

Physique du temps / temps de la physique IV :

ultimes fissures dans la physique classique,
physique microscopique et fin des certitudes

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique, Univ. Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

UE libre « Temps »

Résumé des épisodes précédents

Temps de la physique newtonienne

- temps linéaire
- universel (partout le même)
- absolu (indépendant de tout phénomène ou observateur)
- notion de simultanéité absolue

Temps et espace relativistes

- durées et distances dépendent de l'observateur mais aussi de l'énergie présente → espace-temps pas absolu
- définition locale du temps

Questions et limites de la théorie

premiers instants de l'Univers et intérieur des trous noirs ?

→ singularités (= infinis) témoignent des limites de la théorie

→ besoin de savoir décrire l'espace-temps aux toutes petites échelles...

- 1 Flèche du temps et déterminisme
- 2 Éternité et passage du temps
- 3 L'étrange temps microscopique

1

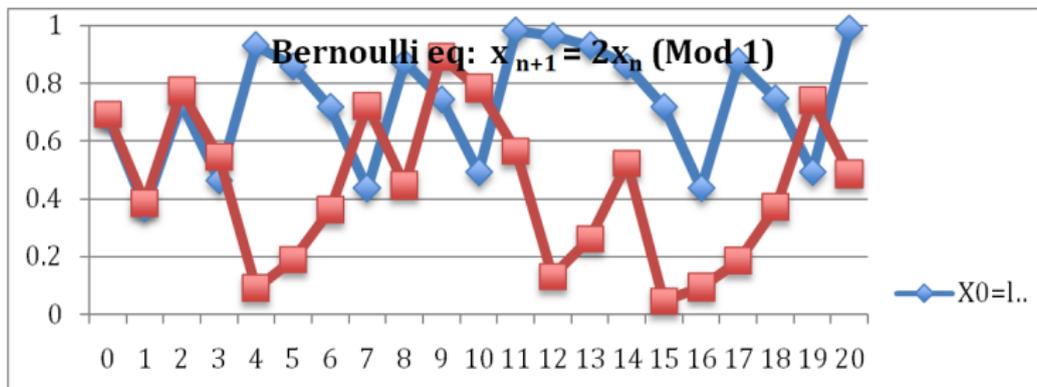
Flèche du temps et déterminisme



Déterminisme

Les mêmes causes donnent les mêmes effets

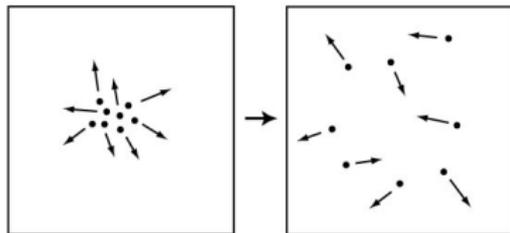
- principe apparemment valable à notre échelle
ex. : objet lâché \rightarrow chute libre
- réalité plus complexe
ex. : nombre de débris? (chaos possible)
- sensibilité aux conditions initiales
- impossibilité de prédictions fiables à long terme
 \rightarrow comportement probabiliste en pratique (météo, diffusion, etc.)



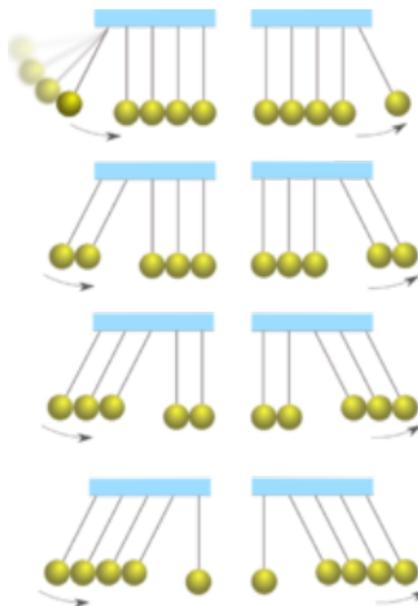
Déterminisme fondamental ?

Indéterminisme

- si « beaucoup » de « degrés de liberté »
- si précision « insuffisante » dans les mesures



résultat de la collision imprévisible

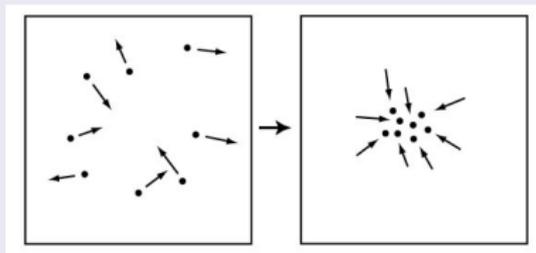


résultat de la collision prévisible

Irréversibilité et flèche du temps

Monde macroscopique

- « film qui passe à l'envers » :
distinction possible ou impossible
→ flèche du temps (passé distinct
du futur)
- **en physique relativiste** : reste vrai
mais « localement » ou entre
événements causalement liés

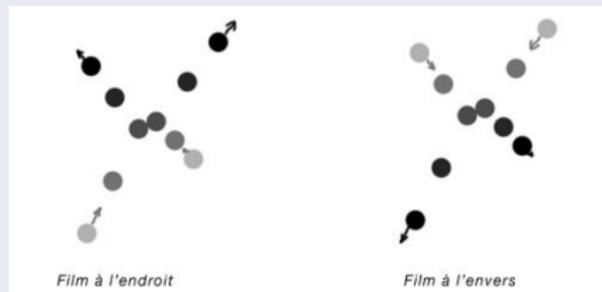


événement peu crédible en inversant
le sens du temps → **irréversibilité** des
phénomènes

Réversibilité et absence de flèche du temps

Monde microscopique

- **pas de flèche du temps** si peu de corpuscules
→ situation possible obtenue en jouant le film à l'envers
- réversibilité « masquée » si beaucoup de particules ?



impossible de distinguer le sens
« correct » d'écoulement du temps
→ phénomène réversible

Réversibilité fluide



deux colorants dans un fluide mélangés
par la rotation de celui-ci



en inversant le sens de rotation on
« démélange » les deux colorants

Temps « statistique » ?

flèche du temps et indéterminisme = « effets statistiques » ?
(question : lien avec flèche du temps cosmologique ?)

2

Éternité et passage du temps



Matière discrète ou continue

Constitution de la matière

- question de la **divisibilité**?
→ **matière discrète ou continue**?
- quatre éléments (**Empédocle** –490 – –435 ?) :
Eau, Terre, Feu, Air
- **solides** de **Platon**
- quatre **qualités élémentales** pour **Aristote**
(monde sublunaire) + **cinquième élément**, la
« **quinte essence** » ou l'éther, pour le Cosmos
→ vision **continue** → **pas de vide**

Le Tétraèdre, le Feu



L'Icosaèdre, l'Eau



L'Octaèdre, l'Air



L'Hexahèdre, la Terre



Le Dodécaèdre, l'Univers



Atomes antiques

Limite à la divisibilité de la matière (**Démocrite**, -460 – -370)

*Si tout corps est divisible à l'infini, de deux choses l'une : ou il ne restera rien ou il restera quelque chose. Dans le premier cas la matière n'aurait qu'une existence virtuelle, dans le second cas on se pose la question : que reste-t-il ? La réponse la plus logique, c'est l'existence d'éléments réels, indivisibles et **insécables** appelés donc **atomes**.*



Démocrite suppose l'existence de différents types d'**atomes crochus immuables**
→ idée (presque) oubliée pendant longtemps...

Le retour des atomes

Chimie du XVIII^{ème}

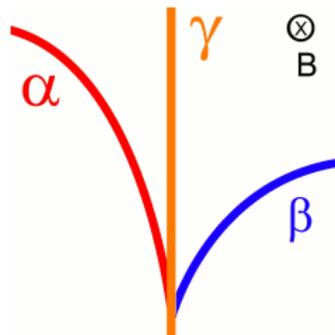
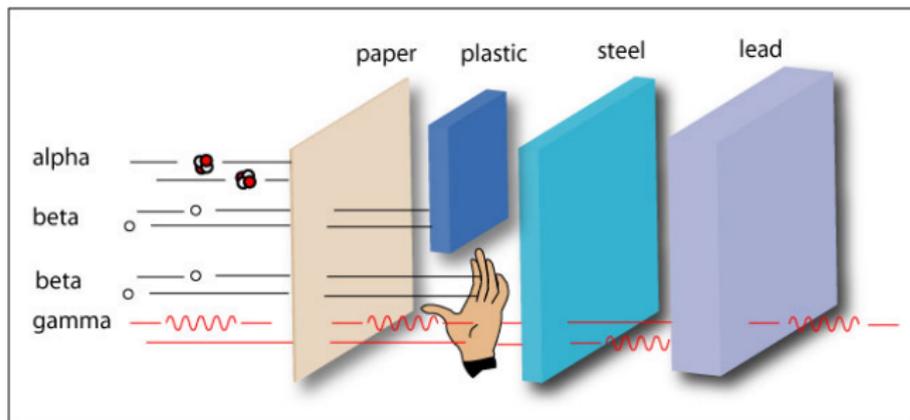
- mesure de quantités de matière lors de **réactions chimiques** avec gaz
→ principe de **conservation de la masse** (citation Lavoisier)
- **Lavoisier, 1785** : décomposition de l'eau
→ notion de **molécule** (**Avogadro** en 1811)

Mendeleiev

- **1869** : éléments classés selon leur **masse** et leurs **propriétés chimiques**
- **masses des « atomes »** = **multiples** de la masse de l'hydrogène (plus léger)
- **prédiction de nouveaux éléments** (cases vides)

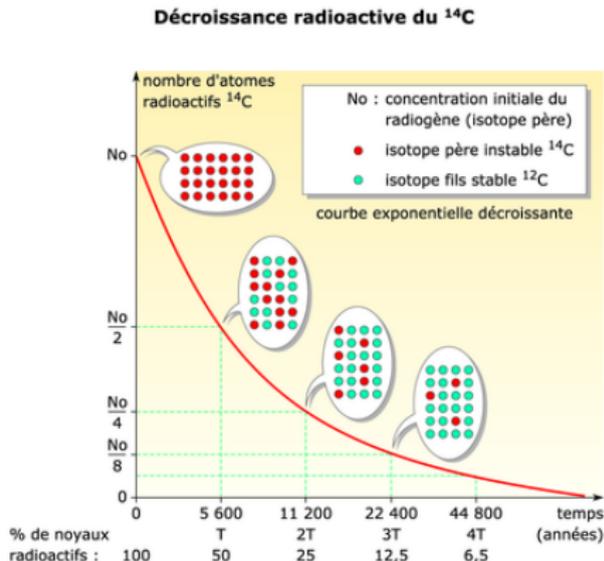
Les atomes ne sont pas éternels

- **1895, Röntgen** : découverte des **rayons X** (produits par décharge de tubes cathodiques) ;
- **1896, Becquerel & les Curie** : découverte de la **radio-activité** naturelle
→ plusieurs types de « rayonnement » (alpha, beta, gamma) ;
- **1901, Rutherford & Soddy** : radio-activité = **transmutation**
→ les atomes sont-ils vraiment insécables ?



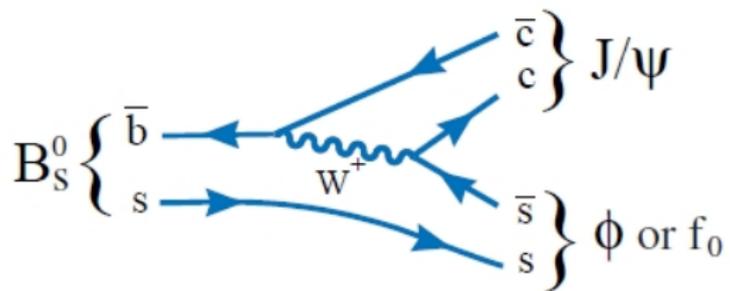
Atomes quantiques

- comportement **probabiliste** des particules instables
- probabilité de désintégration par unité de temps
→ « temps de demi-vie »
- sens seulement pour un **ensemble de particules** : **une particule isolée n'a pas d'âge** !
→ la **durée écoulée n'a d'existence que statistique** !
- version moderne : particule isolée décrite par un **objet mathématique abstrait** (« vecteur d'état »)



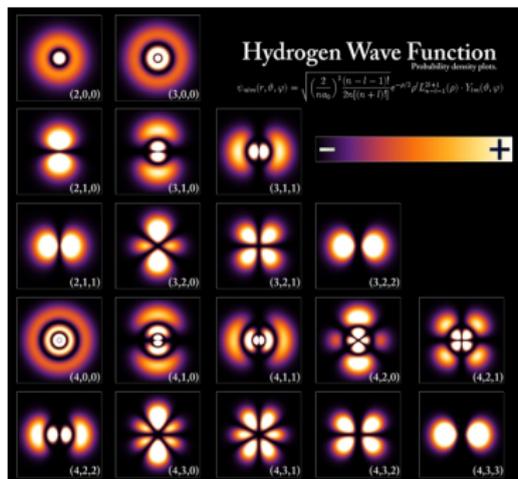
3

L'étrange temps microscopique



Indétermination et onde de probabilité

- **observation** change l'état : particule « vivante » ou pas
- limite **intrinsèque** sur la précision
 - **indétermination de Heisenberg** (ex. : position / vitesse)
 - **plus de déterminisme**
- version moderne : atome quantique avec **probabilité de présence**

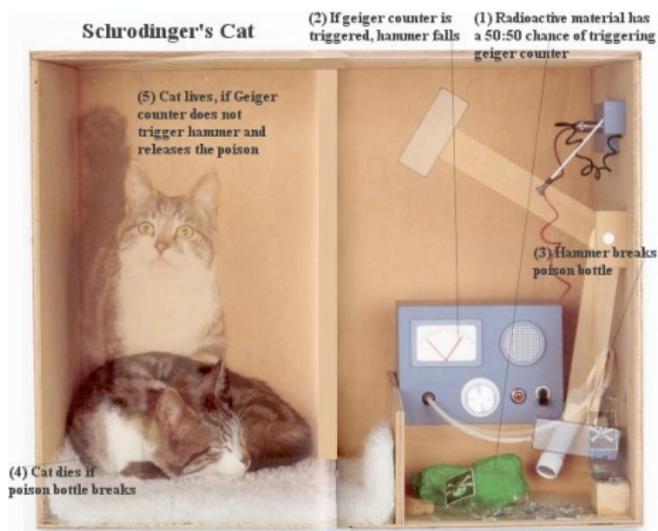


Chat de Schrödinger

- chat dans boîte avec atome **radioactif** et poison
- le chat est décrit par une **combinaison d'états** :

$$|chat\rangle = \frac{|mort\rangle + |vivant\rangle}{\sqrt{2}}$$

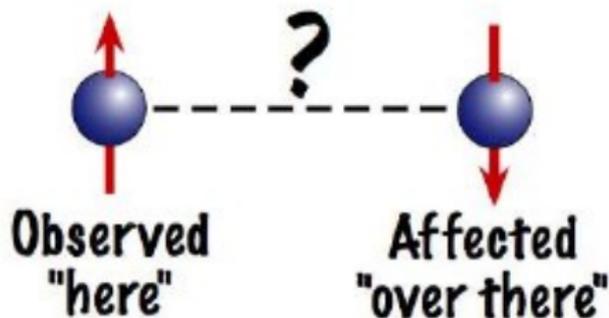
- observation \rightarrow état vivant ou mort
 \rightarrow « **le réel est la somme de tous les possibles** »



Datation quantique et intrication

Quand est mort le chat ?

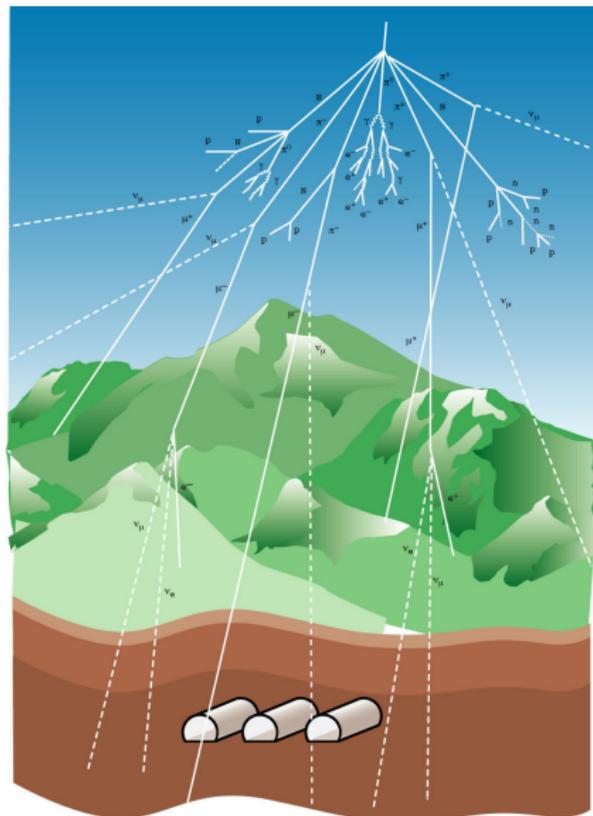
- état décidé au **moment de l'observation**
→ **observation** \equiv événement daté et distinction avant/après
- problème si deux particules liées → « propagation **instantanée** » ?
- impossibilité de penser les deux particules (qui ont interagi autrefois) comme deux entités séparées
→ « états intriqués » pour lesquels la notion de distance n'a pas de sens



Bestiaires des particules

Rayons cosmiques

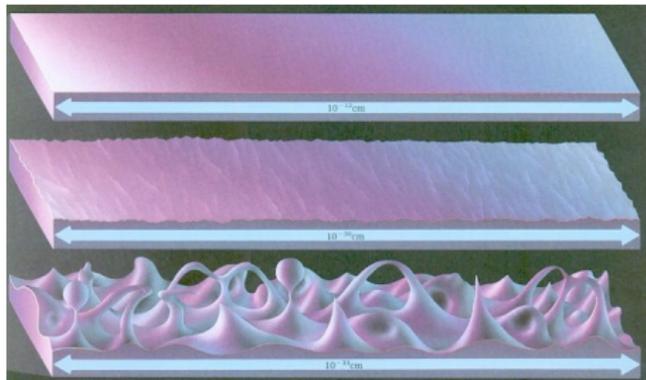
- **1912, Hess** : atmosphère frappée en continu par des **rayons cosmiques**
- **1932, Anderson** : découverte du **positon** (semblable à e^- mais charge positive) → **antimatière** prédite peu avant par **Dirac**
- **1964, violation de CP** : parfois matière et antimatière « voient » une **flèche du temps aux échelles subatomiques**



Indéterminisme quantique et fluctuations

Vide et espace-temps

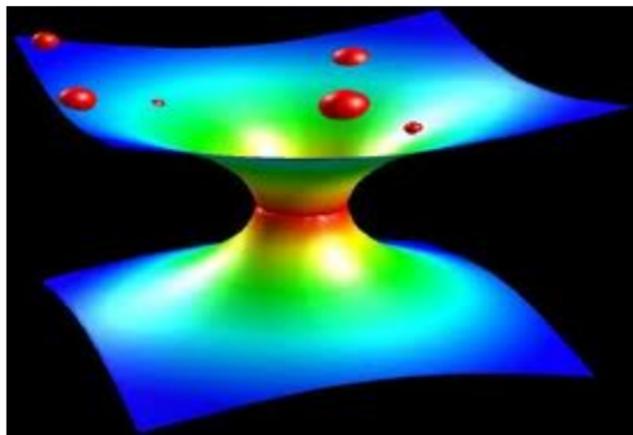
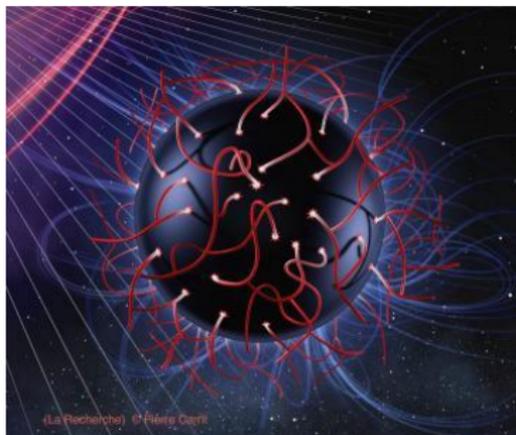
- le vide au sens classique est « trop » déterminé
→ vide quantique fluctuant (particules virtuelles)
- principes quantiques s'appliquent pour tous les systèmes physiques
→ espace-temps quantique
→ aux petites échelles on voit des fluctuations quantiques
→ « mousse d'espace-temps » (nombreux mini-trous de vers)
→ notion d'espace-temps obsolète ! (espace-temps discret et probabiliste)



Gravitation et physique quantique

Trous noirs quantiques

- rayonnement quantique (de **Hawking**) : les trous noirs s'évaporent...
- les singularités ne sont plus de « vrais » infinis → univers dans trou noir ?



Résumé final

Temps classique

- temps universel et absolu
- durées et distances absolues
- simultanéité et chronologie absolues
- déterminisme

Temps moderne

- durées et distances dépendent de l'observateur mais aussi de l'énergie présente → espace-temps pas absolu
- pas de temps (simultanéité, durée, chronologie) absolu ou universel : notions locales
- possibilité de régions causalement coupées (horizon)
- naissance et mort du temps, de l'espace et de la matière ?
- nature intrinsèquement probabiliste
- notion émergente d'espace-temps ? (utile à nos échelles mais sans existence fondamentale)

Limites de la physique actuelle ?

Questions ouvertes

- origine de la flèche du temps ?
- description cohérente de l'acte d'observation
- observateur quantique ?
- **décohérence** : pas de superposition d'états à notre échelle ?
- théorie de la gravitation quantique ?
- voyage dans le temps ?