

Physique : du classique au quantique

Loïc Villain

Institut Denis Poisson, Université de Tours
loic.villain@univ-tours.fr

Centre Galois, le 14 Juin 2022



Qu'est-ce que la physique ?



Physique et étude du monde

- ▶ **physique** = tentative de description **scientifique** du **monde**
(= l'**Univers**, du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit)
⇒ quête et étude de **modèles objectifs**
(**théorie** \simeq **cartographie**; **expérimentation** \simeq **exploration**)
- ▶ recherche du **simple** et **universel** derrière le **complexe** et **particulier**
⇒ hypothèse **réductionniste**

Physique et étude du monde

- ▶ **physique** = tentative de description **scientifique** du **monde**
(= l'**Univers**, du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit)
⇒ quête et étude de **modèles objectifs**
(**théorie** \simeq **cartographie**; **expérimentation** \simeq **exploration**)
- ▶ recherche du **simple** et **universel** derrière le **complexe** et **particulier**
⇒ hypothèse **réductionniste**

Physique et étude du monde

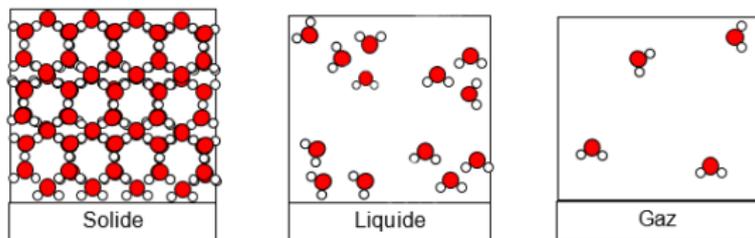
- ▶ **physique** = tentative de description **scientifique** du **monde**
(= l'**Univers**, du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit)
⇒ quête et étude de **modèles objectifs**
(**théorie** \simeq **cartographie** ; **expérimentation** \simeq **exploration**)
- ▶ recherche du **simple** et **universel** derrière le **complexe** et **particulier**
⇒ hypothèse **réductionniste**

Physique et étude du monde

- ▶ **physique** = tentative de description **scientifique** du **monde**
(= l'**Univers**, du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit)
⇒ quête et étude de **modèles objectifs**
(**théorie** \simeq **cartographie** ; **expérimentation** \simeq **exploration**)
- ▶ recherche du **simple** et **universel** derrière le **complexe** et **particulier**
⇒ hypothèse **réductionniste**

Physique et étude du monde

- ▶ **physique** = tentative de description **scientifique** du **monde**
(= l'**Univers**, du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit)
⇒ quête et étude de **modèles objectifs**
(**théorie** \simeq **cartographie** ; **expérimentation** \simeq **exploration**)
- ▶ recherche du **simple** et **universel** derrière le **complexe** et **particulier**
⇒ hypothèse **réductionniste** (**exemple** : existence des **atomes**)



les états de la matière expliqués par l'hypothèse atomique

Physique et modélisation cohérente du monde

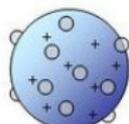
Qu'est-ce qu'un « **atome** » ?



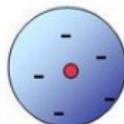
Democritus
(~400-300
B.C.)



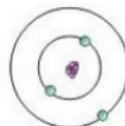
John Dalton
(1803)



J.J. Thomson
(1897)



Rutherford
(1909)



Niels Bohr
(1913)



Schrödinger
(1926-present)

*exemples de modèles successifs de la **structure d'un atome***

Physique et modélisation cohérente du monde

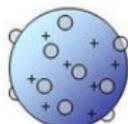
Qu'est-ce qu'un « **atome** » ? Quel type de modèle est « **physique** » ?



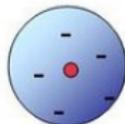
Democritus
(~400-300
B.C.)



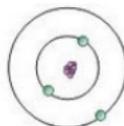
John Dalton
(1803)



J.J. Thomson
(1897)



Rutherford
(1909)



Niels Bohr
(1913)



Schrödinger
(1926-present)

*exemples de modèles successifs de la **structure d'un atome***

Langage de la physique



« *le livre de la nature est écrit en langage mathématique* »
(Galilée, *L'essayeur*, 1623)

Langage de la physique



« *le livre de la nature est écrit en langage mathématique* »
(Galilée, *L'essayeur*, 1623)

⇒ **objets mathématiques** : **nombres**, **objets géométriques**, etc.

Physique et lois de la Nature

- ▶ **physique (théorique)** = recherche et analyse de **modèles mathématiques**
⇒ lois mathématiques **objectives** (équations entre objets mathématiques)
- exemple :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (\text{équations d'Einstein})$$

- ▶ on peut tricher avec les lois humaines, mais pas avec les **lois naturelles** :
 - **Feynman** (*expertise après explosion de la navette Challenger*, 1986) :
« *For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for Nature cannot be fooled* »

Physique et lois de la Nature

- ▶ **physique (théorique)** = recherche et analyse de **modèles mathématiques**
⇒ lois mathématiques **objectives** (équations entre objets mathématiques)
- exemple :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (\text{équations d'Einstein})$$

- ▶ on peut tricher avec les lois humaines, mais pas avec les **lois naturelles** :
 - **Feynman** (*expertise après explosion de la navette Challenger, 1986*) :
« *For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for Nature cannot be fooled* »

Physique et lois de la Nature

- ▶ **physique (théorique)** = recherche et analyse de **modèles mathématiques**
⇒ lois mathématiques **objectives** (équations entre objets mathématiques)
- exemple :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (\text{équations d'Einstein})$$

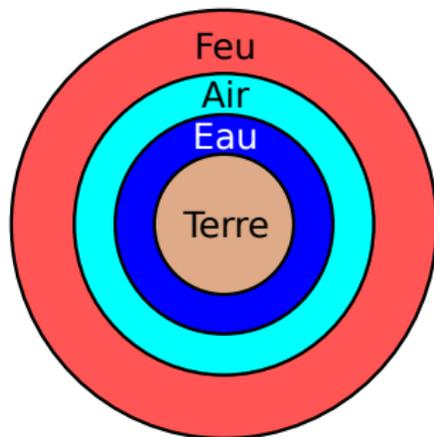
- ▶ on peut tricher avec les lois humaines, mais pas avec les **lois naturelles** :
 - **Feynman** (expertise après explosion de la navette Challenger, 1986) :
« *For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for Nature cannot be fooled* »



Modélisations : chute libre et orbite lunaire antiques

Selon **Aristote** (vers -350)

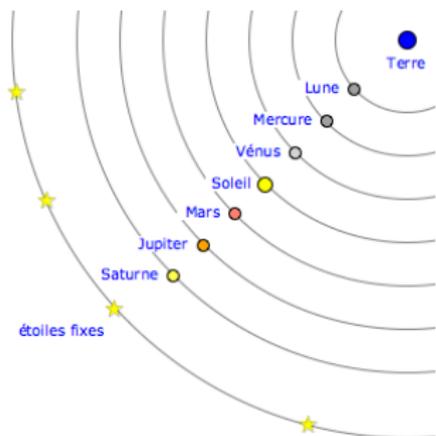
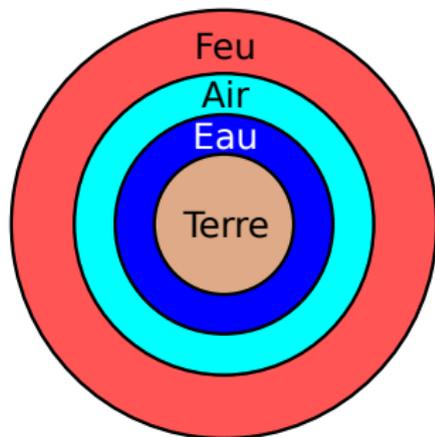
- **chute vers le sol** : retour des corps **lourds** vers leur **lieu naturel**
- **orbite des astres** : **cercle** = figure de la perfection céleste



Modélisations : chute libre et orbite lunaire antiques

Selon **Aristote** (vers -350)

- **chute vers le sol** : retour des corps **lourds** vers leur **lieu naturel**
- **orbite des astres** : **cercle** = figure de la perfection céleste

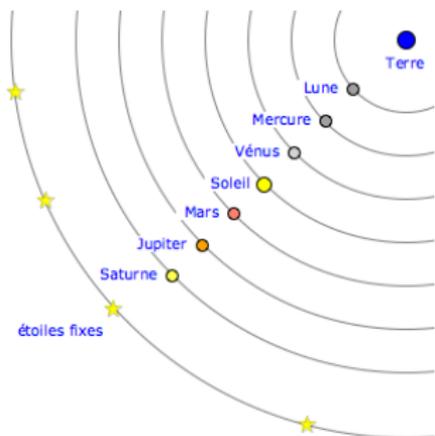
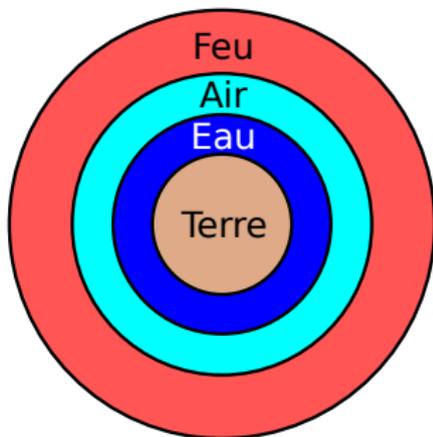


Modélisations : chute libre et orbite lunaire antiques

Selon **Aristote** (vers -350)

- **chute vers le sol** : retour des corps **lourds** vers leur **lieu naturel**
- **orbite des astres** : **cercle** = figure de la perfection céleste

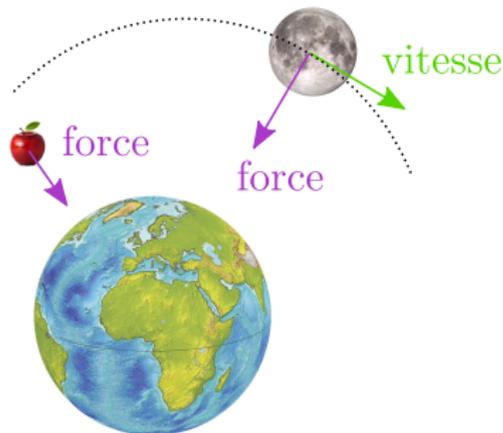
⇒ principal **objet mathématique** = **cercle**



Modélisations : chute libre et orbite lunaire classiques

Selon **Newton** (1687)

- **chute vers le sol** : **force** exercée par la Terre **sans** vitesse initiale
- **orbite des astres** : **force** gravitationnelle **avec** vitesse initiale

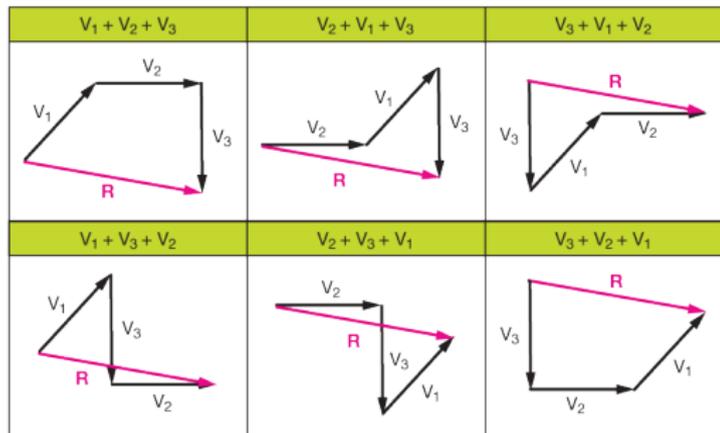
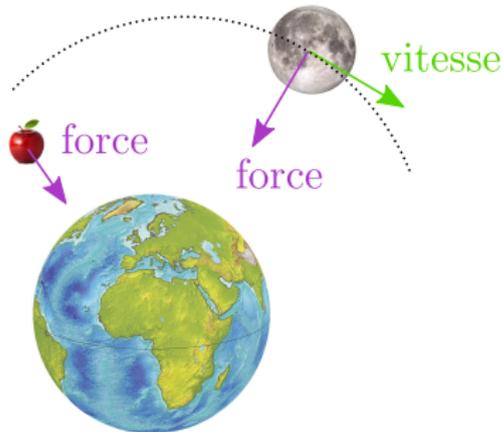


Modélisations : chute libre et orbite lunaire classiques

Selon **Newton** (1687)

- **chute vers le sol** : **force** exercée par la Terre **sans** vitesse initiale
- **orbite des astres** : **force** gravitationnelle **avec** vitesse initiale

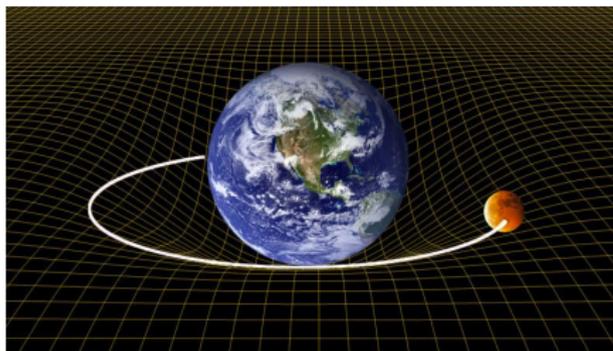
⇒ principal **objet mathématique** = **vecteur** (\simeq flèche)



Modélisations : chute libre et orbite lunaire relativiste

Selon **Einstein** (1915)

- **chute vers le sol** : mouvement « tout droit » dans l'**espace-temps courbé** par la Terre **sans** vitesse initiale
- **orbite des astres** : mouvement « tout droit » dans l'**espace-temps courbé** **avec** vitesse initiale

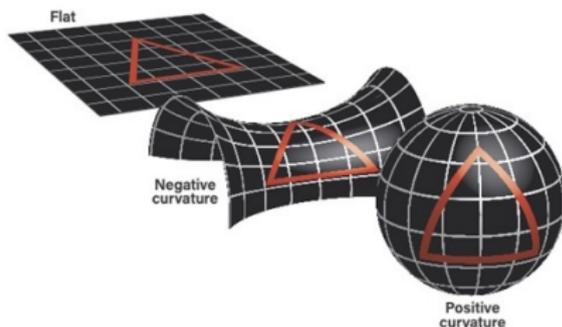
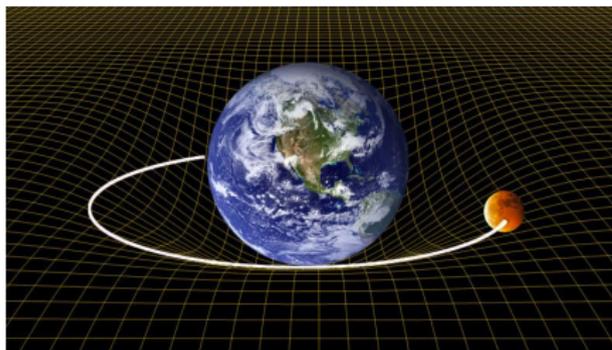


Modélisations : chute libre et orbite lunaire relativiste

Selon **Einstein** (1915)

- **chute vers le sol** : mouvement « tout droit » dans l'**espace-temps courbé** par la Terre **sans** vitesse initiale
- **orbite des astres** : mouvement « tout droit » dans l'**espace-temps courbé** **avec** vitesse initiale

⇒ principal **objet mathématique** = **espace-temps courbe**



Physique et modélisation mathématique

- ▶ **modèles** inévitablement **imparfaits** (\simeq carte toujours différente du territoire)
 - ⇒ physique \simeq quête (sans fin ?) de « **meilleurs modèles** »
 - ⇒ critère(s) de **sélection** ?
- ▶ **méthode scientifique** : modèles admissibles nécessairement **falsifiables** par confrontation de leurs **prédictions théoriques** avec des **observations**
 - ⇒ **mesures expérimentales**

Physique et modélisation mathématique

- ▶ **modèles** inévitablement **imparfaits** (\simeq carte toujours différente du territoire)
 - ⇒ physique \simeq quête (sans fin ?) de « **meilleurs modèles** »
 - ⇒ critère(s) de **sélection** ?
- ▶ **méthode scientifique** : modèles admissibles nécessairement **falsifiables** par confrontation de leurs **prédictions théoriques** avec des **observations**
 - ⇒ **mesures expérimentales**

Physique et modélisation mathématique

- ▶ **modèles** inévitablement **imparfaits** (\simeq carte toujours différente du territoire)
 - ⇒ physique \simeq quête (sans fin ?) de « **meilleurs modèles** »
 - ⇒ critère(s) de **sélection** ?
- ▶ **méthode scientifique** : modèles admissibles nécessairement **falsifiables** par confrontation de leurs **prédictions théoriques** avec des **observations**
 - ⇒ **mesures expérimentales**

Physique et modélisation mathématique

- ▶ **modèles** inévitablement **imparfaits** (\simeq carte toujours différente du territoire)
 - ⇒ physique \simeq quête (sans fin ?) de « **meilleurs modèles** »
 - ⇒ critère(s) de **sélection** ?
- ▶ **méthode scientifique** : **modèles admissibles** nécessairement **falsifiables** par confrontation de leurs **prédictions théoriques** avec des **observations**
 - ⇒ **mesures expérimentales**

Physique et modélisation mathématique

- ▶ **modèles** inévitablement **imparfaits** (\simeq carte toujours différente du territoire)
 - ⇒ physique \simeq quête (sans fin ?) de « **meilleurs modèles** »
 - ⇒ critère(s) de **sélection** ?
- ▶ **méthode scientifique** : **modèles admissibles** nécessairement **falsifiables** par confrontation de leurs **prédictions théoriques** avec des **observations**
 - ⇒ **mesures expérimentales**



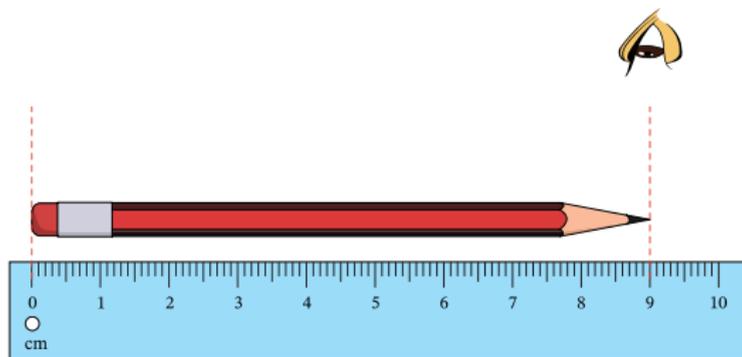
L'expérience Virgo : mesure de distances inférieures à la taille d'un proton

Mesure et étalon standard

- ▶ **mesurer** = **comparer** deux **systèmes physiques** dont un **étalon standard**
exemple : dire qu'un objet mesure **9 centimètres** signifie qu'il est 9 fois plus long qu'un objet d'un centimètre pris comme **référence**

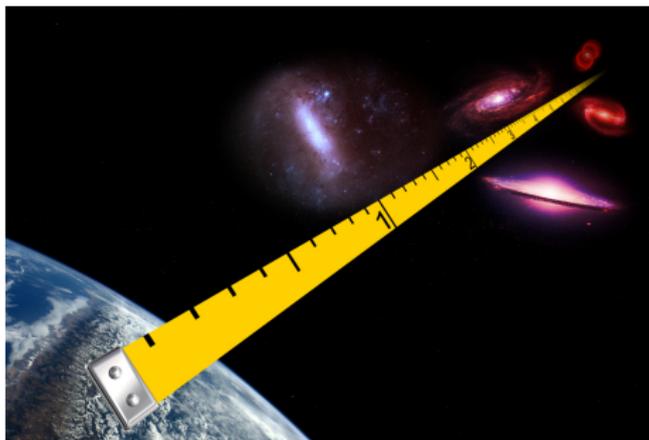
Mesure et étalon standard

- ▶ **mesurer** = **comparer** deux **systèmes physiques** dont un **étalon standard**
exemple : dire qu'un objet mesure **9 centimètres** signifie qu'il est 9 fois plus long qu'un objet d'un centimètre pris comme **référence**



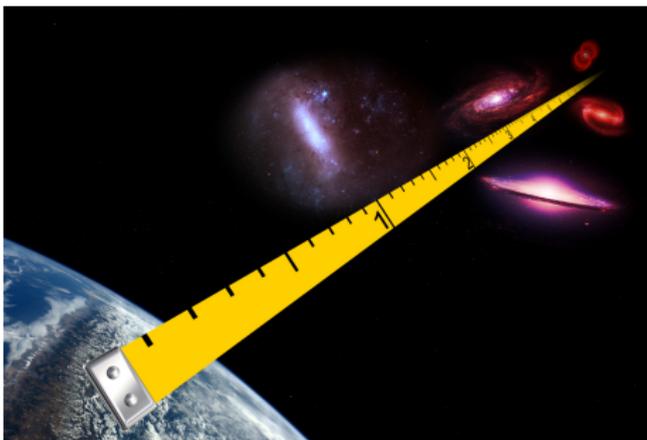
Étalons et contexte

- ▶ besoin d'**étalons distincts** dans divers contextes
exemple : **double-décimètre** inadapté pour mesurer la **distance Terre-Lune** ou la **taille d'un atome**
- ▶ besoin d'**étalonner** les étalons les uns par rapport aux autres
⇒ suite d'étalons adaptés aux **différentes échelles**



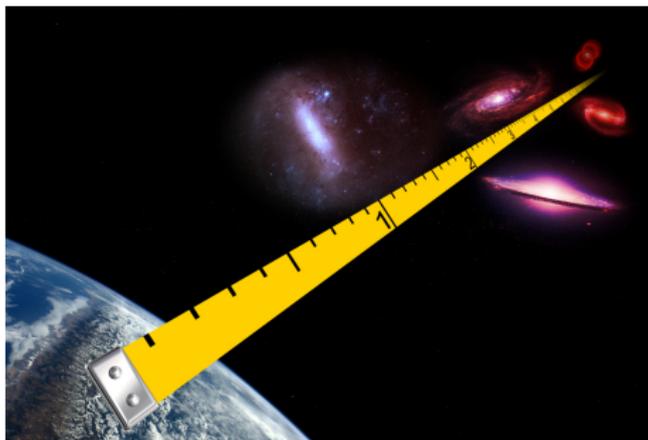
Étalons et contexte

- ▶ besoin d'**étalons distincts** dans divers contextes
exemple : **double-décimètre** inadapté pour mesurer la **distance Terre-Lune** ou la **taille d'un atome**
- ▶ besoin d'**étalonner** les étalons les uns par rapport aux autres
⇒ suite d'étalons adaptés aux **différentes échelles**



Étalons et contexte

- ▶ besoin d'**étalons distincts** dans divers contextes
exemple : **double-décimètre** inadapté pour mesurer la **distance Terre-Lune** ou la **taille d'un atome**
- ▶ besoin d'**étalonner** les étalons les uns par rapport aux autres
⇒ suite d'étalons adaptés aux **différentes échelles**



Étalons et systèmes physiques

- ▶ **pas d'étalon matériel parfait** : aucun **objet macroscopique** n'a des propriétés **rigoureusement constantes**

exemple : dilatation thermique

- ▶ tout étalon est un **système physique** dont les propriétés doivent être étudiées
⇒ aucune « *connaissance a priori* » possible
- ▶ toute mesure implique aussi un **observateur** : influence sur le résultat ?
⇒ question plus subtile qu'il n'y paraît...

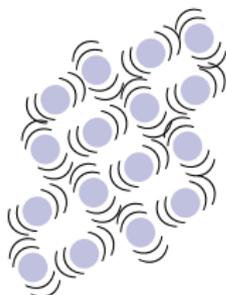
Étalons et systèmes physiques

- ▶ **pas d'étalon matériel parfait** : aucun **objet macroscopique** n'a des propriétés **rigoureusement constantes**

exemple : dilatation thermique



Atomes dans un solide froid



Atomes dans un solide chaud



- ▶ tout étalon est un **système physique** dont les propriétés doivent être étudiées
⇒ aucune « **connaissance a priori** » possible
- ▶ toute mesure implique aussi un **observateur** : influence sur le résultat ?
⇒ question plus subtile qu'il n'y paraît...

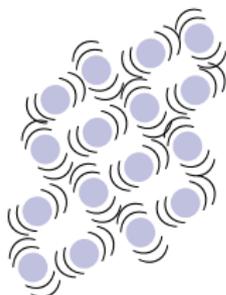
Étalons et systèmes physiques

- ▶ **pas d'étalon matériel parfait** : aucun **objet macroscopique** n'a des propriétés **rigoureusement constantes**

exemple : dilatation thermique



Atomes dans un solide froid



Atomes dans un solide chaud



- ▶ tout étalon est un **système physique** dont les propriétés doivent être étudiées
 - ⇒ aucune « *connaissance a priori* » possible
- ▶ toute mesure implique aussi un **observateur** : influence sur le résultat ?
 - ⇒ question plus subtile qu'il n'y paraît...

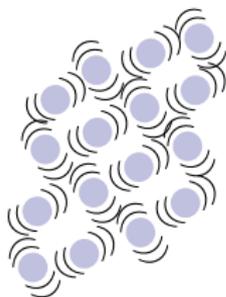
Étalons et systèmes physiques

- ▶ **pas d'étalon matériel parfait** : aucun **objet macroscopique** n'a des propriétés **rigoureusement constantes**

exemple : dilatation thermique



Atomes dans un solide froid



Atomes dans un solide chaud



- ▶ tout étalon est un **système physique** dont les propriétés doivent être étudiées
⇒ aucune « **connaissance a priori** » possible
- ▶ toute mesure implique aussi un **observateur** : influence sur le résultat ?
⇒ question plus subtile qu'il n'y paraît...

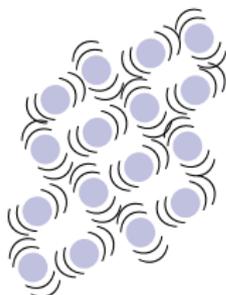
Étalons et systèmes physiques

- ▶ **pas d'étalon matériel parfait** : aucun **objet macroscopique** n'a des propriétés **rigoureusement constantes**

exemple : dilatation thermique



Atomes dans un solide froid



Atomes dans un solide chaud



- ▶ tout étalon est un **système physique** dont les propriétés doivent être étudiées
⇒ aucune « **connaissance a priori** » possible
- ▶ toute mesure implique aussi un **observateur** : influence sur le résultat ?
⇒ question plus subtile qu'il n'y paraît...

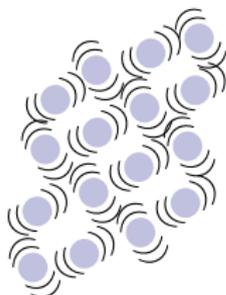
Étalons et systèmes physiques

- ▶ **pas d'étalon matériel parfait** : aucun **objet macroscopique** n'a des propriétés **rigoureusement constantes**

exemple : dilatation thermique



Atomes dans un solide froid



Atomes dans un solide chaud



- ▶ tout étalon est un **système physique** dont les propriétés doivent être étudiées
⇒ aucune « **connaissance a priori** » possible
- ▶ toute mesure implique aussi un **observateur** : influence sur le résultat ?
⇒ question plus subtile qu'il n'y paraît...

De la physique classique à la physique quantique

- ▶ fin du xix^e siècle : **physique classique** (née au xvii^e siècle avec Newton) engrange les **succès** par son **universalité** : explication de **phénomènes terrestres comme célestes** (**exemples** : forme de la Terre, propriétés des matériaux, marées océaniques, orbites des planètes, etc.)
- ▶ **modélisation du monde** reposant sur certaines « **évidences** » en bon accord avec notre **perception immédiate du monde**
- ▶ début du xx^e siècle : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat :
 - la **relativité einsteinienne** et la **physique quantique**
 - ⇒ vers une **abstraction supérieure**, **moins d'évidence** et une **importance encore accrue des mathématiques**... mais aussi : une **meilleure compréhension du monde**, de nombreuses **retombées technologiques**, et diverses questions **encore ouvertes sur la « nature de la réalité »** et ce que nous pouvons en apprendre...

De la physique classique à la physique quantique

- ▶ fin du xix^e siècle : **physique classique** (née au xvii^e siècle avec Newton) engrange les **succès** par son **universalité** : explication de **phénomènes terrestres comme célestes** (**exemples** : forme de la Terre, propriétés des matériaux, marées océaniques, orbites des planètes, etc.)
- ▶ **modélisation du monde** reposant sur certaines « **évidences** » en bon accord avec notre **perception immédiate du monde**
- ▶ début du xx^e siècle : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat :
 - la **relativité einsteinienne** et la **physique quantique**
 - ⇒ vers une **abstraction supérieure**, **moins d'évidence** et une **importance encore accrue des mathématiques**... mais aussi : une **meilleure compréhension du monde**, de nombreuses **retombées technologiques**, et diverses questions **encore ouvertes sur la « nature de la réalité »** et ce que nous pouvons en apprendre...

De la physique classique à la physique quantique

- ▶ fin du xix^e siècle : **physique classique** (née au xvii^e siècle avec Newton) engrange les **succès** par son **universalité** : explication de **phénomènes terrestres comme célestes** (**exemples** : forme de la Terre, propriétés des matériaux, marées océaniques, orbites des planètes, etc.)
- ▶ **modélisation du monde** reposant sur certaines « **évidences** » en bon accord avec notre **perception immédiate du monde**
- ▶ début du xx^e siècle : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat :
la **relativité einsteinienne** et la **physique quantique**

⇒ vers une **abstraction supérieure**, moins d'**évidence** et une **importance encore accrue des mathématiques**... mais aussi : une **meilleure compréhension du monde**, de nombreuses **retombées technologiques**, et diverses questions encore **ouvertes sur la « nature de la réalité »** et ce que nous pouvons en apprendre...

De la physique classique à la physique quantique

- ▶ fin du xix^e siècle : **physique classique** (née au xvii^e siècle avec Newton) engrange les **succès** par son **universalité** : explication de **phénomènes terrestres comme célestes** (**exemples** : forme de la Terre, propriétés des matériaux, marées océaniques, orbites des planètes, etc.)
- ▶ **modélisation du monde** reposant sur certaines « **évidences** » en bon accord avec notre **perception immédiate du monde**
- ▶ début du xx^e siècle : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat :
la **relativité einsteinienne** et la **physique quantique**
⇒ vers une **abstraction supérieure**, **moins d'évidence** et une **importance encore accrue des mathématiques**... mais aussi : une **meilleure compréhension** du monde, de nombreuses **retombées technologiques**, et diverses **questions encore ouvertes** sur la « **nature de la réalité** » et ce que nous pouvons en apprendre...

De la physique classique à la physique quantique

- ▶ fin du xix^e siècle : **physique classique** (née au xvii^e siècle avec Newton) engrange les **succès** par son **universalité** : explication de **phénomènes terrestres comme célestes** (**exemples** : forme de la Terre, propriétés des matériaux, marées océaniques, orbites des planètes, etc.)
- ▶ **modélisation du monde** reposant sur certaines « **évidences** » en bon accord avec notre **perception immédiate du monde**
- ▶ début du xx^e siècle : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat :
la **relativité einsteinienne** et la **physique quantique**
⇒ vers une **abstraction supérieure**, **moins d'évidence** et une **importance encore accrue des mathématiques**... mais aussi : une **meilleure compréhension du monde**, de nombreuses **retombées technologiques**, et **diverses questions encore ouvertes** sur la « **nature de la réalité** » et ce que nous pouvons en apprendre...

De la physique classique à la physique quantique

- ▶ fin du xix^e siècle : **physique classique** (née au xvii^e siècle avec Newton) engrange les **succès** par son **universalité** : explication de **phénomènes terrestres comme célestes** (**exemples** : forme de la Terre, propriétés des matériaux, marées océaniques, orbites des planètes, etc.)
- ▶ **modélisation du monde** reposant sur certaines « **évidences** » en bon accord avec notre **perception immédiate du monde**
- ▶ début du xx^e siècle : **deux révolutions** remettent tout, ou presque, à plat :
la **relativité einsteinienne** et la **physique quantique**
⇒ vers une **abstraction supérieure**, **moins d'évidence** et une **importance encore accrue des mathématiques**... mais aussi : une **meilleure compréhension** du monde, de nombreuses **retombées technologiques**, et diverses **questions encore ouvertes** sur la « **nature de la réalité** » et ce que nous pouvons en apprendre...

Plan

Physique classique : un portrait imaginaire et idéalisé

Comment la lumière vint tout obscurcir : vers la physique quantique

Physique quantique : quelques révolutions épistémologiques et ontologiques

Physique quantique : quelques révolutions expérimentales et technologiques

Épilogue : les révolutions à venir

I

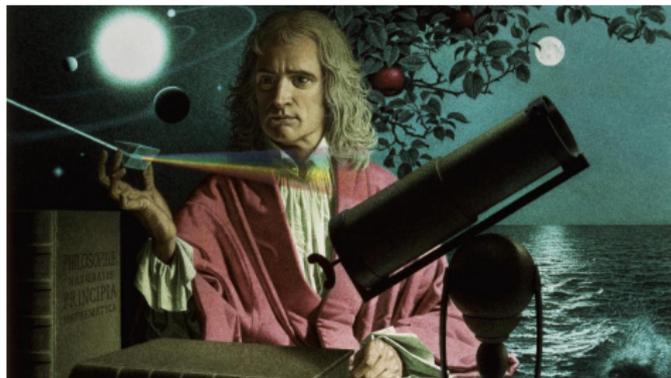
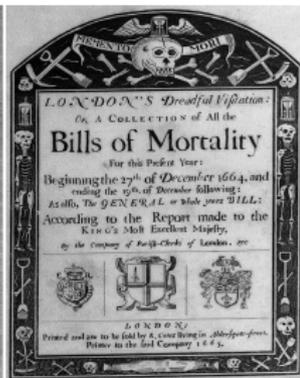
Physique classique : un portrait imaginaire et idéalisé



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

Londres est **confinée**, **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

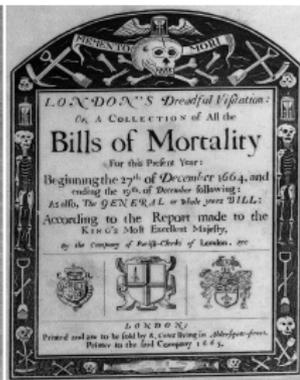
- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

Londres est **confinée**, **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

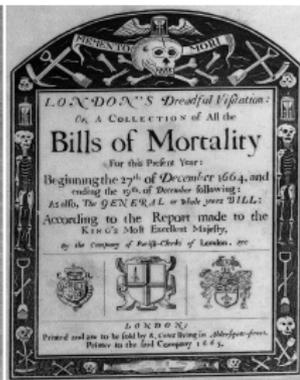
- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

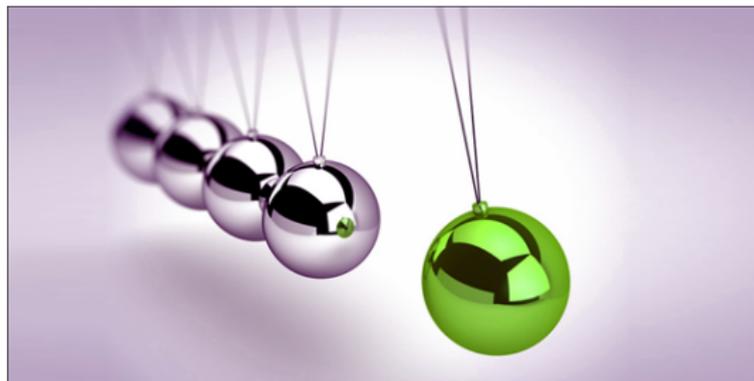
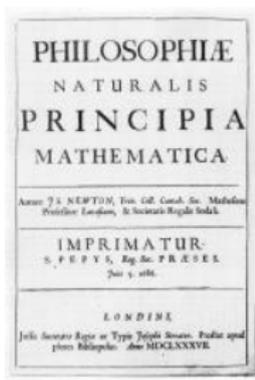
Londres est **confinée**, **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**



Physique classique

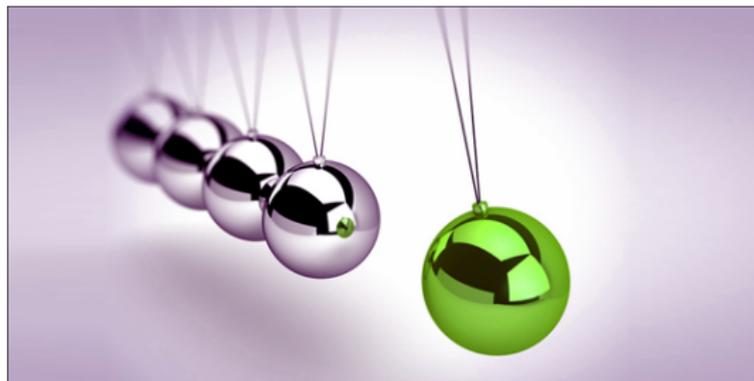
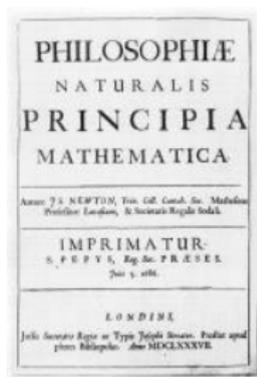
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de Philosophie naturelle*
⇒ naissance de la **physique classique**



- ▶ xvii^e siècle–fin xix^e siècle : nombreux succès (exemple : découverte de Neptune en 1846) et diverses « améliorations techniques »
⇒ **vision quasi-unifiée mécaniste** du Monde
- ▶ **remarque** : s'accompagne assez naturellement d'une interprétation **réaliste**

Physique classique

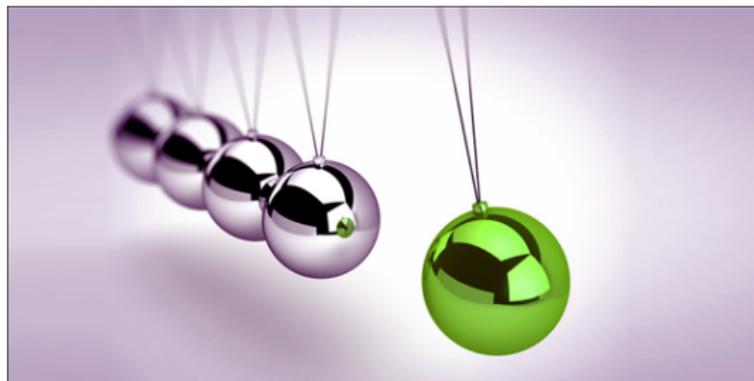
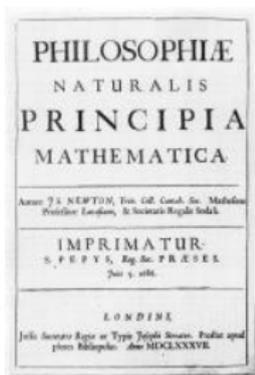
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de Philosophie naturelle*
⇒ naissance de la **physique classique**



- ▶ **xvii^e siècle–fin xix^e siècle** : nombreux succès (**exemple** : découverte de Neptune en **1846**) et diverses « **améliorations techniques** »
⇒ **vision quasi-unifiée mécaniste** du Monde
- ▶ **remarque** : s'accompagne assez naturellement d'une interprétation **réaliste**

Physique classique

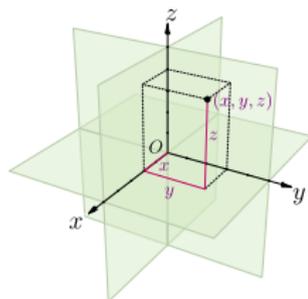
- ▶ **1687, Newton** : *Principes mathématiques de Philosophie naturelle*
⇒ naissance de la **physique classique**



- ▶ **xvii^e siècle–fin xix^e siècle** : nombreux succès (**exemple** : découverte de Neptune en **1846**) et diverses « **améliorations techniques** »
⇒ **vision quasi-unifiée mécaniste** du Monde
- ▶ **remarque** : s'accompagne assez naturellement d'une interprétation **réaliste**

Le monde selon la physique classique

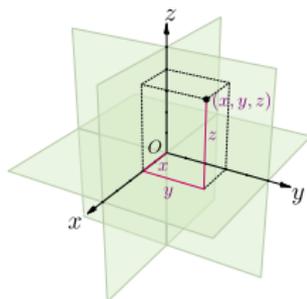
- ▶ l'**Histoire du monde** se produit dans une « boîte universelle immuable », l'espace **euclidien tridimensionnel**
 ⇒ tout événement a lieu à un **endroit donné** (\simeq point dans l'espace)



- ▶ cette Histoire se déroule au cours du **temps**
 ⇒ tout événement a lieu à une **date donnée**
 (\simeq point sur la **Frise Chronologique universelle**)

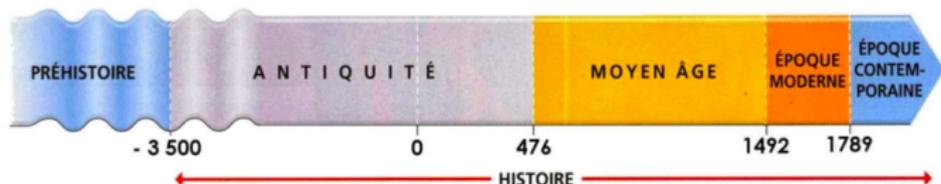
Le monde selon la physique classique

- ▶ l'**Histoire du monde** se produit dans une « boîte universelle immuable », l'**espace euclidien tridimensionnel**
 ⇒ tout événement a lieu à un **endroit donné** (\simeq point dans l'espace)



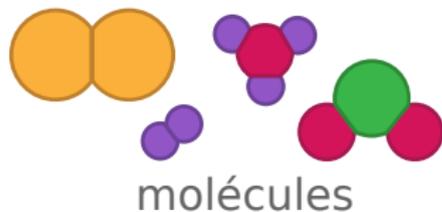
- ▶ cette Histoire se déroule au cours du **temps**
 ⇒ tout événement a lieu à une **date donnée**
 (\simeq point sur la **Frise Chronologique universelle**)

Les grandes périodes de l'Histoire



Les choses selon la physique classique

- ▶ **objets macroscopiques** (« matière ») : constitués de **corpuscules** (\simeq boules de tailles finies)



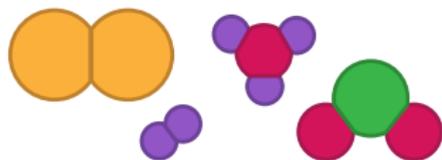
- ▶ corpuscules caractérisés par **diverses propriétés** (exemples : **masse** et **charge électrique**) \simeq **boules avec étiquettes**
- ▶ **état d'un système macroscopique** (volume de gaz, planète, etc.) : à un **instant donné**, **entièrement** décrit par les **positions** et les **vitesse**s des corpuscules qui le constituent

Les choses selon la physique classique

- ▶ **objets macroscopiques** (« matière ») : constitués de **corpuscules** (\simeq boules de tailles finies)



atomes

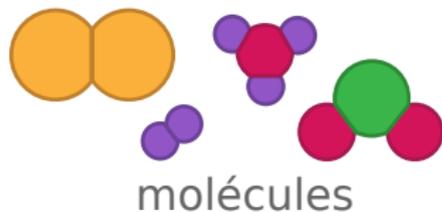


molécules

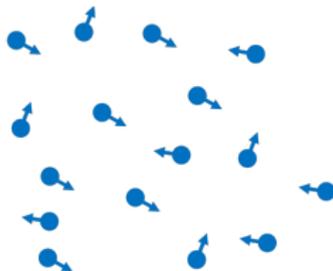
- ▶ corpuscules caractérisés par **diverses propriétés** (exemples : **masse** et **charge électrique**) \simeq **boules avec étiquettes**
- ▶ **état d'un système macroscopique** (volume de gaz, planète, etc.) : à un **instant donné**, **entièrement** décrit par les **positions** et les **vitesse**s des corpuscules qui le constituent

Les choses selon la physique classique

- ▶ **objets macroscopiques** (« matière ») : constitués de **corpuscules** (\simeq boules de tailles finies)

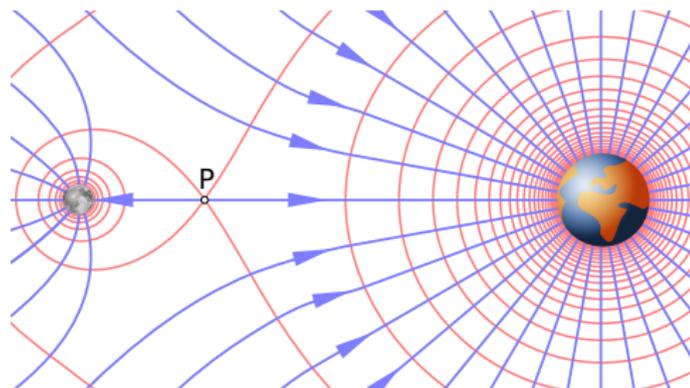
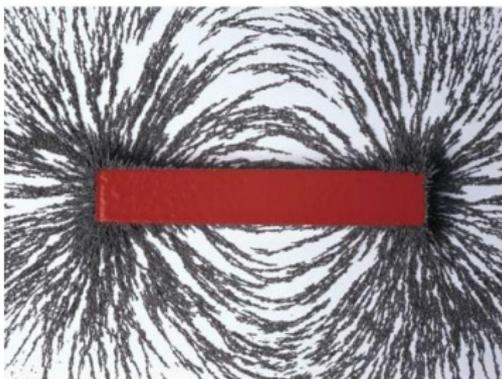


- ▶ corpuscules caractérisés par **diverses propriétés** (exemples : **masse** et **charge électrique**) \simeq **boules avec étiquettes**
- ▶ **état d'un système macroscopique** (volume de gaz, planète, etc.) : à un **instant donné**, **entièrement** décrit par les **positions** et les **vitesse**s des corpuscules qui le constituent



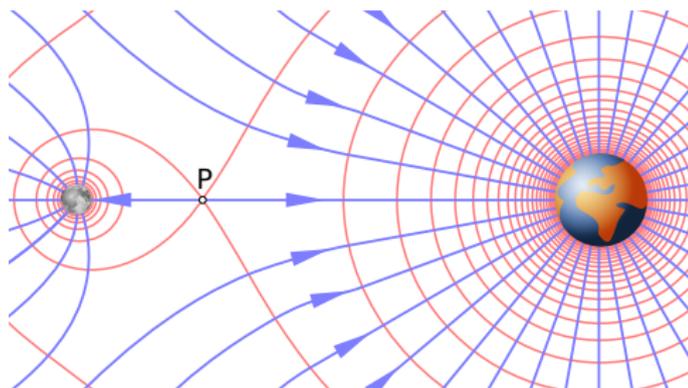
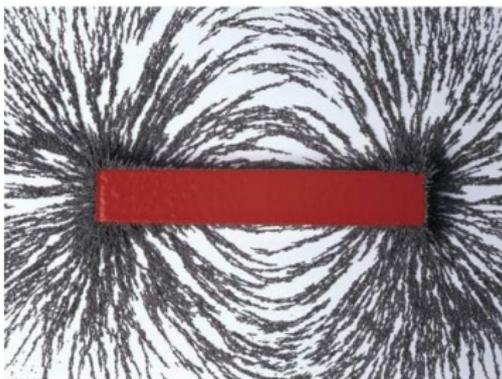
La communication entre choses selon la physique classique

- ▶ **selon leurs propriétés**, corpuscules s'attirent ou se repoussent *via* des **champs d'interaction**, milieux **continus** et **omniprésents**
(exemples : **champs électromagnétique** et gravitationnel)
- ▶ **principe d'une interaction** :
 - présence ou mouvement d'un corpuscule \implies perturbation du champ
 - perturbation du champ \implies action (« force ») sur d'autres corpuscules (eux-mêmes sources de modifications du champ)



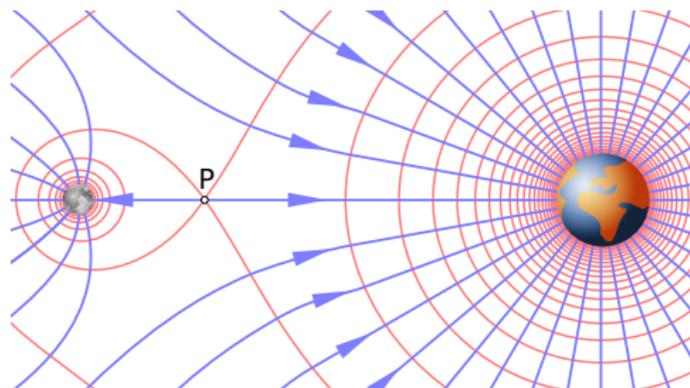
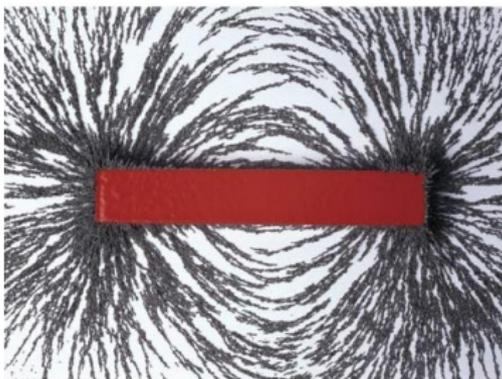
La communication entre choses selon la physique classique

- ▶ **selon leurs propriétés**, corpuscules s'attirent ou se repoussent *via* des **champs d'interaction**, milieux **continus** et **omniprésents**
(**exemples** : **champs électromagnétique** et gravitationnel)
- ▶ **principe d'une interaction** :
 - présence ou mouvement d'un corpuscule \implies perturbation du champ
 - perturbation du champ \implies action (\leftarrow force \rightarrow) sur d'autres corpuscules (eux-mêmes sources de modifications du champ)



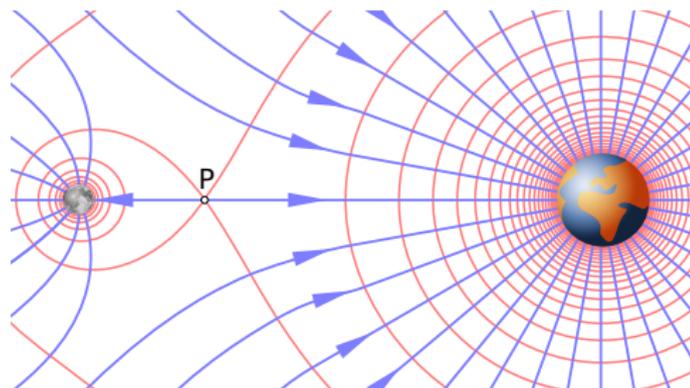
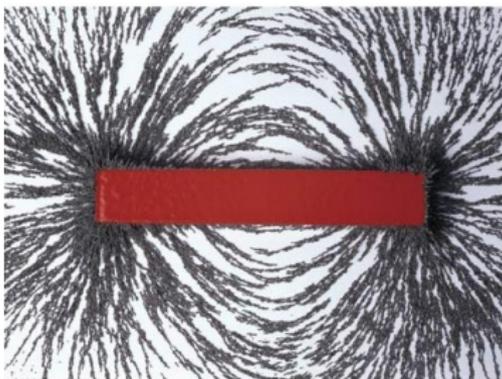
La communication entre choses selon la physique classique

- ▶ **selon leurs propriétés**, corpuscules s'attirent ou se repoussent *via* des **champs d'interaction**, milieux **continus** et **omniprésents**
(**exemples** : **champs électromagnétique** et gravitationnel)
- ▶ **principe d'une interaction** :
 - présence ou mouvement d'un corpuscule \implies perturbation du champ
 - perturbation du champ \implies action (« force ») sur d'autres corpuscules (eux-mêmes **sources** de modifications du champ)



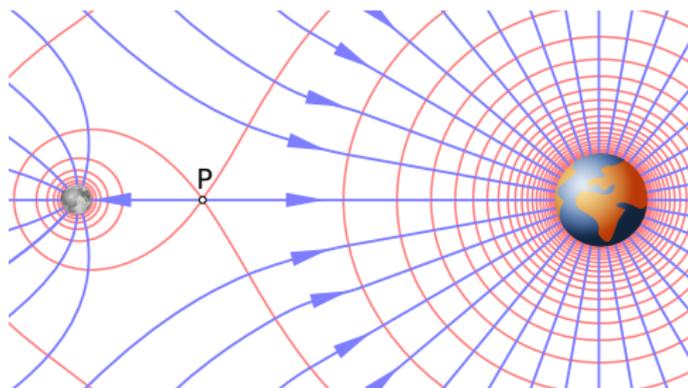
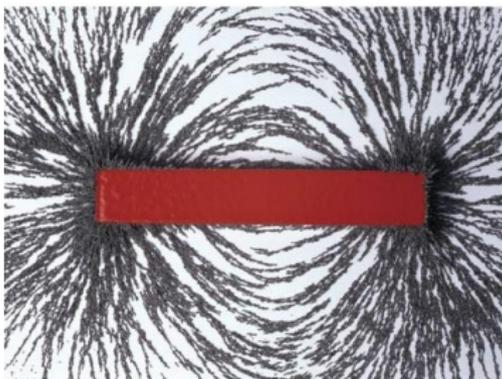
La communication entre choses selon la physique classique

- ▶ **selon leurs propriétés**, corpuscules s'attirent ou se repoussent *via* des **champs d'interaction**, milieux **continus** et **omniprésents**
(**exemples** : **champs électromagnétique** et gravitationnel)
- ▶ **principe d'une interaction** :
 - **présence** ou **mouvement** d'un **corpuscule** \implies **perturbation du champ**
 - **perturbation du champ** \implies **action** (« force ») sur d'autres **corpuscules**
(eux-mêmes **sources** de modifications du champ)



La communication entre choses selon la physique classique

- ▶ **selon leurs propriétés**, corpuscules s'attirent ou se repoussent *via* des **champs d'interaction**, milieux **continus** et **omniprésents**
(**exemples** : **champs électromagnétique** et gravitationnel)
- ▶ **principe d'une interaction** :
 - **présence** ou **mouvement** d'un **corpuscule** \implies **perturbation du champ**
 - **perturbation du champ** \implies **action** (« force ») sur d'autres **corpuscules**
(eux-mêmes **sources** de modifications du champ)



Les phénomènes selon la physique classique

- ▶ **état du monde** : à un **instant donné**, entièrement décrit par les **positions** et **vitesse**s des corpuscules, ainsi que par les « **valeurs** » des champs
 - ⇒ description **duale** : opposition matière **discontinue** et champs **continus**
- ▶ **évolution ultérieure** : **prédictible** à l'aide de lois mathématiques **déterministes** ⇒ principe de causalité
 - ⇒ « *les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets* »
- ▶ **remarque** : seule l'**imprécision** de nos connaissances sur l'état du monde actuelle limite nos prévisions (exemples : chaos, météorologie)
 - ⇒ **connaissance totale a priori possible**

Les phénomènes selon la physique classique

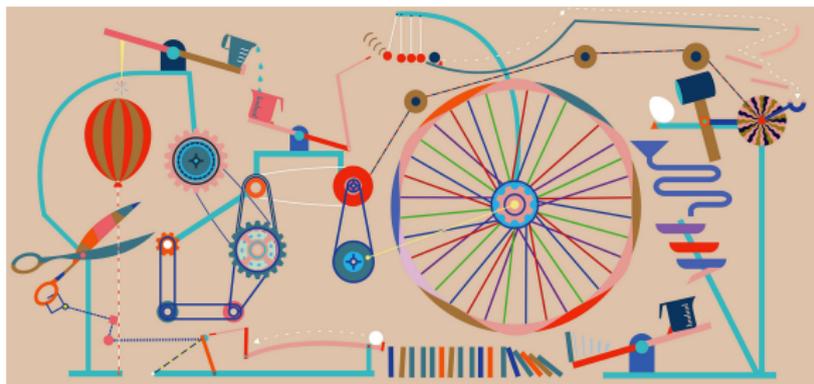
- ▶ **état du monde** : à un **instant donné**, entièrement décrit par les **positions** et **vitesse**s des corpuscules, ainsi que par les « **valeurs** » des champs
⇒ description **duale** : opposition matière **discontinue** et champs **continus**
- ▶ **évolution ultérieure** : **prédictible** à l'aide de lois mathématiques **déterministes** ⇒ principe de causalité
⇒ « *les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets* »
- ▶ **remarque** : seule l'**imprécision** de nos connaissances sur l'état du monde actuelle limite nos prévisions (exemples : chaos, météorologie)
⇒ **connaissance totale a priori possible**

Les phénomènes selon la physique classique

- ▶ **état du monde** : à un **instant donné**, entièrement décrit par les **positions** et **vitesse**s des corpuscules, ainsi que par les « **valeurs** » des champs
⇒ description **duale** : opposition matière **discontinue** et champs **continus**
- ▶ **évolution ultérieure** : **prédictible** à l'aide de lois mathématiques **déterministes** ⇒ principe de causalité
⇒ « *les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets* »
- ▶ **remarque** : seule l'**imprécision** de nos connaissances sur l'état du monde actuelle limite nos prévisions (exemples : chaos, météorologie)
⇒ **connaissance totale a priori possible**

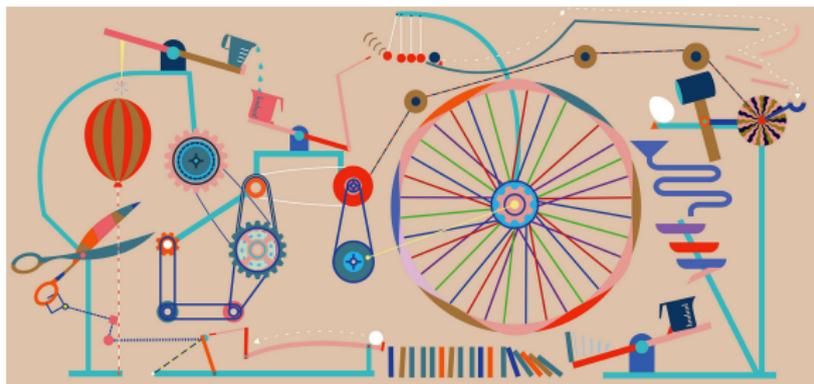
Les phénomènes selon la physique classique

- ▶ **état du monde** : à un **instant donné**, entièrement décrit par les **positions** et **vitesse**s des corpuscules, ainsi que par les « **valeurs** » des champs
⇒ description **duale** : opposition matière **discontinue** et champs **continus**
- ▶ **évolution ultérieure** : **prédictible** à l'aide de lois mathématiques **déterministes** ⇒ principe de causalité
⇒ « *les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets* »
- ▶ **remarque** : seule l'**imprécision** de nos connaissances sur l'état du monde actuelle limite nos prévisions (exemples : chaos, météorologie)
⇒ **connaissance totale a priori possible**



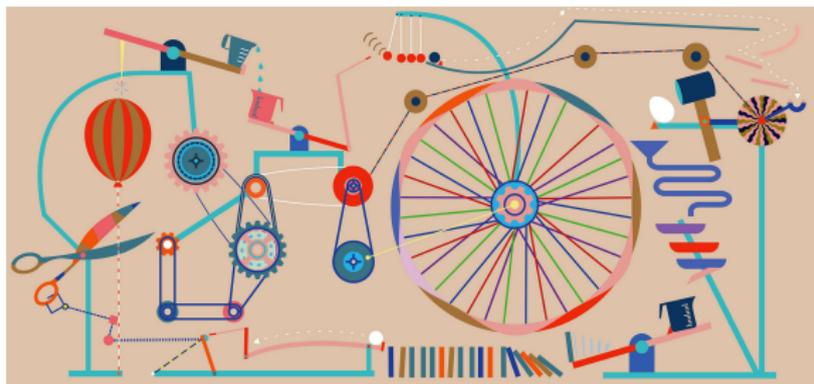
Les phénomènes selon la physique classique

- ▶ **état du monde** : à un **instant donné**, entièrement décrit par les **positions** et **vitesse**s des corpuscules, ainsi que par les « **valeurs** » des champs
⇒ description **duale** : opposition matière **discontinue** et champs **continus**
- ▶ **évolution ultérieure** : **prédictible** à l'aide de lois mathématiques **déterministes** ⇒ principe de causalité
⇒ « *les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets* »
- ▶ **remarque** : seule l'**imprécision** de nos connaissances sur l'état du monde actuelle limite nos prévisions (**exemples** : chaos, météorologie)
⇒ **connaissance totale a priori possible**



Les phénomènes selon la physique classique

- ▶ **état du monde** : à un **instant donné**, entièrement décrit par les **positions** et **vitesse**s des corpuscules, ainsi que par les « **valeurs** » des champs
⇒ description **duale** : opposition matière **discontinue** et champs **continus**
- ▶ **évolution ultérieure** : **prédictible** à l'aide de lois mathématiques **déterministes** ⇒ principe de causalité
⇒ « *les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets* »
- ▶ **remarque** : seule l'**imprécision** de nos connaissances sur l'état du monde actuelle limite nos prévisions (**exemples** : chaos, météorologie)
⇒ **connaissance totale a priori possible**



Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
 - ⇒ imparfait (n'explique pas toutes les observations)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description unifiée de l'électricité et du magnétisme
 - ⇒ notion de **champ électromagnétique**
 - ⇒ **structure de la matière** : corpuscules en interaction électromagnétique [exemple : modèle atomique de **Rutherford**, électrons et **noyau atomique**]
 - ⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
 - ⇒ existence d'**ondes électromagnétiques (vibrations du champ)** :
lumière = cas particulier

Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
 - ⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'électricité et du magnétisme
 - ⇒ notion de **champ électromagnétique**
 - ⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique**
[exemple : modèle atomique de **Rutherford**, électrons et **noyau atomique**]
 - ⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
 - ⇒ existence d'**ondes électromagnétiques** (**vibrations du champ**) :
lumière = cas particulier

Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'électricité et du magnétisme
⇒ notion de **champ électromagnétique**
⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique**
[exemple : modèle atomique de **Rutherford**, électrons et **noyau atomique**]
⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
⇒ existence d'**ondes électromagnétiques** (**vibrations du champ**) :
lumière = cas particulier

Et la lumière dans tout ça ?

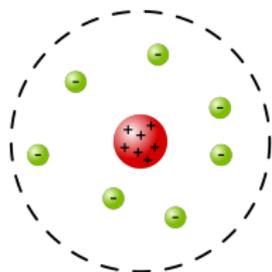
- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'**électricité** et du **magnétisme**
⇒ notion de **champ électromagnétique**
⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique**
[exemple : modèle atomique de **Rutherford**, électrons et **noyau atomique**]
⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
⇒ existence d'**ondes électromagnétiques** (**vibrations du champ**) :
lumière = cas particulier

Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'**électricité** et du **magnétisme**
⇒ notion de **champ électromagnétique**
⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique**
[exemple : modèle atomique de **Rutherford**, électrons et **noyau atomique**]
⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
⇒ existence d'**ondes électromagnétiques** (**vibrations du champ**) :
lumière = cas particulier

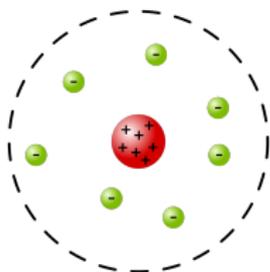
Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
 - ⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'**électricité** et du **magnétisme**
 - ⇒ notion de **champ électromagnétique**
 - ⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique** [exemple : modèle atomique de **Rutherford**, **électrons** et **noyau atomique**]
 - ⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
 - ⇒ existence d'**ondes électromagnétiques** (**vibrations du champ**) :
lumière = cas particulier



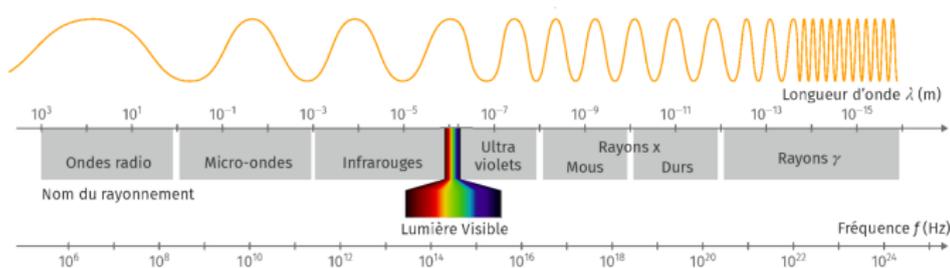
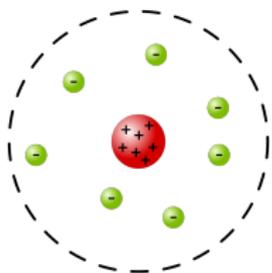
Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
 - ⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'**électricité** et du **magnétisme**
 - ⇒ notion de **champ électromagnétique**
 - ⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique** [exemple : modèle atomique de **Rutherford**, **électrons** et **noyau atomique**]
 - ⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
 - ⇒ existence d'**ondes électromagnétiques** (**vibrations du champ**) :
lumière = cas particulier



Et la lumière dans tout ça ?

- ▶ **1704, Newton** : modèle **corpusculaire**
 ⇒ imparfait (n'explique pas toutes les **observations**)
- ▶ **1801, Young** : « expérience des fentes » ⇒ **nature ondulatoire**
- ▶ **1864, Maxwell** : description **unifiée** de l'**électricité** et du **magnétisme**
 ⇒ notion de **champ électromagnétique**
 ⇒ **structure de la matière** : corpuscules en **interaction électromagnétique**
 [exemple : modèle atomique de **Rutherford**, **électrons** et **noyau atomique**]
 ⇒ explication des processus **chimiques**, des **changements d'état**, etc.
 ⇒ existence d'**ondes électromagnétiques (vibrations du champ)** :
lumière = cas particulier



Fentes de Young (1801) et interférences

- ▶ **interférences**

\simeq « *lumière + lumière = parfois obscurité* »

- ▶ **exemple** : **onde dirigée vers la gauche** et **onde dirigée vers la droite** se **superposent** en une **onde totale** dans laquelle elles « s'ajoutent » ou « se soustraient »

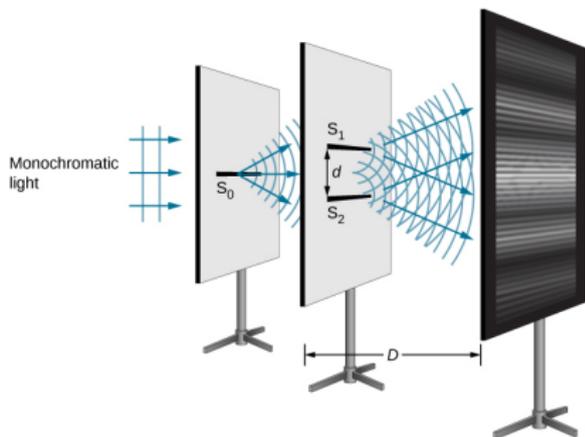
Fentes de Young (1801) et interférences

- ▶ **interférences**

\simeq « *lumière + lumière = parfois obscurité* »

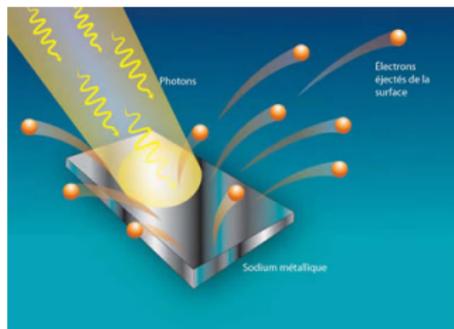
- ▶ **exemple** : **onde dirigée vers la gauche** et **onde dirigée vers la droite** se **superposent** en une **onde totale** dans laquelle elles « s'ajoutent » ou « se soustraient »

- ▶ **expérience de Young** : observation d'une **alternance de franges lumineuses** et **obscures** sur un écran où **deux ondes se superposent**
- ▶ explication impossible à l'aide de **corpuscules**



II

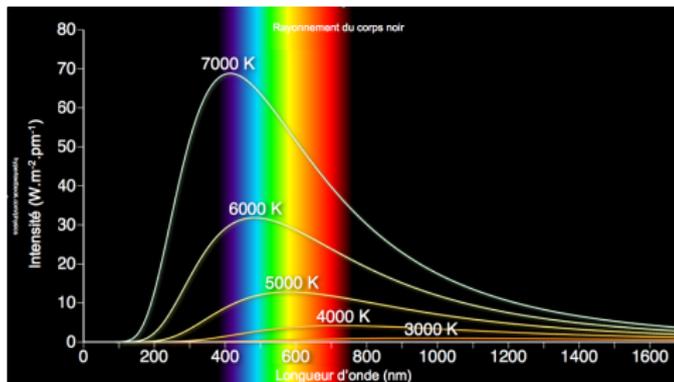
Comment la lumière vint tout obscurcir : vers la physique quantique



Lumière et matière : une étrange histoire

Phénomènes inexplicables **quantitativement** pour la physique classique :

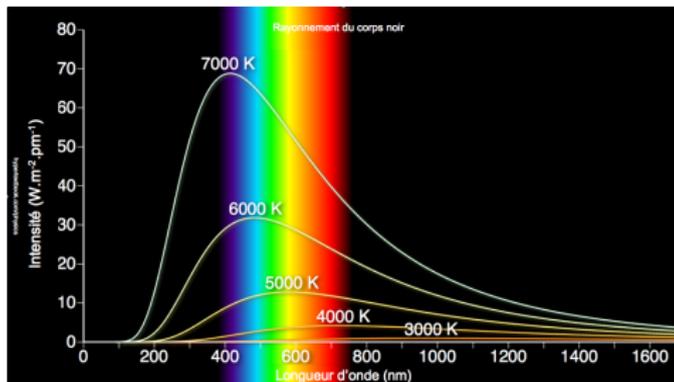
- ▶ rayonnement émis par les **corps chauds** (**spectre du corps noir**)
 - ⇒ **Planck (1900)**, Nobel 1918
- ▶ courant électrique provoqué par la lumière (**effet photo-électrique**)
 - ⇒ **Einstein (1905)**, Nobel 1921



Lumière et matière : une étrange histoire

Phénomènes inexplicables **quantitativement** pour la physique classique :

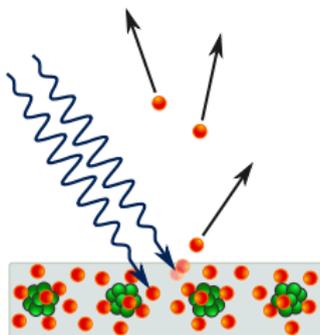
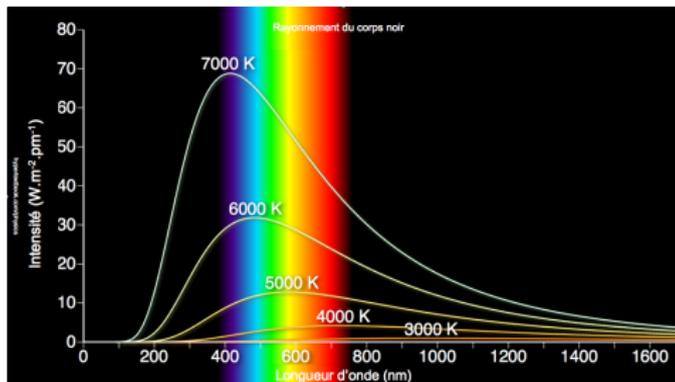
- ▶ rayonnement émis par les **corps chauds** (**spectre du corps noir**)
⇒ **Planck (1900)**, Nobel 1918
- ▶ courant électrique provoqué par la lumière (**effet photo-électrique**)
⇒ **Einstein (1905)**, Nobel 1921



Lumière et matière : une étrange histoire

Phénomènes inexplicables **quantitativement** pour la physique classique :

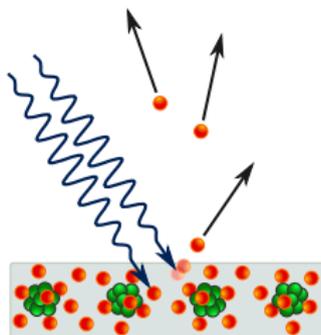
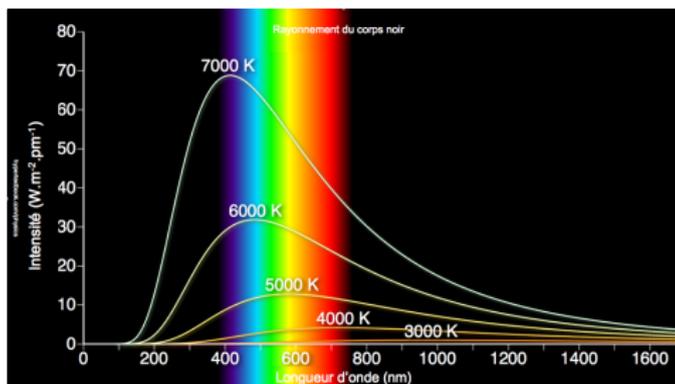
- ▶ rayonnement émis par les **corps chauds** (**spectre du corps noir**)
 ⇒ **Planck (1900)**, Nobel 1918
- ▶ courant électrique provoqué par la lumière (**effet photo-électrique**)
 ⇒ **Einstein (1905)**, Nobel 1921



Lumière et matière : une étrange histoire

Phénomènes inexplicables **quantitativement** pour la physique classique :

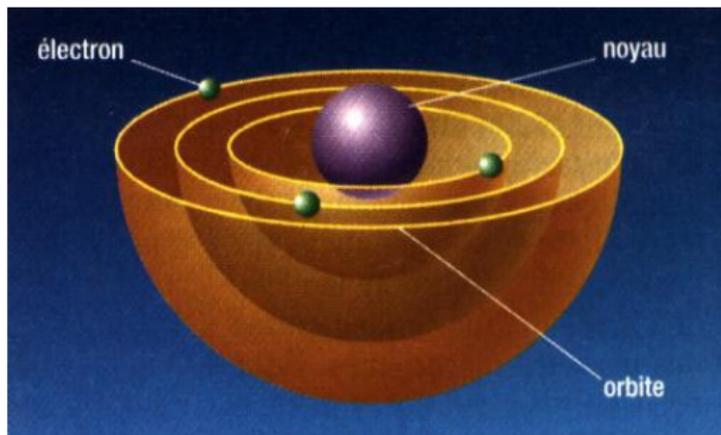
- ▶ rayonnement émis par les **corps chauds** (**spectre du corps noir**)
 ⇒ **Planck (1900)**, Nobel 1918
- ▶ courant électrique provoqué par la lumière (**effet photo-électrique**)
 ⇒ **Einstein (1905)**, Nobel 1921



Les atomes sont-ils éternels ?

Limites du modèle atomique planétaire classique :

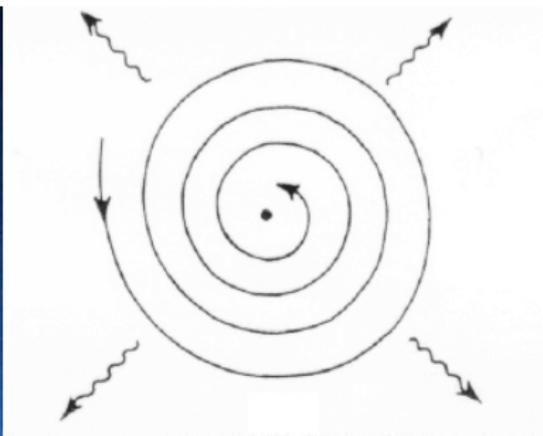
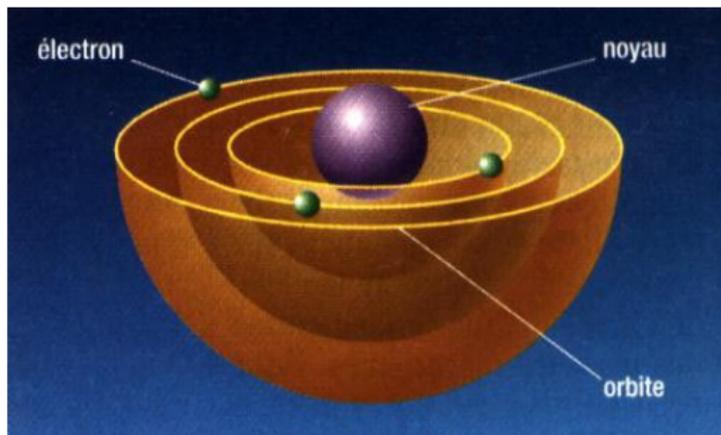
- ▶ électrons en orbite \implies émission de rayonnement électromagnétique
 \implies perte d'énergie \implies trajectoire spirale et instabilité des atomes



Les atomes sont-ils éternels ?

Limites du modèle atomique planétaire classique :

- ▶ électrons en orbite \implies émission de rayonnement électromagnétique
 \implies perte d'énergie \implies trajectoire spirale et instabilité des **atomes**



La couleur des atomes

Limites du modèle atomique planétaire classique :

- ▶ **rayonnement émis** (\simeq couleur des **matériaux froids**) : **spectre continu** prédit par les calculs classiques, mais **spectres discontinus** observés (**exemples** : feu d'artifice, aurore polaire)
- ▶ **explication quantique** des **spectres** : Bohr (1913), de Broglie (1924), Heisenberg (1925), Born (1925), Pauli (1924, 1926), Schrödinger (1926), Dirac (1926), etc.
 ⇒ tous (et d'autres) ont obtenu le **prix Nobel** pour ces travaux



La couleur des atomes

Limites du modèle atomique planétaire classique :

- ▶ **rayonnement émis** (\simeq couleur des **matériaux froids**) : **spectre continu** prédit par les calculs classiques, mais **spectres discontinus observés** (**exemples** : feu d'artifice, aurore polaire)
- ▶ **explication quantique** des **spectres** : **Bohr (1913)**, de **Broglie (1924)**, **Heisenberg (1925)**, **Born (1925)**, **Pauli (1924, 1926)**, **Schrödinger (1926)**, **Dirac (1926)**, etc.
 ⇒ tous (et d'autres) ont obtenu le **prix Nobel** pour ces travaux



La couleur des atomes

Limites du modèle atomique planétaire classique :

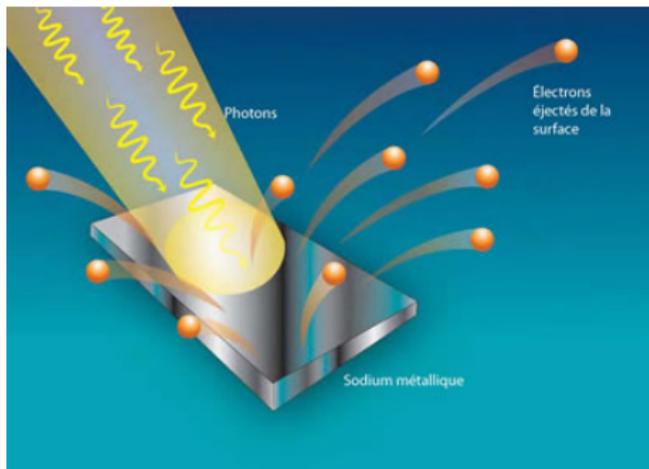
- ▶ **rayonnement émis** (\simeq couleur des **matériaux froids**) : **spectre continu** prédit par les calculs classiques, mais **spectres discontinus observés** (**exemples** : feu d'artifice, aurore polaire)
- ▶ **explication quantique** des **spectres** : **Bohr (1913)**, de **Broglie (1924)**, **Heisenberg (1925)**, **Born (1925)**, **Pauli (1924, 1926)**, **Schrödinger (1926)**, **Dirac (1926)**, etc.
 ⇒ tous (et d'autres) ont obtenu le **prix Nobel** pour ces travaux



Photons et rayonnement électromagnétique

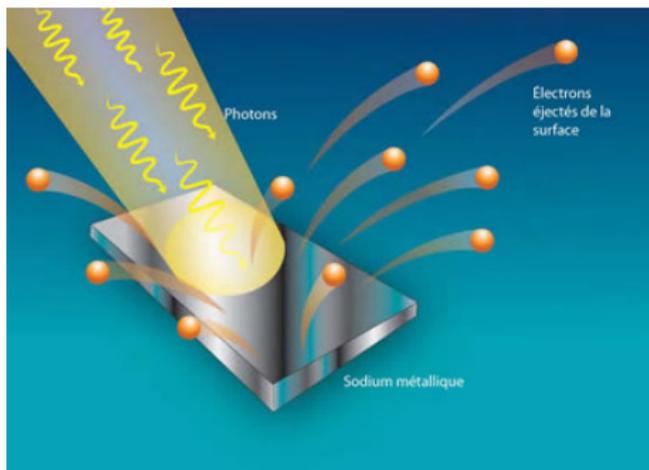
- **Planck & Einstein** : rayonnement du corps noir et l'effet photo-électrique explicables **quantitativement** si émission ou absorption d'énergie électromagnétique sous la forme de paquets d'énergie (nommés photons à partir de 1926)

≈ « corpuscules de lumière » et quantification de l'énergie



Photons et rayonnement électromagnétique

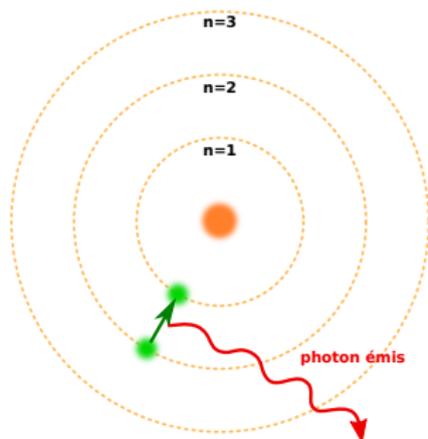
- ▶ **Planck & Einstein** : rayonnement du corps noir et l'effet photo-électrique explicables **quantitativement** si émission ou absorption d'énergie électromagnétique sous la forme de **paquets d'énergie** (nommés **photons** à partir de 1926)
≈ « **corpuscules de lumière** » et **quantification de l'énergie**



Atome de Bohr et hypothèse de de Broglie

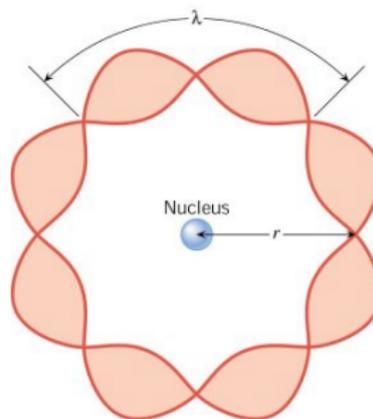
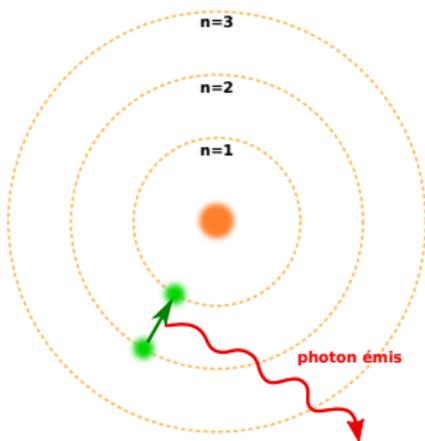
► Bohr :

- **spectres atomiques** explicables **quantitativement** si seules **certaines orbites** sont autorisées pour les électrons et **pas d'émission de rayonnement** depuis celles-ci \implies **quantification de l'énergie**
- **rayonnement** : émis quand électrons sautent **instantanément** d'une orbite autorisée à une autre (\implies **discontinuité du mouvement**)



Atome de Bohr et hypothèse de de Broglie

- ▶ **Bohr** :
 - **spectres atomiques** explicables **quantitativement** si seules **certaines orbites** sont autorisées pour les électrons et **pas d'émission de rayonnement** depuis celles-ci \implies **quantification de l'énergie**
 - **rayonnement** : émis quand électrons sautent **instantanément** d'une orbite autorisée à une autre (\implies **discontinuité du mouvement**)
- ▶ **de Broglie** : **orbites** explicables **quantitativement** si **électrons** \simeq « **ondes de matière** »



Dualité onde-corpuscule

- ▶ **selon l'expérience réalisée**, nécessité de décrire la « **matière** » et les « **champs d'interaction** » (lumière incluse), soit comme des **corpuscules**, soit comme des **ondes** \implies besoin d'un **changement de paradigme**
- ▶ **exemple analogue** : que peut être une « **figure géométrique** » qui parfois est observable comme un rectangle, et parfois comme un disque ?

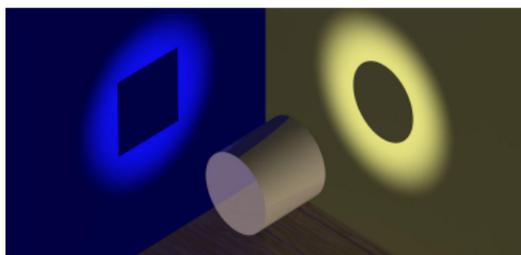
- ▶ **particules quantiques** : ni corpuscules, ni ondes
 - \implies décrites par des **objets mathématiques plus abstraits**
 - \implies vrai de **tous** les **systèmes physiques**

Dualité onde-corpuscule

- ▶ **selon l'expérience réalisée**, nécessité de décrire la « **matière** » et les « **champs d'interaction** » (lumière incluse), soit comme des **corpuscules**, soit comme des **ondes** \implies besoin d'un **changement de paradigme**
 - ▶ **exemple analogue** : que peut être une « **figure géométrique** » qui parfois est observable comme un rectangle, et parfois comme un disque ?
-
- ▶ **particules quantiques** : ni corpuscules, ni ondes
 - \implies décrites par des **objets mathématiques plus abstraits**
 - \implies vrai de **tous** les **systèmes physiques**

Dualité onde-corpuscule

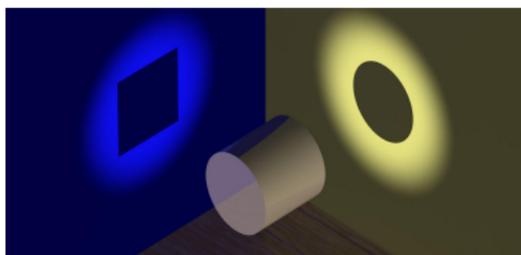
- ▶ **selon l'expérience réalisée**, nécessité de décrire la « **matière** » et les « **champs d'interaction** » (lumière incluse), soit comme des **corpuscules**, soit comme des **ondes** \implies besoin d'un **changement de paradigme**
- ▶ **exemple analogue** : que peut être une « **figure géométrique** » qui parfois est observable comme un rectangle, et parfois comme un disque ?
 \implies un **volume** et **non une surface**



- ▶ **particules quantiques** : ni corpuscules, ni ondes
 \implies décrites par des **objets mathématiques plus abstraits**
 \implies vrai de **tous** les **systèmes physiques**

Dualité onde-corpuscule

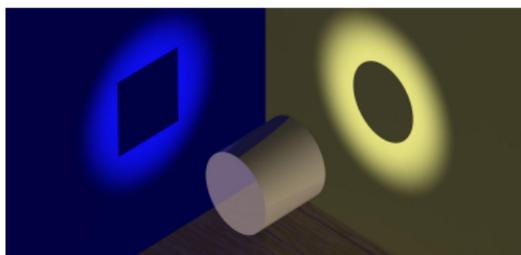
- ▶ **selon l'expérience réalisée**, nécessité de décrire la « **matière** » et les « **champs d'interaction** » (lumière incluse), soit comme des **corpuscules**, soit comme des **ondes** \implies besoin d'un **changement de paradigme**
- ▶ **exemple analogue** : que peut être une « **figure géométrique** » qui parfois est observable comme un rectangle, et parfois comme un disque ?
 \implies un **volume** et **non une surface**



- ▶ **particules quantiques** : ni corpuscules, ni ondes
 \implies décrites par des **objets mathématiques plus abstraits**
 \implies vrai de **tous** les **systèmes physiques**

Dualité onde-corpuscule

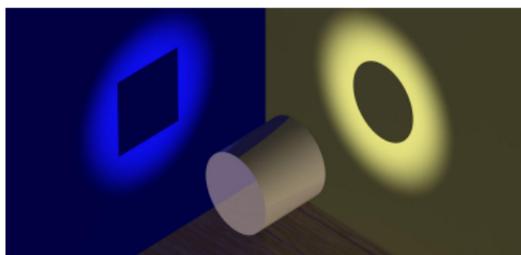
- ▶ **selon l'expérience réalisée**, nécessité de décrire la « **matière** » et les « **champs d'interaction** » (lumière incluse), soit comme des **corpuscules**, soit comme des **ondes** \implies besoin d'un **changement de paradigme**
- ▶ **exemple analogue** : que peut être une « **figure géométrique** » qui parfois est observable comme un rectangle, et parfois comme un disque ?
 \implies un **volume** et **non une surface**



- ▶ **particules quantiques** : ni corpuscules, ni ondes
 \implies décrites par des **objets mathématiques plus abstraits**
 \implies vrai de **tous** les **systèmes physiques**

Dualité onde-corpuscule

- ▶ **selon l'expérience réalisée**, nécessité de décrire la « **matière** » et les « **champs d'interaction** » (lumière incluse), soit comme des **corpuscules**, soit comme des **ondes** \implies besoin d'un **changement de paradigme**
- ▶ **exemple analogue** : que peut être une « **figure géométrique** » qui parfois est observable comme un rectangle, et parfois comme un disque ?
 \implies un **volume** et **non une surface**



- ▶ **particules quantiques** : ni corpuscules, ni ondes
 \implies décrites par des **objets mathématiques plus abstraits**
 \implies vrai de **tous** les **systèmes physiques**

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac et 1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins réalistes, qui pourraient mener (pour certaines) à des prédictions différentes sur des expériences subtiles encore irréalisées

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac et 1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins réalistes, qui pourraient mener (pour certaines) à des prédictions différentes sur des expériences subtiles encore irréalisées

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : équivalence mathématique des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme canonique de la **mécanique quantique** [standard pour une particule isolée]
- ▶ **1933, Dirac et 1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs formulations mathématiques équivalentes pour les phénomènes « simples », mais aussi multiples interprétations, plus ou moins réalistes, qui pourraient mener (pour certaines) à des prédictions différentes sur des expériences subtiles encore irréalisées

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac** et **1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins réalistes, qui pourraient mener (pour certaines) à des prédictions différentes sur des expériences subtiles encore irréalisées

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac** et **1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins réalistes, qui pourraient mener (pour certaines) à des prédictions différentes sur des expériences subtiles encore irréalisées

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac** et **1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins réalistes, qui pourraient mener (pour certaines) à des prédictions différentes sur des expériences subtiles encore irréalisées

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac** et **1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins **réalistes**, qui pourraient mener (pour certaines) à des **prédictions différentes** sur des **expériences subtiles encore irréalisées**

Chronologie quantique initiale (très partielle et partielle)

- ▶ **1924, de Broglie** : ondes de matière
- ▶ **1925, Heisenberg, Born & Jordan** : mécanique **matricielle**
(\simeq approche **positiviste**)
- ▶ **1925, Schrödinger** : **mécanique ondulatoire** (équation d'onde)
 \implies réalité = ondes?
- ▶ **1925, Dirac** : **équivalence mathématique** des formalismes de Heisenberg et de Schrödinger
- ▶ **1930, Hilbert, Dirac & von Neumann** : formalisme **canonique** de la **mécanique quantique** [standard pour une **particule isolée**]
- ▶ **1933, Dirac** et **1942-1948, Feynman** : formalisme en termes d'**intégrales de chemin** [plus adapté pour les situations en lien avec la **relativité restreinte**]
 \implies plusieurs **formulations mathématiques équivalentes** pour les phénomènes « simples », mais aussi **multiples interprétations**, plus ou moins **réalistes**, qui pourraient mener (pour certaines) à des **prédictions différentes** sur des **expériences subtiles encore irréalisées**

Suite de l'exposé

interprétation de Copenhague (Bohr & Heisenberg)

- ▶ la plus traditionnelle, jamais mise en défaut par des expériences
⇒ enseignée à l'université à partir de la 3ème année de physique
- ▶ adaptée à la physique « non-relativiste » (quelques ajustements nécessaires en « physique des hautes énergies »)
⇒ physique du « quotidien », technologie, etc.
- ▶ dichotomie : « système étudié » décrit de manière quantique, mais « observateur » ou « appareil de mesure » classique(s)
⇒ problème théorique irrésolu à ce jour...
- ▶ révolution de notre représentation du monde... comme toutes les « interprétations quantiques » compatibles avec les expériences

Suite de l'exposé

interprétation de Copenhague (Bohr & Heisenberg)

- ▶ la plus traditionnelle, jamais mise en défaut par des expériences
⇒ enseignée à l'université à partir de la 3ème année de physique
- ▶ adaptée à la physique « non-relativiste » (quelques ajustements nécessaires en « physique des hautes énergies »)
⇒ physique du « quotidien », technologie, etc.
- ▶ dichotomie : « système étudié » décrit de manière quantique, mais « observateur » ou « appareil de mesure » classique(s)
⇒ problème théorique irrésolu à ce jour...
- ▶ révolution de notre représentation du monde... comme toutes les « interprétations quantiques » compatibles avec les expériences

Suite de l'exposé

interprétation de Copenhague (Bohr & Heisenberg)

- ▶ la plus traditionnelle, jamais mise en défaut par des expériences
⇒ enseignée à l'université à partir de la 3ème année de physique
- ▶ adaptée à la physique « non-relativiste » (quelques ajustements nécessaires en « physique des hautes énergies »)
⇒ physique du « quotidien », technologie, etc.
- ▶ **dichotomie** : « système étudié » décrit de manière **quantique**, mais « observateur » ou « appareil de mesure » **classique(s)**
⇒ **problème théorique** irrésolu à ce jour...
- ▶ révolution de notre représentation du monde... comme toutes les « interprétations quantiques » compatibles avec les expériences

Suite de l'exposé

interprétation de Copenhague (Bohr & Heisenberg)

- ▶ la plus traditionnelle, jamais mise en défaut par des expériences
⇒ enseignée à l'université à partir de la 3ème année de physique
- ▶ adaptée à la physique « non-relativiste » (quelques ajustements nécessaires en « physique des hautes énergies »)
⇒ physique du « quotidien », technologie, etc.
- ▶ **dichotomie** : « système étudié » décrit de manière **quantique**, mais « observateur » ou « appareil de mesure » **classique(s)**
⇒ **problème théorique** irrésolu à ce jour...
- ▶ révolution de notre représentation du monde... comme toutes les « interprétations quantiques » compatibles avec les expériences

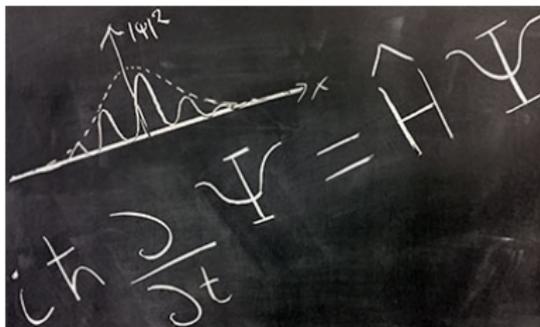
Suite de l'exposé

interprétation de Copenhague (Bohr & Heisenberg)

- ▶ la plus traditionnelle, jamais mise en défaut par des expériences
⇒ enseignée à l'université à partir de la 3ème année de physique
- ▶ adaptée à la physique « non-relativiste » (quelques ajustements nécessaires en « physique des hautes énergies »)
⇒ physique du « quotidien », technologie, etc.
- ▶ **dichotomie** : « système étudié » décrit de manière **quantique**, mais « observateur » ou « appareil de mesure » **classique(s)**
⇒ **problème théorique** irrésolu à ce jour...
- ▶ révolution de notre représentation du monde... comme toutes les « interprétations quantiques » compatibles avec les **expériences**

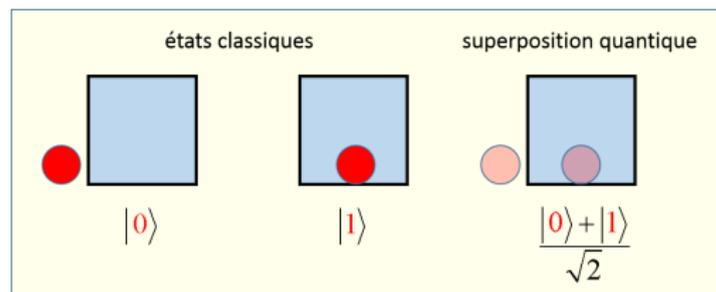
III

Physique quantique : quelques révolutions épistémologiques et ontologiques



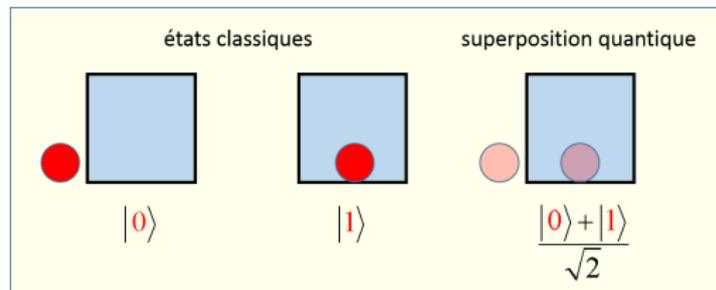
Principe de superposition et indétermination

- ▶ **état quantique d'un système physique** : à un **instant donné**, décrit comme une « **superposition** » d'états classiques **observables**
 \simeq somme de « **flèches** » dans un espace abstrait
- ▶ **résultat possible d'une observation** : un des états classiques inclus dans la superposition
- ▶ **avant mesure** : le système n'est dans **aucun** de ces « états classiques »
 \implies **indétermination quantique** (\neq indétermination classique du chaos)



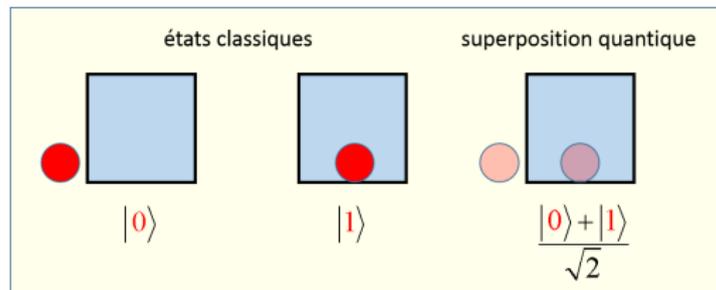
Principe de superposition et indétermination

- ▶ **état quantique d'un système physique** : à un **instant donné**, décrit comme une « **superposition** » d'états classiques **observables**
 \simeq somme de « **flèches** » dans un espace abstrait
- ▶ **résultat possible d'une observation** : un des états classiques inclus dans la superposition
- ▶ **avant mesure** : le système n'est dans **aucun** de ces « états classiques »
 \implies **indétermination quantique** (\neq indétermination classique du chaos)



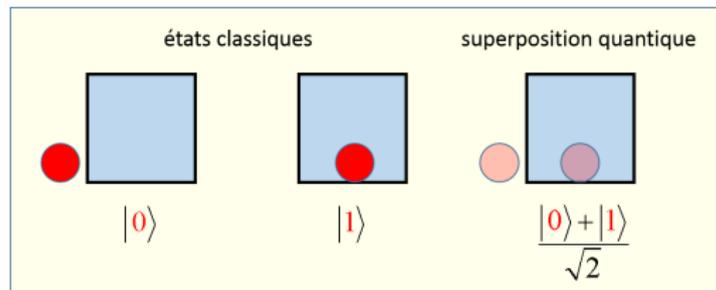
Principe de superposition et indétermination

- ▶ **état quantique d'un système physique** : à un **instant donné**, décrit comme une « **superposition** » d'états classiques **observables**
 \simeq somme de « **flèches** » dans un espace abstrait
- ▶ **résultat possible d'une observation** : un des **états classiques** inclus dans la **superposition**
- ▶ **avant mesure** : le système n'est dans **aucun** de ces « états classiques »
 \implies **indétermination quantique** (\neq indétermination classique du chaos)



Principe de superposition et indétermination

- ▶ **état quantique d'un système physique** : à un **instant donné**, décrit comme une « **superposition** » d'états classiques **observables**
 \simeq somme de « **flèches** » dans un espace abstrait
- ▶ **résultat possible d'une observation** : un des **états classiques** inclus dans la **superposition**
- ▶ **avant mesure** : le système n'est dans **aucun** de ces « états classiques »
 \implies **indétermination quantique** (\neq indétermination classique du chaos)



Équation de Schrödinger et évolution

- ▶ **fonction d'onde** : objet mathématique abstrait décrivant l'« état quantique » d'un système (souvent notée $|\Psi\rangle$)
 - ⇒ onde dans un espace de **dimension** $3N$ si système formé de N particules ponctuelles...
- ▶ résultat d'une mesure imprévisible, mais **évolution déterministe** de l'état quantique et des **probabilités**
 - ⇒ **équation de Schrödinger**

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle \quad \text{avec } i^2 = -1$$

- ▶ **remarque** : présence inévitable de **nombres complexes**
- ▶ **conséquence** : comportement **corpusculaire** ou **ondulatoire**, selon l'expérience

Équation de Schrödinger et évolution

- ▶ **fonction d'onde** : objet mathématique abstrait décrivant l'« état quantique » d'un système (souvent notée $|\Psi\rangle$)
 - ⇒ onde dans un espace de **dimension** $3N$ si système formé de N particules ponctuelles...
- ▶ résultat d'une mesure imprévisible, mais **évolution déterministe** de l'état quantique et des **probabilités**
 - ⇒ **équation de Schrödinger**

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle \quad \text{avec } i^2 = -1$$

- ▶ **remarque** : présence inévitable de **nombres complexes**
- ▶ **conséquence** : comportement **corpusculaire** ou **ondulatoire**, selon l'expérience

Équation de Schrödinger et évolution

- ▶ **fonction d'onde** : objet mathématique abstrait décrivant l'« état quantique » d'un système (souvent notée $|\Psi\rangle$)
 - ⇒ onde dans un espace de **dimension** $3N$ si système formé de N particules ponctuelles...
- ▶ résultat d'une mesure imprévisible, mais **évolution déterministe** de l'état quantique et des **probabilités**
 - ⇒ **équation de Schrödinger**

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle \quad \text{avec } i^2 = -1$$

- ▶ **remarque** : présence inévitable de **nombres complexes**
- ▶ **conséquence** : comportement **corpusculaire** ou **ondulatoire**, selon l'expérience

Équation de Schrödinger et évolution

- ▶ **fonction d'onde** : objet mathématique abstrait décrivant l'« état quantique » d'un système (souvent notée $|\Psi\rangle$)
 - ⇒ onde dans un espace de **dimension** $3N$ si système formé de N particules ponctuelles...
- ▶ résultat d'une mesure imprévisible, mais **évolution déterministe** de l'état quantique et des **probabilités**
 - ⇒ **équation de Schrödinger**

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle \quad \text{avec} \quad i^2 = -1$$

- ▶ **remarque** : présence inévitable de **nombres complexes**
- ▶ **conséquence** : comportement **corpusculaire** ou **ondulatoire**, selon l'expérience

Équation de Schrödinger et évolution

- ▶ **fonction d'onde** : objet mathématique abstrait décrivant l'« état quantique » d'un système (souvent notée $|\Psi\rangle$)
 - ⇒ onde dans un espace de **dimension** $3N$ si système formé de N particules ponctuelles...
- ▶ résultat d'une mesure imprévisible, mais **évolution déterministe** de l'état quantique et des **probabilités**
 - ⇒ **équation de Schrödinger**

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle \quad \text{avec} \quad i^2 = -1$$

- ▶ **remarque** : présence inévitable de **nombres complexes**
- ▶ **conséquence** : comportement **corpusculaire** ou **ondulatoire**, selon l'expérience

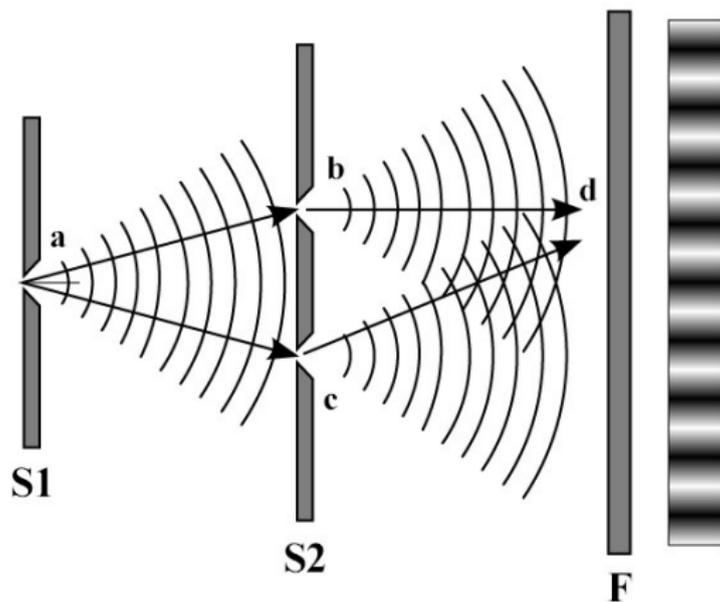
Équation de Schrödinger et évolution

- ▶ **fonction d'onde** : objet mathématique abstrait décrivant l'« état quantique » d'un système (souvent notée $|\Psi\rangle$)
 - ⇒ onde dans un espace de **dimension** $3N$ si système formé de N particules ponctuelles...
- ▶ résultat d'une mesure imprévisible, mais **évolution déterministe** de l'état quantique et des **probabilités**
 - ⇒ **équation de Schrödinger**

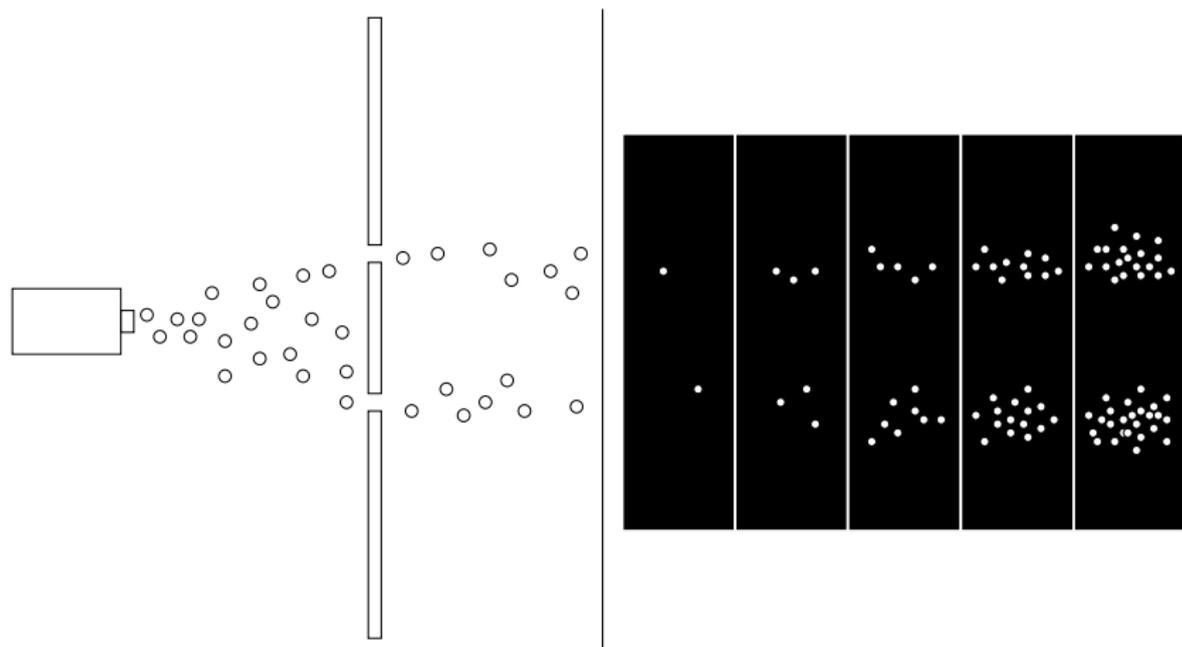
$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle \quad \text{avec} \quad i^2 = -1$$

- ▶ **remarque** : présence inévitable de **nombres complexes**
- ▶ **conséquence** : comportement **corpusculaire** ou **ondulatoire**, **selon l'expérience**

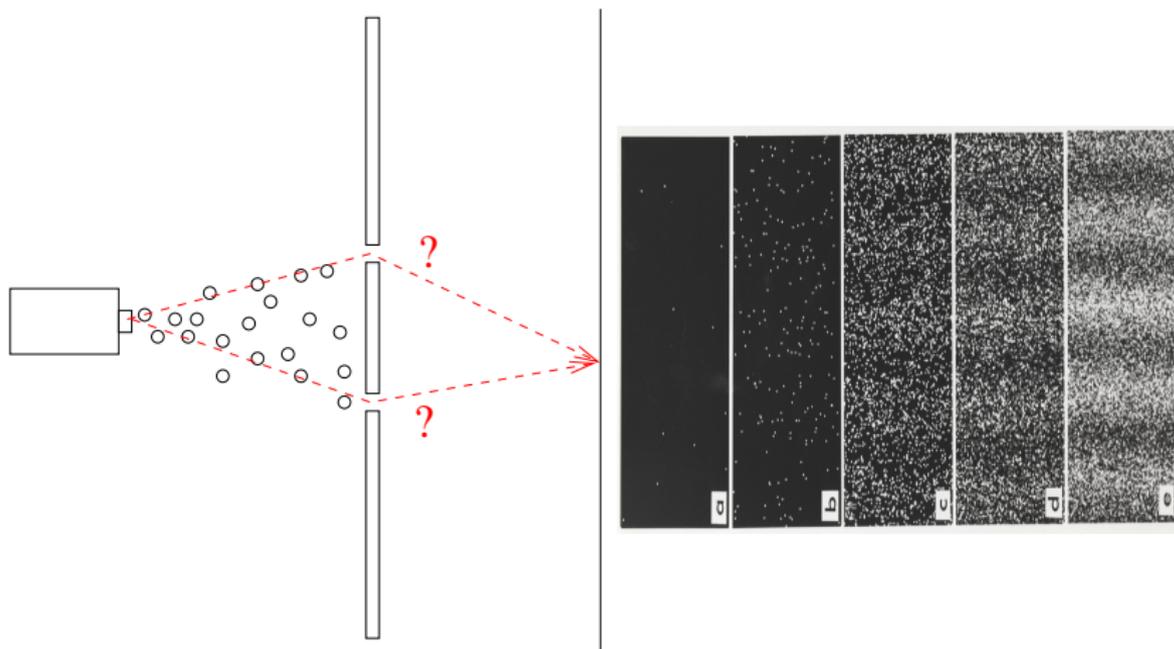
Fentes de Young : onde classique



Fentes de Young : corpuscules classiques

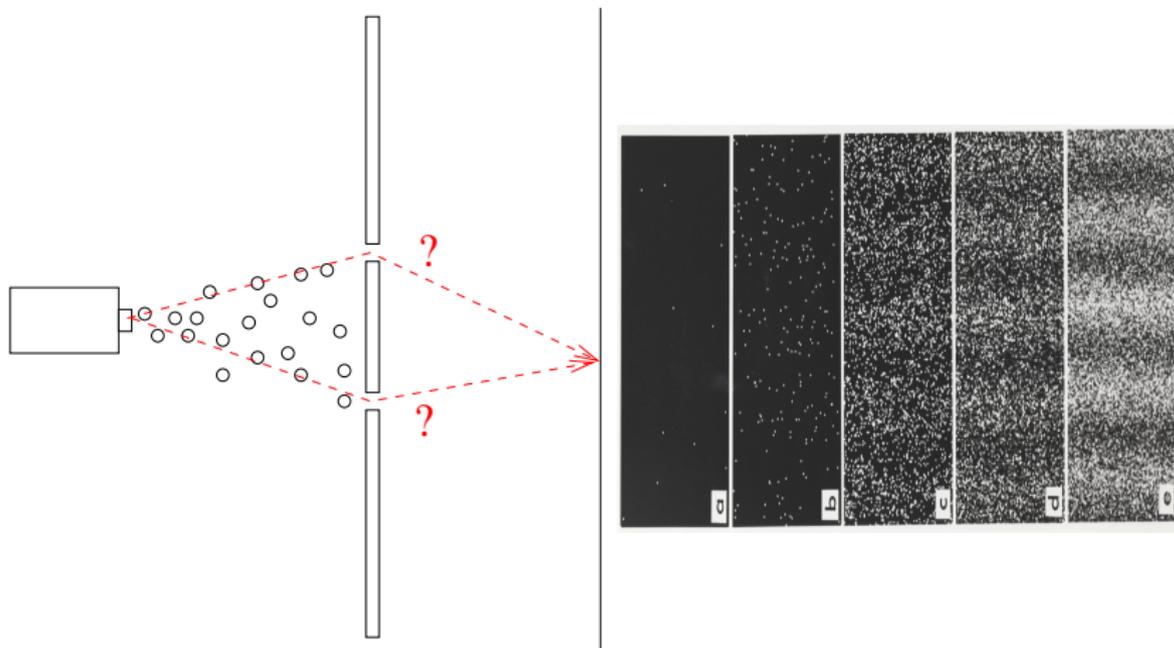


Fentes de Young : particules quantiques



- ▶ **1927, Davisson & Germer** : électron
- ▶ **2019, Université de Vienne** : molécules composées d'environ **2000 atomes**

Fentes de Young : particules quantiques



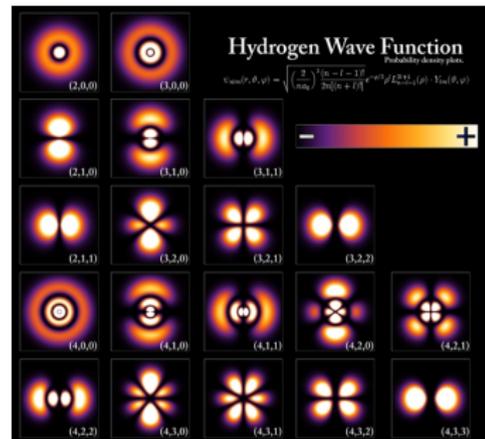
- ▶ 1927, **Davisson & Germer** : **électron**
- ▶ 2019, **Université de Vienne** : **molécules** composées d'environ **2000 atomes**

Indétermination et probabilité

- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité** de chaque **résultat calculable** (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs
(⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** \neq valeur fixée **inconnue** : valeur **pas déterminée à l'avance** (« *réel voilé* », **B. d'Espagnat**)
- ▶ **exemple** : une « **particule** » n'a ni **position**, ni **vitesse** si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : **plusieurs systèmes identiques** ou **répétition de l'expérience**
 - ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)

Indétermination et probabilité

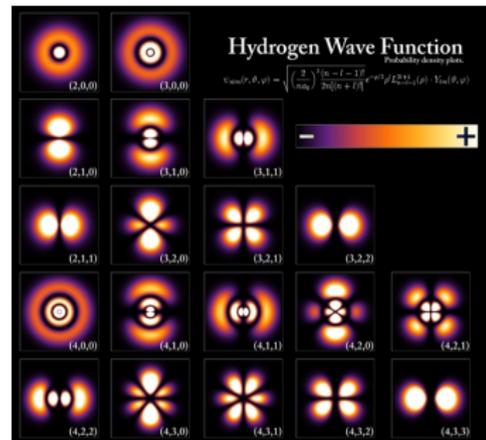
- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité de chaque résultat calculable** (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs (⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** ≠ valeur fixée inconnue : valeur **pas déterminée à l'avance** (« *réel voilé* », B. d'Espagnat)
- ▶ exemple : une « **particule** » n'a ni position, ni vitesse si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : plusieurs systèmes identiques ou répétition de l'expérience ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)



probabilité de présence de l'électron d'un atome d'hydrogène selon son état quantique

Indétermination et probabilité

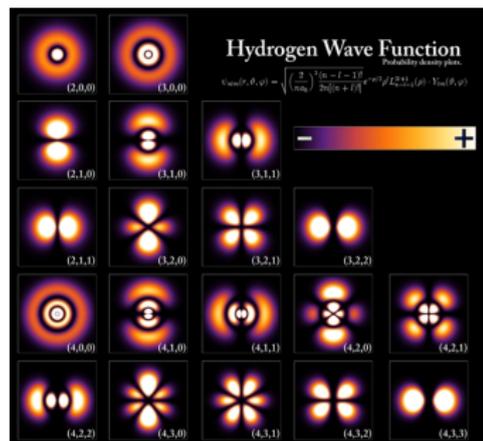
- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité** de chaque résultat calculable (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs (⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** ≠ valeur fixée inconnue : valeur pas déterminée à l'avance (« *réel voilé* », B. d'Espagnat)
- ▶ exemple : une « **particule** » n'a ni position, ni vitesse si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : plusieurs systèmes identiques ou répétition de l'expérience
 - ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)



probabilité de présence de l'électron d'un atome d'hydrogène selon son état quantique

Indétermination et probabilité

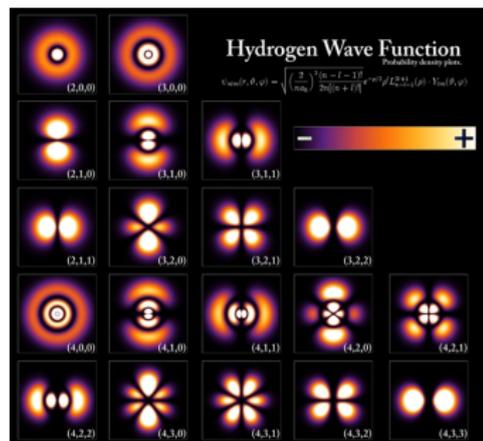
- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité** de chaque **résultat calculable** (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs (⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** ≠ valeur fixée inconnue : valeur **pas déterminée à l'avance** (« *réel voilé* », B. d'Espagnat)
- ▶ **exemple** : une « **particule** » n'a ni position, ni vitesse si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : plusieurs systèmes identiques ou répétition de l'expérience
 - ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)



probabilité de présence de l'électron d'un atome d'hydrogène selon son état quantique

Indétermination et probabilité

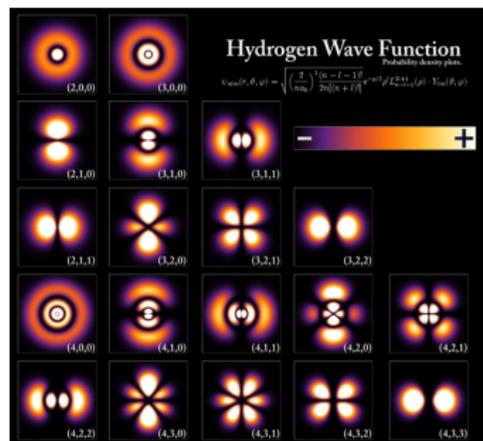
- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité** de chaque résultat calculable (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs (⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** \neq **valeur fixée inconnue** : valeur **pas déterminée à l'avance** (« *réel voilé* », **B. d'Espagnat**)
- ▶ **exemple** : une « **particule** » n'a ni position, ni vitesse si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : plusieurs systèmes identiques ou répétition de l'expérience
 - ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)



probabilité de présence de l'électron d'un atome d'hydrogène selon son état quantique

Indétermination et probabilité

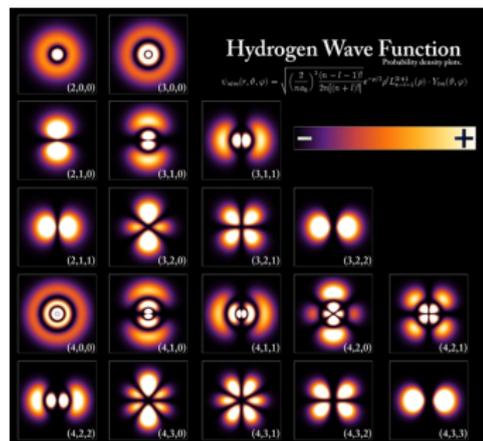
- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité** de chaque résultat calculable (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs (⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** \neq valeur fixée inconnue : valeur pas déterminée à l'avance (« *réel voilé* », B. d'Espagnat)
- ▶ **exemple** : une « **particule** » n'a ni position, ni vitesse si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : plusieurs systèmes identiques ou répétition de l'expérience
 - ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)



probabilité de présence de l'électron d'un atome d'hydrogène selon son état quantique

Indétermination et probabilité

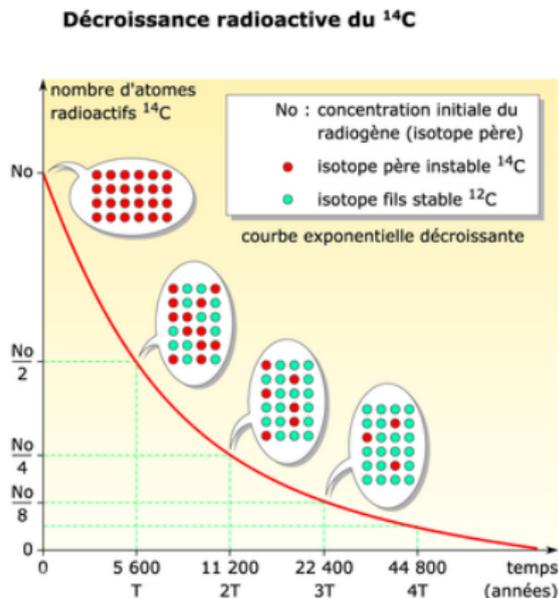
- ▶ **résultat d'une mesure** : **aléatoire**
- ▶ pas de **certitude**, mais **probabilité** de chaque résultat calculable (*via* l'état quantique)
 - ⇒ Nature **intrinsèquement indéterministe**
 - ⇒ caractère **fluctuant** des grandeurs (⇒ « **fluctuations quantiques** »)
- ▶ **indétermination quantique** \neq valeur fixée inconnue : valeur pas déterminée à l'avance (« *réel voilé* », **B. d'Espagnat**)
- ▶ **exemple** : une « **particule** » n'a ni position, ni vitesse si on ne les mesure pas
- ▶ **expérimentalement** : plusieurs systèmes identiques ou répétition de l'expérience
 - ⇒ **distribution statistique** (analogie imparfaite : lancé de dé)



probabilité de présence de l'électron d'un atome d'hydrogène selon son état quantique

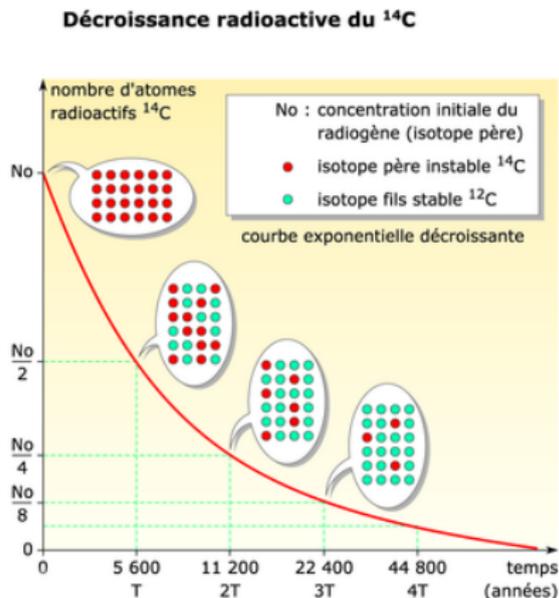
Atomes quantiques et radio-activité

- ▶ **1928, Gamow** : la **radio-activité** est un processus aléatoire **quantique**
 - ⇒ **avant observation**, un **atome radio-actif** n'est ni désintégré, ni pas-désintégré... il a une **probabilité** de l'avoir fait...
- ▶ **conséquence** : un atome radio-actif **isolé** n'a **pas d'âge**, mais un échantillon composé de **beaucoup d'atomes** a un **âge statistique**
 - ⇒ **vieillesse** = notion **statistique**
 - ⇒ **datation au carbone-14**



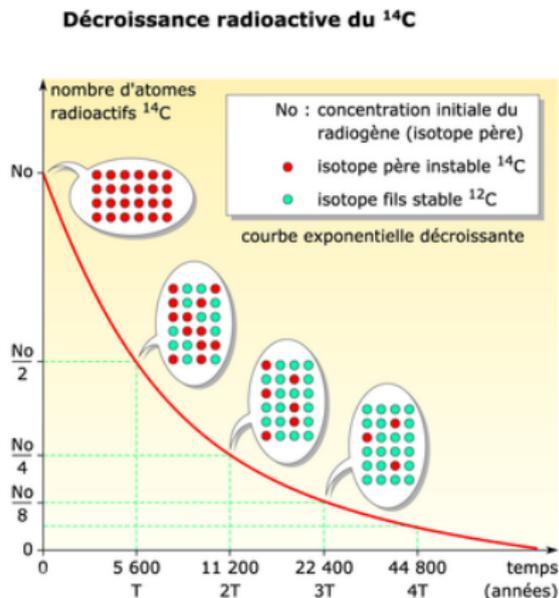
Atomes quantiques et radio-activité

- ▶ **1928, Gamow** : la **radio-activité** est un processus aléatoire **quantique**
 - ⇒ **avant observation**, un **atome radio-actif** n'est ni désintégré, ni pas-désintégré... il a une **probabilité** de l'avoir fait...
- ▶ **conséquence** : un atome radio-actif **isolé** n'a **pas d'âge**, mais un échantillon composé de **beaucoup d'atomes** a un **âge statistique**
 - ⇒ **vieillesse** = notion **statistique**
 - ⇒ **datation au carbone-14**



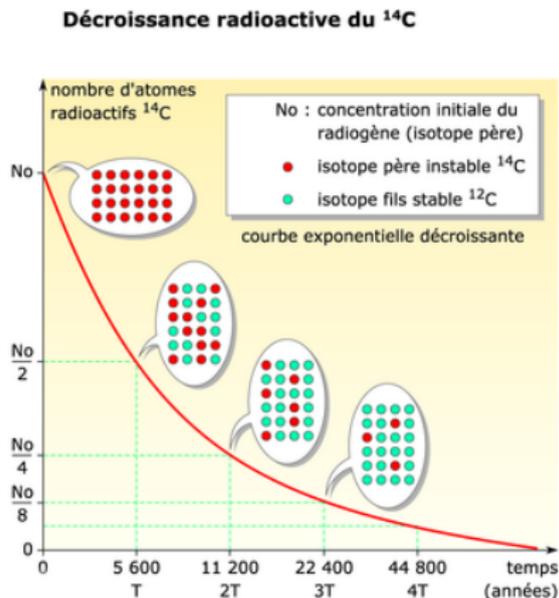
Atomes quantiques et radio-activité

- ▶ **1928, Gamow** : la **radio-activité** est un processus aléatoire **quantique**
 - ⇒ **avant observation**, un **atome radio-actif** n'est ni désintégré, ni pas-désintégré... il a une **probabilité** de l'avoir fait...
- ▶ **conséquence** : un atome radio-actif **isolé** n'a **pas d'âge**, mais un échantillon composé de **beaucoup d'atomes** a un **âge statistique**
 - ⇒ **vieillesse** = notion **statistique**
 - ⇒ **datation au carbone-14**



Atomes quantiques et radio-activité

- ▶ **1928, Gamow** : la **radio-activité** est un processus aléatoire **quantique**
 - ⇒ **avant observation**, un **atome radio-actif** n'est ni désintégré, ni pas-désintégré... il a une **probabilité** de l'avoir fait...
- ▶ **conséquence** : un atome radio-actif **isolé** n'a **pas d'âge**, mais un échantillon composé de **beaucoup d'atomes** a un **âge statistique**
 - ⇒ **vieillesse** = notion **statistique**
 - ⇒ **datation au carbone-14**



Effets d'une mesure sur le système physique

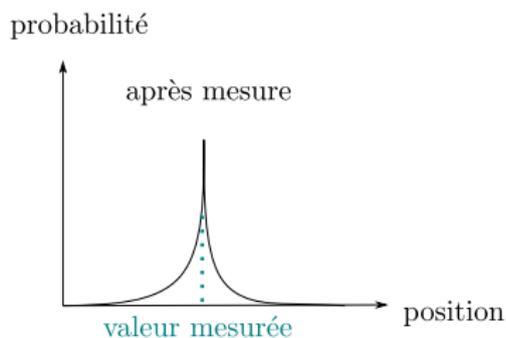
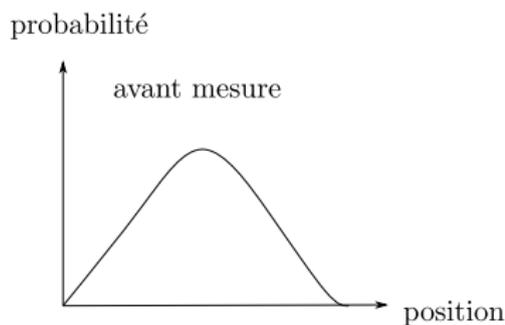
- ▶ pas de description du phénomène **au cours du temps**
- ▶ **après mesure** : passage vers un **état quantique équivalent** à l'état classique observé
⇒ « **effondrement** de la fonction d'onde »
- ▶ **question ouverte** : phénomène **instantané**?
oui selon **interprétation de Copenhague** (et autres) ; **non** selon certaines interprétations ou théories spéculatives
- ▶ **conclusion inévitable** : **observateur** perturbe le système de **manière aléatoire** (\simeq modifie en général la flèche $|\Psi\rangle$)

Effets d'une mesure sur le système physique

- ▶ pas de description du phénomène **au cours du temps**
- ▶ **après mesure** : passage vers un **état quantique équivalent** à l'état classique observé
 - ⇒ « **effondrement** de la fonction d'onde »
- ▶ **question ouverte** : phénomène **instantané**?
oui selon **interprétation de Copenhague** (et autres) ; **non** selon certaines interprétations ou théories spéculatives
- ▶ **conclusion inévitable** : **observateur** perturbe le système de **manière aléatoire** (\simeq modifie en général la flèche $|\Psi\rangle$)

Effets d'une mesure sur le système physique

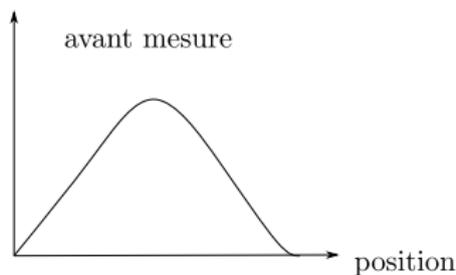
- ▶ pas de description du phénomène **au cours du temps**
- ▶ **après mesure** : passage vers un **état quantique équivalent** à l'état classique observé
 ⇒ « **effondrement** de la fonction d'onde »
- ▶ **question ouverte** : phénomène **instantané**?
 oui selon **interprétation de Copenhague** (et autres) ; non selon certaines interprétations ou théories spéculatives
- ▶ **conclusion inévitable** : **observateur** perturbe le système de **manière aléatoire** (\simeq modifie en général la flèche) $|\Psi\rangle$



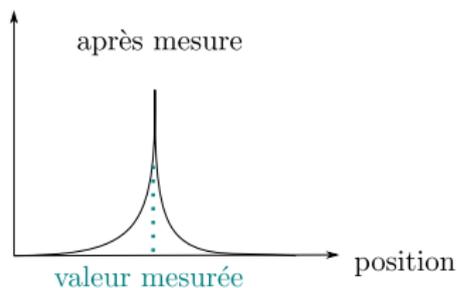
Effets d'une mesure sur le système physique

- ▶ pas de description du phénomène **au cours du temps**
- ▶ **après mesure** : passage vers un **état quantique équivalent** à l'état classique observé
 ⇒ « **effondrement** de la fonction d'onde »
- ▶ **question ouverte** : phénomène **instantané**?
 oui selon **interprétation de Copenhague** (et autres) ; non selon certaines interprétations ou théories spéculatives
- ▶ **conclusion inévitable** : **observateur** perturbe le système de **manière aléatoire** (\simeq modifie en général la flèche) $|\Psi\rangle$

probabilité

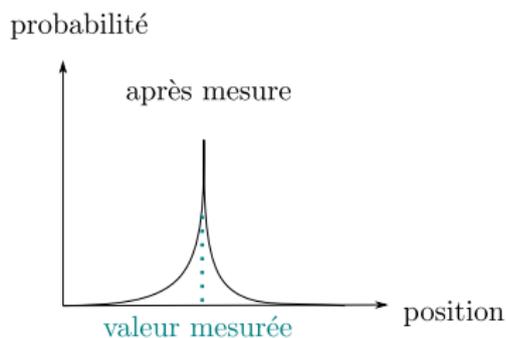
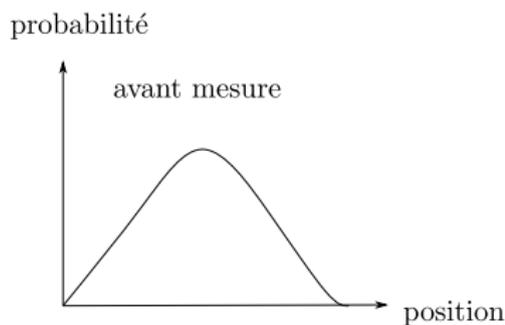


probabilité



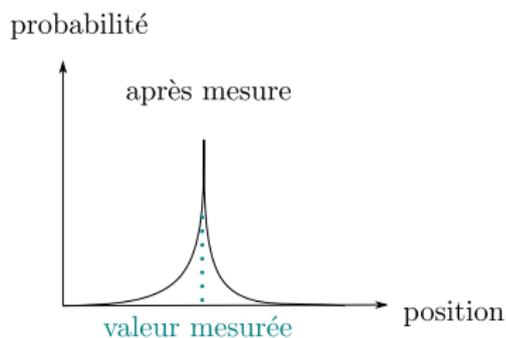
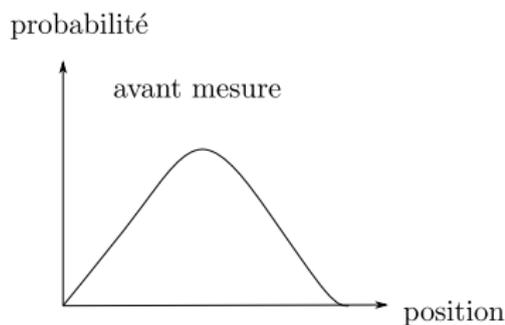
Effets d'une mesure sur le système physique

- ▶ pas de description du phénomène **au cours du temps**
- ▶ **après mesure** : passage vers un **état quantique équivalent** à l'état classique observé
 ⇒ « **effondrement** de la fonction d'onde »
- ▶ **question ouverte** : phénomène **instantané**?
 oui selon **interprétation de Copenhague** (et autres) ; non selon certaines interprétations ou théories spéculatives
- ▶ **conclusion inévitable** : **observateur** perturbe le système de **manière aléatoire** (\simeq modifie en général la flèche) $|\Psi\rangle$

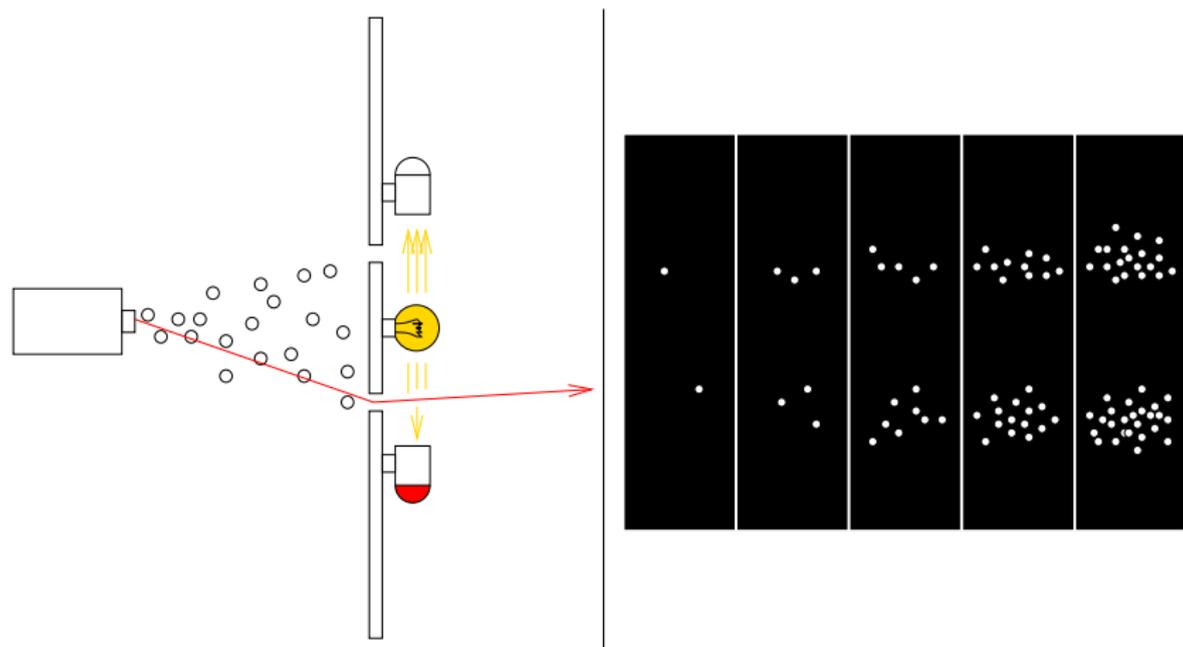


Effets d'une mesure sur le système physique

- ▶ pas de description du phénomène **au cours du temps**
- ▶ **après mesure** : passage vers un **état quantique équivalent** à l'état classique observé
 ⇒ « **effondrement** de la fonction d'onde »
- ▶ **question ouverte** : phénomène **instantané**?
 oui selon **interprétation de Copenhague** (et autres) ; non selon certaines interprétations ou théories spéculatives
- ▶ **conclusion inévitable** : **observateur** perturbe le système de **manière aléatoire** (\simeq modifie en général la flèche) $|\Psi\rangle$



Fentes de Young : particules quantiques observées



Chat de Schrödinger

- ▶ **1935, Schrödinger** : chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- ▶ **avant observation**, **superposition** d'états :

$$|chat\rangle = |mort\rangle + |vivant\rangle$$

- ▶ **observation (mesure)**
 - ⇒ état **classique** vivant ou mort déterminé
 - ⇒ « action » de l'observateur ? à quel moment ? choix retardé possible ? rôle de la conscience ? importance de la taille du système observé ? échelle de la frontière entre le « monde quantique » et le « monde classique » ?

Chat de Schrödinger

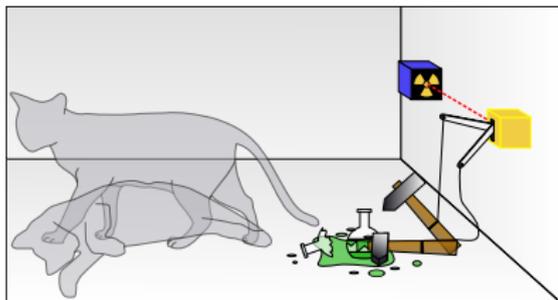
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- ▶ **avant observation**, **superposition** d'états :

$$|\text{chat}\rangle = |\text{mort}\rangle + |\text{vivant}\rangle$$

- ▶ **observation (mesure)**

⇒ état classique vivant ou mort déterminé

⇒ « action » de l'observateur ? à quel moment ? choix retardé possible ? rôle de la conscience ? importance de la taille du système observé ? échelle de la frontière entre le « monde quantique » et le « monde classique » ?



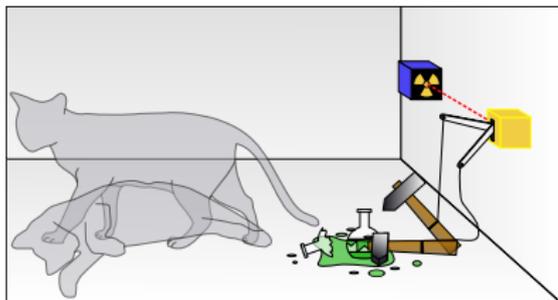
Chat de Schrödinger

- ▶ **1935, Schrödinger** : chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- ▶ **avant observation**, **superposition** d'états :

$$|chat\rangle = |mort\rangle + |vivant\rangle$$

- ▶ **observation (mesure)**
 ⇒ **état classique** vivant ou mort déterminé

⇒ « action » de l'observateur ? à quel moment ? choix retardé possible ? rôle de la conscience ? importance de la taille du système observé ? échelle de la frontière entre le « monde quantique » et le « monde classique » ?



Chat de Schrödinger

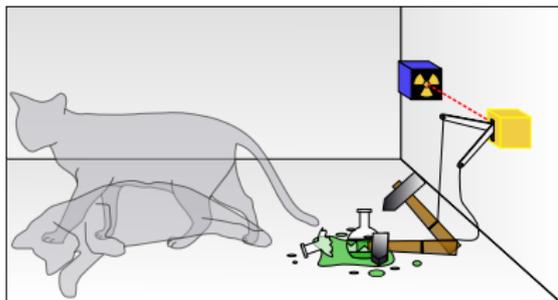
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- ▶ **avant observation**, **superposition** d'états :

$$|chat\rangle = |mort\rangle + |vivant\rangle$$

- ▶ **observation (mesure)**

⇒ **état classique** vivant ou mort déterminé

⇒ « action » de l'observateur ? à quel moment ? choix retardé possible ? rôle de la **conscience** ? importance de la **taille** du système observé ? échelle de la **frontière** entre le « monde quantique » et le « monde classique » ?



Chat de Schrödinger

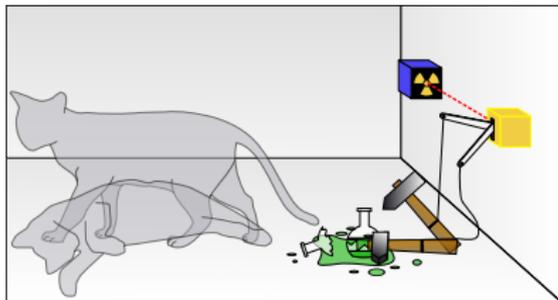
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- ▶ **avant observation**, **superposition** d'états :

$$|chat\rangle = |mort\rangle + |vivant\rangle$$

- ▶ **observation (mesure)**

⇒ **état classique** vivant ou mort déterminé

⇒ « action » de l'observateur ? à quel moment ? choix retardé possible ? rôle de la **conscience** ? importance de la **taille** du système observé ? échelle de la **frontière** entre le « monde quantique » et le « monde classique » ?



Chat de Schrödinger

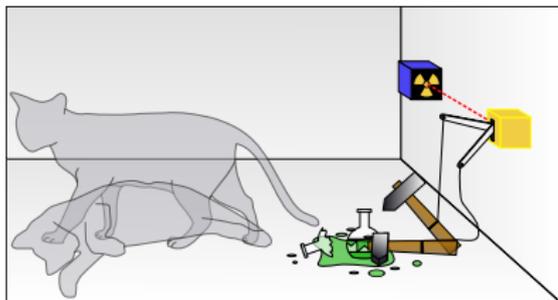
- ▶ **1935, Schrödinger** : chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- ▶ **avant observation**, **superposition** d'états :

$$|chat \rangle = |mort \rangle + |vivant \rangle$$

- ▶ **observation (mesure)**

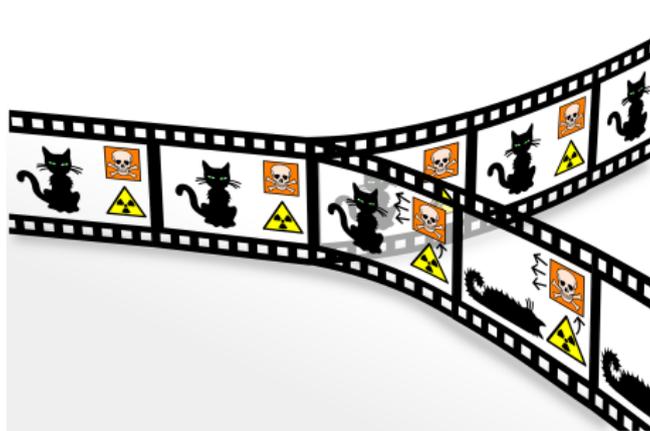
⇒ **état classique** vivant ou mort **déterminé**

⇒ « action » de l'observateur ? à quel moment ? choix retardé possible ? rôle de la **conscience** ? importance de la **taille** du système observé ? échelle de la **frontière** entre le « monde quantique » et le « monde classique » ?



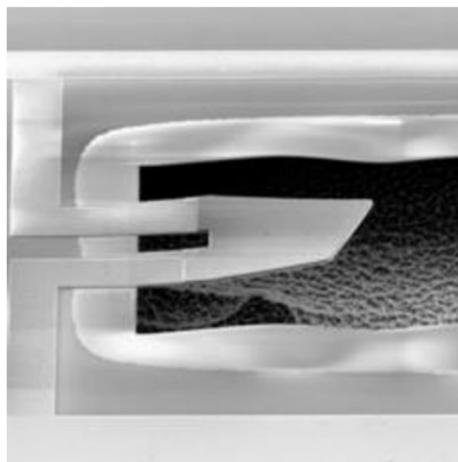
Chat de Schrödinger et univers multiples

- ▶ **1957, Everett** : interprétation **réaliste** possible si « **univers multiples** »
- ▶ **principe sous-jacent** \simeq **observateur lui-même quantique**, mais « conscient » d'un seul univers



Chaton de Schrödinger

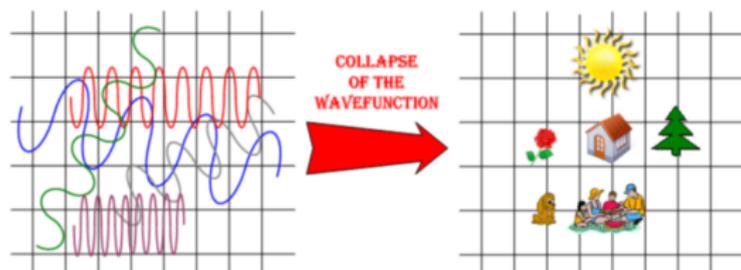
2010, Cleland *et al.* : micro-diapason placé dans une **superposition d'états de vibration** \implies « chaton de Schrödinger »



taille \sim 60 micro-mètres (visible à l'œil nu)

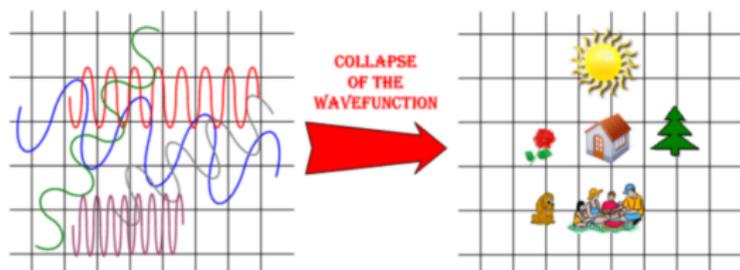
Où sont les chats mort-vivants ?

- ▶ **Zeh, 1970** : **interaction** d'un système quantique avec son **environnement**
 ⇒ disparition des états superposés (**décohérence**)
- ▶ **2012** : prix Nobel de physique pour **Serge Haroche** (manipulation de **photons isolés**, observation d'**états superposés** et de la **décohérence**, etc.)



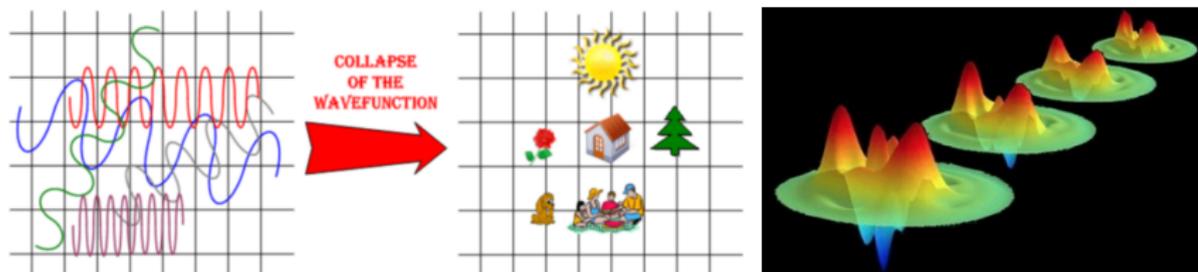
Où sont les chats mort-vivants ?

- ▶ **Zeh, 1970** : **interaction** d'un système quantique avec son **environnement**
 ⇒ **disparition des états superposés (décohérence)**
- ▶ **2012** : prix Nobel de physique pour **Serge Haroche** (manipulation de **photons isolés**, observation d'**états superposés** et de la **décohérence**, etc.)



Où sont les chats mort-vivants ?

- ▶ **Zeh, 1970** : **interaction** d'un système quantique avec son **environnement**
 ⇒ **disparition des états superposés (décohérence)**
- ▶ **2012** : prix Nobel de physique pour **Serge Haroche** (manipulation de **photons isolés**, observation d'**états superposés** et de la **décohérence**, etc.)

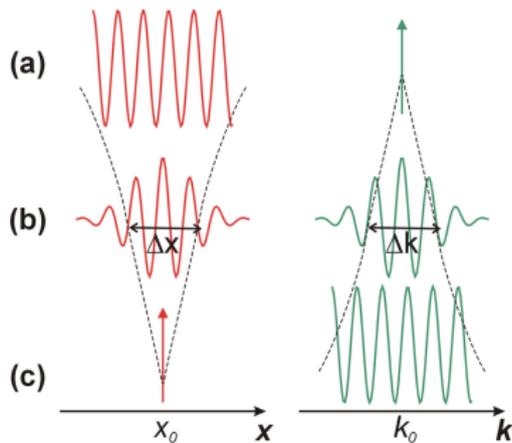


Autre étrangeté quantique : la complémentarité

- ▶ **complémentarité** : certaines **grandeurs physiques** sont **complémentaires**
 - ⇒ plus l'une est **déterminée précisément**, moins l'autre l'est, et réciproquement...
 - ⇒ relations d'**indétermination de Heisenberg (1927)** (et non pas « relations d'incertitude »)
- ▶ **exemples** : **vitesse** et **position** d'un objet ; **couleur de la lumière** et **nombre de photons** qu'elle contient (cf. **laser**)

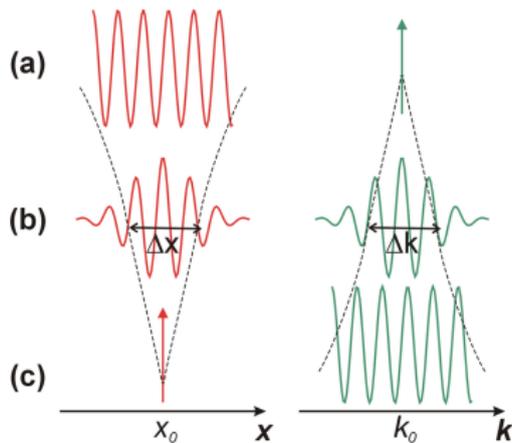
Autre étrangeté quantique : la complémentarité

- ▶ **complémentarité** : certaines **grandeurs physiques** sont **complémentaires**
 ⇒ plus l'une est **déterminée précisément**, moins l'autre l'est, et réciproquement...
 ⇒ relations d'**indétermination de Heisenberg (1927)** (et non pas « relations d'incertitude »)
- ▶ **exemples** : **vitesse** et **position** d'un objet ; **couleur** de la lumière et **nombre** de photons qu'elle contient (cf. laser)



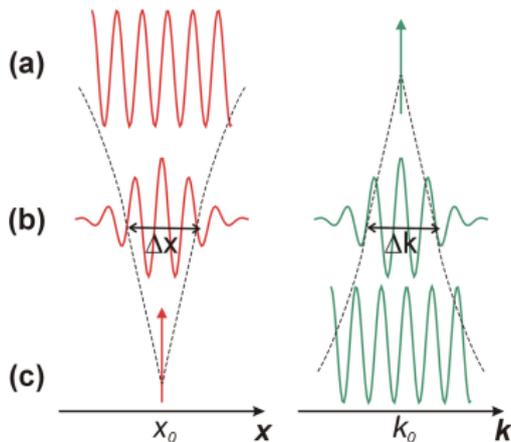
Autre étrangeté quantique : la complémentarité

- ▶ **complémentarité** : certaines grandeurs physiques sont **complémentaires**
 - ⇒ plus l'une est **déterminée précisément**, moins l'autre l'est, et réciproquement...
 - ⇒ relations d'**indétermination de Heisenberg (1927)** (et non pas « relations d'incertitude »)
- ▶ exemples : vitesse et position d'un objet ; couleur de la lumière et nombres de photons qu'elle contient (cf. laser)



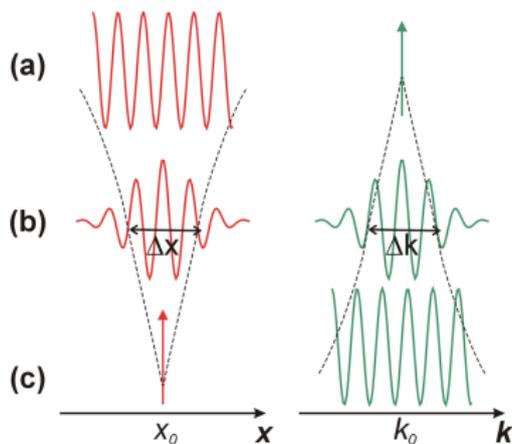
Autre étrangeté quantique : la complémentarité

- ▶ **complémentarité** : certaines grandeurs physiques sont **complémentaires**
 - ⇒ plus l'une est **déterminée précisément**, moins l'autre l'est, et réciproquement...
 - ⇒ relations d'**indétermination de Heisenberg (1927)** (et non pas « relations d'incertitude »)
- ▶ **exemples** : **vitesse** et **position** d'un objet ; **couleur** de la lumière et **nombre de photons** qu'elle contient (cf. **laser**)



Autre étrangeté quantique : la complémentarité

- ▶ **complémentarité** : certaines grandeurs physiques sont **complémentaires**
 - ⇒ plus l'une est **déterminée précisément**, moins l'autre l'est, et réciproquement...
 - ⇒ relations d'**indétermination de Heisenberg (1927)** (et non pas « relations d'incertitude »)
- ▶ **exemples** : **vitesse** et **position** d'un objet ; **couleur** de la lumière et **nombre de photons** qu'elle contient (cf. **laser**)



Contextualité et complémentarité

- ▶ **conséquence de la complémentarité** : toute **mesure d'une grandeur** peut influencer le « caractère déterminé » d'une **autre grandeur** qui serait mesurée **ultérieurement** (\simeq « **contextualité** »)
- ▶ **analogie humaine imaginaire** : personne ne peut avoir simultanément un **nom** et un **prénom**
- ▶ **exemple de chaîne expérimentale** :

être humain dans un état quantique initial quelconque

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

mesure prénom
 \implies

prénom déterminé/nom incertain

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

\implies possibilité d'obtenir des **résultats différents** pour le nom d'une **même personne** lors des deux « mesures »

Contextualité et complémentarité

- ▶ **conséquence de la complémentarité** : toute **mesure d'une grandeur** peut influencer le « caractère déterminé » d'une **autre grandeur** qui serait mesurée **ultérieurement** (\simeq « **contextualité** »)
- ▶ **analogie humaine imaginaire** : personne ne peut avoir simultanément un **nom** et un **prénom**
- ▶ **exemple de chaîne expérimentale** :

être humain dans un état quantique initial quelconque

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

mesure prénom
 \implies

prénom déterminé/nom incertain

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

\implies possibilité d'obtenir des **résultats différents** pour le nom d'une **même personne** lors des deux « mesures »

Contextualité et complémentarité

- ▶ **conséquence de la complémentarité** : toute **mesure d'une grandeur** peut influencer le « caractère déterminé » d'une **autre grandeur** qui serait mesurée **ultérieurement** (\simeq « **contextualité** »)
- ▶ **analogie humaine imaginaire** : personne ne peut avoir simultanément un **nom** et un **prénom**
- ▶ **exemple de chaîne expérimentale** :

être humain dans un état quantique initial quelconque

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

mesure prénom
 \implies

prénom déterminé/nom incertain

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

\implies possibilité d'obtenir des **résultats différents** pour le nom d'une **même personne** lors des deux « mesures »

Contextualité et complémentarité

- ▶ **conséquence de la complémentarité** : toute **mesure d'une grandeur** peut influencer le « caractère déterminé » d'une **autre grandeur** qui serait mesurée **ultérieurement** (\simeq « **contextualité** »)
- ▶ **analogie humaine imaginaire** : personne ne peut avoir simultanément un **nom** et un **prénom**
- ▶ **exemple de chaîne expérimentale** :

être humain dans un état quantique initial quelconque

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

mesure prénom
 \implies

prénom déterminé/nom incertain

mesure nom
 \implies

nom déterminé/prénom incertain

\implies possibilité d'obtenir des **résultats différents** pour le nom d'une **même personne** lors des **deux « mesures »**

Intrication et paradoxe EPR

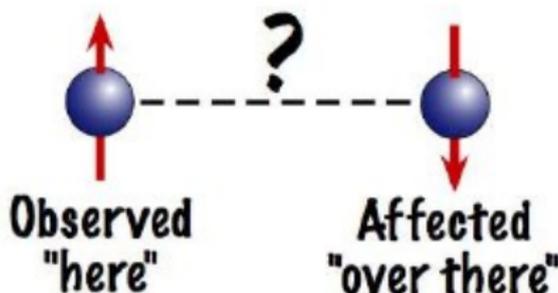
- ▶ **intrication quantique** \simeq deux **sous-parties** d'un système physique initialement liées qui « se partagent » une grandeur physique (**exemple** : deux **flèches** orientées dans deux **sens opposés**)
- ▶ orientation d'une des flèches déterminée au **moment de l'observation**
⇒ orientation de l'autre fixée instantanément **quelle que soit la distance qui les sépare**
- ▶ **1935, Einstein-Podolsky-Rosen** : violation de la **relativité restreinte** selon laquelle « aucune information ne peut être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière »?

Intrication et paradoxe EPR

- ▶ **intrication quantique** \simeq deux **sous-parties** d'un système physique initialement liées qui « se partagent » une grandeur physique (**exemple** : deux **flèches** orientées dans deux **sens opposés**)
- ▶ orientation d'une des flèches déterminée au **moment de l'observation**
⇒ orientation de l'autre fixée instantanément **quelle que soit la distance qui les sépare**
- ▶ **1935, Einstein-Podolsky-Rosen** : violation de la relativité restreinte selon laquelle « aucune information ne peut être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière »?

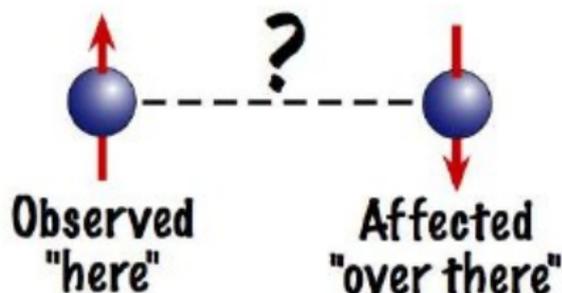
Intrication et paradoxe EPR

- ▶ **intrication quantique** \simeq deux **sous-parties** d'un système physique initialement liées qui « se partagent » une grandeur physique (**exemple** : deux **flèches** orientées dans deux **sens opposés**)
- ▶ orientation d'une des flèches déterminée au **moment de l'observation**
 \implies orientation de l'autre fixée instantanément **quelle que soit la distance qui les sépare**
- ▶ 1935, **Einstein-Podolsky-Rosen** : violation de la **relativité restreinte** selon laquelle « aucune information ne peut être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière » ?



Intrication et paradoxe EPR

- ▶ **intrication quantique** \simeq deux **sous-parties** d'un système physique initialement liées qui « se partagent » une grandeur physique (**exemple** : deux **flèches** orientées dans deux **sens opposés**)
- ▶ orientation d'une des flèches déterminée au **moment de l'observation**
 \implies orientation de l'autre fixée instantanément **quelle que soit la distance qui les sépare**
- ▶ **1935, Einstein-Podolsky-Rosen** : **violation de la relativité restreinte** selon laquelle « *aucune information ne peut être transmise à une vitesse supérieure à celle de la lumière* » ?

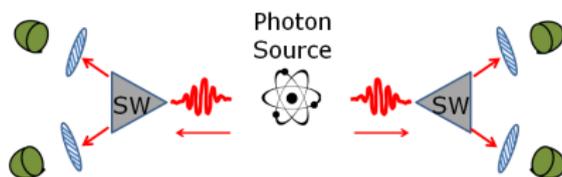


Intrication et non-localité

- ▶ **1964, Bell** : théorème prouvant certaines « **spécificités quantiques** »
⇒ **indétermination quantique** \neq indétermination classique (ignorance)
- ▶ **1982, Aspect** : **expérience** validant la **prédiction quantique** du paradoxe EPR, mais impossible de **communiquer** de cette façon car **résultat quantiquement aléatoire** de la mesure
- ▶ **conséquence possible** : « **téléportation** » quantique (depuis **1997**)
- ▶ **conclusion** : notion de **distance n'a pas de sens** pour les **systèmes intriqués**
⇒ **non-localité** (\simeq systèmes quantiques pas « localisés dans l'espace »)
- ▶ **2013, Université de Jérusalem** : intrication entre photons n'ayant **jamais co-existé**
- ▶ **2017, Université de Genève** : **16 millions d'atomes intriqués**

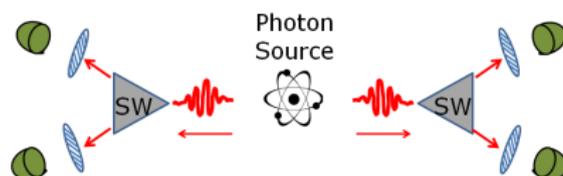
Intrication et non-localité

- ▶ **1964, Bell** : théorème prouvant certaines « **spécificités quantiques** »
 ⇒ **indétermination quantique** ≠ indétermination classique (ignorance)
- ▶ **1982, Aspect** : **expérience** validant la **prédiction quantique** du paradoxe EPR, mais impossible de **communiquer** de cette façon car **résultat quantiquement aléatoire de la mesure**
- ▶ **conséquence possible** : « **téléportation** » quantique (depuis **1997**)
- ▶ **conclusion** : notion de **distance n'a pas de sens** pour les **systèmes intriqués**
 ⇒ **non-localité** (\simeq systèmes quantiques pas « localisés dans l'espace »)
- ▶ **2013, Université de Jérusalem** : intrication entre photons n'ayant **jamais co-existé**
- ▶ **2017, Université de Genève** : **16 millions d'atomes intriqués**



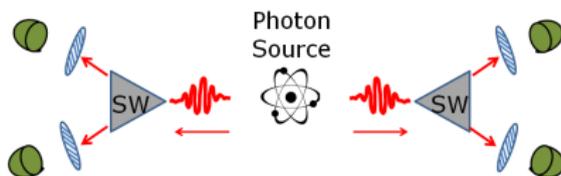
Intrication et non-localité

- ▶ **1964, Bell** : théorème prouvant certaines « **spécificités quantiques** »
 ⇒ **indétermination quantique** ≠ indétermination classique (ignorance)
- ▶ **1982, Aspect** : **expérience** validant la **prédiction quantique** du paradoxe EPR, mais impossible de **communiquer** de cette façon car **résultat quantiquement aléatoire de la mesure**
- ▶ **conséquence possible** : « **téléportation** » quantique (depuis **1997**)
- ▶ **conclusion** : notion de **distance n'a pas de sens** pour les **systèmes intriqués**
 ⇒ **non-localité** (\simeq systèmes quantiques pas « localisés dans l'espace »)
- ▶ **2013, Université de Jérusalem** : intrication entre photons n'ayant **jamais co-existé**
- ▶ **2017, Université de Genève** : **16 millions d'atomes intriqués**



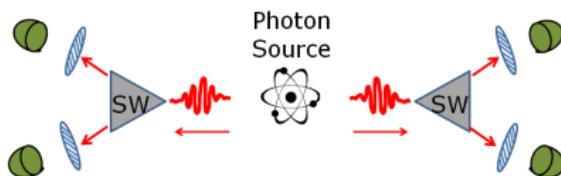
Intrication et non-localité

- ▶ **1964, Bell** : théorème prouvant certaines « **spécificités quantiques** »
 ⇒ **indétermination quantique** ≠ indétermination classique (ignorance)
- ▶ **1982, Aspect** : **expérience** validant la **prédiction quantique** du paradoxe EPR, mais impossible de **communiquer** de cette façon car **résultat quantiquement aléatoire de la mesure**
- ▶ **conséquence possible** : « **téléportation** » quantique (depuis **1997**)
- ▶ **conclusion** : notion de **distance n'a pas de sens** pour les **systèmes intriqués**
 ⇒ **non-localité** (\simeq systèmes quantiques pas « localisés dans l'espace »)
- ▶ **2013, Université de Jérusalem** : intrication entre photons n'ayant **jamais co-existé**
- ▶ **2017, Université de Genève** : **16 millions d'atomes intriqués**



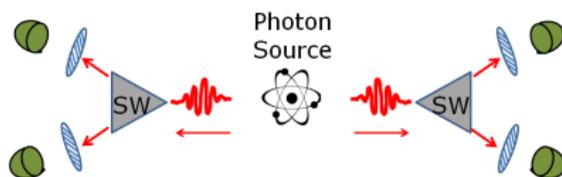
Intrication et non-localité

- ▶ **1964, Bell** : théorème prouvant certaines « **spécificités quantiques** »
 ⇒ **indétermination quantique** \neq indétermination classique (ignorance)
- ▶ **1982, Aspect** : **expérience** validant la **prédiction quantique** du paradoxe EPR, mais impossible de **communiquer** de cette façon car **résultat quantiquement aléatoire de la mesure**
- ▶ **conséquence possible** : « **téléportation** » quantique (depuis **1997**)
- ▶ **conclusion** : notion de **distance n'a pas de sens** pour les **systèmes intriqués**
 ⇒ **non-localité** (\simeq systèmes quantiques pas « localisés dans l'espace »)
- ▶ **2013, Université de Jérusalem** : intrication entre photons n'ayant **jamais co-existé**
- ▶ **2017, Université de Genève** : **16 millions d'atomes intriqués**



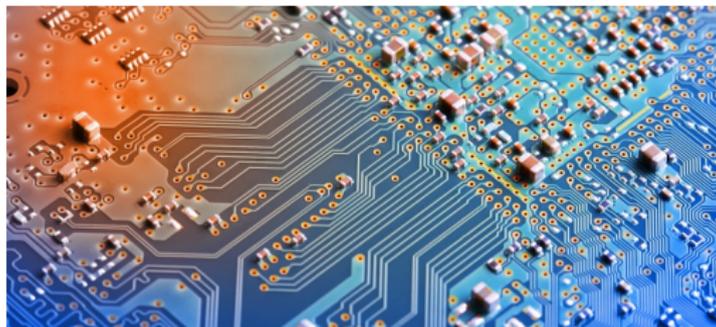
Intrication et non-localité

- ▶ **1964, Bell** : théorème prouvant certaines « **spécificités quantiques** »
 ⇒ **indétermination quantique** \neq indétermination classique (ignorance)
- ▶ **1982, Aspect** : **expérience** validant la **prédiction quantique** du paradoxe EPR, mais impossible de **communiquer** de cette façon car **résultat quantiquement aléatoire de la mesure**
- ▶ **conséquence possible** : « **téléportation** » quantique (depuis **1997**)
- ▶ **conclusion** : notion de **distance n'a pas de sens** pour les **systèmes intriqués**
 ⇒ **non-localité** (\simeq systèmes quantiques pas « localisés dans l'espace »)
- ▶ **2013, Université de Jérusalem** : intrication entre photons n'ayant **jamais co-existé**
- ▶ **2017, Université de Genève** : **16 millions d'atomes intriqués**



IV

Physique quantique : quelques révolutions expérimentales et technologiques



Électronique et matériaux

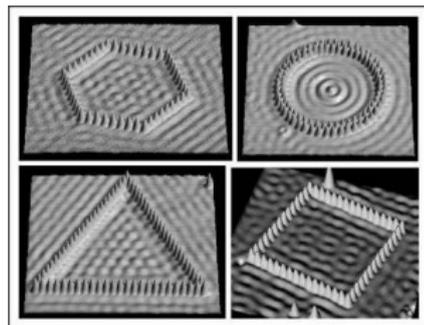
- ▶ transistor, semi-conducteurs et matériaux innovants \implies **miniaturisation**
- ▶ spintronique \implies effet magnétorésistif géant (disques durs actuels)
cf. Fert, Nobel 2007
- ▶ microscope à effet tunnel
- ▶ supraconducteur et superfluide \sim états quantiques macroscopiques
 \implies pas de résistance électrique
 \implies économie d'énergie, champs magnétiques intenses (IRM), etc.
(**limitation actuelle** : très basses températures nécessaires)

Électronique et matériaux

- ▶ transistor, semi-conducteurs et matériaux innovants \implies **miniaturisation**
- ▶ spintronique \implies effet magnétorésistif géant (disques durs actuels)
cf. **Fert**, Nobel 2007
- ▶ microscope à **effet tunnel**
- ▶ supraconducteur et superfluide \sim **états quantiques macroscopiques**
 \implies pas de **résistance électrique**
 \implies économie d'énergie, **champs magnétiques intenses (IRM)**, etc.
(**limitation actuelle** : très basses températures nécessaires)

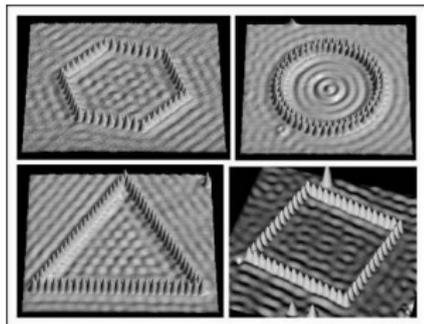
Électronique et matériaux

- ▶ transistor, semi-conducteurs et matériaux innovants \implies **miniaturisation**
- ▶ spintronique \implies effet magnétorésistif géant (disques durs actuels)
cf. **Fert**, Nobel 2007
- ▶ microscope à **effet tunnel**
- ▶ supraconducteur et superfluide \sim **états quantiques macroscopiques**
 \implies pas de **résistance électrique**
 \implies économie d'énergie, **champs magnétiques intenses (IRM)**, etc.
(**limitation actuelle** : très basses températures nécessaires)



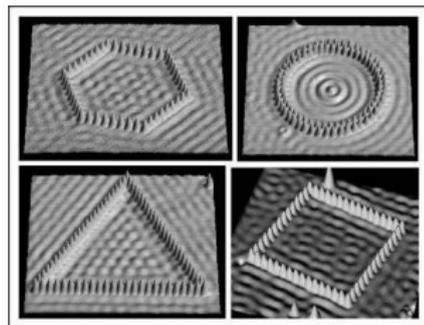
Électronique et matériaux

- ▶ transistor, semi-conducteurs et matériaux innovants \implies **miniaturisation**
- ▶ spintronique \implies effet magnétorésistif géant (disques durs actuels)
cf. **Fert**, Nobel 2007
- ▶ microscope à **effet tunnel**
- ▶ supraconducteur et superfluide \sim **états quantiques macroscopiques**
 \implies pas de résistance électrique
 \implies économie d'énergie, champs magnétiques intenses (IRM), etc.
(**limitation actuelle** : très basses températures nécessaires)



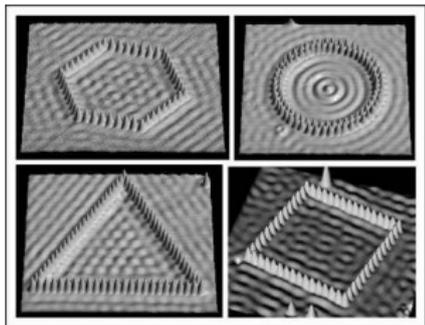
Électronique et matériaux

- ▶ transistor, semi-conducteurs et matériaux innovants \implies **miniaturisation**
- ▶ spintronique \implies effet magnétorésistif géant (disques durs actuels)
cf. **Fert**, Nobel 2007
- ▶ microscope à **effet tunnel**
- ▶ supraconducteur et superfluide \sim **états quantiques macroscopiques**
 \implies pas de **résistance électrique**
 \implies économie d'énergie, **champs magnétiques intenses (IRM)**, etc.
(**limitation actuelle** : très basses températures nécessaires)



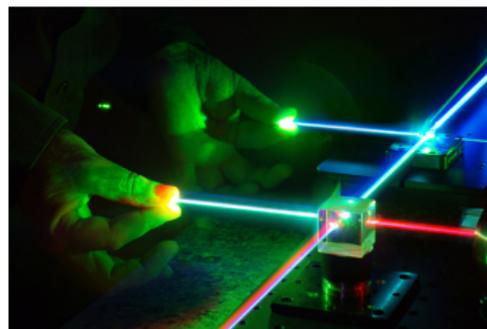
Électronique et matériaux

- ▶ transistor, semi-conducteurs et matériaux innovants \implies **miniaturisation**
- ▶ spintronique \implies effet magnétorésistif géant (disques durs actuels)
cf. **Fert**, Nobel 2007
- ▶ microscope à **effet tunnel**
- ▶ supraconducteur et superfluide \sim **états quantiques macroscopiques**
 \implies pas de **résistance électrique**
 \implies économie d'énergie, **champs magnétiques intenses (IRM)**, etc.
(**limitation actuelle** : très basses températures nécessaires)



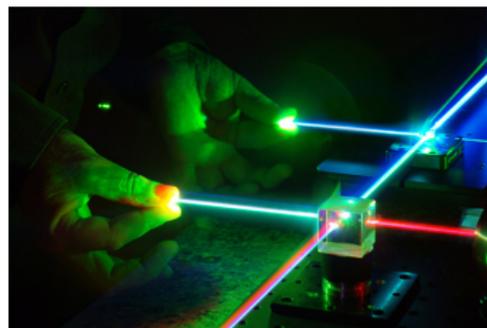
Optique quantique

- ▶ **laser** \implies transfert d'information, énergie concentrée (découpe), etc.
- ▶ **photonique** : composants à base de **lumière** et non d'électricité
 \implies systèmes plus **rapides** (cf. fibre optique)



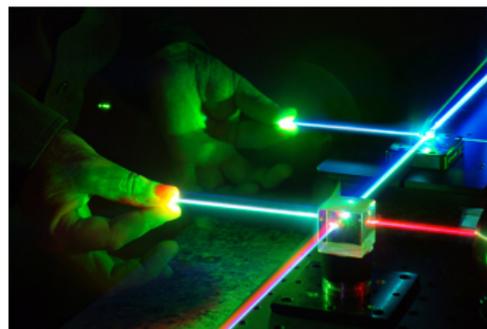
Optique quantique

- ▶ **laser** \implies transfert d'information, énergie concentrée (découpe), etc.
- ▶ **photonique** : composants à base de **lumière** et non d'électricité
 \implies systèmes plus **rapides** (cf. fibre optique)



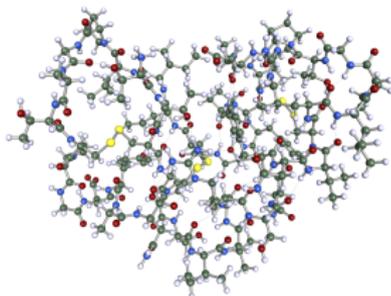
Optique quantique

- ▶ **laser** \implies transfert d'information, énergie concentrée (découpe), etc.
- ▶ **photonique** : composants à base de **lumière** et non d'électricité
 \implies systèmes plus **rapides** (cf. fibre optique)



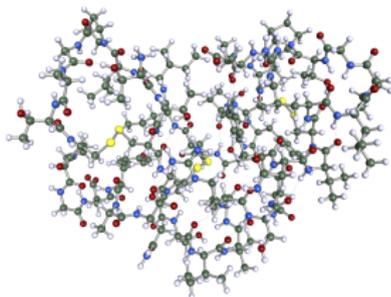
Chimie quantique, physique nucléaire et des particules

- ▶ **structure électronique** des atomes et molécules
⇒ fabrication de **nouvelles molécules**, etc.
- ▶ origine de la **radioactivité**, **énergie nucléaire** et fonctionnement des **étoiles**,
modèle standard de la **physique des particules**
- ▶ **antimatière** ⇒ en **imagerie médicale** (PET scan, tomographie par émission de positons)



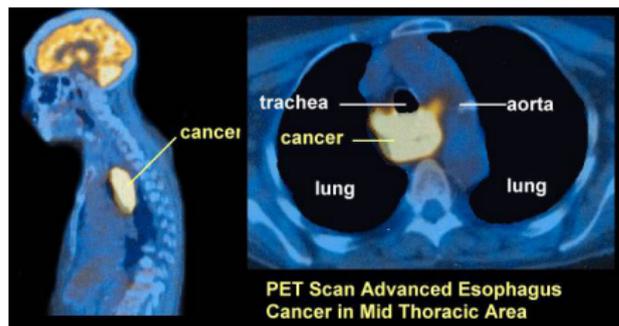
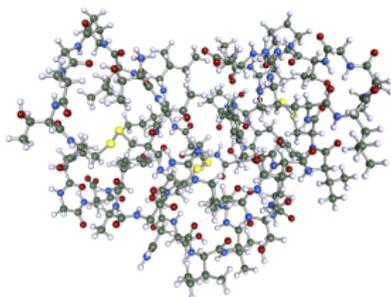
Chimie quantique, physique nucléaire et des particules

- ▶ **structure électronique** des atomes et molécules
⇒ fabrication de **nouvelles molécules**, etc.
- ▶ origine de la **radioactivité**, **énergie nucléaire** et fonctionnement des **étoiles**,
modèle standard de la **physique des particules**
- ▶ **antimatière** ⇒ en **imagerie médicale** (PET scan, tomographie par émission de positons)



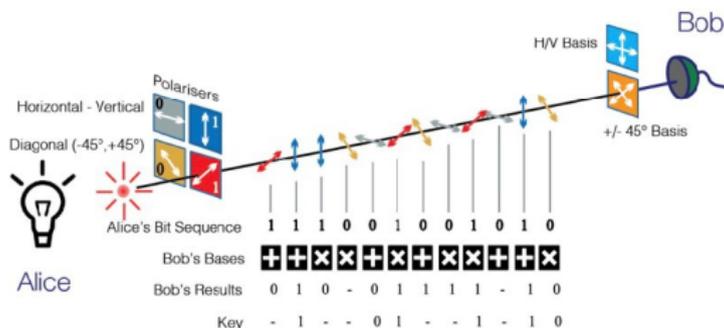
Chimie quantique, physique nucléaire et des particules

- ▶ **structure électronique** des atomes et molécules
⇒ fabrication de **nouvelles molécules**, etc.
- ▶ origine de la **radioactivité**, **énergie nucléaire** et fonctionnement des **étoiles**,
modèle standard de la **physique des particules**
- ▶ **antimatière** ⇒ en **imagerie médicale** (PET scan, tomographie par émission de positons)



Cryptographie quantique

- ▶ **cryptographie quantique** \implies sûreté augmentée (\simeq **intrication**)
 exemple : **2016**, Micius, satellite chinois à 500 km d'altitude
 \implies **communication quantiquement sécurisée** sur 7400 km de distance (Chine-Vienne)
- ▶ **principe** : état modifié si **espionnage**



Cryptographie quantique

- ▶ **cryptographie quantique** \implies sûreté augmentée (\simeq **intrication**)
exemple : **2016**, Micius, satellite chinois à 500 km d'altitude
 \implies communication quantiquement sécurisée sur 7400 km de distance (Chine-Vienne)
- ▶ **principe** : état modifié si **espionnage**



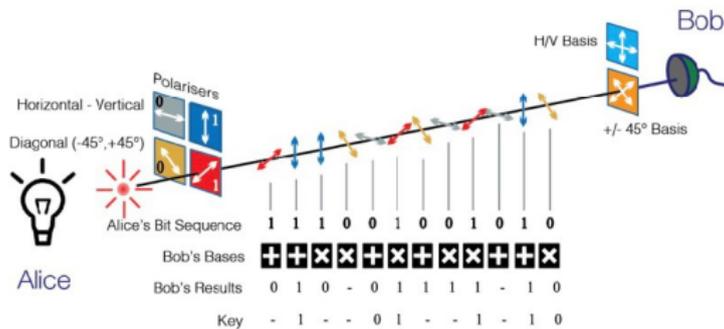
Cryptographie quantique

- ▶ **cryptographie quantique** \implies sûreté augmentée (\simeq **intrication**)
exemple : **2016**, Micius, satellite chinois à 500 km d'altitude
 \implies **communication quantiquement sécurisée** sur 7400 km de distance (Chine-Vienne)
- ▶ **principe** : état modifié si **espionnage**



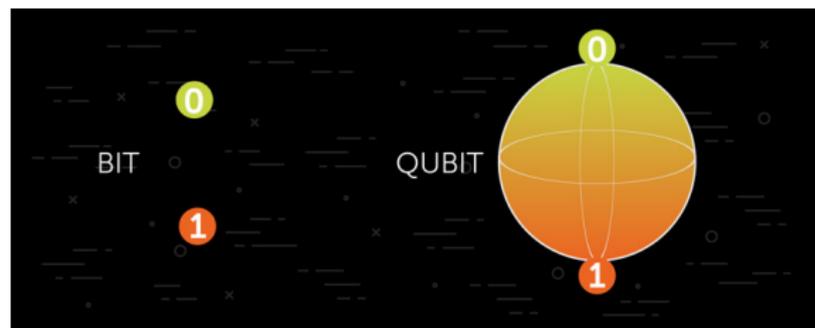
Cryptographie quantique

- ▶ **cryptographie quantique** \implies sûreté augmentée (\simeq **intrication**)
exemple : **2016**, Micius, satellite chinois à 500 km d'altitude
 \implies **communication quantiquement sécurisée** sur 7400 km de distance (Chine-Vienne)
- ▶ **principe** : état modifié si **espionnage**



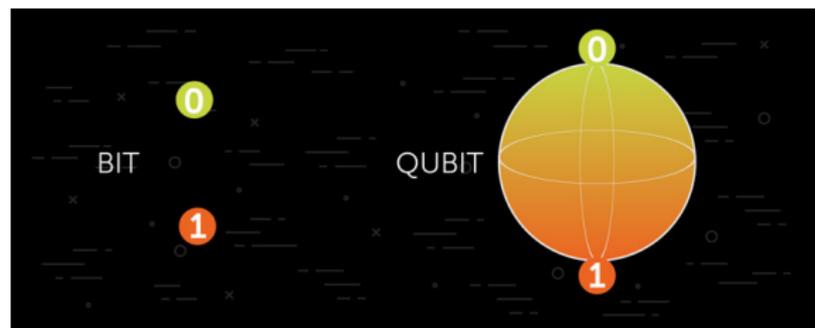
Ordinateurs quantiques

- ▶ **ordinateurs quantiques** et **q-bit** \implies plus **rapides**, plus **performants**
exemples : calcul fait en **quelques jours** au lieu de **milliers voire millions d'années**...
 - \implies « super-hacking » (\simeq **factorisation de grands nombres**), résolution de problèmes scientifiques, simulations numériques plus riches et réalistes, etc.
 - \implies gros investissements de **compagnies privées** et d'**états**
- ▶ **difficultés** : éviter la **décohérence** (superpositions cruciales)



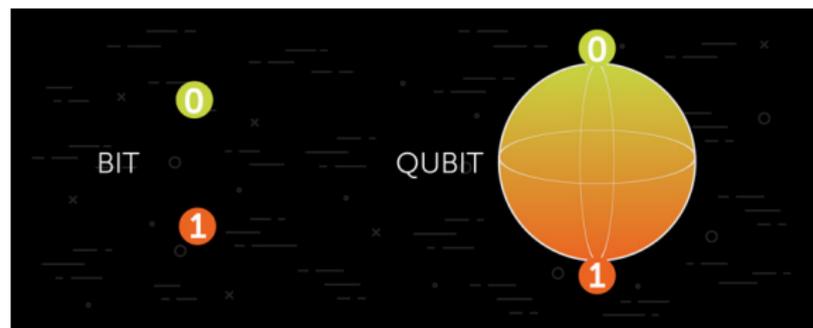
Ordinateurs quantiques

- ▶ ordinateurs quantiques et q-bit \implies plus rapides, plus performants
exemples : calcul fait en quelques jours au lieu de milliers voire millions d'années...
 - \implies « super-hacking » (\simeq factorisation de grands nombres), résolution de problèmes scientifiques, simulations numériques plus riches et réalistes, etc.
 - \implies gros investissements de compagnies privées et d'états
- ▶ difficultés : éviter la décohérence (superpositions cruciales)



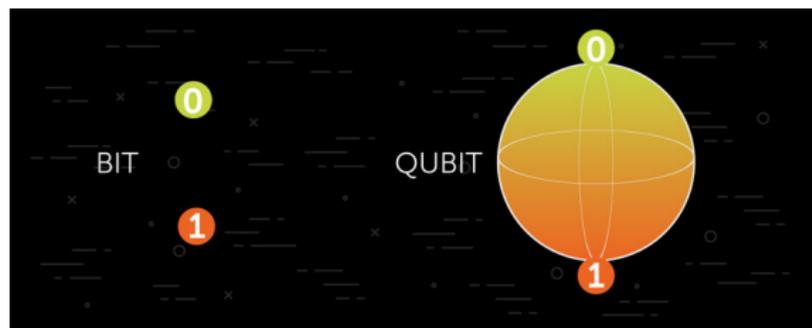
Ordinateurs quantiques

- ▶ ordinateurs quantiques et q-bit \implies plus rapides, plus performants
exemples : calcul fait en quelques jours au lieu de milliers voire millions d'années...
 - \implies « super-hacking » (\simeq factorisation de grands nombres), résolution de problèmes scientifiques, simulations numériques plus riches et réalistes, etc.
 - \implies gros investissements de compagnies privées et d'états
- ▶ difficultés : éviter la décohérence (superpositions cruciales)



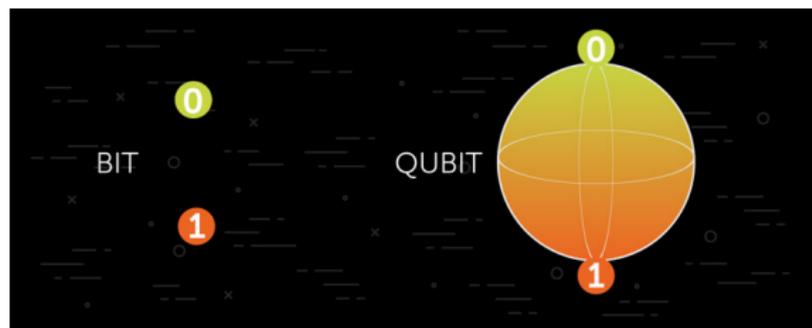
Ordinateurs quantiques

- ▶ ordinateurs quantiques et q-bit \implies plus rapides, plus performants
exemples : calcul fait en quelques jours au lieu de milliers voire millions d'années...
 - \implies « super-hacking » (\simeq factorisation de grands nombres), résolution de problèmes scientifiques, simulations numériques plus riches et réalistes, etc.
 - \implies gros investissements de compagnies privées et d'états
- ▶ difficultés : éviter la décohérence (superpositions cruciales)



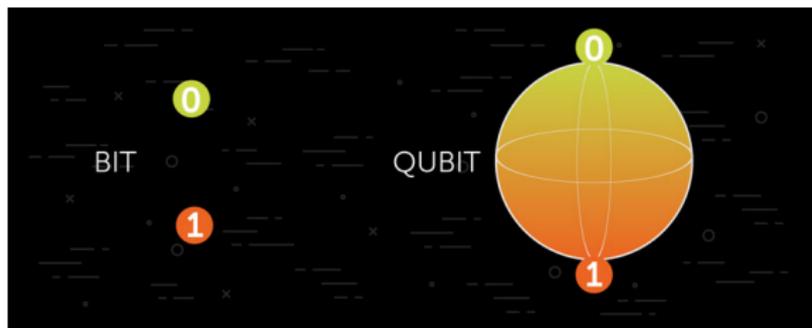
Ordinateurs quantiques

- ▶ ordinateurs quantiques et q-bit \implies plus rapides, plus performants
exemples : calcul fait en quelques jours au lieu de milliers voire millions d'années...
 - \implies « super-hacking » (\simeq factorisation de grands nombres), résolution de problèmes scientifiques, simulations numériques plus riches et réalistes, etc.
 - \implies gros investissements de compagnies privées et d'états
- ▶ difficultés : éviter la décohérence (superpositions cruciales)



Ordinateurs quantiques

- ▶ ordinateurs quantiques et q-bit \implies plus rapides, plus performants
exemples : calcul fait en quelques jours au lieu de milliers voire millions d'années...
 - \implies « super-hacking » (\simeq factorisation de grands nombres), résolution de problèmes scientifiques, simulations numériques plus riches et réalistes, etc.
 - \implies gros investissements de compagnies privées et d'états
- ▶ **difficultés** : éviter la **décohérence** (superpositions cruciales) et besoin d'**algorithmes quantiques**



Vers la « Suprématie quantique » ?

- **Septembre 2019** : **Google** présente résultats avec 49 q-bits
⇒ calcul fait en 2,5 jours au lieu de 10 000 ans...
- **Décembre 2020** : **Chine** présente « Jiuzhang », premier ordinateur quantique **photonique** avec 76 q-bits
⇒ 20 s au lieu de 600 millions d'années...
- **Octobre 2021** : **Chine** présente « Jiuzhang 2.0 » dix fois plus rapide...

Vers la « Suprématie quantique » ?

- **Septembre 2019** : **Google** présente résultats avec 49 q-bits
⇒ calcul fait en **2,5 jours au lieu de 10 000 ans...**
- **Décembre 2020** : **Chine** présente « Jiuzhang », premier ordinateur quantique **photonique** avec 76 q-bits
⇒ **20 s au lieu de 600 millions d'années...**
- **Octobre 2021** : **Chine** présente « Jiuzhang 2.0 » dix fois plus rapide...

Vers la « Suprématie quantique » ?

- **Septembre 2019** : **Google** présente résultats avec 49 q-bits
⇒ calcul fait en **2,5 jours au lieu de 10 000 ans...**
- **Décembre 2020** : **Chine** présente « Jiuzhang », premier ordinateur quantique **photonique** avec 76 q-bits
⇒ **20 s au lieu de 600 millions d'années...**
- **Octobre 2021** : **Chine** présente « Jiuzhang 2.0 » dix fois plus rapide...



Vers la « Suprématie quantique » ?

- **Septembre 2019** : **Google** présente résultats avec 49 q-bits
⇒ calcul fait en **2,5 jours au lieu de 10 000 ans...**
- **Décembre 2020** : **Chine** présente « Jiuzhang », premier ordinateur quantique **photonique** avec 76 q-bits
⇒ **20 s au lieu de 600 millions d'années...**
- **Octobre 2021** : **Chine** présente « Jiuzhang 2.0 » dix fois plus rapide...

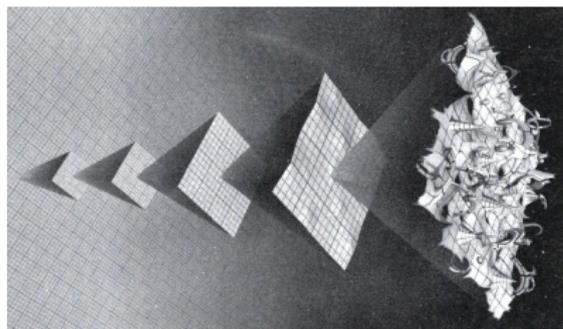


Vers la « Suprématie quantique » ?

- **Septembre 2019** : **Google** présente résultats avec 49 q-bits
⇒ calcul fait en **2,5 jours au lieu de 10 000 ans...**
- **Décembre 2020** : **Chine** présente « Jiuzhang », premier ordinateur quantique **photonique** avec 76 q-bits
⇒ **20 s au lieu de 600 millions d'années...**
- **Octobre 2021** : **Chine** présente « Jiuzhang 2.0 » dix fois plus rapide...



Épilogue : les révolutions à venir



Le mystère du monde quantique

- ▶ **remise en cause** de nombreux *a priori* sur la « nature de la réalité » : pas de **corpuscules** ni d'**ondes** ; existence de propriétés **contextuelles** ; influence de l'**acte de mesure** ; résultat de toute mesure **probabiliste** ; disparition de la notion de **localité**, etc.
- ▶ théorie **abstraite et mathématiques** dont l'**interprétation** n'est pas simple (car en désaccord avec notre « perception directe » du monde), mais dont le socle théorique est précis et clair : **applications technologiques** multiples, explication **quantitative** de phénomènes naturels, etc.
- ▶ révolution technologique et sociétale à venir
 ⇒ « **plan quantique** » : 1,8 milliard d'euros sur 5 ans (Gouvernement français, janvier 2021)
- ▶ **implications** profondes sur ce que sont l'**espace**, le **temps** et la **matière** quand on prend aussi en compte la **relativité einsteinienne** (restreinte et générale)
- ▶ **aura de mystère** ⇒ très appréciée des **pseudo-scientifiques** : « **médecine quantique** », « **thérapies quantiques** », « **psychologie quantique** », etc. (!?!)

Le mystère du monde quantique

- ▶ **remise en cause** de nombreux *a priori* sur la « nature de la réalité » : pas de **corpuscules** ni d'**ondes** ; existence de propriétés **contextuelles** ; influence de l'**acte de mesure** ; résultat de toute mesure **probabiliste** ; disparition de la notion de **localité**, etc.
- ▶ théorie **abstraite et mathématiques** dont l'**interprétation** n'est pas simple (car en désaccord avec notre « perception directe » du monde), mais dont le socle théorique est précis et clair : **applications technologiques** multiples, **explication quantitative de phénomènes naturels**, etc.
- ▶ révolution technologique et sociétale à venir
 - ⇒ « **plan quantique** » : 1,8 milliard d'euros sur 5 ans (Gouvernement français, janvier 2021)
- ▶ **implications** profondes sur ce que sont l'**espace**, le **temps** et la **matière** quand on prend aussi en compte la **relativité einsteinienne** (restreinte et générale)
- ▶ **aura de mystère** ⇒ très appréciée des **pseudo-scientifiques** : « **médecine quantique** », « **thérapies quantiques** », « **psychologie quantique** », etc. (!?!)

Le mystère du monde quantique

- ▶ **remise en cause** de nombreux *a priori* sur la « nature de la réalité » : pas de **corpuscules** ni d'**ondes** ; existence de propriétés **contextuelles** ; influence de l'**acte de mesure** ; résultat de toute mesure **probabiliste** ; disparition de la notion de **localité**, etc.
- ▶ théorie **abstraite et mathématiques** dont l'**interprétation** n'est pas simple (car en désaccord avec notre « perception directe » du monde), mais dont le socle théorique est précis et clair : **applications technologiques** multiples, **explication quantitative de phénomènes naturels**, etc.
- ▶ **révolution technologique et sociétale à venir**
 - ⇒ « **plan quantique** » : 1,8 milliard d'euros sur 5 ans (Gouvernement français, janvier 2021)
- ▶ **implications** profondes sur ce que sont l'**espace**, le **temps** et la **matière** quand on prend aussi en compte la **relativité einsteinienne** (restreinte et générale)
- ▶ **aura de mystère** ⇒ très appréciée des **pseudo-scientifiques** : « **médecine quantique** », « **thérapies quantiques** », « **psychologie quantique** », etc. (!?!)

Le mystère du monde quantique

- ▶ **remise en cause** de nombreux *a priori* sur la « nature de la réalité » : pas de **corpuscules** ni d'**ondes** ; existence de propriétés **contextuelles** ; influence de l'**acte de mesure** ; résultat de toute mesure **probabiliste** ; disparition de la notion de **localité**, etc.
- ▶ théorie **abstraite et mathématiques** dont l'**interprétation** n'est pas simple (car en désaccord avec notre « perception directe » du monde), mais dont le socle théorique est précis et clair : **applications technologiques** multiples, **explication quantitative de phénomènes naturels**, etc.
- ▶ **révolution technologique et sociétale à venir**
 - ⇒ « **plan quantique** » : 1,8 milliard d'euros sur 5 ans (**Gouvernement français, janvier 2021**)
- ▶ **implications** profondes sur ce que sont l'**espace**, le **temps** et la **matière** quand on prend aussi en compte la **relativité einsteinienne** (restreinte et générale)
- ▶ **aura de mystère** ⇒ très appréciée des **pseudo-scientifiques** : « **médecine quantique** », « **thérapies quantiques** », « **psychologie quantique** », etc. (!?!)

Le mystère du monde quantique

- ▶ **remise en cause** de nombreux *a priori* sur la « nature de la réalité » : pas de **corpuscules** ni d'**ondes** ; existence de propriétés **contextuelles** ; influence de l'**acte de mesure** ; résultat de toute mesure **probabiliste** ; disparition de la notion de **localité**, etc.
- ▶ théorie **abstraite et mathématiques** dont l'**interprétation** n'est pas simple (car en désaccord avec notre « perception directe » du monde), mais dont le socle théorique est précis et clair : **applications technologiques** multiples, **explication quantitative de phénomènes naturels**, etc.
- ▶ **révolution technologique et sociétale** à venir
 - ⇒ « **plan quantique** » : 1,8 milliard d'euros sur 5 ans (**Gouvernement français, janvier 2021**)
- ▶ **implications** profondes sur ce que sont l'**espace**, le **temps** et la **matière** quand on prend aussi en compte la **relativité einsteinienne** (restreinte et générale)
- ▶ **aura de mystère** ⇒ très appréciée des **pseudo-scientifiques** : « **médecine quantique** », « **thérapies quantiques** », « **psychologie quantique** », etc. (!?!)

Le mystère du monde quantique

- ▶ **remise en cause** de nombreux *a priori* sur la « nature de la réalité » : pas de **corpuscules** ni d'**ondes** ; existence de propriétés **contextuelles** ; influence de l'**acte de mesure** ; résultat de toute mesure **probabiliste** ; disparition de la notion de **localité**, etc.
- ▶ théorie **abstraite et mathématiques** dont l'**interprétation** n'est pas simple (car en désaccord avec notre « perception directe » du monde), mais dont le socle théorique est précis et clair : **applications technologiques** multiples, **explication quantitative de phénomènes naturels**, etc.
- ▶ **révolution technologique et sociétale** à venir
 - ⇒ « **plan quantique** » : 1,8 milliard d'euros sur 5 ans (**Gouvernement français, janvier 2021**)
- ▶ **implications** profondes sur ce que sont l'**espace**, le **temps** et la **matière** quand on prend aussi en compte la **relativité einsteinienne** (restreinte et générale)
- ▶ **aura de mystère** ⇒ très appréciée des **pseudo-scientifiques** : « **médecine quantique** », « **thérapies quantiques** », « **psychologie quantique** », etc. (!?!)

Werner Heisenberg : « *La théorie quantique fournit une illustration frappante du fait que l'on peut parfaitement comprendre un phénomène tout en étant incapable d'en parler autrement qu'à l'aide d'images et de paraboles* »

Quelques références

Livres (\simeq par difficulté croissante) :

- Stannard & Gamow, *Le Nouveau Monde de M. Tompkins*
- Feynman, *Lumière et matière, une étrange histoire*
- Einstein & Infeld, *L'évolution des idées en physique*
- Damour & Burniat, *Le mystère du monde quantique* (BD, Prix des lycéens)
- Mouchet, *L'étrange subtilité quantique*
- Haroche, *La Lumière révélée : De la lunette de Galilée à l'étrangeté quantique*
- d'Espagnat, *Le réel voilé*

Sites web :

<https://toutestquantique.fr/> : [site avec nombreuses animations](#)

<https://lejournal.cnrs.fr/billets/quest-ce-que-le-hasard-quantique>