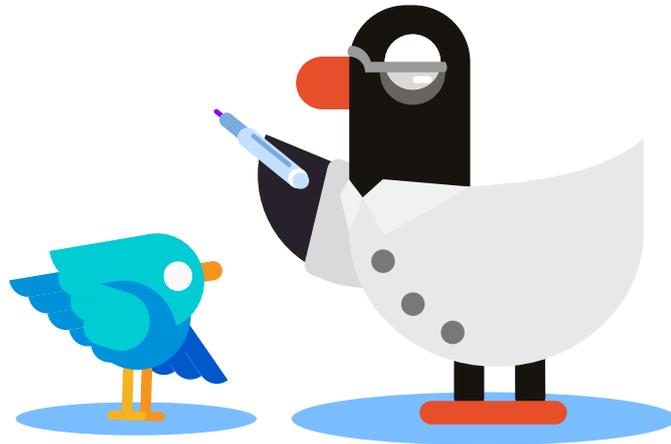




**TROUS NOIRS,  
PARADOXE DE L'INFORMATION  
ET THÉORIE DES CORDES**



Cette brochure est complémentaire à deux vidéos Youtube qui ont été réalisées en collaboration avec kurzgesagt – In a nutshell et sont consultables en ligne :

- *Comment les trous noirs pourraient-ils détruire l'Univers – Le paradoxe de l'information*
- *La théorie des cordes expliquée – Quelle est la vraie nature de la réalité ?*



Visionner les vidéos



Accéder au site Internet

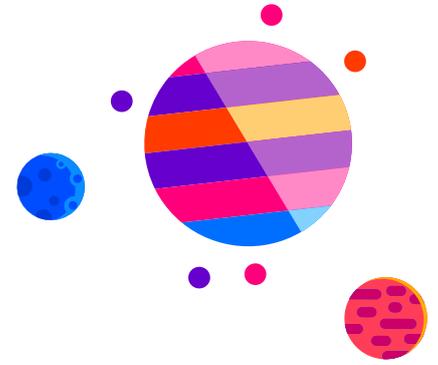
*Les vidéos sont disponibles en français, allemand et italien sur la chaîne YouTube SwissMAP, et en anglais sur la chaîne kurzgesagt.*

*Consultez notre site Internet pour plus d'informations sur les vidéos et nos activités.*

Cette brochure a reçu le soutien financier du FNS à travers la subvention du projet Agora n°171622 et du PRN SwissMAP



# SOMMAIRE



Page 4

- Préface

## QUESTIONS D'ORDRE GÉNÉRAL

Page 5

- En quoi consiste le travail d'un physicien théoricien ?
- Qu'est-ce que la physique théorique ?
- Qu'est-ce que « la théorie du tout » ?

## LE PARADOXE DE L'INFORMATION

Page 6

- Qu'est-ce qu'une année-lumière ?
- Les ondes radio et les ondes lumineuses sont-elles les mêmes ? (Et quel est le rapport entre la longueur et l'énergie d'une onde ?)
- Qu'est-ce qu'un photon ?
- La lumière est-elle affectée par la gravité ?
- La lumière n'est-elle affectée que par les trous noirs ?
- Les trous noirs existent-ils ?

Page 7

- Quelle est la masse d'un trou noir ? / Quelle est la taille d'un trou noir ?
- Les trous noirs sont-ils sphériques ?
- Que se passe-t-il quand deux trous noirs se rencontrent ?
- Qu'arriverait-il si je tombais dans un trou noir ?

Page 8

- Qu'est-ce qu'un trou blanc ?
- Quel est le lien entre l'information et les trous noirs ?
- Quel est le lien entre la radiation de Hawking et l'information ?
- Si un trou noir s'évapore à cause de la radiation de Hawking, comment le second principe (voir ci-dessus) est-il respecté ?

Page 9

- La radiation de Hawking a-t-elle déjà été mesurée ?
- Si la radiation de Hawking n'a jamais été mesurée, Hawking pourrait-il avoir tort ?
- Quel est le postulat du paradoxe de l'information ?
- Qu'est-ce que le principe d'incertitude de Heisenberg ? Quel est son lien avec l'observateur externe ?

Page 10

- Pourquoi les particules agissent-elles comme des ondes ?
- Quelle est la différence entre la mécanique quantique et la théorie quantique des champs ?
- Une particule est « un point dans l'espace ». Qu'est-ce que cela signifie ?
- Qu'en est-il du « rayon de l'électron » ?
- Comment découvre-t-on les particules ?

Page 11

- Combien y a-t-il de dimensions ?
- Pourquoi la théorie des cordes requiert-elle plus de dimensions ?
- Combien de dimensions y a-t-il selon la théorie des cordes ? 10, 11 ou 26 ?
- Pourquoi étudie-t-on encore la théorie des cordes si le nombre de dimensions connues est insuffisant ?

Page 12

- Ces « compactifications » ne sont-elles qu'illusions ?
- Qu'est-ce que la gravité quantique ?
- Comment a-t-on tenté d'expliquer la gravité quantique ?
- Pourquoi la relativité générale est-elle si différente des autres théories ?

Page 13

- Pourquoi est-il si compliqué de quantifier la gravité ? (en rapport à d'autres théories comme l'électromagnétisme)
- Comment une particule peut-elle avoir une force ?



## QUESTIONS D'ORDRE GÉNÉRAL

### En quoi consiste le travail d'un physicien théoricien ?

Les physiciens théoriciens sont des scientifiques qui ont une formation de base en physique ainsi que dans certaines branches des mathématiques. En général, cette profession requiert la possession d'un diplôme de bachelier et de master ainsi que d'un doctorat. Leur but est d'améliorer la compréhension d'un phénomène physique en utilisant des techniques mathématiques et des simulations informatiques pour interpréter le résultat des expériences. Les physiciens théoriciens participent également à la conception de nouvelles expériences afin de tester la validité des théories. La concrétisation de ces expériences demande cependant d'autres compétences, c'est pourquoi ces dernières sont le plus souvent menées par des physiciens expérimentaux. La distinction entre physicien théoricien et physicien expérimental est relativement moderne : elle est devenue de plus en plus précise au cours du siècle dernier, à mesure que les expériences et la théorie se complexifiaient.

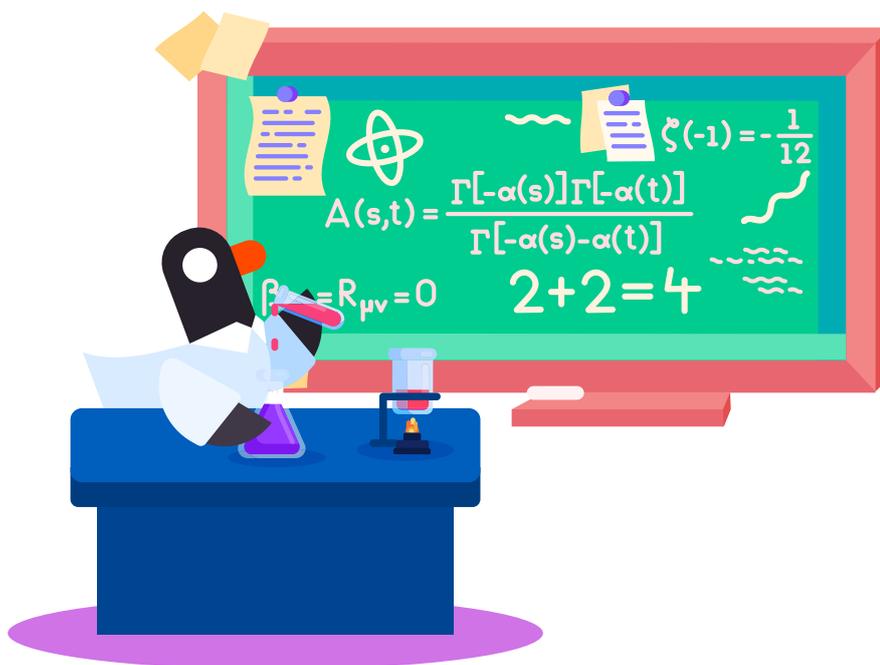
### Qu'est-ce que la physique théorique ?

Le mot « théorie » est un peu trompeur, car il semble désigner quelque chose qui n'est pas réel, quelque chose d'abstrait. En physique, lorsque l'on parle de la « théorie de la gravitation universelle » ou de la « théorie de la relativité restreinte », nous entendons quelque chose de très différent : un ensemble de

règles de base à partir desquelles nous pouvons prédire le comportement de la nature. Une bonne théorie est à la fois concise et capable de prédire un grand nombre de phénomènes. Toutefois, une théorie ne peut pas s'utiliser dans tous les contextes : la mécanique newtonienne, par exemple, fonctionne très bien pour des objets du quotidien se déplaçant à faible vitesse, mais elle n'est pas applicable lorsque cette vitesse se rapproche de celle de la lumière, on utilisera alors la théorie de la relativité restreinte.

### Qu'est-ce que « la théorie du tout ? »

La théorie du tout désigne un ensemble de règles qui peut potentiellement décrire tous les phénomènes physiques. Les scientifiques n'ont pas encore mis au point une telle théorie (voir la partie sur la théorie des cordes). La plupart des physiciens pensent que si une telle théorie existe, elle se trouve dans l'infiniment petit (au niveau des particules élémentaires, etc.). Même si on l'avait trouvée, cela resterait très difficile, voire probablement impossible, de déduire le comportement d'un système complexe (tel qu'un organisme unicellulaire) à partir des lois fondamentales de ses composantes microscopiques. Ainsi, même si la découverte de cette « théorie du tout » est peut-être l'une des ambitions les plus anciennes de la physique, la trouver ne marquerait pas « la fin de la science », loin de là !



# LE PARADOXE DE L'INFORMATION

## Qu'est-ce qu'une année-lumière ?

Une année-lumière est une unité de distance. C'est l'une des nombreuses unités utilisées pour calculer une distance de grande envergure (dite astronomique). Il s'agit du trajet parcouru par la lumière en une année qui est estimé à environ  $9,5 \times 10^{12}$  km. En comparaison, la distance approximative entre le soleil et la Terre est de  $1,5 \times 10^8$  km ou, plus précisément, d'environ cinq minutes-lumière.

## Les ondes radio et les ondes lumineuses sont-elles les mêmes ? (Quel est le rapport entre la longueur et l'énergie d'une onde ?)

La lumière et les ondes radioélectriques, tout comme les micro-ondes, les rayons X et les rayons gamma, sont des formes de rayonnement électromagnétique.

Tous ces rayonnements se déplacent à la « vitesse de la lumière ». Toutefois, ils se distinguent par leur longueur d'onde : celle de la lumière visible varie entre 390 et 700 nanomètres. Les autres types d'ondes sont plutôt définis de manière arbitraire. Par exemple, on parlera d'ondes radioélectriques pour les longueurs d'onde comprises entre quelques millimètres et plusieurs kilomètres. Les expériences de Becquerel, Hertz et Thompson, datant du siècle dernier, ont permis de déterminer que plus la longueur d'onde est courte, plus cette onde contient de l'énergie. L'explication théorique de ce phénomène a été exposée par Einstein en 1905, ce qui lui valut un prix Nobel. Dans la vie de tous les jours, la dangerosité des ondes électromagnétiques courtes sur la santé ne nous est pas inconnue. En effet, plus leur longueur est courte, plus les ondes seront dangereuses. Une exposition prolongée à des rayons ultraviolets (~300 nanomètres) peut provoquer des coups de soleil ou un cancer de la peau. Une exposition plus modérée à des rayons X peut également causer des brûlures et le cancer, tandis qu'une exposition, même relativement faible, à des rayons gamma peut être mortelle.

## Qu'est-ce qu'un photon ?

Un photon est un quantum de lumière, c'est-à-dire une particule qui transporte les rayonnements électromagnétiques et qui est responsable de la force électromagnétique. Contrairement aux électrons, par exemple, les photons n'ont pas de masse et se déplacent à la vitesse de la lumière.

## La lumière est-elle affectée par la gravité ?

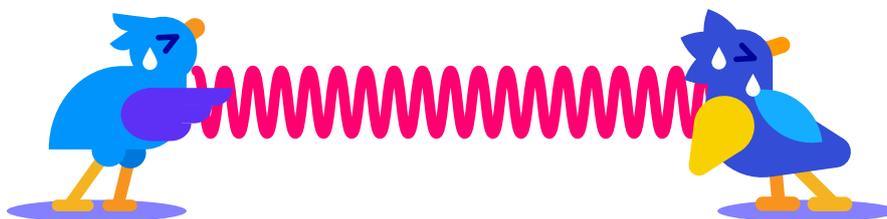
Une force physique n'agit que sur un objet chargé, on dira qu'une force s'associe à une charge. Par exemple, la loi de Coulomb s'associe à la charge électrique (une expérience typique à faire en classe : accumuler une charge électrostatique sur quelqu'un jusqu'à ce que ses cheveux se dressent). Dans le cas de la gravité, l'énergie joue le rôle de cette charge : tout objet porteur d'énergie est soumis à la gravité. Il en est de même pour la lumière qui transporte, de toute évidence, de l'énergie (la lumière du soleil réchauffe) ; cela nous paraît logique si l'on considère que la lumière est délivrée par des particules (photons). Notez que toutes ces découvertes n'ont été réalisées qu'après le XX<sup>e</sup> siècle, et plus précisément après les travaux d'Einstein, car on pensait à l'époque que la gravité était liée à la masse plutôt qu'à l'énergie.

## La lumière n'est-elle affectée que par les trous noirs ?

La lumière est affectée par toute gravité, même par celle de la Terre, qui est relativement faible. Cependant, cet effet est négligeable et ne devient significatif qu'en présence d'une très forte attraction gravitationnelle.

## Les trous noirs existent-ils ?

Des preuves irréfutables l'attestent. Non seulement leur existence a été avancée par de nombreux arguments théoriques, mais un certain nombre « d'observations » expérimentales de trous noirs ont été réalisées. Bien sûr, c'est loin d'être aussi direct que de voir une étoile ou une planète à l'aide d'un télescope. Au lieu de cela, nous pouvons observer des objets (étoiles) en orbite autour d'un corps sombre. La période de révolution de ces objets nous renseigne sur la masse du corps. Certaines de ces observations sont compatibles avec nos prédictions concernant les trous noirs. Plus récemment, on a pu observer un certain nombre d'événements où des ondes gravitationnelles étaient émises par des phénomènes astronomiques comparables à la fusion de deux trous noirs (pour la première fois par l'expérience LIGO en 2015). On espère pouvoir observer directement les disques d'accrétion des trous noirs, c'est-à-dire la matière qui tombe dans les trous noirs.



## Quelle est la masse d'un trou noir ? / Quelle est la taille d'un trou noir ?

Il n'y a aucune limite quant à la taille d'un trou noir. Il peut être infiniment grand ou infiniment petit. L'important est que sa masse soit concentrée dans un espace suffisamment restreint. Un trou noir de la masse de notre soleil, qui pourrait très bien exister quelque part dans l'univers, aurait un rayon d'environ un kilomètre. L'objet massif appelé Sagittaire A\*, qui se trouve au centre de la Voie lactée et que l'on croit être un trou noir, a une masse équivalente à plusieurs millions de fois celle de notre soleil. Un trou noir d'une telle envergure serait juste un peu plus grand que notre soleil.

## Les trous noirs sont-ils sphériques ?

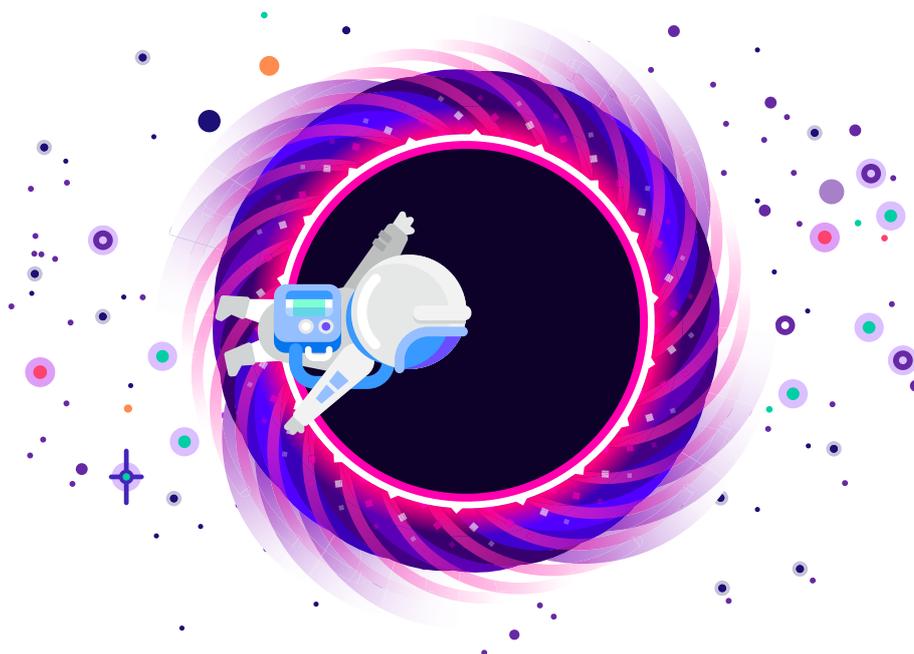
Pour de simples raisons de symétrie, les trous noirs sont supposés avoir une forme plus ou moins sphérique, un peu comme les planètes et les étoiles. Cependant, un trou noir en rotation autour d'un seul axe (on considère que c'est le cas de la majorité des trous noirs existant dans notre univers) n'aurait qu'une symétrie de rotation autour de cet axe. Plutôt qu'une sphère parfaite, il serait quelque peu aplati. Les trous noirs de Kerr illustrent ce phénomène.

## Que se passe-t-il lorsque deux trous noirs se rencontrent ?

Si deux trous noirs se rapprochent l'un de l'autre, ils finissent par ne former plus qu'un seul trou noir plus massif. Ce phénomène est appelé la fusion. Il s'agit d'un processus assez violent, car les deux trous noirs tourbillonnent de manière incontrôlable en se dirigeant l'un vers l'autre avant de fusionner. Lors de la fusion, ils émettent une grande quantité d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles (un peu comme les électrons qui génèrent des ondes radioélectriques lorsqu'ils se déplacent dans une antenne). Certains de ces processus ont récemment pu être observés par les détecteurs d'ondes gravitationnelles de dernière génération, ce qui est exceptionnel.

## Qu'arriverait-il si je tombais dans un trou noir ?

Selon la relativité générale, il ne se passerait rien de spécial en franchissant l'horizon des événements. C'est un résultat direct du principe d'équivalence, l'un des fondements de la théorie d'Einstein. Nous tomberions tout simplement en chute libre, jusqu'à ressentir de faibles forces de marée, c'est-à-dire que différents points de notre corps, comme la tête et les orteils, subiraient des forces gravitationnelles légèrement différentes. Bien que ce soit toujours le cas, ces forces sont généralement négligeables (C'est assez amusant de calculer la différence d'attraction gravitationnelle entre la tête et les orteils d'une personne sur Terre). Cependant, au fur et à mesure que l'on se rapprocherait de la singularité, l'attraction gravitationnelle augmenterait, et avec elle, les forces de marée. En fin de compte, celles-ci deviendraient assez fortes pour pouvoir tout pulvériser.



## Qu'est-ce qu'un trou blanc ?

Comme son nom le suggère, le trou blanc devrait s'opposer au trou noir : il s'agit d'une région de l'espace où la matière et la lumière ne peuvent pénétrer. En mathématiques, il est la solution aux équations de la relativité générale. Regarder un film représentant un trou blanc serait comme en regarder un représentant un trou noir, mais défilant en marche arrière. Il est important de noter que, contrairement aux trous noirs, l'existence des trous blancs reste hypothétique.

## Quel est le lien entre l'information et les trous noirs ?

Il existe plusieurs cas où l'information et les trous noirs sont liés. Le lien le plus important est celui provenant du concept de la thermodynamique des trous noirs. Dans les années 1970, il a été avancé que les trous noirs obéissent à des lois qui ressemblaient beaucoup à celles de la thermodynamique. Nous les avons énumérées ci-dessous :

- Le principe zéro : si A est en équilibre thermique avec B, et B avec C, alors A et C sont en équilibre thermique ; on peut donc définir une fonction (la température T), constante pour ces trois corps. Pour les trous noirs, il existe une fonction constante à travers son horizon des événements : la gravité de surface, k. Nous sommes donc tentés de déterminer :

$$T \sim k$$

- Le premier principe : l'énergie est conservée de sorte qu'une variation d'énergie corresponde toujours à la chaleur échangée (et au travail effectué) par le système. En voici la formule :

$$dE = T dS,$$

où E représente l'énergie interne et S l'entropie. Concernant les trous noirs, une variation de l'énergie s'accompagne toujours d'un changement de sa taille ; dans les formules, cela donne :

$$dE = k dA / 8\pi$$

où A représente la surface. Ce qui donne

$$S \sim A$$

Voici donc une preuve de l'existence d'une relation entre l'entropie (l'information) et la surface.



- Second principe : dans un système isolé, l'entropie ne diminue jamais avec le temps (et augmente lors d'un processus spontané) :

$$dS \geq 0$$

Hawking a introduit une loi similaire qui s'applique aux trous noirs pour une surface A,

$$dA \geq 0$$

ce qui renforce la similitude entre S et A.

## Quel est le lien entre la radiation de Hawking et l'information ?

Il y a plusieurs éléments de réponse à cette question. Il est important de noter que l'analogie avec la thermodynamique (voir question ci-dessus) qui démontre un lien entre l'entropie et la surface représente un argument de taille. L'un des aspects les plus frappants des calculs de Hawking est qu'ils suggèrent que les trous noirs émettent une radiation thermique (aussi appelée « rayonnement du corps noir »), qui est elle-même caractérisée par la température. Étonnamment, il s'avère qu'une telle température est liée à la gravité de surface k tout comme le suggère la thermodynamique du trou noir :

$$T = k / 2\pi,$$

et que l'entropie est simplement proportionnelle à la surface

$$S = A / 4.$$

## Si un trou noir s'évapore à cause de la radiation de Hawking, comment le second principe (voir ci-dessus) est-il respecté ?

En présence d'une radiation, le second principe doit être modifié pour prendre en compte l'entropie des particules émises. Ce qui n'est pas surprenant, étant donné que ce principe ne s'applique qu'aux systèmes isolés.



## La radiation d'Hawking a-t-elle déjà été mesurée ?

Elle n'a jamais été mesurée, car la radiation est très faible. Les trous noirs perdent leur masse extrêmement lentement par rapport aux étoiles. Même à la fin de leur cycle de vie, lorsque le processus d'évaporation s'accélère, l'énergie irradiée par un trou noir est plus faible comparée à d'autres événements astronomiques rares comme les supernovæ. On ne sait pas avec certitude s'il serait possible d'observer la radiation des trous noirs dans un avenir proche.

## Si la radiation de Hawking n'a jamais été mesurée, Hawking pourrait-il avoir tort ?

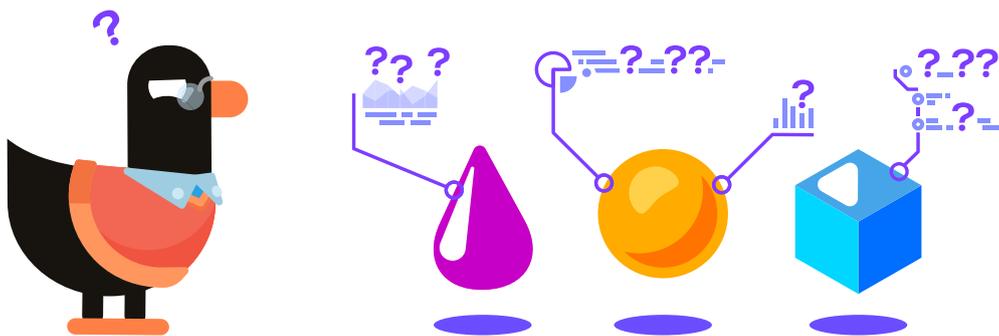
C'est évidemment une possibilité. Cependant, nous sommes sincèrement convaincus que les trous noirs émettent des radiations. Le calcul d'origine de Hawking et les calculs indépendants qui ont suivi se basent sur des faits très simples de la relativité générale et de la physique quantique, qui ont été vérifiés empiriquement de nombreuses fois.

## Quel est le postulat du paradoxe de l'information ?

Imaginez de la matière, conçue de telle manière qu'elle crée un trou noir (une sorte d'effondrement de matière). Si nous attendons suffisamment longtemps, le trou noir s'évaporerait en ne laissant que des radiations thermiques. En mécanique quantique, nous pouvons faire en sorte que la matière qui s'effondre soit dans un « état pur ». Cependant, peu importe son état initial, le produit final de l'évaporation est la radiation de chaleur, qui n'est jamais dans un « état pur » (il se trouve dans un état « mixte »). Une des propriétés fondamentales des systèmes quantiques est que les états purs ne peuvent être associés qu'à d'autres états purs avec l'évolution temporelle (techniquement, l'évolution temporelle est unitaire). D'où le paradoxe.

## Qu'est-ce que le principe d'incertitude d'Heisenberg ? Qu'est-ce que l'observateur extérieur ? Comment sont-ils liés ?

Dans la vidéo, nous avons présenté le principe d'incertitude d'Heisenberg qui est directement lié à notre capacité de mesurer les choses (les mesures sont prises par ce qu'on appelle parfois l'observateur extérieur). Ces deux concepts ne sont pas tout à fait semblables, mais l'observateur extérieur fournit une interprétation physique intuitive du principe d'incertitude : en fait, Heisenberg lui-même utilisait l'observateur extérieur comme justification physique de son principe. Une autre manière de présenter le principe d'Heisenberg est d'observer que de très petits objets tels que des particules élémentaires agissent comme des ondes. En effet, une expérience connue en mécanique quantique montre que les électrons qui passent à côté d'un obstacle « sont diffractés ». En d'autres termes, ils contournent cet obstacle. Les ondes sonores agissent presque de la même manière : au théâtre, si vous vous asseyez derrière une colonne, vous entendrez quand même le son. Le principe d'incertitude est donc le résultat mathématique de la description de l'onde, ou dans un jargon plus scientifique, « l'observable quantique ne se déplace pas ». Ce n'est pas ici un principe en soi, mais bien une conséquence des axiomes de la mécanique quantique. Toutefois, étant donné l'importance historique de ce principe dans le développement de la mécanique quantique et le fait qu'il soit un élément de base des effets de la mécanique quantique, les physiciens considèrent qu'il s'agit d'un principe fondamental de la physique quantique. Alors que l'observateur extérieur permet de justifier intuitivement le principe d'Heisenberg, il est en effet avéré que les physiciens de notre époque font la différence entre les deux concepts sur lesquels ils travaillent d'arrache-pied pour mieux en comprendre leurs légères différences.



## Pourquoi les particules se comportent-elles comme des ondes ?

Personne ne le sait vraiment. Cependant, lors d'expériences, on peut observer que les électrons (ou d'autres particules microscopiques) envoyés à travers une fente étroite ne se comportent pas comme des objets solides, mais bien comme des ondes. On peut aisément observer les phénomènes de diffraction et d'interférence. Pour expliquer ces caractéristiques, les physiciens du début du XXe siècle ont établi une liste de règles concernant les particules microscopiques, qui diffèrent des normes de la physique classique : il s'agit de la mécanique quantique.

## Quelle est la différence entre la mécanique quantique et la théorie quantique des champs ?

Tout d'abord, la mécanique quantique n'est pas vraiment compatible avec la relativité restreinte (encore moins avec la relativité générale). La raison est qu'en mécanique quantique, la position et la vitesse (ou plutôt la quantité de mouvement) d'une particule sont traitées très différemment des coordonnées temporelles et de l'énergie. La position est une observable (techniquement, un opérateur dans l'espace de Hilbert) alors que le temps est un paramètre (un nombre). C'est incompatible avec la relativité restreinte selon laquelle l'espace et le temps peuvent échanger leurs positions grâce aux transformations de Lorentz. Pour surmonter cela, on parle de champs dans la théorie quantique des champs (le champ des électrons ou des photons par exemple), où l'espace et le temps sont tous deux considérés comme des paramètres.

## Une particule est « un point dans l'espace ». Que cela signifie-t-il ?

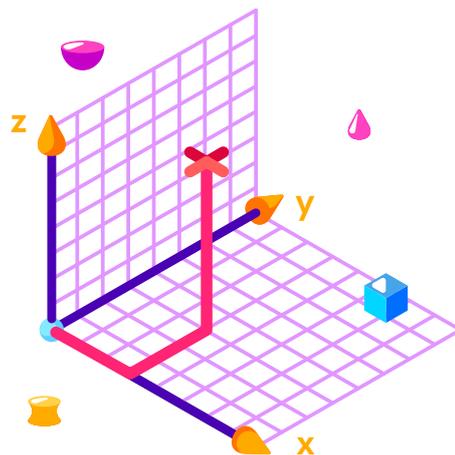
Voici une autre conséquence de la relativité restreinte. Supposons que nous décidions de décrire une particule comme étant une sphère solide d'un rayon déterminé. Si nous regardions la même particule à partir d'un cadre de référence différent (en utilisant les transformations de Lorentz), nous verrions un ellipsoïde et non pas une sphère. Ainsi, n'importe quelle forme varierait en fonction du cadre de référence et ne peut pas être une propriété élémentaire de notre particule observée. Par conséquent, lorsque nous décrivons la position d'un électron par exemple, nous l'identifions seulement avec un point ou plus précisément avec un état d'excitation du champ de l'électron ayant lieu à cet endroit. Tous les électrons sont en fait des excitations du même champ d'électrons, en parfaite harmonie avec l'observation empirique selon laquelle tous les électrons sont totalement indiscernables.

## Qu'en est-il du « rayon de l'électron » ?

Comme vu précédemment, un électron est en fait l'excitation d'un champ d'électrons en un point donné. Cependant, on dit souvent que « l'électron a un rayon d'environ 10 - 15 m ». Ces deux affirmations semblent s'opposer. En effet, d'une part, cela n'a aucun sens de concevoir un électron comme un objet étendu (à cause de la relativité restreinte, voir le paragraphe ci-dessus) ; d'autre part, il est impossible d'observer un « point » étant donné qu'il s'agit d'une référence mathématique abstraite. Dans la pratique, un électron est toujours entouré de fluctuations quantiques. La conception simpliste que l'on se fait d'un électron seul dans un espace vide n'a aucun sens étant donné que dans la réalité, cet électron sera toujours entouré d'un nuage tourbillonnant de fluctuations quantiques. La taille moyenne de ce type de nuage s'appelle « le rayon classique de l'électron », une échelle de longueur au-delà de laquelle ces effets quantiques ne sont plus pris en considération.

## Comment découvre-t-on les particules ?

Il faut différencier les particules stables qui composent la matière qui nous entoure (tels que les électrons) des particules instables (tels que les pions, des particules composites formées de quarks qui se désintègrent quelques nanosecondes après leur formation). Lorsque nous pensons à la découverte d'une particule, nous faisons principalement référence aux particules instables. Ce sont parfois des particules élémentaires (comme le boson de Higgs) et plus souvent des particules composites (comme les pions). La principale manière de détecter ces particules est de créer une collision avec d'autres particules élémentaires : par exemple, des électrons sur cible fixe, des électrons et positrons ou des protons avec des antiprotons. Ces particules peuvent être découvertes parmi les résidus de ces collisions. Remarquez que ces particules sont rarement observées directement : la plupart du temps, elles se désintègrent très rapidement (plus vite que les pions !) et le résultat de cette désintégration est mesuré. C'est pourquoi comprendre quelle particule s'est désintégrée relève d'un travail de détective.



## Combien y a-t-il de dimensions ?

Dans notre vision de l'Univers, nous vivons tous dans un espace tridimensionnel. À cause de la relativité restreinte, il faut mettre le temps et l'espace sur un même pied d'égalité. La raison est qu'il existe des transformations (le boost de Lorentz) qui mélangent les coordonnées spatiales et temporelles. Ces transformations sont essentielles pour que les systèmes inertiels qui se déplacent à différentes vitesses aient du sens, particulièrement lorsque leur vitesse relative est proche de la vitesse de la lumière. Au total, nous observons donc un espace-temps à quatre dimensions. Bien qu'il soit compliqué de nier l'existence d'autres dimensions, il n'y a aucune preuve scientifique pour confirmer cette hypothèse. (Voir ci-dessous pour plus d'informations à ce sujet.)

## Pourquoi la théorie des cordes requiert-elle plus de dimensions ?

Nous avons expliqué que plus une théorie réalise de prédictions, plus elle est « forte ». En ce qui concerne la théorie des cordes, si ces cordes existent, l'univers est alors composé d'un espace-temps en dix dimensions. Par conséquent, la théorie des cordes fait de très fortes prédictions. Lorsque la théorie des cordes est considérée comme une théorie quantique, elle ne conserve visiblement pas la structure qu'elle devrait avoir si elle était étudiée du point de vue de la relativité restreinte (Groupe de Poincaré). Il est fréquent qu'une théorie quantique ait moins de symétrie que ce que nous pourrions penser naïvement de la physique classique. Ce phénomène physique est qualifié d'anomalie. Dans la théorie des cordes, le Groupe de Poincaré présente une anomalie dans l'espace-temps quadridimensionnel et n'en présente pas dans un espace-temps à dix dimensions. Puisque le Groupe de Poincaré est une propriété élémentaire du monde (plus fondamentale, dans un sens, que le nombre de dimensions que l'on rencontre !), nous déduisons que la théorie des cordes n'est applicable que dans un système à dix dimensions.

## DIMENSIONS: 10



## Combien de dimensions y a-t-il selon la théorie des cordes ? 10, 11 ou 26 ?

En effet, il se pourrait que vous ayez entendu parler de ces trois nombres. Ils font référence à des théories légèrement différentes. Les cordes « bosoniques » comportent 26 dimensions. Ces théories des cordes n'ont pas de fermions. Même si ceux-ci sont importants d'un point de vue historique et sont toujours utilisés aujourd'hui, il est clair qu'ils ne devraient pas être utilisés pour décrire le monde. Les fermions sont une partie essentielle du modèle standard (en effet, les électrons, les muons, les quarks, et les neutrinos sont tous des fermions). Les « supercordes », plus spécifiquement appelées cordes supersymétriques, contiennent 10 dimensions ; elles sont caractérisées par l'excitation bosonique et fermionique. Il n'y a que quelques façons d'intégrer les fermions aux supercordes et par conséquent, il n'existe que quelques théories des supercordes. Dans les années 1980, il a été suggéré que ces quelques théories n'étaient que le fruit d'une théorie « mère ». Celle-ci est divisée en 11 dimensions et porte le nom de « théorie M ».

## Pourquoi étudie-t-on encore la théorie des cordes si le nombre de dimensions connues est insuffisant ?

Nous avons vu que la théorie des cordes doit être composée d'un espace-temps en 10 dimensions pour exister et que nous vivons dans un monde en 4 dimensions. Il semble que ce soit une raison suffisante pour écarter cette théorie. Cependant, des physiciens pensent que certaines de ces dimensions sont « trop petites pour être perçues ». Imaginez un fil de fer : il s'agit clairement d'un objet en trois dimensions ayant la forme d'un fin cylindre plein et long. Cependant, si on le regarde de loin ou si on le photographie en basse résolution alors le fil de fer semble être en une dimension. D'une certaine manière, la dimensionnalité n'est qu'une question d'échelle : à grande échelle, nous ne voyons ce fil de fer qu'en une seule dimension, mais si on le regarde attentivement (disons au dixième de millimètre), on se rend compte qu'il s'agit d'un objet en 3 dimensions. Les scientifiques pensent que 6 dimensions sur 10 sont difficiles à percevoir, car elles sont « enveloppées de cercles microscopiques », elles sont tellement petites que les microscopes les plus performants et les expériences les plus élaborées ne les ont jamais vus. Ce phénomène s'appelle « compactification ».

## Ces « compactifications » ne sont-elles qu'illusion ? (Voir ci-dessus.)

Elles sont probablement théoriques. Cependant, elles ne sont pas seulement un moyen de remettre en question les 10 dimensions : différentes compactifications confèreraient des propriétés distinctes aux cordes, et plus précisément, elles conduiraient à différentes sortes d'excitations de cordes. Il faut espérer qu'il existe une compactification spécifique qui reproduit exactement la physique du modèle standard. Cela n'a pas encore été prouvé (ni écarté). Pendant ce temps, la recherche actuelle sur les « géométries compactes » mène à des avancées prometteuses en mathématiques. C'est typique de la théorie des cordes : tandis que des principes physiques avérés restent insaisissables, les cordes sont devenues une base utile pour les physiques mathématiques et même les mathématiques pures.

## Comment a-t-on tenté d'expliquer la gravité quantique ?

Quand on parle de gravité quantique, on qualifie une théorie qui, d'un côté, obéit aux principes de la physique quantique (par exemple le principe d'Heisenberg, ou d'un point de vue plus technique, le fait que des observables ne se dirigent pas toujours dans le même sens) et, d'un autre côté fait appel à la relativité générale dans une limite acceptable. Par analogie, l'électrodynamique quantique est une théorie qui obéit aux lois de la physique quantique et qui sollicite l'électrodynamique de Maxwell de façon ad hoc, par exemple lorsqu'on examine une grande quantité de photons et d'électrons de basse énergie.

## Quand parle-t-on de gravité quantique ?

La description quantique de tous les types de force excepté la gravité est celle de la théorie quantique des champs : c'est-à-dire que la version quantique de l'électrodynamique est agencée sous la forme de « champ quantique » du photon.

Depuis plusieurs décennies, des physiciens tentent de formuler une théorie quantique de la gravité sur base du champ quantique du graviton. Cependant, aucune tentative n'a jusqu'à présent été fructueuse. La recherche continue dans cette direction, mais au fil du temps, des physiciens ont commencé à opter pour des idées plus radicales. Ils se sont dit que les fondements de la théorie quantique ne reposaient pas sur une théorie quantique des champs, mais sur quelque chose d'autre. Par exemple, des expériences ont essayé de transposer l'espace-temps en blocs de construction et d'élaborer une théorie où la géométrie naîtrait de l'assemblage de ces blocs ; cette approche a également fait face à différents écueils. La théorie des cordes est encore une autre approche dans laquelle, comme vu précédemment, les particules ne sont pas élémentaires, mais sont en revanche les excitations de la corde.

## Pourquoi la relativité générale est-elle si différente des autres théories ?

Une théorie comme celle de la mécanique hamiltonienne ou de l'électrodynamique de Maxwell décrit le mouvement des particules et des champs dans des géométries fixes (par exemple, dans un espace-temps quadridimensionnel, sur un plan, sur un cylindre, etc.). Le choix de la géométrie est entièrement libre : dans un sens, la géométrie est la scène et les particules et les champs sont les comédiens. C'est aussi le cas pour la mécanique quantique et la théorie quantique des champs. Les choses sont radicalement différentes pour la relativité générale : selon cette théorie, la présence de masse et d'énergie engendre la courbure de l'espace, ce qui veut dire que la géométrie sous-jacente change. Il est donc impossible de concevoir séparément la géométrie d'une part, et les champs et les particules d'autre part. La géométrie est déterminée par des équations dynamiques qui s'apparient aux autres équations décrivant le mouvement des particules. Il s'agit là de la différence majeure entre la relativité générale et, par exemple, la théorie de Maxwell



## Pourquoi est-il si compliqué de quantifier la gravité ? (en rapport avec d'autres théories comme l'électromagnétisme)

La réponse à cette question est forcément technique, et a un rapport avec le concept de « renormalisation » de la théorie quantique des champs. Un élément d'explication qui permet de mettre en exergue une différence importante entre la gravité et l'électromagnétisme est le fait que le photon n'a pas de charge électrique. Donc, bien qu'il soit le médiateur de la force électromagnétique, il n'est pas lui-même soumis à cette propre force. Par conséquent, les équations des mouvements électromagnétiques sont linéaires dans le champ électromagnétique. Ce n'est pas le cas de la gravité : le graviton transporte de l'énergie et par sa nature, il est lui-même soumis à la force gravitationnelle. Donc, les gravitons interagissent entre eux (et évidemment, les équations de la relativité générale sont non linéaires). Il s'agit d'une complication considérable dans la quantification de la gravité. Il faut garder à l'esprit qu'il est possible de quantifier des champs qui agissent sur eux-mêmes (ce qui a permis l'émergence de la chromodynamique quantique), mais ce n'est vraiment pas simple et ce n'est le cas que pour des théories bien particulières.

## Comment une particule peut-elle avoir une force ?

Imaginez que nous avons deux particules chargées, par exemple, deux électrons soumis à la force de Coulomb ou deux planètes soumises à la loi universelle de la gravitation de Newton. Dans les deux cas, nous savons qu'il y a une force (de répulsion ou d'attraction) entre les deux particules ou les deux planètes. Comment cette force est-elle transmise ? Généralement, dans la physique non relativiste, on pense souvent que la force agit instantanément et à distance. C'est difficilement compatible avec la relativité restreinte, selon laquelle il existe une limite de vitesse supérieure à laquelle l'information peut être transmise. Pour éviter ce problème, Maxwell a suggéré que la force était régulée par des champs de force (les champs électromagnétiques ou gravitationnels dans nos exemples), ce qui retarde le temps de réaction. Dans la physique quantique, il est possible de concevoir les champs comme des particules (du moins, on peut certainement le faire pour le champ électromagnétique). Par conséquent, on peut penser que la force de répulsion entre deux électrons est due aux photons qui « séparent les électrons » ; ce processus peut être décrit de façon très précise par l'électrodynamique quantique.

