

Support de cours

Cours:

## **PHYS-101(f) - PG I - mécanique - MA (Sylvain Bréchet)**

Vidéo:

### **14 - Mécanique classique et mécanique quantique**

Concepts (extraits des sous-titres générés automatiquement) :

**Existence de l'électron. Opérateur position. Fonction des fréquences. Énergie de la lumière. Mécanique quantique. Mécanique classique. Espaces propres. Terme quantique. Mouvement spirale. Orbites possibles. Espace vectoriel. Chose de pratique. Bonnes sessions. État op. Fonctions psy.**



[vers la recherche de séquences vidéo](#)

(dans PHYS-101(f) - PG I - mécanique - MA (Sylvain Bréchet).)



[vers la vidéo](#)

Center for Digital Education. Plus de matériel de soutien pédagogique ici :

<https://www.epfl.ch/education/educational-initiatives/cede/educational-technologies-gallery/boocs-en/>

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

Ces sous-titres ont été générés automatiquement ... Voilà, bonjour à toutes et à tous. Nous voilà parvenus à la fin de ce cours de mécanique. Et aujourd'hui, on va voir le lien qui existe entre... Merci beaucoup, c'est un petit peu parce que j'ai chompé un refroidissement. Merci, Pierre. D'ailleurs, Pierre, j'en profite. Pierre a préparé des supermanies pendant tout le semestre pour vous. Il vous a encore préparé des manip incroyables qui vont quelque part vous ouvrir l'esprit par rapport au cours qui viendra le 2e semestre, qui est un cours d'électromagnétisme. Alors je vous propose qu'on l'applaudisse, chaleureusement. ... Une bonne partie du succès de ce cours est dû à Pierre, la physique sans les manip, d'accord ? C'est comme une raclette sans fromage. D'accord ? Donc c'est essentiel d'avoir des manip qu'on puisse voir régulièrement et puis qui permettent de sortir l'aspect purement mathématique pour avoir quelque chose de pratique à comprendre et à visualiser. Donc merci encore. Applaudissements ... Pardon ? ... Ah ouais, tu peux venir à Neuvercarbou, c'est déjà 9h20 donc... Ah ouais, d'accord. ... Ah oui, d'accord, OK. Non, non, c'est vrai qu'en général les cours commencent à 8h, celui-ci commencent à 9h. Donc ce qu'on va faire ensemble aujourd'hui, c'est qu'on va voir dans un premier temps le lien qui existe entre la mécanique classique et la mécanique antique. Comme je vous l'ai annoncé, c'est le plus beau cours de tout le semestre et de loin. D'accord ? En revanche, il n'est pas l'examen. Et comme il n'est pas l'examen, je vais me permettre de faire quelque chose que je n'ai pas fait jusqu'à présent, c'est prendre des slides qui sont déjà complètement écrits et simplement vous expliquer la physique, sans devoir écrire quoi que ce soit ou écrire très peu, disons, pratiquement. D'accord ? Le but, c'est pas que vous preniez des notes. Le but, c'est que vous écoutiez, que vous

#### notes

#### résumé

0m 0s



## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

suiviez et que ce soit quelque part un peu récréatif et que ça vous permette de voir ce qu'on peut faire avec l'analyse et l'algèbre lorsqu'on applique les formalismes mathématiques à bonnes fins. Parfois, un peu abstrait quand même, il faut l'avouer pour l'étude de la physique. Alors, qui d'entre vous a eu le courage et l'audace de lire les 40 pages de notes sur la mécanique quantique ? Il y a quand même des gens qui l'ont fait, bravo. Je suis pas sûr qu'à votre place, je l'aurais fait moi-même, parce que c'est vrai que c'est quand même assez costaud. Donc, je vais pas aller dans tous les détails qui sont présentés dans les notes. Si vous avez des questions, n'hésitez pas à venir me trouver. Je vous explique très volontiers. D'accord ? Je vais commencer avec une petite histoire. Alors, à la fin du XVe siècle, les physiciens se sont rendus compte qu'il y avait des soucis avec la physique. Ça a commencé avec le rayonnement du corps noir. Planck est parti de deux résultats. Un résultat qui a été établi pour Rayleigh et un autre par Rayleigh-Jeans, qui n'est de deux comportements en fonction des fréquences. Il s'est dit, mathématiquement, il aimerait trouver une fonction qui interpole ces deux résultats. Pour y arriver, il a dû introduire un nouveau paramètre, un paramètre  $h$ , que Planck a voulu faire tendre vers zéro. Il n'y est jamais arrivé. Vous savez pourquoi ?  $h$  est une constante fondamentale de la physique. Il a ainsi découvert. Ceci a permis plus tard Albert Einstein de dénoncer... Enfin, plutôt de découvrir l'effet photoélectrique où l'énergie de la lumière arrive sous forme quantifiée, sous forme de photons. Il y a des mains qui se sont levées. Vous avez des questions ? Non ? Ok. On tente pour moi. Donc, Einstein a compris que la lumière venait sous forme de quantités fixes, discrètes, d'accord ?

#### notes

#### résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

D'où le terme quantique, c'est de l'axavien, quantifié, d'accord ? Et ceci ensuite était très utile pour comprendre la structure atomique. Puisque, parallèle à toute cette discussion, à Cambridge, le célèbre Gigi Thomson a réussi à mettre en évidence l'existence de l'électron avec une manif que j'ai eu l'occasion de voir tous les jours en passant devant lorsque je faisais ma thèse dans le même bâtiment, d'accord ? Et donc, tout naturellement, Thomson a imaginé un modèle de la matière avec des électrons pour lesquels il a donné une charge négative, ce qui était une absurdité, il aurait mieux fait de faire le contraire, mais on ne peut pas refaire l'histoire. Donc, il a donné aux électrons une charge négative. Il a imaginé que ces électrons, comme des petits raisins dans un pain au raisin, se retrouvaient dans une structure chargée positivement, et que ça formait un atome. Cette structure en pain au raisin a paru assez suspecte à son postdoc qui était Rasserford, et donc ce que Rasserford a fait. Il a imaginé une expérience avec des particules alpha, qui sont des noyaux d'ellium, qu'il a envoyé sur une fine couche d'or, et il a réussi à montrer que la plupart de ces particules passaient à travers la couche d'or, ce qui montre que la matière est essentiellement faite de vide. Grâce à ça, il a imaginé, par analogie avec un système gravitationnel, ce qui était une bonne idée, il a imaginé que les atomes devaient être formés d'un noyau chargé positivement avec des électrons qui orbitent autour, un peu comme les planètes orbitent autour du soleil. Seulement voilà ce modèle-là, qui paraît assez raisonnable quelque part, à un grand défaut. Si on connaît l'électromagnétisme, ce qui sera votre cas dans quelques mois, eh bien on sait que lorsqu'on a une particule qui est accélérée, c'est le cas d'un électron qui a une accélération centripète sur une trajectoire circulaire

#### notes

#### résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

ou elliptique, eh bien cette particule va rayonner de l'énergie. Donc, l'électron perd de l'énergie, si il perd de l'énergie, il ne peut pas se maintenir sur une trajectoire circulaire ou elliptique. Non, il va avoir un mouvement spirale, il va spiraler pour s'effondrer sur le proton. Alors vous pouvez faire le calcul, c'est fait à la fin des notes de cours sur la mécanique quantique. Si vous prenez un atome d'hydrogène, vous prenez votre électron qui se trouve sur la partie extérieure et vous regardez le temps qu'il faudrait à un électron classiquement pour tomber, spiraler sur le proton et ce que vous trouvez, c'est 15 picosecondes. D'accord ? 15 fois 10 puissance, moins 12 secondes. Et pourtant, la matière existe et elle est stable, vous en êtes une preuve vivante depuis des milliards d'années. Donc clairement, ce modèle ne fonctionne pas. Bon, alors, BOR, qui a eu l'occasion de venir en tant que visiteur dans le laboratoire de Rutherford, a une idée assez géniale. Il s'est basé sur des résultats expérimentaux. Il a lié l'effet photoélectrique d'Einstein, le fait que les photons soient quantifiés, que leur énergie soit proportionnelle à la fréquence. Il a lié ça avec le modèle de Rutherford qui l'a amélioré. C'est dit la chose suivante. Si on regarde les résultats des spectroscopiques, des chimistes, qu'est-ce qu'ils observent ? Ils observent qu'il y a des photons qui sont émis par la matière avec des longueurs d'ondes caractéristiques. Un peu comme si, parmi toutes les orbites possibles, il y avait des orbites particulières qui étaient permises et d'autres qui étaient interdites. Et un électron pouvait alors sauter d'une orbite sur une autre, par exemple d'une orbite plus énergétique, sur une orbite moins énergétique, en émettant de l'énergie sous forme de photons. D'accord ? Et ce, de manière quantifiée. Pour ce faire, il a dû imaginer que le moment cinétique était quantifié, d'accord ? Et que cette

#### notes

#### résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

quantification se faisait en unité de la constante de Planck réduite de  $\hbar$ . Ce modèle de bord est absolument sensationnel, d'accord ? C'est un modèle semi-classique qui a ouvert la porte à la mécanique quantique. Donc, les niveaux d'énergie prédits par bord sont ceux qui sont prédits aussi par la mécanique quantique. Donc bord avait quasiment compris, mais pas tout à fait. Il était dans une logique classique, d'accord ? Alors, qui sait qui a compris ? Et bien ceux qui ont commencé à comprendre, c'est Eisenberg et Schrödinger séparément. Alors, parlons rapidement d'Eisenberg. Eisenberg était très jeune, il est né en 1901, et il a eu son idée géniale en 1924-1925. Donc, vous voyez, il avait un petit peu plus qu'une vingtaine d'années. Eisenberg avait un problème de santé, c'est qu'il avait un rhume des foins qui était assez énorme. Et donc, le printemps, il souffrait le martyr à cause des pollens. En gros, il a conseillé d'aller s'isoler dans une île de la mer du Nord, l'île de Helgauland, sur laquelle il n'y a que de l'herbe et donc pas de pollen entourée de mer, donc ce qui veut dire qu'en termes d'allergie, il avait un peu de repis. Et donc, qu'a fait Eisenberg, perdu sur son île, sans télévision à l'époque, évidemment, sans Internet, d'accord ? Et bien, il a étudié le modèle de bord. Et il a fait quelque chose d'assez incroyable. Il s'est dit, OK, si je regarde ce qui se passe dans le modèle de bord, j'ai des électrons qui parlent de certaines orbites, qui sont sur certaines orbites, qui vont se déplacer sur d'autres orbites en émettant des photons, d'accord ? Donc, on peut, par exemple, décrire ceci de manière générique en prenant une orbite en entrée, une orbite en sortie, et on va les lier mathématiquement par des indices, d'accord ? Un indice de ligne et un indice de colonne, l'indice

notes

résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

notes

résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

et égal à une constante, qui est la constante de Planck réduite à chevards divisé par deux. Saint, c'était un coup de pied dans la fermière du déterminisme classique. Il l'a fait voler en éclat. La physique est limitée. Si vous voulez, c'est de la même amplitude en physique que les théorèmes d'incomplétude de Gödel en mathématiques, sur les certitudes mathématiques qu'on peut avoir. Donc ça a été vraiment un tournant révolutionnaire. Ça, c'est pour Eisenberg. De son côté, Schrödinger, lui... Je vais vous raconter l'histoire maintenant. Schrödinger était professeur à l'ETH, à Zürich. Il est parti en vacances de neige à Rosa dans les Gryons. Bon. Seulement, il n'est pas parti en vacances de neige avec sa femme. Il est parti en vacances de neige avec sa maîtresse. D'accord ? Et puis, il y a eu des chutes de neige assez abondantes à Rosa. Donc ils étaient plantés dans un chalet. Qu'est-ce que vous faites quand vous êtes seul avec votre maîtresse dans un chalet qui a des chutes de neige abondantes ? La seule chose que vous pouvez faire, c'est de la physique, bien sûr. Vous aviez pensé à autre chose. Donc, clairement, Schrödinger a fait de la physique. D'accord ? En fait, ce qu'il a fait, c'est qu'il a imaginé quelque chose d'assez simple, mais de très beau. Si je prends, par exemple, le thé qu'il y a dans ce mug, d'accord, si j'envoie un petit caillou au centre, comme ça, qui tombe, qu'est-ce que je vais créer ? Des vagues qui vont s'éloigner le long du profil de l'eau. OK ? Et puis, ce qu'on va voir, c'est des ronds qui s'éloignent. Les uns des autres, comme ça. Donc, des endroits, il y a des ronds, des endroits, il n'y a rien. OK ? Alors, maintenant, on a une sorte de continue. On pourrait imaginer que ces vagues représentent la probabilité de présence d'une particule comme

#### notes

#### résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

notes

résumé

## Chapitre 14

### Mécanique classique et mécanique quantique

EPFL

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

1 / 26

d'équation Schrödinger, vous pouvez imaginer que la fonction qui apparaît dans cette équation est en fait un vecteur abstrait d'un espace vectoriel de fonction. D'accord ? Donc là, on rejoint le concept de la mécanique des matrices avec des opérateurs et des espaces vectoriels. D'accord ? Et donc le concept de fonction est le concept de vecteur. Et donc, on aura une généralisation d'un notion d'application linéaire qui est représentée dans une base par une matrice, qui peut aussi être, de manière générale, un opérateur linéaire qui agit sur une fonction, qui a un élément d'un espace vectoriel, et qui peut retourner, par exemple, un multiple de cette fonction, c'est une équation au valeur propre. D'accord ? Sauf que l'espace de fonction dont on va parler, l'espace de Hubert, est un espace qui a une base de dimension infini. D'accord ?

notes

résumé

**14.1 Fondements de la mécanique quantique**

- 14.1.1 Mécanique classique et mécanique quantique
- 14.1.2 Observables physiques
- 14.1.3 Quantité de mouvement
- 14.1.4 Hamiltonien
- 14.1.5 Equation de Schrödinger

**14.2 Chimie quantique**

- 14.2.1 Atome d'hydrogène
- 14.2.2 Orbitales de l'atome d'hydrogène
- 14.2.3 Spin

**14.3 Information quantique**

- 14.3.1 Processus de mesure
- 14.3.2 Qubit
- 14.3.3 Ordinateur quantique
- 14.3.4 Intrication quantique

C'est une base de fonction, de fonction orthogonale. Donc voilà un peu le cadre mathématique. Vous voyez que c'est... Il y a essentiellement des maths là-dedans, mais dans ces maths, on retrouve une physique incroyable.

notes

résumé

15m 37s



**14.1 Fondements de la mécanique quantique**

- 14.1.1 Mécanique classique et mécanique quantique
- 14.1.2 Observables physiques
- 14.1.3 Quantité de mouvement
- 14.1.4 Hamiltonien
- 14.1.5 Equation de Schrödinger

notes

résumé

15m 49s



**14.1 Fondements de la mécanique quantique**

- 14.1.1 Mécanique classique et mécanique quantique
- 14.1.2 Observables physiques
- 14.1.3 Quantité de mouvement
- 14.1.4 Hamiltonien
- 14.1.5 Equation de Schrödinger

peut être dans une configuration propre de SPIN-UP ou une configuration propre de SPIN-DOWN. On a donc quelque chose de binaire. Et donc, on peut construire un appareil de mesure et on peut voir que ce SPIN a une probabilité 1,5 d'être dans un état UP, une probabilité 1,5 d'être dans un état DOWN. On va démontrer ceci ensemble dans quelques instants. On verra donc qu'on a un processus de mesure qui est probabiliste, et ceci va nous conduire vers un élément fondamental qui est tout aussi important en physique qu'en informatique, même, qui est le Q-BIT, la généralisation d'une notion de BIT classique au cadre quantique, le Quantum BIT, où là vous avez un état de superposition entre un SPIN-UP et un SPIN-DOWN, ce qui va nous conduire vers la structure d'un ordinateur quantique, exprimé de manière très grossière évidemment, et on va terminer avec quelque chose qui a fait l'objet d'un PRINCEP il y a de ça 2 ans, donc voyez si c'est récent, d'accord, qui est l'intrication quantique. Le fait que des objets qui sont en contact initialement peuvent être séparés dans l'espace, mais forment un seul et même objet, et donc si vous mesurez les propriétés d'un, d'une partie de l'objet, à un endroit, vous savez quasiment immédiatement qu'elle va être la propriété de l'autre partie de l'objet à un autre endroit, potentiellement, l'information est transmise à une vitesse qui est quasiment infinie, ce qui est sûr, c'est que cette vitesse, si elle devait être transmise de manière causale, entre guillemets, devrait être transmise à une vitesse qui est au moins 10 000 fois supérieure à la vitesse de la lumière, donc ce n'est pas causale au sens traditionnel de la physique, d'accord ? Cette interaction à distance, cette intrication quantique, est un phénomène absolument magnifique. C'est peut-être l'une des plus belles découvertes du XXe siècle, d'accord, de la fin du XXe siècle.

**notes****résumé**

**Mécanique classique****1 Observables physiques**

- Fonctions
- Compatibles

**2 Description du réel****3 Lois déterministes****4 Processus de mesure déterministes****5 Théorie locale****Mécanique quantique****1 Observables physiques**

- Opérateurs
- Incompatibles

**2 Description du possible****3 Lois déterministes****4 Processus de mesure probabilistes****5 Théorie non-locale**

D'accord, c'était une expérience de pensée qui a été proposée par Einstein, Podolsky et Rosen pour débouter la mécanique classique, la mécanique quantique. Loin de la débouter, ça l'a rendu encore beaucoup plus riche que ce qu'elle était auparavant.

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

19m 27s



- **Observables physiques** : décrites par des opérateurs.

➊ Dérivée spatiale (gradient) :  $\nabla = \frac{d}{d\mathbf{r}} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

➋ Dérivée temporelle :  $\frac{\partial}{\partial t}$

- **Espace de Hilbert** : les opérateurs  $\hat{A}$  agissent sur des fonctions  $\psi(\mathbf{r}, t)$  qui sont des vecteurs d'un espace vectoriel  $\mathcal{H} = L^2(\mathbb{R}^3)$  de dimension infinie.

- **Fonction d'onde** : photon (quasiparticule de lumière)

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \in \mathbb{C}$$

➊ Gradient :  $\nabla \psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \hat{z}$

➋ Dérivée temporelle :  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$

- **Equation aux valeurs propres** : l'opérateur  $\hat{A}$  satisfait une équation aux valeurs propres (fonctions)  $A$

$$\hat{A} \psi(\mathbf{r}, t) = A \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.1)$$

notes

résumé

19m 40s



- **Observables physiques** : décrites par des opérateurs.

① Dérivée spatiale (gradient) :  $\nabla = \frac{d}{d\mathbf{r}} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

② Dérivée temporelle :  $\frac{\partial}{\partial t}$

- **Espace de Hilbert** : les opérateurs  $\hat{A}$  agissent sur des fonctions  $\psi(\mathbf{r}, t)$  qui sont des vecteurs d'un espace vectoriel  $\mathcal{H} = L^2(\mathbb{R}^3)$  de dimension infinie.

- **Fonction d'onde** : photon (quasiparticule de lumière)

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \in \mathbb{C}$$

① Gradient :  $\nabla \psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \hat{z}$

② Dérivée temporelle :  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$

- **Equation aux valeurs propres** : l'opérateur  $\hat{A}$  satisfait une équation aux valeurs propres (fonctions)  $A$

$$\hat{A} \psi(\mathbf{r}, t) = A \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.1)$$

les lois sont déterministes, il faut juste que je t'en perds aussi un tout petit peu en physique classique. C'est vrai en mécanique, quand on a une série de points matériels. C'est plus compliqué quand on est en train de regarder une description statistique de la mécanique classique, où là, il y a des priorités qui interviennent liées au manque d'information qu'on a. Mais en théorie, si on a toutes les informations nécessaires, eh bien, on a des processus qui, au niveau microscopique, sont complètement déterministes. En revanche, quand on veut mesurer quelque chose en mécanique classique, en mécanique quantique, on a un processus qui est probabiliste. Comment vous pouvez comprendre ceci ? Imaginez que l'état qui caractérise le système est un élément d'un espace vectoriel abstrait, et vous projetez sur les vecteurs propres de cet espace vectoriel, et c'est cette projection qui va se faire, qui donne lieu aux caractères probabilistes, qui va faire intervenir des probabilités de manière explicite. On va voir comment ceci se combine au niveau théorique dans quelques instants. Lorsqu'on décrit la mécanique classique, on a fait ceci durant tout ce semestre. On se retrouve avec des équations locales, des équations différentielles. En mécanique quantique, c'est beaucoup plus compliqué. Comme j'ai faisais allusion avec le paradoxe PR, l'intrication quantique, vous avez des interactions structurelles à distance, donc la physique est essentiellement non-locale, et c'est cette non-localité qui a valu le prix Nobel, à un aspect de l'exen-France, à Anton Zeilinger de l'Université de Vienne, et à John Closer de, je ne sais plus quelle université, aux États-Unis. J'ai eu l'occasion d'entendre les deux premiers, pas le troisième. Voilà. Donc...

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

- $$p = \hbar k \in \mathbb{R}^3 \quad (14.4)$$

Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

6 / 28

notes

résumé

23m 7s



- **Quantité de mouvement** : un mouvement est caractérisé par un déplacement dans l'espace.
  - ① Opérateur variation spatiale :  $\nabla$  (gradient)
  - ② Dimension :  $\hbar$  (constante de Planck réduite :  $\hbar = h/2\pi$ )
  - ③ Valeur propre réelle :  $-i$  (nombre imaginaire)

- **Opérateur quantité de mouvement** :

$$\hat{p} = -i \hbar \nabla \quad (14.2)$$

- **Equation aux valeurs propres** :

$$\hat{p} \psi(\mathbf{r}, t) = p \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.3)$$

$$-i \hbar \nabla \psi(\mathbf{r}, t) = -i \hbar \nabla (\psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}) = \hbar \mathbf{k} \psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} = \hbar \mathbf{k} \psi(\mathbf{r}, t)$$

- **Valeurs propres de l'opérateur** : quantité de mouvement photon

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \in \mathbb{R}^3 \quad (14.4)$$

si on fait agir le gradient, on prend les dérivés partiels de  $\psi$  par rapport au coordonnée cartésien, XYZ, qu'on va dire multiplier par les vecteurs unitaires de nos trois axes. On a aussi la dérivée partielle de  $\psi$  par rapport au temps. D'accord ? Alors, maintenant, si on prend un opérateur physique, HAP, par exemple, qui agit sur un élément d'espace de Hilbert, donc une fonction. Si cette fonction est une fonction propre au sens d'un vecteur propre, si vous faites agir une matrice sur un vecteur propre, vous obtenez le produit d'une valeur propre fois le vecteur propre. Alors ici, le vecteur, c'est une fonction, c'est  $\psi$ . La valeur propre, c'est aussi une fonction, c'est  $A$ . Ce HAP, c'est l'opérateur, ça, c'est l'équation au valeur propre qui apparaît pour la description de l'opérateur  $A$ , quel que soit cet opérateur. Alors ça, pour l'instant, c'était général. Ce qu'on va faire maintenant, c'est que on va considérer

notes

résumé



## 14 Mécanique classique et mécanique

- **Energie** : un mouvement est caractérisé par une variation dans le temps.

- ① Opérateur variation temporelle :  $\frac{\partial}{\partial t}$  (dérivée temporelle)

- ② Dimension :  $\hbar$  (constante de Planck réduite :  $\hbar = h/2\pi$ )

- ③ Valeur propre réelle :  $i$  (nombre imaginaire)

- **Opérateur Hamiltonien** :

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad (14.5)$$

- **Equation aux valeurs propres** :

$$\hat{H} \psi(\mathbf{r}, t) = E \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.6)$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} (\psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}) = \hbar \omega \psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} = \hbar \omega \psi(\mathbf{r}, t)$$

- **Valeurs propres de l'opérateur** : énergie photon

$$E = \hbar \omega = h\nu \in \mathbb{R} \quad \text{où } \hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ et } \omega = 2\pi\nu \quad (14.7)$$

Alors, la quantité de mouvement est importante. Il y a une autre grandeur qui est tout aussi importante, si ce n'est plus, qui est l'énergie. Quand on a un mouvement, quelque chose qui varie au cours du temps. Alors, on va se baser sur l'opérateur de variation temporelle, la dérivée partielle par rapport au temps, pour construire un opérateur qui a trait à l'énergie. Cet opérateur, on va l'appeler l'Hamiltonien. Pourquoi ? Parce qu'en mécanique analytique, l'énergie est représentée par un Hamiltonien. Donc, on a ici  $\hbar$ , qui est construit avec la dérivée partielle par rapport au temps. On aimerait un opérateur qui ait une unité d'énergie. Bon, alors si on prend un moment cinétique et qu'on le divise par un temps, on arrive à une énergie. Vous pouvez le vérifier avec les unités physiques, vous allez voir que ça marche. On aimerait des valeurs propres qui soient non seulement réelles, mais en plus, positives. Donc, il faut qu'on multiplie par un  $i$  qui est ici. On a une équation de valeurs propres, l'une des plus importantes de la physique, qui est qu' $\hbar$ , qui agit sur  $\psi$ , la fonction onde, nous retourne la valeur propre lorsque  $\psi$  est une fonction propre, qui est l'énergie multipliée par  $\psi$ . Alors, maintenant, on prend  $\hbar$ ,  $h$  chapeau, pardon, l'opérateur Hamiltonien qui est ici. On le fait agir sur le vecteur propre, le vecteur d'ondes  $\psi$ , ou la fonction onde, si vous voulez. On remplace par son expression explicite. Dans le cas d'un photon, c'est pas général, c'est pour un photon. Un photon qui se propage librement. Si on dérive par rapport au temps l'exponentiel, on va dériver le terme qui est ici, qui est un moins  $\omega t$ . On dérive par rapport au temps, on aura un moins  $\omega$  avec le  $i$  qui est devant. Je passerai tout de suite la parole.  $i$  fois moins  $i$ , ça fait plus un.

notes

résumé

29m 8s



- **Energie** : un mouvement est caractérisé par une variation dans le temps.

- ① Opérateur variation temporelle :  $\frac{\partial}{\partial t}$  (dérivée temporelle)

- ② Dimension :  $\hbar$  (constante de Planck réduite :  $\hbar = h/2\pi$ )

- ③ Valeur propre réelle :  $i$  (nombre imaginaire)

- **Opérateur Hamiltonien** :

$$\hat{H} = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad (14.5)$$

- **Equation aux valeurs propres** :

$$\hat{H} \psi(\mathbf{r}, t) = E \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.6)$$

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} (\psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}) = \hbar \omega \psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} = \hbar \omega \psi(\mathbf{r}, t)$$

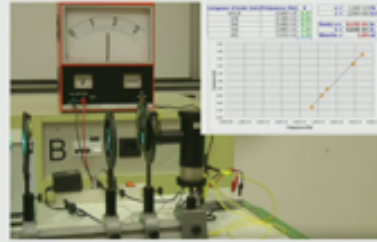
- **Valeurs propres de l'opérateur** : énergie photon

$$E = \hbar \omega = h \nu \in \mathbb{R} \quad \text{où } \hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ et } \omega = 2\pi \nu \quad (14.7)$$

Il nous reste le  $\hbar$  et le  $\omega$ . On a un  $\psi_0$  fois l'exponentiel de  $i \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$  et le moins  $\omega t$ . C'est donc  $\hbar \omega$  fois  $\psi_0$ , fonction de la position du temps. Et c'est là qu'on va voir quelque chose de magique, quelque chose que vous avez peut-être déjà entendu parler. C'est justement les valeurs propres de l'opérateur hamiltonien pour un photon. Il se trouve que l'énergie d'un photon est un multiple de sa pulsation. C'est  $\hbar$  fois  $\omega$ , mais n'oublions pas que  $\hbar$ , c'est depuis,

notes

résumé



- **Effet photoélectrique** : en éclairant une plaque métallique avec des photons de fréquence  $\nu$ , on peut arracher des électrons de certaines orbitales atomiques et leur donner une énergie cinétique,

$$T(\nu) = h\nu - W$$

où  $W$  est le travail à fournir à l'électron de charge électrique  $e$  pour le libérer de la plaque métallique (Einstein : Prix Nobel 1921). Les électrons se déposent alors sur une plaque métallique voisine et génèrent à l'équilibre une tension électrique  $V(\nu)$ ,

$$T(\nu) = eV(\nu) = h\nu - W \quad \text{ainsi} \quad V(\nu) = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$$

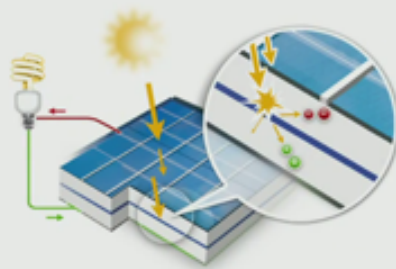
il faut  $h$  bar et  $\omega$ , c'est depuis, il faut la fréquence en mécanique quantique. La fréquence se note avec un  $\nu$ . Donc on trouve  $h$  fois  $\nu$ . L'énergie du photon est proportionnelle à sa fréquence. Et ça, c'est l'effet photoélectrique d'Albert Einstein. Oui. – C'est quoi ce vecteur  $k$  qui est multiplié par le vecteur  $r$  ? – Alors ça représente un vecteur d'onde. C'est un vecteur qui a une dimension de mètre-moins-1 et qui caractérise la propagation de l'onde dans une direction donnée. En fait, pour un mathématicien, il y a d'autres manières de voir ce vecteur  $k$ . C'est le vecteur que vous obtenez si vous faites une transformée de Fourier, vous verrez ceci l'année prochaine, une transformée de Fourier d'une fonction décrite dans l'espace et l'aide du vecteur position  $r$ . Si vous faites une transformée de Fourier par rapport à l'espace direct, vous tombez dans l'espace réciproque, l'espace de Fourier, qui est caractérisé par des  $k$ . Donc il y a une sorte de dualité entre un espace réel et un espace abstrait qui est l'espace des quantités de mouvement. Donc ce  $k$  est très important. Et justement, les propriétés de transformée de Fourier des ondes sont des propriétés particulièrement sympathiques. D'ailleurs, cet exponentiel se cache la propagation d'un signal décrit en mathématiques par des fonctions grignoles. Donc à tout un arsenal théorique là-dedans qui est très beau et qui vaut la peine d'être investigué en détail. Donc pour l'instant, vous pouvez vous le représenter simplement par un vecteur dans la dimension et l'inverse d'une distance. Donc c'est une sorte de dimension duale par rapport à un vecteur position et puis il est orienté dans la direction de la propagation d'onde. Très bien.

notes

résumé

31m 25s





- **Effet photoélectrique** : en éclairant une plaque métallique avec des photons de fréquence  $\nu$ , on peut arracher des électrons de certaines orbitales atomiques et les faire circuler dans un circuit électrique en générant un courant électrique  $I$ .
- **Applications** : les panneaux solaires et les cellules photoélectriques fonctionnent grâce à l'effet photovoltaïque.

Donc j'aimerais maintenant vous présenter une expérience qui permet, alors on ne va pas la faire en détail, mais j'ai vous présenté une expérience qui permet de déterminer la constante de Planck. Grâce à l'effet photoélectrique d'Einstein. L'idée est la suivante. On éclaire une plaque métallique avec des photons qui ont une certaine fréquence,  $\nu$ , et puis si on s'y prend bien, on va réussir à arracher des électrons de certaines orbitales atomiques. Vous pouvez penser à une sorte de bière. Vous avez une petite bille qui représente le photon, qui vient heurter un électron qui le chasse de son orbital et donc vous pouvez l'envoyer dans l'espace et regarder ce qui se passe. Concrètement, vous allez appliquer une tension entre une cathode et une anode. D'accord ? Et l'énergie cinétique que vous avez donnée aux électrons, c'est la différence entre l'énergie initiale des photons et le travail qu'il faut accomplir pour réussir à arracher les électrons de l'orbital sur laquelle ils se trouvent, ils sont soumis, à la force électrostatique qui les maintient. Autour des électrons, il faut vaincre cette force et ensuite on a une certaine énergie cinétique qui va dépendre de la fréquence. Alors, si on applique une tension avec une plaque voisine, à l'équilibre, l'énergie cinétique des électrons va être égale à leur énergie potentielle électrique qui est le produit de la charge des électrons  $e$  multipliée par la tension électrique  $V$ , qui dépend de la fréquence. D'accord ? Et ça, c'est donc  $h\nu$ , moins  $W$ . Et donc, la tension qu'on peut mesurer, on va pouvoir l'exprimer en termes de  $h$ , divisé par  $e$ , fois  $\nu$ , et puis en un terme affine, qui est ce  $W$  divisé par  $e$ , qui n'est pas très important. Ce qui est intéressant ici, c'est qu'on va avoir un comportement linéaire affinée, d'accord ? Et c'est la pente qui nous intéresse. Si on éclaire les électrons avec des photons de

notes

résumé

33m 7s

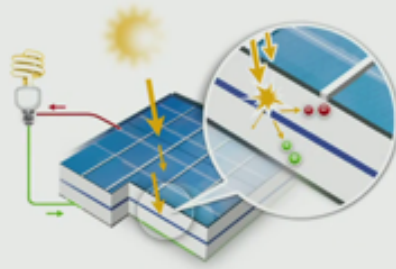




- Dr. Sylvain Bréchet

notes

résumé



- **Effet photoélectrique** : en éclairant une plaque métallique avec des photons de fréquence  $\nu$ , on peut arracher des électrons de certaines orbitales atomiques et les faire circuler dans un circuit électrique en générant un courant électrique  $I$ .
- **Applications** : les panneaux solaires et les cellules photoélectriques fonctionnent grâce à l'effet photovoltaïque.

élevée. Alors attendez, voilà. Donc là, ça va grapper encore un petit peu. Bon, après, il faudrait attendre que ça stabilise, etc. Reprendre toutes ces valeurs, ces points, les tracer sur un graphe proprement et déterminer la pente. D'accord, c'est ça l'idée. Donc là, vous avez vu le jaune. On peut le faire pour du vert, avec une fréquence plus élevée, une longueur d'onde plus courte. Vous voyez que c'est la tension augmente. On était parti pour le rouge avec une tension qui était un peu inférieure à 0,5, on le fait à 0,4 et des poussières. Vous voyez que là, on a voisine une tension de 1 V pour le vert. On a encore une valeur plus importante pour le bleu. On va dépasser le vert. Là, on sera aux alentours de 1,5. Je pense que par là autour, avec une huitante, peut-être. On pourrait même aller jusqu'à l'ultraviolet. On pourrait prendre même des fréquences encore plus élevées, mais qu'ils pourraient ne se livrer. Si on prenait des rayons X, c'est pas très bon pour la santé. Il faut se prendre protégé un peu. Les rayons GAVA, il faut les éviter comme la peste. D'accord, heureusement, on est protégé par la ionosphère terrestre. Et donc, les rayons de mangama sur Terre sont très minimes, voire quasiment inexistantes. Il y a encore une fois. Si on est exposé à des rayons gamma, ça peut créer des cancers. C'est pour ça que quand vous voyez des cosmonautes ou des astronautes qui sont en orbite autour de la Terre sur la station spatiale, ils ont des combinaisons avec des protections extrêmes pour éviter que ce genre de rayons les touche.

### notes

### résumé

- **Energie** : mécanique classique

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \quad (14.8)$$

- **Hamiltonien** : mécanique quantique

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{\mathbf{r}}) \quad (14.9)$$

- **Opérateurs** : développement mathématique

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{et} \quad \frac{\hat{p}^2}{2m} = \frac{1}{2m} (-i\hbar)^2 \nabla^2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \quad (14.10)$$

- **Equation opératorielle** :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\hat{\mathbf{r}}) \quad (14.11)$$

- **Equation de Schrödinger** : made in Switzerland (1925)

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + V(\hat{\mathbf{r}}) \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.12)$$

Bon, évidemment qu'avec l'effet photoélectrique d'Albert Einstein, en éclairant un matériau qui a des propriétés photoélectriques intéressantes comme le silicium, en général des semi-conducteurs, on arrivera à déloger des électrons ou alors les absences d'électrons qui sont des trous, qu'on arrive à se circuler dans un circuit, et ça permet de générer un courant. C'est assez standard, c'est essentiel aujourd'hui, pour une indépendance énergétique. C'est ce qu'on va faire maintenant sur ce transparent,

notes

résumé

39m 4s



- **Energie** : mécanique classique

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \quad (14.8)$$

- **Hamiltonien** : mécanique quantique

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{\mathbf{r}}) \quad (14.9)$$

- **Opérateurs** : développement mathématique  $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} = \vec{\nabla}^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{et} \quad \frac{\hat{p}^2}{2m} = \frac{1}{2m} (-i\hbar)^2 \nabla^2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \quad (14.10)$$

- **Equation opératorielle** :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\hat{\mathbf{r}}) \quad (14.11)$$

- **Equation de Schrödinger** : made in Switzerland (1925)

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + V(\hat{\mathbf{r}}) \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.12)$$

qui est peut-être le plus magique de l'ensemble du cours, c'est qu'on va commencer en haut avec l'énergie mécanique en mécanique classique, et la dernière équation, vous voyez en bas, c'est l'équation de Schrödinger. D'accord ? Bon, alors, lancez-nous. On prend l'énergie en mécanique classique et on applique ce que Dirac appelait le principe de correspondance. On confie correspondre à une fonction, un opérateur. Donc on prend l'énergie, l'opérateur correspondant, c'est l'hamiltonien. Pour le vecteur quantité de mouvement, eh bien l'opérateur vectoriel correspondant, c'est l'opérateur de quantité de mouvement. L'énergie potentielle dépend de la position, donc maintenant, ça va être une fonction de l'opérateur de position, Airchapot. Ok. Alors, maintenant, l'opérateur hamiltonien, on l'a déterminé au préalable. On a fait pareil pour la quantité de mouvement. Or, ce qui apparaît ici, qui est une dimension de  $MV^2$  qui est  $p^2$  sur  $2M$ , on peut l'écrire comme  $p^2$  sur  $2M$ , l'opérateur quantité de mouvement divisé par  $2M$ . Dans l'opérateur de quantité de mouvement, qu'est-ce qu'on a ? Moins  $\hbar$ , fois de gradient. Donc on va se retrouver avec le produit scalaire de l'opérateur gradient avec lui-même, ce qui représente l'opérateur Laplacien, parfois aussi écrit avec un tri en grand-versé comme ceci. D'accord ? Et si vous faites le calcul, ce que vous trouvez, c'est la somme des dérivés partiels, en coordonnées cartésiennes. C'est plus compliqué dans d'autres coordonnées. C'est la somme des dérivés partiels, secondes, par rapport aux trois coordonnées cartésiennes. Voilà ce que représente le Laplacien. D'accord ? Donc maintenant, on prend  $p^2$  sur  $2M$ , qui est moins  $\hbar^2$  sur  $2M$  fois de Laplacien, qu'on substitue ici. On prend  $i\hbar$  dérivée par rapport au temps qu'on substitue là. Et on tombe sur une équation opératorielle qui est ici, qui contient en fait la même information que celle qui était ici.

notes

résumé

39m 36s



- **Energie** : mécanique classique

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \quad (14.8)$$

- **Hamiltonien** : mécanique quantique

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{\mathbf{r}}) \quad (14.9)$$

- **Opérateurs** : développement mathématique  $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} = \vec{\nabla}^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

$$\hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{et} \quad \frac{\hat{p}^2}{2m} = \frac{1}{2m} (-i\hbar)^2 \nabla^2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \quad (14.10)$$

- **Equation opératorielle** :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\hat{\mathbf{r}}) \quad (14.11)$$

- **Equation de Schrödinger** : made in Switzerland (1925)

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + V(\hat{\mathbf{r}}) \psi(\mathbf{r}, t) \quad (14.12)$$

Sauf que maintenant, c'est transcrit en termes d'opérateur au lieu d'être exprimé en termes de fonction. Quand on a des opérateurs des applications linéaires,

notes

résumé

41m 37s



## Erwin Schrödinger (1887 - 1961)

Je suis stupéfait de découvrir que notre vision scientifique du monde est vraiment déficiente. Elle nous donne beaucoup d'informations précises, ordonne magnifiquement bien nos expériences du réel, mais reste terriblement muette et tristement étrangère à nos coeurs et à tout ce qui compte réellement pour nous. Elle ne peut ni nous renseigner sur le rouge ni sur le bleu, ni sur l'amer ni sur le sucré, ni sur la douleur ni sur le plaisir. Elle ne connaît rien de la beauté ou de la laideur, du bien ou du mal, de Dieu ou de l'éternité.



Erwin Schrödinger

- **Chat de Schrödinger** : un chat est enfermé dans une boîte avec une source radioactive. Il est dans un état de superposition "vivant" et "mort". Si on ouvre la boîte, on effectue une mesure et on trouve qu'il est soit "vivant" ou "mort" (probabilité 1/2).



on les fait agir sur des vecteurs. Ces vecteurs, c'est des éléments d'espace vectoriel de Hilbert, ces fonctions d'ondes, c'est le fameux  $\psi$ . Donc on va simplement placer un  $\psi$ , fonction de la position du temps, ici, là et là. Et ça donne ça, qui est l'équation de Schrödinger, celle qu'il a découverte à Zurich dans l'ignorance. D'accord ? Alors, j'aimerais vous dire quelques mots sur Schrödinger. C'était quelqu'un d'exceptionnel, à tout point de vue. Et c'est quelqu'un qui a surtout compris qu'elles étaient les limites de la science. Il a compris que ce qui était réellement intéressant, ce qui faisait la beauté de la vie, échappe complètement la science. D'accord ? Les relations interpersonnelles et relations humaines ne peuvent pas se mettre en équation. Il n'y a pas l'équation du bonheur, n'existe pas. D'accord ? Si vous allez manger un bon repas, que vous avez, et vous aurez peut-être ceci à Noël, que vous vous retrouvez avec du foie gras, que vous dégustez avec un bon sauternes, d'accord ? Ensuite, vous avez une excellente pièce de viande accompagnée d'un bon bordeaux, et que vous terminiez par un gâteau au chocolat. Eh bien, si vous décrivez ceci scientifiquement, vous pouvez décrire la composition du gâteau et des mets que vous êtes en train de déguster, mais le plaisir gustatif et la compagnie qui l'accompagne est quelque chose que vous n'allez pas réussir à mettre en équation. Et c'est ce que nous dit Schrödinger. Je suis stupéfait de découvrir que notre vision scientifique du monde est vraiment déficiente. Elle nous donne beaucoup d'informations précises, ordonne magnifiquement bien nos expériences du réel, mais reste terriblement muette et tristement étrangère à nos coeurs, et à tout ce qui compte réellement pour nous. Elle ne peut ni nous renseigner sur le rouge ni sur le bleu, en termes de fréquences, oui, mais pas sur les sensations que ça peut procurer, ni sur la mer,

## notes

## résumé

41m 45s



## Erwin Schrödinger (1887 - 1961)

Je suis stupéfait de découvrir que notre vision scientifique du monde est vraiment déficiente. Elle nous donne beaucoup d'informations précises, ordonne magnifiquement bien nos expériences du réel, mais reste terriblement muette et tristement étrangère à nos cœurs et à tout ce qui compte réellement pour nous. Elle ne peut ni nous renseigner sur le rouge ni sur le bleu, ni sur l'amer ni sur le sucré, ni sur la douleur ni sur le plaisir. Elle ne connaît rien de la beauté ou de la laideur, du bien ou du mal, de Dieu ou de l'éternité.



Erwin Schrödinger

- **Chat de Schrödinger** : un chat est enfermé dans une boîte avec une source radioactive. Il est dans un état de superposition "vivant" et "mort". Si on ouvre la boîte, on effectue une mesure et on trouve qu'il est soit "vivant" ou "mort" (probabilité 1/2).



ni sur le sucré, ni sur la douleur, ni sur le plaisir. Elle ne connaît rien de la beauté ou de la laideur, du bien, du mal, de dire ou de l'éternité. Alors Schrodinger, on lui associe souvent un animal, son petit félin de compagnie, qui se trouve ici accroché, sur son côté gauche, le fameux chat de Schrodinger. Alors je vais quand même vous raconter l'histoire du chat de Schrodinger. C'est une boutade. C'était une boutade. Schrodinger détestait cordialement Eisenberg et vice-versa, contrairement à Bord et Eisenberg qui étaient d'avis différents, mais qui se respectaient avis d'admiration mutuelle. Ce n'est pas le cas de Schrodinger et Eisenberg. Et donc l'interprétation de la mécanique quantique de l'école de Copenhague, c'est-à-dire Eisenberg, Bord et Born, d'accord, était détestée par Schrodinger, qui a voulu montrer le caractère absurde de l'application des concepts de sa théorie à l'échelle macroscopique. Si au lieu d'avoir un électron, vous remplacez l'électron par un chat, qu'est-ce que ça peut donner ? Eh bien, si vous voulez faire une mesure pour trouver l'état du chat, pouvez imaginer une expérience quelque part un peu sadique, je suis navré, mais elle a été conçue comme ceci. Donc il faut imaginer que vous placez un chat dans une boîte. Et dans cette boîte, vous allez placer une source radioactive, et une fiol de cyanure avec un marteau. Et la source radioactive a une probabilité de 50% de se désintégrer. Une probabilité de 50% ne passe pas à se désintégrer. Mais si la source radioactive, un élément qui se désintègre, à ce moment-là, de manière déterministe, de manière claire, le marteau tombe, il frappe la fiol remplie de cyanure, l'évateur de cyanure se répand dans la boîte, et malheureusement, le chat ne peut pas y survivre. Et alors, comment savoir si le chat est mort et ou vivant ? Il faut faire une expérience de mesure qui consiste dans la réalité à

## notes

## résumé

## Erwin Schrödinger (1887 - 1961)

Je suis stupéfait de découvrir que notre vision scientifique du monde est vraiment déficiente. Elle nous donne beaucoup d'informations précises, ordonne magnifiquement bien nos expériences du réel, mais reste terriblement muette et tristement étrangère à nos cœurs et à tout ce qui compte réellement pour nous. Elle ne peut ni nous renseigner sur le rouge ni sur le bleu, ni sur l'amer ni sur le sucré, ni sur la douleur ni sur le plaisir. Elle ne connaît rien de la beauté ou de la laideur, du bien ou du mal, de Dieu ou de l'éternité.



Erwin Schrödinger

- **Chat de Schrödinger** : un chat est enfermé dans une boîte avec une source radioactive. Il est dans un état de superposition "vivant" et "mort". Si on ouvre la boîte, on effectue une mesure et on trouve qu'il est soit "vivant" ou "mort" (probabilité 1/2).



ouvrir la boîte. Je suppose que le chat est très silencieux, qu'on ne peut pas savoir si il est vivant ou mort. Donc on ouvre la boîte, et là on voit si il vit encore, ou malheureusement, si il est déjà mort. Alors comment est-ce qu'on décrit ça en mécanique quantique ? Eh bien, le vecteur d'état psy qui décrit l'état du chat est une combinaison linéaire des états propres où le chat est vivant, et où il est mort. Et en faisant une mesure, c'est-à-dire une projection dans l'espace de Hilbert, on trouvera alors une probabilité de 50% d'avoir un chat vivant, une probabilité de 50% d'avoir un chat mort. On va revenir là-dessus, plus tard avec le spin des électrons, mais l'idée sera essentiellement la même. Alors, si on décrit, disons, non, si on interprète vraiment l'état qu'on retrouve en mécanique quantique comme un état réel qu'on peut avoir, on a quelque chose d'assez absurde, parce qu'une combinaison linéaire d'un chat vivant et d'un chat mort, ça veut strictement rien dire, et là, il faut quand même accorder du crédit à Schrödinger, qui a compris que c'était absurde. Ce qui a fait dire à Carlo Rovelli, qui est le fondateur de la mécanique quantique La Bucle, qui a écrit un très bon livre sur l'histoire de la mécanique quantique, qui s'appelle Helgauland, en référence à Eisenberg, que psy peut s'interpréter, en ce sens, c'est l'interprétation de la mécanique quantique relationnelle de Rovelli, comme psy s'interprète comme l'information du système chat, dû à son interaction avec l'environnement. Donc, avant d'avoir fait la mesure, l'information qu'on a, c'est une possibilité que le chat soit vivant ou mort. Au moment où on a fait la mesure, on fait une projection dans un espace vectoriel abstrait, et là, on retrouve, soit le chat vivant, soit le chat mort.

## notes

## résumé

**14.2 Chimie quantique**

14.2.1 Atome d'hydrogène

14.2.2 Orbitales de l'atome d'hydrogène

14.2.3 Spin

Sauf que quand on a fait la mesure, qu'on enlève la boîte, si le chat est vivant, on suppose qu'on retire tout de suite le dispositif radioactif, il reste vivant. D'accord ? S'il est mort, il va pas tout d'un coup ressusciter. D'accord ? Donc, il soit vivant, soit mort.

notes

résumé

47m 1s



- **Energie** : mécanique classique (2 corps : proton fixe)

$$E = \frac{\mathbf{p}_r^2}{2m_e} + \frac{L^2}{2m_e r^2} + V_C(\mathbf{r}) \quad \text{où} \quad V_C(\mathbf{r}) \equiv -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (14.13)$$

- **Hamiltonien** : mécanique quantique

$$\hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{\mathbf{r}}) \quad \text{où} \quad V_C(\hat{\mathbf{r}}) \equiv -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \hat{1} \quad (14.14)$$

- **Equation aux valeurs propres** : symétrie sphérique  $\mathbf{r} = (r, \theta, \phi)$

$$\hat{H} \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.15)$$

- **Equation de Schrödinger stationnaire** : (14.14)  $\Rightarrow$  (14.15) = (14.16)

$$\left( \frac{\hat{\mathbf{p}}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{\mathbf{r}}) \right) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi)$$

- Fonctions propres  $\psi_{n,\ell,m_\ell}$  : vecteurs de l'espace de Hilbert  $\mathcal{H}$
- Valeurs propres  $E_n < 0$  où  $n \in \mathbb{N}^*$  : niveaux d'énergie

Alors, je vous propose qu'on prenne une pause, et dans un quart d'heure, je vous explique la suite de la saga, et on va ensemble déterminer la structure de l'atome d'hydrogène, et on va discuter ensuite de l'information quantique. ... Voilà, j'en profite pour faire un petit commentaire qui fait un peu écho, disons, à la pause où j'ai retrouvé d'anciens étudiants qui voulaient devenir assistants de cours dans le futur. Si vous avez aimé le cours de physique, vous pouvez ne pas l'avoir aimé, hein, mais si vous avez aimé le cours de physique, que vous avez envie d'être assistants de ce cours, que vous avez une note qui est suffisamment bonne, disons, 5,25, 5,5 ou plus, d'accord ? N'hésitez pas à m'envoyer plus tard, donc, ça sera cet été, votre CV avec une photo et puis une petite lettre de motivation, vous expliquez que vous avez l'enseignement. Pourquoi la photo ? Ça me permet de me rappeler qui vous êtes. Si on interagit, vous avez posé des questions, comme ça, je peux savoir si vous feriez un ou une bonne assistante. Il faut savoir que les notes sont importantes, mais il n'y a pas que ça, parce qu'il est évidemment mieux d'avoir un ou une assistante qui a fait un 5,25 ou un 5,5, et qui s'est expliqué la matière qui est passionnée plutôt que d'avoir quelqu'un qui a eu six, mais qui n'arrive pas à la cesser chaussures, d'accord ? Voilà. Donc, je dis ça comme ça. Si jamais ça vous intéresse, vous gardez ça dans un coin de votre tête, à l'esprit, puis vous m'envoyez un email le moment venu, il est évidemment idéal quand on fait de l'assistanat de se retrouver avec des étudiants de la volée d'après dans la même section, d'accord ? À tous les niveaux, c'est bénéfique. Donc, c'est pour ça que je privilégie, si je peux, des étudiants qui viennent de la

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

47m 16s



- **Energie** : mécanique classique (2 corps : proton fixe)

$$E = \frac{\mathbf{p}_r^2}{2m_e} + \frac{L^2}{2m_e r^2} + V_C(\mathbf{r}) \quad \text{où} \quad V_C(\mathbf{r}) \equiv -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (14.13)$$

- **Hamiltonien** : mécanique quantique

$$\hat{H} = \frac{\hat{\mathbf{p}}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{\mathbf{r}}) \quad \text{où} \quad V_C(\hat{\mathbf{r}}) \equiv -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (14.14)$$

- **Equation aux valeurs propres** : symétrie sphérique  $\mathbf{r} = (r, \theta, \phi)$

$$\hat{H} \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.15)$$

- **Equation de Schrödinger stationnaire** : (14.14)  $\Rightarrow$  (14.15) = (14.16)

$$\left( \frac{\hat{\mathbf{p}}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{\mathbf{r}}) \right) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi)$$

- Fonctions propres  $\psi_{n,\ell,m_\ell}$  : vecteurs de l'espace de Hilbert  $\mathcal{H}$
- Valeurs propres  $E_n < 0$  où  $n \in \mathbb{N}^*$  : niveaux d'énergie

section de mathématiques pour ce cours-là. Bon, ceci étant dit, passons maintenant à la chimie quantique. Quand on aura terminé toute cette partie

notes

résumé

- Equation de Schrödinger stationnaire : (14.16)

$$\left( \frac{\hat{p}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{r}) \right) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi)$$

- Opérateur moment cinétique : où  $\hat{r} = r \hat{\mathbf{r}}$

$$\hat{L} = \hat{r} \times \hat{p} = r \times (-i\hbar \nabla) = -i\hbar r \times \nabla \quad (14.17)$$

- Equation aux valeurs propres : moment cinétique

$$\hat{L}^2 \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = \hbar^2 \ell(\ell+1) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.18)$$

- Equation aux valeurs propres : projection du moment cinétique

$$\hat{L}_z \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = \hbar m_\ell \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.19)$$

- Fonction propre : fonction radiale et fonction harmonique sphérique

$$\psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = R_{n,\ell}(r) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) \quad (14.20)$$

sur la mécanique quantique, je vous donnerai des informations sur l'examen et on verra aussi de belles expériences de cours. Bon. Alors, c'est quoi, un atome d'hydrogène ? C'est un électron qui, quelque part, a un mouvement autour d'un proton. C'est un problème à deux corps. Seulement, voilà, la masse de l'électron est les quelques ordres de grandeur inférieure à la masse du proton. C'est un facteur de l'ordre de 4.400-4.500. Ce qui veut dire qu'on peut considérer en première approximation, c'est une très bonne approximation, que le proton est fixe et qu'on regarde la dynamique de l'électron autour du proton. Comme on l'avait fait avec le système Terre-Soleil où le Soleil était fixe, on gardait la dynamique de la Terre autour du Soleil. D'accord ? Après le problème à deux corps, ce qu'on avait fait, peut-être penser au système Terre-Soleil, c'est qu'on a écrit que l'énergie, c'est l'énergie radiale de la Terre ou de la planète par rapport au Soleil, qui est la quantité de mouvement radial au carré divisé par 2 fois la masse, plus un terme d'énergie cinétique de rotation, le terme centrifuge, avec le moment cinétique au carré divisé par 2 fois la masse, fois rayon carré. Et puis on avait encore un terme d'énergie potentielle. Alors pour le problème à deux corps, dans le cas du système gravitationnel, c'était l'énergie potentielle liée à la force de la gravitation universelle. Ici, on a un électron, un proton. L'énergie, c'est celle qui est liée à la force de coulomb, la force électrique, qui va donc pas faire intervenir le produit des masses, mais le produit des charges. Donc c'est la charge d'électron au carré, multiplié par moins un. On a ici une constante qui est 1 sur 4 pids epsilon zéro, où epsilon zéro est la permittivité électrique du vide. Et on a le facteur air. L'énergie potentielle est en inverse de la distance. Alors, on applique

notes

résumé

49m 40s



- Equation de Schrödinger stationnaire : (14.16)

$$\left( \frac{\hat{p}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{r}) \right) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi)$$

- Opérateur moment cinétique : où  $\hat{r} = r \hat{\mathbf{1}}$

$$\hat{L} = \hat{r} \times \hat{p} = r \times (-i\hbar \nabla) = -i\hbar r \times \nabla \quad (14.17)$$

- Equation aux valeurs propres : moment cinétique

$$\hat{L}^2 \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = \hbar^2 \ell(\ell+1) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.18)$$

- Equation aux valeurs propres : projection du moment cinétique

$$\hat{L}_z \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = \hbar m_\ell \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.19)$$

- Fonction propre : fonction radiale et fonction harmonique sphérique

$$\psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = R_{n,\ell}(r) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) \quad (14.20)$$

notes

résumé

- Equation de Schrödinger stationnaire : (14.16)

$$\left( \frac{\hat{p}_r^2}{2m_e} + \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2} + V_C(\hat{r}) \right) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = E_n \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi)$$

- Opérateur moment cinétique : où  $\hat{r} = r \hat{\mathbf{1}}$

$$\hat{L} = \hat{r} \times \hat{p} = r \times (-i\hbar \nabla) = -i\hbar r \times \nabla \quad (14.17)$$

- Equation aux valeurs propres : moment cinétique

$$\hat{L}^2 \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = \hbar^2 \ell(\ell+1) \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.18)$$

- Equation aux valeurs propres : projection du moment cinétique

$$\hat{L}_z \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = \hbar m_\ell \psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) \quad (14.19)$$

- Fonction propre : fonction radiale et fonction harmonique sphérique

$$\psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = R_{n,\ell}(r) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) \quad (14.20)$$

ces niveaux d'énergie sont tous négatifs. D'accord ? Et là, pour un mathématicien, vous voyez quelque chose d'incroyable. Si vous prenez l'opérateur hamiltonien, il a deux spectres. Le spectre, c'est l'ensemble des valeurs propres. Il y a un spectre discret pour les énergies négatives, et il y a un spectre continu pour les énergies positives, où l'électron n'est pas lié à un atome, mais il se déplace simplement, il est dévié par la présence de l'atome. Donc, on voit que le discret et le continu se combinent dans le cadre de la mécanique quantique, et le monde dans lequel on vit a une composante discrète et une composante continue. C'est donc le formalisme de la mécanique quantique qui est le plus adapté pour pouvoir le décrire.

notes

résumé

- Equation aux valeurs propres : fonction radiale (14.21)

$$\left( \underbrace{-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2}}_{= \frac{\hat{p}_r^2}{2m_e}} r^2 + \underbrace{\frac{\hbar^2 \ell(\ell+1)}{2m_e r^2}}_{= \frac{\hat{L}^2}{2m_e r^2}} - \underbrace{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}}_{= V_C(\vec{r})} \right) R_{n,\ell}(r) = E_n R_{n,\ell}(r)$$

- Equations aux valeurs propres : fonction harmonique sphérique

$$\left( \underbrace{-\hbar^2 \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) - \frac{\hbar^2}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}}_{= \hat{L}^2} \right) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) = \hbar^2 \ell(\ell+1) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi)$$

$$\underbrace{\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial \phi}}_{= \hat{L}_z} Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) = \hbar m_\ell Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) \quad (14.22)$$

- Niveaux d'énergie : où  $E_I$  est l'énergie d'ionisation d'un électron

$$E_n = -\frac{E_I}{n^2} \quad \text{et} \quad E_I = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \quad (14.23)$$

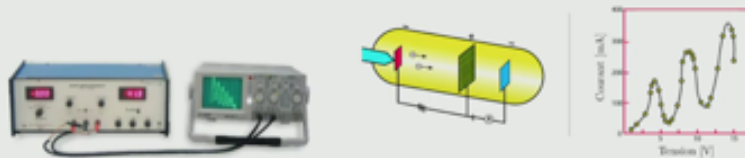
Alors, ce qu'on peut faire rapidement pour l'opérateur moment scientifique, c'est utiliser le principe de correspondance, et l'écrire comme le produit vectoriel de l'opérateur position avec l'opérateur quantité de mouvement. Et on aura une équation au valeur propre pour le carré de l'opérateur moment scientifique. En gros, c'est pour la norme du moment scientifique, si vous voulez. D'accord ? Donc, si on le fait agir sur cette fonction nonde, qui est la même fonction propre que celle de la mitternir, je n'ai pas voulu démontrer ici, c'est fait dans les notes. D'accord ? On obtient quelque chose qui a une unité de moment scientifique au carré, on a un âge barre carré, et on a des nombres quantiques qui apparaissent des petits L, L fois L plus 1, où L est le nombre azimutale. On peut aussi prendre le moment scientifique et le projeter selon l'axe vertical. Donc, on a l'opérateur composante vertical du moment scientifique. Pourquoi on prend la composante verticale ? Parce que quand on définit des coordonnées sphériques, on le prend par rapport à la verticale. C'est cet axe-là qu'on considère ici. On a avoir âge barre, foie le troisième nombre quantique, qui est le nombre magnétique orbital. Bon. Notre fonction propre qui décrit l'état de l'atome d'hydrogène, on peut l'exprimer comme le produit d'une partie radiale qui dépend uniquement d'accordonnées radiales R, et d'une partie angulaire qui dépend de détails de fi, qui sont ce qu'on appelle les harmoniques sphériques. Alors, maintenant,

notes

résumé

54m 10s





- **Frank et Hertz** : des électrons sont arrachés d'une cathode par une tension  $V$  appliquée entre deux plaques dans une enceinte remplie de vapeur de mercure. Lorsque l'énergie  $eV$  des électrons correspond à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie du mercure,

$$eV = \Delta E = E_{n+1} - E_n$$

ils cèdent leur énergie aux électrons du niveau inférieur  $E_n$  pour leur permettre d'effectuer une transition vers le niveau supérieur  $E_{n+1}$ . Ils sont alors arrêtés et n'atteignent pas l'anode : ils ne participent alors pas au courant  $I$ .

- **Observation** : les niveaux d'énergie  $E_n$  successifs sont mis en évidence par une chute importantes du courant  $I$  en fonction de la tension  $V$ .

si on tient compte de cette structure, on réécrit notre opérateur hamiltonien, qu'est-ce qu'on voit ? Il n'y a que la coordonnée radiale qui apparaît dans la structure des opérateurs. Donc, on avait la fonction ondu, à gauche, à droite. On va pouvoir diviser par la partie harmonique sphérique, supposée qu'elle est différente de zéro, d'accord ? Et il nous reste uniquement la partie radiale. En revanche, si on écrit en coordonnée sphérique, le carré de l'opérateur moment cinétique, c'est un peu compliqué, c'est assez de structure-là, et là, vous voyez que c'est les âmes qui apparaissent, c'est pas les coordonnées radiales. Donc, vous prenez la fonction ondu, le psi, et vous divisez par la partie radiale, il reste que la partie angulaire, les harmoniques sphériques. On a une équation, on va leur propre, pour les harmoniques sphériques. En fait, on en a une deuxième, puisqu'on a aussi une équation au valeur propre pour la composante verticale qui est ici. Alors, on se retrouve avec 3 équations au valeur propre qu'on peut résoudre dans un espace de fonction. Et si on fait ça proprement, on trouve alors, ça prend un certain nombre de pages, on trouve alors les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène, qui sont en fait des multiples de ce qu'on appelle l'énergie ionisation. L'énergie ionisation, c'est l'énergie qu'il faut fournir à l'électron, lorsqu'il est sur le niveau d'énergie le plus bas, pour pouvoir l'arracher de l'atome. Donc, cette énergie est positive, les niveaux d'énergie sont négatifs, d'où signe moins, et vous allez avoir ici, au dénominateur, un  $N^2$  qui apparaît. L'énergie ionisation, on va y faire apparaître. La masse de l'électron, la charge de l'électron,  $\hbar$ , epsilon 0, yapi, tout se cache là-dedans. Alors, cette existence de niveau d'énergie,

notes

résumé

55m 33s



- **Fonction propre** : fonction radiale et fonction harmonique sphérique

$$\psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = R_{n,\ell}(r) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) \quad (14.20)$$

- **Vecteur** : espace de Hilbert (notation de Dirac : appelé "ket")

$$|n, \ell, m_\ell\rangle \equiv \psi_{n,\ell,m_\ell} \in \mathcal{H} \quad (14.24)$$

- **Nombres quantiques** :

- ① Nombre quantique principal (niveaux d'énergie) :  $n$

$$n \in \mathbb{N}^* \quad (14.25)$$

- ② Nombre quantique azimutal (moment cinétique) :  $\ell$

$$0 \leq \ell \leq n - 1 \quad (14.26)$$

- ③ Nombre quantique magnétique (projection du moment cinétique) :  $m_\ell$

$$-\ell \leq m_\ell \leq \ell \quad (14.27)$$

on peut la mettre en évidence au niveau pratique. Comment est-ce qu'on fait ceci ? Eh bien, on prend un tube cathodique qui est ici. Dans ce tube, on a des vapeurs de mercure. On va appliquer une tension entre la cathode et la anode qui est ici. D'accord ? Et se faisant, on va arracher les électrons de la cathode. Ces électrons, ils vont interagir avec les atomes de mercure présentes dans les vapeurs du tube. Et alors, si l'énergie des électrons, qui va être le produit de leur charge, fois la tension à laquelle ils sont soumis, si cette énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie, disons le  $n$  et le  $n$  plus un, eh bien, on aura un arc atomique. C'est-à-dire qu'on a nos électrons qui, comme la boule blanche, vont venir frapper les boules de couleur, qui sont les électrons présents sur l'orbital  $n$ , qui vont ensuite être déplacés vers l'orbital  $n$  plus 1. Et donc, les électrons qui ont été arrachés ne vont pas pouvoir rejoindre ici la anode, ce qui veut dire que le courant diminue. Donc, ce qu'on va faire maintenant, c'est qu'on va faire une rampe de tension, on va faire augmenter la tension, et puis, on va voir que le courant présente des minima, les minima sans ceux que vous voyez ici, d'accord ? Pourquoi ? Parce que, justement, on a une énergie correspondante qui correspond à la différence entre deux niveaux d'énergie, c'est-à-dire qu'on va mettre en évidence les niveaux d'énergie des atomes de mercure. D'accord ? Alors, vous allez voir ça sur la caméra qui est ici. Il faut lancer d'abord l'expérience, ça prend un petit peu de temps. Voilà, on crée la rampe, de manière systématique, et maintenant, vous voyez que ces niveaux d'énergie commencent à apparaître avec la présence de cette diminution du courant, selon l'axe vertical, en fonction de la tension, selon

notes

résumé

57m 10s



- **Fonction propre** : fonction radiale et fonction harmonique sphérique

$$\psi_{n,\ell,m_\ell}(r, \theta, \phi) = R_{n,\ell}(r) Y_{\ell,m_\ell}(\theta, \phi) \quad (14.20)$$

- **Vecteur** : espace de Hilbert (notation de Dirac : appelé "ket")

$$|n, \ell, m_\ell\rangle \equiv \psi_{n,\ell,m_\ell} \in \mathcal{H} \quad (14.24)$$

- **Nombres quantiques** :

- ① Nombre quantique principal (niveaux d'énergie) :  $n$

$$n \in \mathbb{N}^* \quad (14.25)$$

- ② Nombre quantique azimutal (moment cinétique) :  $\ell$

$$0 \leq \ell \leq n - 1 \quad (14.26)$$

- ③ Nombre quantique magnétique (projection du moment cinétique) :  $m_\ell$

$$-\ell \leq m_\ell \leq \ell \quad (14.27)$$

l'axe horizontal. D'accord ? Donc là, vous avez une démonstration du caractère quantique de la matière. Bon.

notes

résumé

$$|n, \ell, m_\ell\rangle \equiv \psi_{n,\ell,m_\ell} \in \mathcal{H}$$

 $\ell = 0$ 

Etats s

 $|1, 0, 0\rangle$ 
 $|2, 0, 0\rangle$ 
 $|3, 0, 0\rangle$ 

nombre azimutal

nombre  
magnétique

nombre principal

 $\ell = 1$ 

Etats p

 $|2, 1, -1\rangle$ 
 $|2, 1, 0\rangle$ 
 $|2, 1, 1\rangle$ 
 $|3, 1, -1\rangle$ 
 $|3, 1, 0\rangle$ 
 $|3, 1, 1\rangle$ 
 $\ell = 2$ 

Etats d

 $|3, 2, -2\rangle$ 
 $|3, 2, -1\rangle$ 
 $|3, 2, 0\rangle$ 
 $|3, 2, 1\rangle$ 
 $|3, 2, 2\rangle$ 

Dr. Sylvain Bréchet

14 - Mécanique classique et mécanique quantique

18 / 28

Alors, cette fonction non propre pour l'atome d'hydrogène, qui est le produit de la partie radiale et de la partie angulaire, peut être, ils ont perçu, comme un vecteur d'un espace vectoriel abstrait qui est l'espace de Hilbert, et là, on va utiliser la notation de Dirac, qui consiste à introduire un trait vertical et une parenthèse angulaire à droite. En jargon d'algèbre linéaire, vous pouvez concevoir ce vecteur comme un vecteur colonne. C'est l'équivalent d'un vecteur colonne. Vous allez voir ce qu'est le vecteur ligne un petit peu plus tard. C'est le dual de ce vecteur. C'est l'élément du espace vectoriel dual qui sera le vecteur ligne. D'accord ? Alors, si on prend les nombres quantiques qui caractérisent ce vecteur, on a le nombre quantique principal, c'est un nombre entier, qui varie de 1 jusqu'à le niveau que vous pouvez atteindre en excitation en matière. On a un deuxième nombre qui est le nombre azimutal, et en fait, on peut montrer par conservation d'énergie mécanique que le nombre quantique azimutal ne peut pas être plus grand que le nombre quantique moins 1. D'accord ? Et puis, il est nécessairement positif ou à la rigueur nulle, mais il ne sera jamais négatif. D'accord ? Maintenant, si vous imaginez que vous faites tourner, par exemple, cette bouteille des vins, elle a un certain moment cinétique. On l'a fait tourner autour de l'axe vertical. Si on l'a fait tourner dans le bon sens, on a une valeur maximale. Si on regarde l'axe dans l'autre sens, on a son opposé. D'accord ? Puis on peut imaginer, en prenant des valeurs intermédiaires, qu'on va se retrouver avec des valeurs intermédiaires. Des valeurs intermédiaires qui sont quantifiées, d'accord, par des entiers. Donc, la projection du moment cinétique selon l'axe vertical peut avoir une valeur maximale pour  $M_L$ , qui est  $L$ , une valeur minimale qui est moins  $L$ . Et  $M_L$  va donc varier par un quantum d'un

notes

résumé

59m 19s



$$|n, \ell, m_\ell\rangle \equiv \psi_{n,\ell,m_\ell} \in \mathcal{H}$$

 $\ell = 0$ 

Etats s

 $|1, 0, 0\rangle$ 
 $|2, 0, 0\rangle$ 
 $|3, 0, 0\rangle$ 

nombre azimutal

nombre  
magnétique

nombre principal

 $\ell = 1$ 

Etats p

 $|2, 1, -1\rangle$ 
 $|2, 1, 0\rangle$ 
 $|2, 1, 1\rangle$ 
 $|3, 1, -1\rangle$ 
 $|3, 1, 0\rangle$ 
 $|3, 1, 1\rangle$ 
 $\ell = 2$ 

Etats d

 $|3, 2, -2\rangle$ 
 $|3, 2, -1\rangle$ 
 $|3, 2, 0\rangle$ 
 $|3, 2, 1\rangle$ 
 $|3, 2, 2\rangle$ 

unité entre moins L et plus L. Et ce qui est fou, c'est que ceci va nous permettre de comprendre la structure du tableau périodique des éléments. Aussi incroyable que ça puisse paraître. Vous allez voir. On a donc notre orbital, qui, en écriture, en notation directe, est caractérisé par les trois nombres quantiques, N, L et ML. Est-ce que vous avez entendu parler, dans un cours introductif, de chimie d'orbital de type S, de type P, de type D, de type F ? Oui, c'est le cas ? Oui ? Ok. Alors, c'est des termes techniques qui sont en fait liés à la valeur de L. D'accord ? Elles sont classifiées ces orbitales par rapport à L. Alors, regardons le cas où L égale 0. Si L égale 0, ML varie entre moins 0 et plus 0, donc ML, c'est 0 aussi. Donc, on a comme deuxième et troisième nombre quantique des 0. Ensuite, on peut avoir un état qui se trouve sur le premier niveau d'énergie, sur le deuxième niveau d'énergie, sur le troisième niveau d'énergie. Rappellations en instant. On a une structure, si on fait le calcul, on voit qu'on a quelque chose qui est parfaitement radial. Pourquoi ? Ok. S'il n'y a pas de moment cinétique, on a une dynamique très particulière, parce que, si vous prenez un électron, un naïvement,

notes

résumé

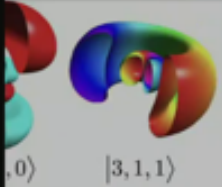
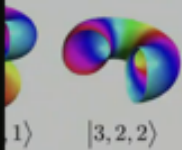
nombre azimutal

nombre

↙ magnétique

 $|n, \ell, m_\ell\rangle$ 

nombre principal

 $|,0\rangle$  $|3, 1, 1\rangle$  $|1\rangle$  $|3, 2, 2\rangle$ 

18 / 28

### 14.2.3 Spin

- **Spin** : moment cinétique intrinsèque  $\hat{S}$  indépendant
  - Moment cinétique défini à une constante près : le
  - Fonction propre : vecteur de l'espace de Hilbert |

- Equation aux valeurs propres : spin

$$\hat{S}^2 |s, m_s\rangle = \hbar^2 s(s+1) |s, m_s\rangle$$

- **Equation aux valeurs propres** : projection du spi

$$\hat{S}_z |s, m_s\rangle = \hbar m_s |s, m_s\rangle$$

- **Spin** : électron, proton, neutron :

$$s = \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad -s \leq m_s \leq s \quad \Rightarrow \quad m_s \in \left\{ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\}$$

- Spin up :  $|\uparrow\rangle = \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle$  • Spin down

- **Orbitale** : deux états propres spin électron (spin u

$$|n, \ell, m\rangle \otimes |s, m_s\rangle \in L^2(\mathbb{R}^3) \otimes \mathbb{C}^2 \quad \text{où} \quad |s, m_s\rangle$$

Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

fait tourner sur un cercle, vous avez un moment cinétique, vous êtes d'accord ? Sur une trajectoire elliptique aussi. D'accord ? Du moment où il y a une rotation, il y a un moment cinétique. Comment faire pour que globalement, il n'y en ait pas ? Il faut imaginer que pour chaque trajectoire possible de l'électron, il y a une trajectoire inverse. Et ceci, dans les trois directions de l'espace, autour d'un point, ce qui naturellement donne une structure sphérique. Donc, ça n'a pas d'équivalent classique, ces états S. D'accord ? Elle est égale à 0. Il n'y a pas d'axe privilégié symétrie. Tout axe est un axe de symétrie. Bon. Alors, maintenant, il y a les états P, les orbitals P. Pour les orbitals P, L égale 1. Vous avez un axe de symétrie. Le voilà. D'accord ? Et puis, L v au 1, ce qui veut dire que ML varie entre moins 1, 1 et 0. Enfin, entre moins 1, 0 et 1 plutôt, je devrais le dire. Donc, il faut aussi que N soit plus grand au égal, disons, à L plus 1. L v au 1. Et puis, N, le N qu'on doit avoir pour pouvoir apparaître ces orbitals, c'est le deuxième niveau d'énergie. On n'en a pas sur le premier niveau d'énergie. C'est pour ça que si vous regardez le tableau périodique des éléments, sur la première ligne, il n'y a quasiment rien. Pourquoi ? Parce que sur la première ligne, vous avez que des orbitales S. Il n'y a pas d'orbital P. Les orbitals P apparaissent sur la deuxième ligne qui est ici. D'accord ? Vous avez 3 orbitals P. D'accord ? Pour chaque niveau d'énergie, pour le deuxième, pour le troisième, j'aimerais juste encore ajouter un petit commentaire. Il y a un code de couleur quand c'est rouge, c'est positif, quand c'est bleu, c'est négatif. Donc, c'est réel pour L égale 0. Ça

## notes

## résumé

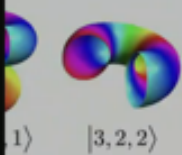
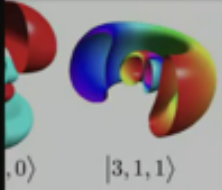
62m 49s



nombre azimutal

nombre  
magnétique $|n, \ell, m_\ell\rangle$ 

nombre principal



18 / 28

## 14.2.3 Spin

- **Spin** : moment cinétique intrinsèque  $\hat{S}$  indépendant
  - Moment cinétique défini à une constante près : le
  - Fonction propre : vecteur de l'espace de Hilbert

- **Equation aux valeurs propres : spin**

$$\hat{S}^2 |s, m_s\rangle = \hbar^2 s(s+1) |s, m_s\rangle$$

- **Equation aux valeurs propres : projection du spin**

$$\hat{S}_z |s, m_s\rangle = \hbar m_s |s, m_s\rangle$$

- **Spin** : électron, proton, neutron :

$$s = \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad -s \leq m_s \leq s \Rightarrow m_s \in \left\{ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\}$$

$$\text{Spin up : } |\uparrow\rangle = \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle$$

$$\text{Spin down : } |\downarrow\rangle = \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

- **Orbitale** : deux états propres spin électron (spin up et spin down)

$$|n, \ell, m\rangle \otimes |s, m_s\rangle \in L^2(\mathbb{R}^3) \otimes \mathbb{C}^2 \quad \text{où} \quad |s, m_s\rangle$$

Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

devient complexe à tous les niveaux pour  $L$  égale 1. Donc là, on est dansé. C'est-à-dire qu'on a un code de couleur un peu particulier qui rencontre la présence de parties imaginaires et de parties réelles. Maintenant, vous avez des états  $D$  pour lesquels  $L$  égale 2, les orbitales  $D$ , si  $L \geq 2$ ,  $m_L$  varie entre moins 2, moins 1, 0, 1 et 2. Il y a donc 5 orbitales possibles. Pour qu' $L$  soit égal à 2, il faut que  $N$  soit en tout cas égal à 3. Donc, pour le niveau  $N$  égal à 3, on a des orbitales qui ressemblent à ça. Et là, il faudra attendre d'être sur la troisième ligne du tableau de Mendelief pour voir apparaître ces orbitales  $D$ . D'accord ? Maintenant, si vous êtes perspicace, que vous regardez le nombre de cases présentes sur la première, la deuxième et la troisième ligne, vous allez voir que vous avez plus de cases que le nombre d'orbitales. En fait, il y a deux fois autant de cases que d'orbitales. Pourquoi ? Parce qu'il y a une propriété interne qui va caractériser l'électron. Qui est-ce qu'on appelle son moment signétique intrinsèque ou encore son spin ? Le spin peut être dans une position up ou dans une position down.

notes

résumé

de rotation

$$\psi_{s, m_s} \in \mathbb{C}^{2s+1}$$

(14.28)

(14.29)

(14.30)

$$\left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

(14.31)

$$|\downarrow\rangle\}$$

19 / 28

## 14.2.3 Expérience - Stern-Gerlach



- **Stern-Gerlach** : un faisceau d'atomes d'argent avec un spin envoyé dans l'entrefer de deux aimants où règne un champ magnétique inhomogène (Prix Nobel 1943). Le spin des atomes d'argent est dans un état de superposition entre spin up et spin down,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle)$$

- **Champ magnétique** : le champ magnétique vertical inhomogène dévie les atomes de spin up  $|\uparrow\rangle$  vers le haut et les atomes de spin down  $|\downarrow\rangle$  vers le bas. On observe deux taches égales en haut et en bas.
- **Interprétation** : la mesure du spin des atomes d'argent avec le Stern-Gerlach donne un spin up  $|\uparrow\rangle$  avec une probabilité 1/2 et un spin down  $|\downarrow\rangle$  avec une probabilité 1/2.
- **Processus de mesure** : le processus de mesure est probabiliste.

Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

Le moment magnétique, comme on l'a vu ensemble, est défini à une constante près. Cette constante, c'est le spin des particules fondamentales. Le spin se comporte comme un moment magnétique. S se comporte comme L. Sauf que, maintenant, pour le spin, il y a un certain nombre d'états possibles. En fait, on peut montrer que la fonction d'onde qui décrit l'état du spin va être un élément de  $\mathbb{C}$  à la puissance de  $S+1$ . Pour  $S$  égale une demi, c'est  $\mathbb{C}^2$ .  $\mathbb{C}^2$  veut dire qu'il y a deux vecteurs propres. On reviendra là-dessus. On a une équation de valeur propre pour l'opérateur spin, pour la composante verticale. Là où ça devient intéressant, c'est justement cette composante verticale où la valeur propre, c'est le nombre magnétique de spin  $m_s$ . Alors,  $m_s$  comme  $m_l$ , va varier entre moins  $S$  et plus  $S$  par un crément d'unité. D'accord ? Le voilà. Si vous avez des particules, comme l'électron, le proton et le neutron, c'est des fermions, qui plus est des fermions de spin 1/2 ? Il y a deux types de particules. Il y a des fermions et des bosons. Les bosons comme les photons sont des particules de spin entiers. Les fermions des particules de spin 1/2 entiers. Et ceci se reflète mathématiquement par la symétrie que les fonctions dont il est caractérisé sous échange de leurs arguments. Alors,  $m_s$  peut varier donc entre moins 1/2 et plus 1/2. Il y a deux valeurs possibles, soit moins 1/2, soit plus 1/2. Donc on a un premier vecteur avec  $S$  moins 1/2  $m_s$ , plus 1/2. Donc le spin est orienté selon l'axe. On parle de spin-up. Et on a un deuxième vecteur avec  $S$  moins 1/2  $m_s$ , soit moins 1/2, soit moins 1/2, soit moins 1/2, soit moins 1/2, soit moins 1/2. Où le spin est orienté dans l'essence opposée à l'axe. C'est le spin-down en l'y représente par

notes

résumé

65m 55s



de rotation

$$\psi_{s, m_s} \in \mathbb{C}^{2s+1}$$

(14.28)

(14.29)

(14.30)

$$\left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

(14.31)

$$|\downarrow\rangle\}$$

19 / 28

## 14.2.3 Expérience - Stern-Gerlach



- **Stern-Gerlach** : un faisceau d'atomes d'argent avec un spin envoyé dans l'entrefer de deux aimants où règne un champ  $m$  inhomogène (Prix Nobel 1943). Le spin des atomes d'argent dans un état de superposition entre spin up et spin down,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle)$$

- **Champ magnétique** : le champ magnétique vertical inhomogène dévie les atomes de spin up  $|\uparrow\rangle$  vers le haut et les atomes de spin down  $|\downarrow\rangle$  vers le bas. On observe deux taches égales en haut et en bas.
- **Interprétation** : la mesure du spin des atomes d'argent avec le Stern-Gerlach donne un spin up  $|\uparrow\rangle$  avec une probabilité 1/2 et un spin down  $|\downarrow\rangle$  avec une probabilité 1/2.
- **Processus de mesure** : le processus de mesure est probabiliste.

Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

des flèches. Alors maintenant, on satisfait le principe d'exclusion de Pauli qui stipule, et qui est correct, que deux fermions ne peuvent pas être dans le même état. Donc on peut avoir deux électrons qui ont les mêmes propriétés orbitales sur la même orbite. Pourquoi ? Parce qu'ils peuvent avoir une propriété de spin opposée, un spin-up et un spin-down. Donc le vecteur d'état qui caractérise complètement l'électron sur l'atome d'hydrogène est constitué d'une première partie orbitale, du deuxième partie lié au spin. Et on a un produit tensoriel entre les deux. Comme ça c'est technique, l'idéal.

notes

résumé



Ce spin des particules fondamentales, le spin des électrons, il a été mis en évidence par une expérience historique qui a été réalisée par Otto Stern et Walter Gerlach en 1922. Qu'est-ce qu'ils ont fait ? Ils ont pris des atomes d'argent. Pourquoi l'argent ? Vous vous retrouvez avec un électron unique qui se trouve dans une orbitale externe, sur la dernière couche atomique. Donc on arrive à le manipuler assez facilement. Alors si on envoie des atomes d'argent, il faut imaginer des électrons avec un spin, le spin de l'électron n'est pas déterminé avant de faire la mesure. Au moment où l'électron passe dans la région d'espace où règne un champ météoro-magnétique, si on a un spin-up, l'électron, donc l'atome d'argent, est dévié vers l'eau, si on a un spin-down, il est dévié vers le bas. Qu'est-ce qu'on constate expérimentalement la présence de deux tâches ? Si c'était purement classique, qui n'avait pas de spin, on se retrouverait avec une bande continue. Alors comment on décrit ça ? Eh bien le vecteur d'état  $\psi$  qui décrit l'état du  $\psi$  du spin, c'est une combinaison linéaire des états propres, spin-up et spin-down. Et on a un facteur de normalisation qui est un sur la racine carrée de 2, parce que les états spin-up et spin-down sont normalisés. Donc le carré de leur norme vaut un. Et on veut que l'état  $\psi$  soit lui aussi normalisé, puisque c'est avec cet état qu'on va calculer des probabilités. Donc on voit qu'on a, si vous voulez, un processus de mesure qui est probabiliste. Alors j'aimerais vous montrer très rapidement

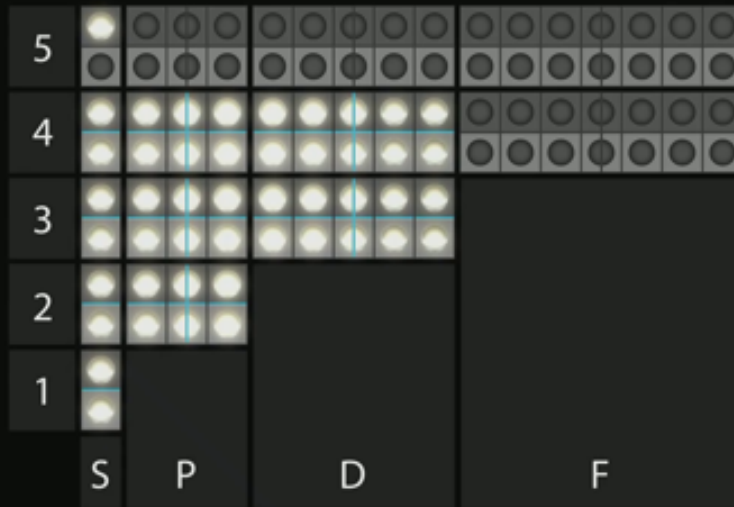
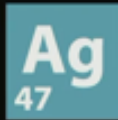
notes

**résumé**

68m 23s







le début de la vidéo en anglais qui explique le fonctionnement du schtiernwerlach. On verra la suite après. Et on va faire des calculs en déterminant la probabilité de mesurer un spin-up et de mesurer un spin-down.

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

70m 7s



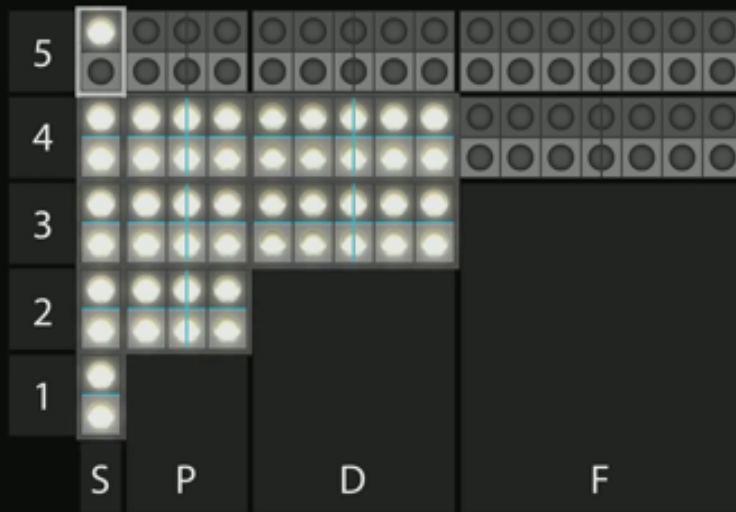
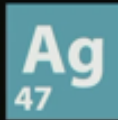
.....

.....

.....

.....

.....



The spins neutralise each other.

notes

résumé

71m 20s





- **Stern-Gerlach** : un faisceau d'atomes d'argent avec un spin  $s = 1/2$  est envoyé dans l'entrefer de deux aimants où règne un champ magnétique inhomogène (Prix Nobel 1943). Le spin des atomes d'argent se trouve dans un état de superposition entre spin up et spin down,

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle)$$

- **Champ magnétique** : le champ magnétique vertical inhomogène  $B$  dévie les atomes de spin up  $|\uparrow\rangle$  vers le haut et les atomes de spin down  $|\downarrow\rangle$  vers le bas. On observe deux taches égales en haut et en bas.
- **Interprétation** : la mesure du spin des atomes d'argent avec le dispositif de Stern-Gerlach donne un spin up  $|\uparrow\rangle$  avec une probabilité  $1/2$  et un spin down  $|\downarrow\rangle$  avec une probabilité  $1/2$ .
- **Processus de mesure** : le processus de mesure est probabiliste.

There is only one unpaired spin, the spin of the 5-S electron. It can be either in spin-up or spin-down or in any superposition of these two states. We can represent this spin state using... Ça, c'est pour plus tard.

notes

résumé

71m 27s



- **Processus de mesure** : le processus de mesure est **probabiliste**.
- **Vecteur d'état de spin** : superposition des vecteurs propres  $|\uparrow\rangle$  et  $|\downarrow\rangle$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle) \quad (14.32)$$

- **Vecteur d'état propre de spin** : les vecteurs  $|\uparrow\rangle$  et  $|\downarrow\rangle$  sont orthonormaux (base de  $\mathbb{C}^2$ ) : produits scalaires entre vecteurs

$$\langle\uparrow|\uparrow\rangle = 1 \quad \text{et} \quad \langle\downarrow|\downarrow\rangle = 1 \quad \text{et} \quad \langle\uparrow|\downarrow\rangle = \langle\downarrow|\uparrow\rangle = 0 \quad (14.33)$$

- **Processus de mesure du spin** : probabilité spin up

$$p_{\uparrow} = |\langle\uparrow|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2} \left| \underbrace{\langle\uparrow|\uparrow\rangle}_{=1} \pm \underbrace{\langle\uparrow|\downarrow\rangle}_{=0} \right|^2 = \frac{1}{2} \quad (14.34)$$

- **Processus de mesure du spin** : probabilité spin down

$$p_{\downarrow} = |\langle\downarrow|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2} \left| \underbrace{\langle\downarrow|\uparrow\rangle}_{=0} \pm \underbrace{\langle\downarrow|\downarrow\rangle}_{=1} \right|^2 = \frac{1}{2} \quad (14.35)$$

- **Interprétation** : en faisant une mesure du spin, on a une probabilité 1/2 d'observer un spin up ou un spin down.

Donc, parlons de ce processus de mesure.

notes

résumé

71m 45s



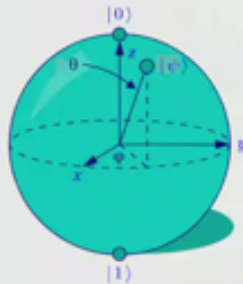
- **Bit** : "classical bit" : état propre

$$|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle \quad \text{ou} \quad |1\rangle \equiv |\downarrow\rangle \quad (14.36)$$

- **Qubit** : "quantum bit" : état de superposition

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle \quad (14.37)$$

- **Sphère de Bloch** : les vecteurs d'état de superposition  $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^2$  se trouvent sur une sphère dont le plan horizontal est le plan complexe et dont l'axe vertical contient les états propres  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$



Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

23 / 28

Là, ça va dire intéressant du point de vue des mathématiques. On va déterminer ces probabilités de mesure. Alors, comment est-ce qu'on fait ? Eh bien, on est dans ces deux. Donc on veut une base de vecteurs qui sont des vecteurs orthonormaux dans ces deux. Alors, on a un premier vecteur qui est le vecteur spin-up, le deuxième qui est le vecteur spin-down. Par exemple, si on prend une base, on peut les noter avec des vecteurs avec des composantes 1 0 0 1, par exemple, qui sont automatiquement orthogonales. Alors, c'est des vecteurs orthonormaux, ce qui veut dire que si on prend le vecteur ket, ce vecteur colonne s'appelle un vecteur ket, ce vecteur ket spin-up, on peut faire un produit scalaire avec un vecteur ligne spin-up. Le vecteur ligne spin-up s'appelle le vecteur bras. C'est le dual du vecteur ket. Il appartient en espace vectoriel dual. Le produit matriciel du vecteur ligne avec le vecteur colonne va nous donner le produit scalaire entre les deux, ce qui va donner le carré du vecteur, c'est un vecteur normé, ça donne 1. D'accord ? Au passage, pourquoi est-ce qu'on appelle le premier et le bras le deuxième le ket ? Parce que si vous prononcez la suite des deux, ça donne braquette, qui est une parenthèse en anglais. D'accord ? Et la parenthèse, c'est la manière d'écrire le produit scalaire, c'est-à-dire, on doit ça, dire. Ok. Alors, maintenant, si vous faites le produit du vecteur ligne spin-down avec le vecteur colonne spin-down, vous avez la braquette correspondant qui donne la norme au carré qui donne 1. Ces vecteurs étant orthogonaux, si vous faites le produit scalaire du vecteur bras spin-up et du vecteur ket spin-down, ou vice-versa, vous allez obtenir 0. Alors, maintenant, regardez ce qui se passe, c'est l'accès superbe. Vous prenez le vecteur d'état de spin général, avant d'avoir fait la mesure, qui est normalisé, donc c'est

notes

résumé

71m 50s



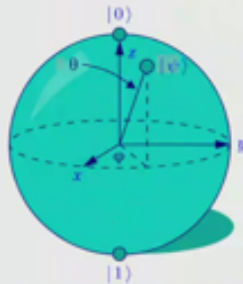
- **Bit** : "classical bit" : état propre

$$|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle \quad \text{ou} \quad |1\rangle \equiv |\downarrow\rangle \quad (14.36)$$

- **Qubit** : "quantum bit" : état de superposition

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle \quad (14.37)$$

- **Sphère de Bloch** : les vecteurs d'état de superposition  $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^2$  se trouvent sur une sphère dont le plan horizontal est le plan complexe et dont l'axe vertical contient les états propres  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$



Dr. Sylvain Bréchet

14 Mécanique classique et mécanique quantique

23 / 28

une combinaison linéaire d'un spin-up avec un spin-down, avec un 1 sur-acine de 2, le chien vivant, le chien mort. Avant d'ouvrir la boîte, on a une combinaison linéaire des deux, l'électron, et façon de parler, l'information qui caractérise l'état de l'électron, est une superposition de deux états possibles. On fait un processus de mesure, revient à faire une projection dans l'espace vectoriel. On projette sur le bras dont on veut déterminer l'état. Et alors, la probabilité d'avoir un spin-up se détermine. En prenant le produit scalaire entre le vecteur bras spin-up et le vecteur dont on veut déterminer l'état, qui est psy, on prend donc ces complexes, on prend le module de ceci et on élève au carré. Bon, alors on fait l'opération, on élève au carré, on a ce facteur 1 sur-acine de 2 qui se transforme par demi. Il va nous rester à l'intérieur du module, le produit scalaire entre le spin-up et le spin-up, entre le spin-up et le spin-down, le premier vaut 1, le deuxième vaut 0, c'est levé au carré, ça fait une demi. La probabilité donc de mesurer un spin-up, c'est une demi. On peut faire le même raisonnement avec un spin-down. Maintenant, on fait le produit scalaire du vecteur bras spin-down avec le vecteur psy. Et alors là, on voit qu'on a d'abord un braquette entre un spin-down et un spin-up, et puis plus ou moins un braquette entre un spin-down et un spin-down, le premier vaut 0, le deuxième vaut 1, ceci donne aussi une demi. Donc on a déterminé les probabilités de mesurer un spin-up ou de mesurer un spin-down. C'est ça qu'on fait réellement niveau calculatoire en mécanique cantique, c'est comme ça qu'on calcule ces probabilités. Il y a une raison détaillée pour laquelle le formalisme et la structure qu'il a ici, si ça vous intéresse, il y a la partie mathématique sur la structure du formalisme qui est

notes

résumé

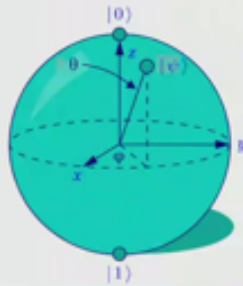
- **Bit** : "classical bit" : état propre

$$|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle \quad \text{ou} \quad |1\rangle \equiv |\downarrow\rangle \quad (14.36)$$

- **Qubit** : "quantum bit" : état de superposition

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle \quad (14.37)$$

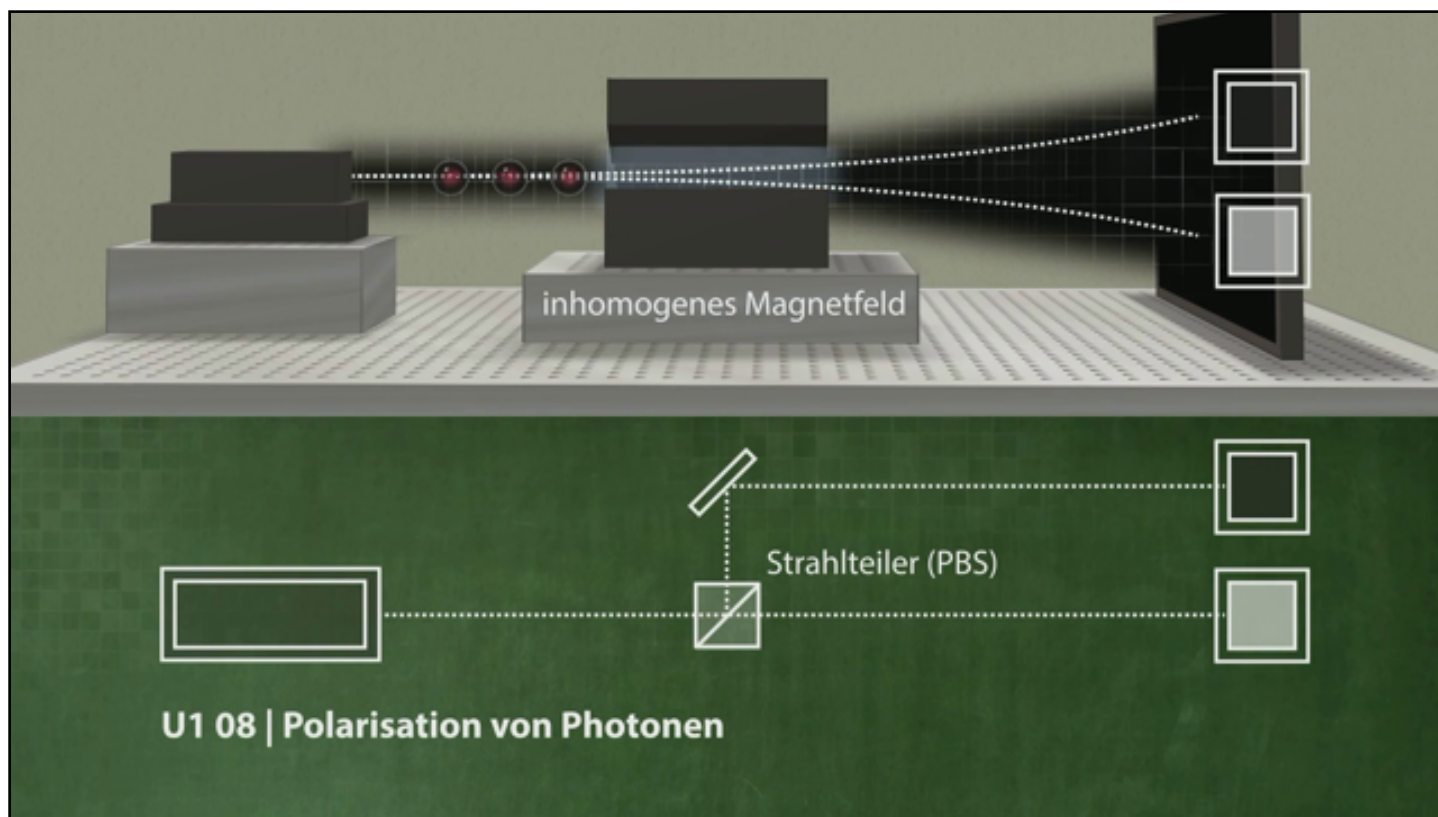
- **Sphère de Bloch** : les vecteurs d'état de superposition  $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^2$  se trouvent sur une sphère dont le plan horizontal est le plan complexe et dont l'axe vertical contient les états propres  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$



donnée dans les notes de cours pour les regarder, de cette manière. Alors, ceci va nous permettre maintenant de comprendre le concept de l'ordinateur quantique et d'abord du qubit. Pourquoi ? Si on a deux états, spin-up, spin-down, c'est binaire, comme des 0 et des 1 en base 2, comme fonctionne un ordinateur classique. Les états propres, vous pouvez les voir comme des états classiques, 0 et 1. Alors ce qui est intéressant en mécanique quantique, c'est ce qui fait tout l'intérêt de l'ordinateur quantique,

notes

résumé



c'est que vous pouvez avoir un état hop et un état down, mais ça c'est... il y a deux possibilités. Mais en mécanique quantique, vous pouvez avoir une combinaison linéaire d'un état hop et d'un état down, d'un 0 et d'un 1. Un qubit, un quantum bit, c'est un état de superposition entre un état propre 0 et un état propre 1. Cette état de superposition, pour des raisons techniques, peut se décrire en géométrie projective sur une sphère dans le plan complexe de module unité. Cette sphère s'appelle la sphère de Bloch. Et donc vous placez au pôle nord l'état propre 0, au pôle sud l'état propre 1. Alors, ils sont orthogonaux d'après la structure qui est donnée ici. Ils ne sont pas orthogonaux d'après la sphère ou ils sont sur le même axe, juste une nuance ici. Vous voyez tout de suite que si  $\theta = 0$ , vous êtes dans l'état 1, dans l'état 0, pardon, et si  $\theta = \pi$ , et vous retrouvez, compte-en-du-fait que  $\phi$  doit être égal à 0, vous retrouvez dans l'état 1. Et vous avez toutes les autres combinaisons linéaires possibles qui vont vous donner des points qui se trouvent quelque part sur cette sphère qui est la sphère de Bloch. Ce qui vous permet de faire par superposition linéaire des calculs en parallèle, des calculs en parallèle assez riches d'ailleurs, qu'elle ne pourrait jamais faire à un ordinateur classique. C'est ça qui rend l'ordinateur quantique particulièrement attrayant. Alors pour vous illustrer ceci, on va revenir...

notes

résumé

76m 13s



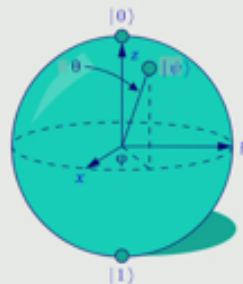
- **Bit** : "classical bit" : état propre

$$|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle \quad \text{ou} \quad |1\rangle \equiv |\downarrow\rangle \quad (14.36)$$

- **Qubit** : "quantum bit" : état de superposition

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle \quad (14.37)$$

- **Sphère de Bloch** : les vecteurs d'état de superposition  $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^2$  se trouvent sur une sphère dont le plan horizontal est le plan complexe et dont l'axe vertical contient les états propres  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$



Dr. Sylvain Bréchet

14. Mécanique classique et mécanique quantique

23 / 28

Donc en fait, ce qui vient d'être présenté, c'est ce qui se passe pour le spin-up et le spin-down. Il y a un commentaire qui a été fait par la personne qui présente cette vidéo.

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

78m 25s



- Ordinateur classique :
  - ① Base binaire (bit) :  $|0\rangle$  ou  $|1\rangle$
  - ② Octet : séquence unique 01110010
  - ③ Cryptographie : la lecture ne modifie pas la séquence
  - ④ Température :  $\sim 273 - 300$  K (ambiante)
- Ordinateur quantique :
  - ① Base infinie (qubit) :  $|\psi\rangle$  (sphère de Bloch)
  - ② Octet : séquence multiple  $\psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4 \psi_5 \psi_6 \psi_7 \psi_8$
  - ③ Cryptographie : la lecture modifie la séquence
  - ④ Température :  $\sim 0.01$  K



Et de dire, et c'est ce qui va être important pour nous maintenant, c'est qu'on peut faire exactement la même chose avec des photons. Les photons ont deux états de polarisation. On va dire deux états de polarisation. On peut faire l'analogie entre le spin-up et le spin-down pour les deux états de polarisation du spin-down. Et on peut faire l'analogie entre le spin-up et le spin-down pour les deux états de polarisation du spin, si vous voulez. Donc vous pouvez, à l'aide de photons qui se déplacent le long de fibroptique, vous retrouvez avec une expérience qui simule ce qui se passe avec le schtielach. Et d'ailleurs, c'est avec des photons et de la fibroptique qu'on arrive à décrire l'intrication quantique de laquelle on va parler dans quelques instants.

notes

résumé

79m 12s



- **Intrication quantique** : les états de deux qubits intriqués sont corrélés (non-séparables) quelle que soit la distance spatiale qui les sépare.

- **Etats non-intriqués de deux qubits : séparables**

$$|\psi\rangle_{1,2} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 \quad (14.38)$$

$$|\psi\rangle_i = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle_i + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle_i \quad \text{où } i = 1, 2$$

- **Etats intriqués de deux qubits : non-séparables - 4 états de Bell**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.39)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2)$$

- **Applications :**

- Téléportation quantique
- Cryptographie quantique

Avant de faire, parlons rapidement de l'ordinateur quantique et comparons-le à un ordinateur classique. Pour un ordinateur classique, vous avez une base binaire des états propres 0 et 1. D'accord ? C'est aussi ceux que vous allez mesurer si vous faites une mesure quantique. Mais avant de faire une mesure quantique, le système quantique sera beaucoup plus riche. Donc si vous prenez un octet, c'est une séquence unique de 8 bits, des 0 et des 1. D'accord ? Et surtout, quand vous faites de la cryptographie, vous pouvez lire une séquence sans la modifier. Parce que le processus de mesure est parfaitement déterministe et il ne va pas changer, disons, la séquence qui a été élu. L'ordinateur quantique a cette particularité de pouvoir fonctionner à température ambiante. Vous en avez des exemples devant vous en ce moment. Pour l'ordinateur quantique, c'est plus compliqué. Chaque qubit peut se retrouver dans un état de polarisation, quelqu'un qui a une infinité d'orientations possibles. D'accord ? Le qubit va se retrouver quelque part sur la sphère de Bloch. Et donc, quand vous avez un octet, vous avez une séquence multipliée de 8 qubits qui peuvent avoir une orientation quelconque. Et donc, vous pouvez jouer à la fois sur les vecteurs propres, mais aussi sur les phases pour faire des calculs en parallèle. Et ça, c'est génial. Maintenant, si vous faites de la cryptographie, le fait de faire une mesure, de regarder une séquence, veut dire que vous forcez vos qubits à prendre des états propres, vous avez un. Ce faisant, vous avez modifié le code et on peut savoir que vous avez modifié le code et vous n'avez plus le code de départ. Ce qui veut dire, qu'en termes de cryptographie, l'ordinateur quantique, c'est l'enfer des hackers. D'accord ? Et donc, si c'est l'enfer des hackers, c'est le paradis des banquiers. C'est pas une surprise quand, en Suisse, il y a beaucoup de moyens

notes

résumé

80m 0s



- **Intrication quantique** : les états de deux qubits intriqués sont corrélés (non-séparables) quelle que soit la distance spatiale qui les sépare.

- **Etats non-intriqués de deux qubits : séparables**

$$|\psi\rangle_{1,2} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 \quad (14.38)$$

$$|\psi\rangle_i = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle_i + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle_i \quad \text{où } i = 1, 2$$

- **Etats intriqués de deux qubits : non-séparables - 4 états de Bell**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.39)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2)$$

- **Applications :**

- Téléportation quantique
- Cryptographie quantique

qui ont été investis pour la cryptographie quantique. Je dis ça, je dis rien. Donc, ça, c'est pour la cryptographie. Maintenant, il y a un tout petit problème, quand même, qui est énorme, d'ailleurs. Pour que ça fonctionne, il faut que les degrés liés aux rotations, aux vibrations au niveau atomique soient réduits à quasiment zéro. Et donc, il faut pouvoir travailler avec un ordinateur quantique qui a une température de fonctionnement de l'ordre du centième de Kelvin. D'accord ? Un centième au-dessus du zéro absolu. Et donc, l'équipatation qu'il faut, vous voyez, elles sont plutôt impressionnantes. Ça ressemble aux premiers ordinateurs qui avaient été créés avec des grosses climatisations dans les années 70, oui. C'est une question par rapport à l'expérience précédente. Pourquoi est-ce que, lorsque les particules, elles sont dans le verre, elles changent pas d'orientation du spin après placement dans le verre ? Alors, si vous voulez, on ne sait pas quelle est l'orientation du spin d'une particule. Il est complètement aléatoire avant de faire la mesure. Quand on fait la mesure, l'appareil de mesure force la particule à se retrouver dans un état propre qui est mesurable. Soit un zéro, soit un. Et il y a des probabilités qui sont associées. Alors, maintenant, si les propriétés de la particule étaient telles qu'elles étaient proches d'un état propre, il y aurait plus de probabilités de se retrouver avec un état propre plutôt qu'un autre. D'accord ? Mais l'information qu'on a sur l'état propre, donnée par le vecteur d'état, contient les deux possibilités. D'accord ? Les jeux sont ouverts. C'est comme si on n'avait pas encore joué. On n'a pas encore fait de mesure. Au moment où on fait la mesure, on force le système à adopter l'un des deux états propres avec des propriétés données. C'est assez fou, parce que ce n'est pas classique. Vous ne pouvez pas considérer que le système formé de l'électron possède une

notes

résumé

- **Intrication quantique** : les états de deux qubits intriqués sont corrélés (non-séparables) quelle que soit la distance spatiale qui les sépare.

- **Etats non-intriqués de deux qubits : séparables**

$$|\psi\rangle_{1,2} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 \quad (14.38)$$

$$|\psi\rangle_i = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle_i + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle_i \quad \text{où } i = 1, 2$$

- **Etats intriqués de deux qubits : non-séparables - 4 états de Bell**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.39)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2)$$

- **Applications :**

- Téléportation quantique
- Cryptographie quantique

propriété. Il ne l'a pas encore. Il acquiert cette propriété au moment où on fait la mesure et on force le système de se retrouver dans un état classique. Ce n'est pas trivial, ce que je viens de vous dire. Ce n'est pas simple du tout. D'accord ? Que ça me paraisse étrange, c'est normal. Les plus grands physiciens sont passés à travers le même type d'état d'âme au début du XXe siècle. Et certains sont encore dans ce type d'état d'âme aujourd'hui. Bon. Si vous voulez la mécanique quantique, il y a une chose qui est sûre. Personne n'est d'accord sur l'interprétation. Les maths, ça va bien. Faire des calculs, tout se passe bien. Il y a d'ailleurs un celléphysien qui disait Quantum Mechanics is Shadap and Calculate. D'accord ? En gros, posez-vous pas les questions de savoir le pourquoi du comment. Je n'ai pas du tout d'accord avec lui. D'accord ? Ni avec Richard Feynman qui disait, personne ne comprend la mécanique quantique. On peut justement essayer de la comprendre. Mais ce n'est pas simple. Ce n'est vraiment pas simple. Et voilà, il y a des interprétations différentes qui ont chacune leurs attraits et leurs défauts.

notes

résumé

- **Intrication quantique** : les états de deux qubits intriqués sont corrélés (non-séparables) quelle que soit la distance spatiale qui les sépare.

- **Etats non-intriqués de deux qubits : séparables**

$$|\psi\rangle_{1,2} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 \quad (14.38)$$

$$|\psi\rangle_i = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle_i + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle_i \quad \text{où } i = 1, 2$$

- **Etats intriqués de deux qubits : non-séparables - 4 états de Bell**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.39)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2)$$

- **Applications :**

- Téléportation quantique
- Cryptographie quantique

Alors maintenant, parlons un tout petit peu de l'intrication quantique qui a donné lieu au prix Nobel de physique il y a de ça 2 ans. D'accord ? L'intrication quantique, c'est le fait que deux objets, deux électrons par exemple, de photons, vont se comporter comme un objet unique. S'ils ont interagis au départ et qui sont dans un état quantique qu'on appelle un état intriqué, ils forment un seul objet. Donc si on les déplace dans l'espace physiquement, à très longue distance, l'information du premier est corrélée à l'information du deuxième. C'est ça qui est complètement fou. D'accord ? Donc pour comprendre les états intriqués et leurs conséquences, on va d'abord parler d'états séparables qui ne sont pas intriqués. Donc on prend le vecteur d'état qui décrit un système de deux particules pour simplifier, prenons des photons avec des états de polarisation, des 0 et des 1. D'accord ? Un état de superposition entre un 0 et 1, pour le premier photon, un état de superposition entre un 0 et 1, pour le deuxième photon, ils seront chacun sur une sphère de Bloch. D'accord ? Par contre, l'état total, on peut le séparer à l'aide d'un produit tensoriel entre l'état de chacun des deux photons. D'accord ? Ça, c'est des états séparables. Ensuite, il y a des états intriqués ou si vous voulez des états non séparables, qui sont ce qu'on appelle des états de Bell. Il y a deux types d'états de Bell. Des états de Bell dans lesquels on a la même polarisation, des états de Bell dans lesquels on a une polarisation opposée. Comment est-ce qu'on les construit ? Eh bien, il y a un facteur de normalisation qui est sur la racine carrée de 2 pour avoir un évènement de norme. Et ensuite, on a le produit tensoriel de nos deux photons, qui sont dans le même état de polarisation propre. 0, 0, 1, 1.

## notes

## résumé

84m 47s



- **Intrication quantique** : les états de deux qubits intriqués sont corrélés (non-séparables) quelle que soit la distance spatiale qui les sépare.

- **Etats non-intriqués de deux qubits : séparables**

$$|\psi\rangle_{1,2} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 \quad (14.38)$$

$$|\psi\rangle_i = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle_i + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle_i \quad \text{où } i = 1, 2$$

- **Etats intriqués de deux qubits : non-séparables - 4 états de Bell**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.39)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2)$$

- **Applications :**

- Téléportation quantique
- Cryptographie quantique

D'accord ? Qu'on ne peut pas écrire comme  $\psi_1$  produit tensoriel à  $\psi_2$ . Est-ce que  $\psi_1$  et  $\psi_2$  sont des états de superposition des états propres ? On a le deuxième état où le deuxième type d'état intriqué,

notes

résumé

- **Intrication quantique** : les états de deux qubits intriqués sont corrélés (non-séparables) quelle que soit la distance spatiale qui les sépare.

- **Etats non-intriqués de deux qubits : séparables**

$$|\psi\rangle_{1,2} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 \quad (14.38)$$

$$|\psi\rangle_i = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle_i + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle_i \quad \text{où } i = 1, 2$$

- **Etats intriqués de deux qubits : non-séparables - 4 états de Bell**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.39)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2)$$

- **Applications :**

- Téléportation quantique
- Cryptographie quantique

les états psi majuscule,

notes

résumé

86m 49s



- **Intrication quantique de photons** : photon 1 et photon 2

- ① Etats propres de polarisation :  $|0\rangle$  ou  $|1\rangle$

- ② Etats intriqués de Bell : **photons de même polarisation**

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 \pm |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2) \quad (14.40)$$

- **Processus de mesure des polarisations des photons** : probabilités

- ① Photons de même polarisation :

$$p_{\Phi^\pm}(0,0) = |(\langle 0|_1 \otimes \langle 0|_2) |\Phi^\pm\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle 0|0\rangle_1 \langle 0|0\rangle_2 \pm \langle 0|1\rangle_1 \langle 0|1\rangle_2|^2 = \frac{1}{2}$$

$$p_{\Phi^\pm}(1,1) = |(\langle 1|_1 \otimes \langle 1|_2) |\Phi^\pm\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle 1|0\rangle_1 \langle 1|0\rangle_2 \pm \langle 1|1\rangle_1 \langle 1|1\rangle_2|^2 = \frac{1}{2}$$

- ② Photons de polarisation opposée :

$$p_{\Phi^\pm}(0,1) = |(\langle 0|_1 \otimes \langle 1|_2) |\Phi^\pm\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle 0|0\rangle_1 \langle 1|0\rangle_2 \pm \langle 0|1\rangle_1 \langle 1|1\rangle_2|^2 = 0$$

$$p_{\Phi^\pm}(1,0) = |(\langle 1|_1 \otimes \langle 0|_2) |\Phi^\pm\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle 1|0\rangle_1 \langle 0|0\rangle_2 \pm \langle 1|1\rangle_1 \langle 0|1\rangle_2|^2 = 0$$

- **Paradoxe** : après avoir mesuré le photon intriqué 1 dans un état propre de polarisation à Bellevue, en mesurant le photon intriqué 2 à Bernex, on sait qu'il a la même polarisation à une vitesse au moins 10'000 fois supérieure à la vitesse de la lumière (Nicolas Gisin : UNIGE 1997).

où là, c'est des états de polarisation opposés. Donc, vous prenez le premier et le deuxième photon, vous avez les indices qui sont donnés ici, qui correspondent aux photons. Et vous allez vous retrouver avec des produits temporels d'états propres différents, les états de polarisation 0 ou 1. D'accord ? Alors maintenant, on va voir quelle est la conséquence de ceci au niveau pratique. Alors j'essaie de le faire le plus compréhensible possible, parce que c'est quand même quasiment de la recherche. Comme je disais, ça donnait lieu à un prix Nobel il y a deux ans. Donc c'est quand même quelque chose de pas si vieux que ça.

notes

résumé

86m 50s



- Intrication quantique : non-localité : prix Nobel de physique 2022

- Alain Aspect

- Anton Zeilinger

- John Clauser



- Information quantique : non-causalité : prix Marcel Benoist 2014

- Nicolas Gisin



Voilà, les recherches ont commencé de manière sérieuse dans les années 80. À l'époque, on avait dit à Alain Aspect, est-ce que vous avez déjà un post permanent en recherche et on lui a déconseillé de travailler ce sujet qui était trop compliqué ? Il a bien fait d'insister, puisqu'il a eu le prix Nobel grâce à ses travaux. Alors maintenant, on peut faire la chose suivante. On peut prendre deux photons, comme l'a fait Nicolas Gisin de l'Université de Genève, qui était un postdoc de mon mentor. Prenez deux photons et vous arrangez pour les intriguer à un endroit, par exemple, la gare cornavain. Ça, c'est ce qui a été fait historiquement. D'accord ? Vous les intriguez à Genève, à la gare cornavain. Vous avez un système de fibres optiques et vous amenez un photon à belle vue, l'autre photon à Bernet. D'accord ? Vous arrangez, par exemple, pour qu'ils aient la même polarisation. Seulement, vous ne savez pas quelle va être la polarisation. Vous savez pas si ça va être un 0, 1, 1. D'accord ? Ça peut être les deux. Vous avez un état de superposition pour les deux. Alors, vous avez vos états intrigués qui sont ici, de la même polarisation. Vous calculez la probabilité que vous mesuriez la valeur 0 pour les deux photons. Comment vous faites ça ? Prenez votre état de bel qui est ici. Faites le produit scalaire. Alors, il y a des produits tensoriels qui se combinent. C'est un peu technique. Faites le produit scalaire avec un état, avec un vecteur bras qui, lui-même, contient le produit tensoriel de deux états bras pour les états propres de polarisation 0, neufs, deux photons. D'accord ? Puis ensuite, ces produits tensoriels se distribuent. Ça fait un produit de produits scalaires. Ils sont là. Avec des 0 et des 1. S'il y a deux fois le même, ça fait 1. S'il y a un

## notes

## résumé

87m 25s



- Intrication quantique : non-localité : prix Nobel de physique 2022

- Alain Aspect

- Anton Zeilinger

- John Clauser



- Information quantique : non-causalité : prix Marcel Benoist 2014

- Nicolas Gisin



1 et un 0, ça fait 0. Donc ça, ça donne 0, ça, ça donne 1. Vous avez une demi, donc vous avez une probabilité, une demi, de mesurer les deux photons dans le même état 0. Vous pouvez faire le même exercice avec l'état de polarisation 1. Qu'est-ce qu'on trouve ? On trouve une probabilité, une demi, qui soit les deux dans l'état de polarisation 1. Maintenant, on peut calculer la probabilité que leur polarisation soit différente, que l'un soit dans l'état de polarisation 0, l'autre dans l'état 1, et vice-versa, il en trouve 0. La probabilité de détecter deux photons avec des états de polarisation différentes, s'ils sont intraqués à la même polarisation au départ, elle est nulle. Ça coïncide comme conséquence. La conséquence, c'est la suivante, elle est incroyable. C'est que si vous avez vos deux photons, qui sont dans un état de superposition de la polarisation 0 et 1, si vous mesurez, disons, à belle vue, l'état de polarisation de votre photon, vous allez trouver avec 50 % de chance, soit un 0, soit un 1. Mais là où c'est incroyable, c'est que si vous mesurez un 0 à belle vue, vous mesurez avec une probabilité de 1, donc de manière certaine, un 0 également à Bernet. Si vous mesurez un 1 à belle vue, vous mesurez un 1 à Bernet. Alors, maintenant, on peut faire la chose suivante. On peut synchroniser la mesure dans le temps avec un appareillage sophistiqué, c'est ce qu'a fait Nicolas Gisin d'université de Genève. Vous le synchronisez dans le temps et vous arrangez pour que les détections se fassent de manière quasiment simultanée. Alors simultanée, c'est jamais possible, expérimentalement, mais disons de manière tellement simultanée que si un signal devait être envoyé de belle vue à Bernet, il devrait circuler à une vitesse qui est au moins 10 000 fois plus grande que la vitesse de propagation de la lumière.

## notes

## résumé

- Intrication quantique : non-localité : prix Nobel de physique 2022

- Alain Aspect

- Anton Zeilinger

- John Clauser



- Information quantique : non-causalité : prix Marcel Benoist 2014

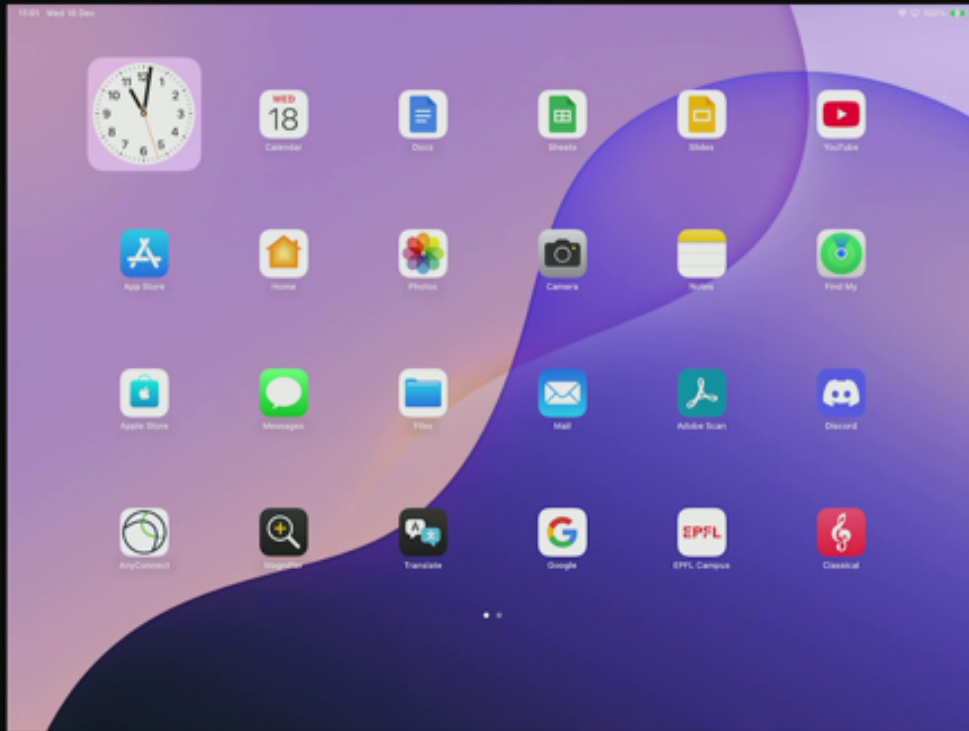
- Nicolas Gisin



Donc, c'est clairement pas un signal causal. Et qu'est-ce qu'on observe ? On observe la même valeur. On observe le même état de polarisation donc on a un objet qui est délocalisé dans l'espace. On a une physique qui est non-locale. On a cette interaction structurelle à distance qui ouvre des perspectives pour la cryptographie quantique et même pour la téléportation quantique puisque vous pouvez téléporter instantanément d'informations d'un endroit à un autre. D'accord ? Ça a été fait pour des photons de même polarisation. Ça a été refait pour des photons de polarisation opposés. Là, c'est exactement le résultat inverse. Si vous les préparez dans un état impliqué de polarisation opposée, si vous détectez un quelque part, vous obtenez un zéro ailleurs et vous avez ça. Oui ? Comment vous attribuer des particules ? Ça, c'est compliqué. Il faut utiliser des cristaux biréfringents en général pour les photons. Donc, si c'est des photons, vous avez des ondes électromagnétiques derrière et vous devez à travers un matériau vous arranger pour que vos photons et cette structure qui les intrigue. Et ça se fait en général de manière pratique à l'aide de cristaux très particuliers. D'accord ? Ça, c'est de la technologie. Mais c'est pas simple à faire. Vous avez raison de poser la question. C'est pas quelque chose de facile.

notes

résumé



Alors, je vais rapidement terminer. Cette amplification quantique a donc rapporté le prix Nobel à un aspect, à Anton Zeilinger et à John C. Closer. L'expérience qui a été faite par Nicolas Gisin qui démontre que s'il y a une interaction, elle est forcément à cause de la vitesse de propagation du signal, on peut lui mettre, disons, une borne inférieure qui est 10 000 fois la vitesse de la lumière, a donc été réalisée ici par Nicolas Gisin, vous avez Bellevue aussi, Berner là, d'accord ? Et puis, vous avez la gare cor-d'avent qui a permis, enfin, c'est à la gare cor-d'avent qu'avec un cristal biréfringent, on a réussi à, disons, à attrapper ces photons. Alors, maintenant, il y a deux options. Soit on prend la pause, après la pause, je vous donne des compléments d'informations sur l'examen avec une belle expérience avec laquelle on termine, ou alors on prend pas la pause et on termine encore plus tôt. Qui sait qui veut prendre la pause ? Bon, ben, moi, l'affaire est claire. On va continuer. Je vais vous donner des informations sur l'examen. Et puis, je vous présenterai encore de trois expériences. Alors...

## notes

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## résumé

92m 10s



---

---

---

---

---

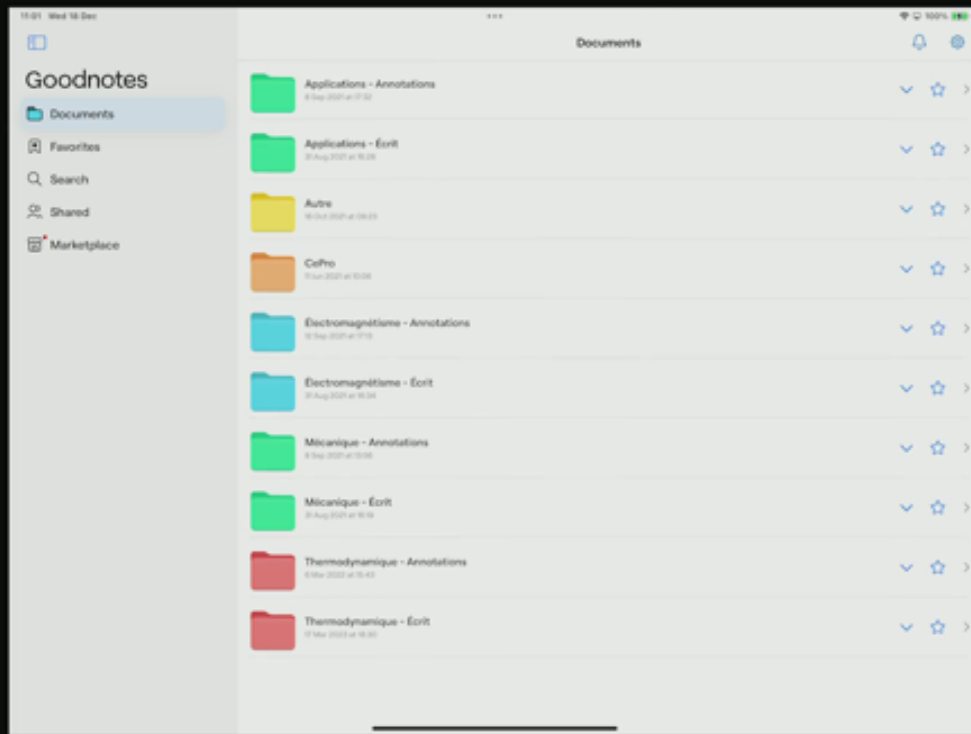
---

---

---

---

---



Et si vous avez des questions plus tard

notes

résumé

93m 32s





- Examen : **vendredi 17 janvier 2025 : 9h15 - 12h45**  
CE1 4, CE1 6, CE1 104, CE1 105
- Sujets pas demandés à l'examen :
  - ❶ 4.2 Oscillateur harmonique amorti (équation horaire)
  - ❶ 7.3 Résonance
  - ❶ 10.1 Systèmes de masse variable
  - ❶ 11.1 Dynamique terrestre
  - ❶ 11.2 Pendule de Foucault
  - ❶ 14 Mécanique classique et mécanique quantique
- Séance Q&A : **vendredi 10 janvier 2025 : 10h00 - 12h00**  
Salle CE1 101
- Evaluation du cours : **ouverte sur moodle (merci !)**

Ce document, il sera très bientôt accessible sur le site Moodle du cours. D'accord ?  
La question que vous posez tous, c'est quand l'examen, c'est le vendredi 17 janvier, de 9h15 à 12h45,

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

93m 54s



- Examen : 3 problèmes
  - ① Point matériel
  - ② Points matériels
  - ③ Solide indéformable
- Problème :
  - ① Description illustrée du problème (1 page)
  - ② Série de questions avec emplacement pour les réponses (1 page)
  - ③ 4 feuilles quadrillées recto-verso (calculs, dessins, etc...)
- Formulaire : 1 page A4 recto-verso
  - Vous pouvez créer le formulaire à la main ou à l'aide d'une tablette (pas d'image numérique, lisible sans loupe...)
- Papier brouillon : distribué mais **non ramassé et non corrigé**

pour ceux qui ont un temps réglementaire de 3h30. D'accord ? Initialement, c'était 3h, on a ajouté une demi-heure, sans que le contenu augmente pour que vous ayez plus de temps de revoir ce que vous avez écrit. Les salles d'examen qui ont changé très récemment, c'est la CE1-4, la CE1-6, la CE1-104, la CE1-105. Ils sont tout autour de cette auditoire ici. OK ? La question que vous posez, certainement, tous, c'est de savoir qu'est-ce qui ne sera pas demandé à l'examen ? Effectivement, il y a des choses qui ne seront pas demandées à l'examen. Les solutions mathématiques de l'oscillateur harmonique amortie ne seront pas demandées à l'examen. Vous pouvez tomber sur une équation horaire qui contient un amortissement, ça, c'est possible et ça, c'est fait. D'accord ? Mais il n'y a pas la résoudre avec une distribution de cas, d'un amortissement faible, d'un amortissement fort et d'un amorti critique. Il n'y aura pas non plus de résonance à l'examen. Pour répondre à la question que quelqu'un posait la semaine passée, vous n'aurez pas de système de masse variable à l'examen. D'accord ? Donc le début du chapitre X. En ce qui concerne le chapitre XI, il y a beaucoup de choses qui n'y aura pas. Il n'y a pas d'inamique terrestre. Il n'y aura pas non plus de pendule de Foucault. D'accord ? Et pour terminer ce que je vous ai présenté aujourd'hui, évidemment, ne sera pas au sujet de l'examen, ça serait pas une très bonne idée. Au niveau stratégique et en terme de noeud, je suis pas sûr que ça soit la meilleure stratégie. Voilà. Ensuite, il y aura une séance de réponse aux questions que j'organiserai le 10 janvier, soit exactement une semaine avant l'examen de 10 heures à midi. Pas trop tôt quand même qu'on puisse y dormir, pas trop tard pour que vous puissiez poser vos questions rapidement. Il ne faut pas

notes

résumé

94m 13s



- Examen : 3 problèmes
  - ① Point matériel
  - ② Points matériels
  - ③ Solide indéformable
- Problème :
  - ① Description illustrée du problème (1 page)
  - ② Série de questions avec emplacement pour les réponses (1 page)
  - ③ 4 feuilles quadrillées recto-verso (calculs, dessins, etc...)
- Formulaire : 1 page A4 recto-verso
  - Vous pouvez créer le formulaire à la main ou à l'aide d'une tablette (pas d'image numérique, lisible sans loupe...)
- Papier brouillon : distribué mais **non ramassé et non corrigé**

que la séance soit trop proche de l'examen, puisqu'ensuite, par rapport à ce qui a pu être demandé, il faut que vous puissiez réajuster votre compréhension de la matière. Il ne faut pas non plus qu'il y ait un... disons qu'elle soit trop tôt, pour que vous ayez le temps de réviser aussi correctement. C'est pour ça que je pense qu'une semaine est un bon compromis, disons. La séance de révision aura lieu en CE101, juste derrière dans une de ces salles. J'en profite pour mentionner que les évaluations de cours sont ouvertes. Alors, c'est vrai pour le cours de physique, c'est vrai pour les autres cours également. Vous pouvez commencer à évaluer les cours en allant sur Moodle. Ça aide tous les enseignants de BA1, d'avoir un feedback c'est important. Donc, merci d'avance.

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuillet : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

[illegible]

### Exercises

4 / 4

notes

96m 43s



- Consignes :

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuillet : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

- Solution :



comme ça doit être annoncé pour des raisons légales, très à l'avance, on n'a pas le droit de le faire pour ce semestre. Donc, pour le formulaire, ce qu'il faudra confacier, c'est que vous prenez une page à quatre rectoversaux, vous pouvez le... Soit l'écrire à la main sur du papier, soit l'écrire, ce que je recommande plutôt sur une tablette parce que c'est plus facile à effacer, d'accord ? Vous l'écrivez à la main, et les dessins, vous devez les reproduire à la main. Donc, vous ne pouvez pas simplement, par exemple, prendre l'illustration des cordes indécis, indriques et sphériques, reproduire l'image sur la tablette. Vous pouvez le faire à la main, d'accord ? Mais ça ne doit pas être quelque chose de numérisé. Chacun doit faire l'effort. Ce qui est important, c'est que l'écriture de chacun apparaît sur son formulaire. Donc, s'il y a deux formuleurs identiques, qui sont le même document PDF réalisé par un étudiant ou une étudiante qui est copiée à de multiples reprises, si je vois ça, les formuleurs passent à la poubelle, d'accord ? En revanche, si vous avez quelqu'un qui a fait un très bon travail, en qui vous avez confiance, que vous recopiez son formulaire à l'identique, il n'y a aucun souci, il faut simplement que ce soit votre propre écriture. S'il vous plaît, j'insiste là-dessus, faites relire l'autre formulaire à quelqu'un d'autre, revoyez avec grand soin les formules qui donnent les vecteurs positions, vitesse et accélération, donc les grandeurs cinématiques, encore donnés cylindriques et sphériques. Vous pouvez évidemment vous inspirer du formulaire donné sur Moudal, d'accord ? Comptez le nombre de points qu'il y a partout et vérifiez si un teta est un teta et si un fi est un fi, d'accord ? Je vous dis ça parce que des fois, il y a eu des erreurs dans le passé. Ça peut coûter de frais cher, ça peut amener à

notes

résumé

- ❶ Carte **camipro** : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuillet : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

[illegible]

### Examen

4 / 4

notes

résumé

- Consignes :

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuille : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

- Solution :



vont être vues. OK ? Sinon, au terme de consigne,

notes

résumé

illet : **doit impérativement rester attaché**

vitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

n :



mettez votre carte Kami Pro en la plaçant visiblement sur votre table. Ça évitera de devoir aller la chercher sur un sac qui est perdu au fond d'auditoires. Donc faites ça, vous arrivez avec votre carte Kami Pro. Si vous êtes non francophone, vous avez le droit d'indictionnaire bilingue entre votre langue maternelle et le français, sans annotations, hein ? Je vais pas avoir de formules cachées dedans. Ensuite, les appareils, tous types d'appareils électroniques, que ce soit une tablette, que ce soit une calculatrice, un smartphone, est strictement interdit. Ceux qui, pour des raisons médicales, ont le droit d'avoir des casques de protection anti-bruit qui fonctionnent de manière électronique, ça, c'est toléré. D'accord ? Mais c'est des gens qui ont fait les demandes au préalable. OK ? Donc si vous avez un examen traditionnel, vous n'avez pas le droit à rien, pouvez éventuellement prendre des bouchons pour les placer dans vos oreilles pour ne pas être dérangé par du bruit dans la salle. En ce qui concerne feuillet d'examen, il doit rester impérativement attaché sinon des feuilles qui peuvent disparaître. Ça peut être problématique. Et puis je vous recommande de prendre des boissons énergisantes avec vous, de prendre du sucre de raisin, de prendre quelques barres de céréales. Pour vous sucez de santé, c'est important d'avoir un corps sain pour que l'esprit fonctionne de manière saine. J'aimerais vous raconter une petite anecdote qui va vous faire sourire. Quand j'étais moi-même au gymnase, à l'époque, durant les examens de maturité, dans un gymnase vaudois que dont je t'aiera le nom, ma mère m'avait donné à l'époque des sucres de raisin, des petites tablettes, comme ça, qui avaient un aspect marbré avec un petit logo dessus. Bon, alors j'ai mangé mon sucre de raisin et puis d'un coup, il y a un surveillant qui passe à côté de moi qui me regarde comme ça et qui fait, ah bah je vois

notes

résumé

101m 53s



illet : **doit impérativement rester attaché**

avitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

n :



qu'on s'embête pas. Alors j'ai pas tout de suite compris. Il m'a fallu une minute pour comprendre. En fait, mes petites tablettes, ça ressemblait aussi à autre chose, en l'occurrence de l'extase, d'accord ? Et donc, il a pensé que je faisais mon examen sous influence, ce qui n'était pas du tout le cas. Et donc s'il vous plaît, utilisez des drogues légales, comme le café, le chocolat, qui est un anti-dépresseur, qui est absolument recommandable, surtout si c'est du chocolat noir, d'accord ? N'hésitez pas à en prendre avec vous, mais de grâce, ne prenez pas autre chose, n'exagerez pas non plus sur la café, d'accord ? Le jour de l'examen, vous avez donc droit de venir avec un ravitaillement léger, mais s'il vous plaît, par courtoisie, pour d'autres étudiants dans la même salle que vous, évitez de venir avec votre écho affondue et votre caclon, d'accord ? Ça ne sera pas du goût de tout le monde. L'affondue et la raclette sont délicieuses, mais on peut les déguster après l'examen. Non, c'est de blague, évidemment, personne ne va le faire. Moi, je vous en scène quand même. Voilà. Maintenant, je vous laisse avec la sagesse

notes

résumé

## • Consignes :

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuillet : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

## • Solution :



de notre ami Le Chat, qui nous dit qu'en effectuant une opération assez simple, type 2 plus 2, Le Chat réalise qu'il existe des milliards de réponses mauvaises, possible et seulement une qui soit bonne. Et donc la chute, c'est la majorité, n'aurait-elle donc pas toujours raison ? Donc je vous demanderai de faire partie de la minorité éclairée. D'accord ? Alors, j'aimerais vous donner quelques recommandations par rapport à l'examen lui-même. La première chose qui est importante, un examen, c'est le mental. Vous avez tous participé à ce cours de manière régulière. Vous avez fait les exercices, vous avez trahi dur. Vous avez les compétences nécessaires pour réussir. D'accord ? Statistiquement, c'est le cas de la majorité d'entre vous. Donc il ne faut pas en douter, il faut partir gagnant. Vous commencez par les problèmes qui vous paraissent les plus simples. Peu importe s'ils sont objectivement ou non les plus simples. Ca, ça n'a aucun... Aucun... Ca joue aucun rôle. C'est votre perception subjective qui compte. D'accord ? Pourquoi ? Parce que si vous réussissez à résoudre un certain nombre de... Enfin, répondre à un certain nombre de questions, ça va vous donner la motivation de continuer et vous allez être plus performant que vous le sauriez si vous commenciez par les problèmes durs. D'accord ? Il faut toujours commencer par les problèmes simples. Ensuite, il y a des techniques. Il faut regarder une fois que vous avez obtenu vos réponses que les équations soient homogènes au niveau physique. Il faut que toutes les grandeurs et les bonnes dimensions physiques, chose que vous pouvez vérifier à la fin. Si ce n'est pas le cas, très vraisemblablement, vous avez oublié de multiplier ou de diviser par une grandeur. Donc il faut remonter la chaîne, faut faire du debugging comme en informatique, d'accord ? Et voir où le problème a été généré. Et vous avez une demi-heure pour le faire. Voir

notes

résumé

104m 27s



## • Consignes :

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuillet : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

## • Solution :



plus si vous arrivez à terminer l'examen avant. Vous pouvez aussi regarder les valeurs limites. Donc il est clair que si vous avez une vitesse à calculer, par exemple, vous voulez déterminer sa valeur au temps initial, il faut trouver la vitesse initiale. Si vous trouvez autre chose, c'est que vous avez fait une erreur, d'accord ? Ou la vitesse finale doit, par exemple, être une vitesse limite. Vous pourrez imaginer ce cas de figure. Autre chose, si vous avez des fonctions spéciales, comme le sinus, le cosinus, l'hogarrtme, un tangent, arc-tangente, qu'est-ce qu'il y a encore ? L'expandientiel, les arguments de ces fonctions sont toujours, toujours sans dimension, d'accord ? Donc il y a un truc que je ne veux pas voir. Si vous avez, par exemple, du frottement, que vous avez un T sur Tau, je n'ai pas envie de voir un truc du genre TxK sur Tau ou TxL sur Tau. C'est clairement faux. Et ça va être qu'on T faux. D'accord ? Donc faites attention à ça. En revanche, il est possible que si vous faites une petite faute de signe, on ferme un œil. Ceci se concrétisera avec un OK sur votre feuille, qui signifie qu'on a compris, que vous avez compris la physique, que vous étiez stressé, que vous avez fait une petite erreur, et on n'en tient pas compte, d'accord ? Au cas par cas, on pourra décider de ce type de correction. Dernière chose, le jour avant l'examen, 24 heures avant l'examen, ne travaillez pas sur un examen donné. C'est contre-productif et ça a été démontré par des études en neurosciences. D'accord ? Il y a une consolidation qui se fait dans la mémoire. Et donc il est important de reposer son esprit, voire de faire autre chose, d'accord, mais pas l'examen que vous aurez 24 heures plus tard. Surtout ne travaillez pas la nuit d'avant sur un examen, ça ne sert

notes

résumé

## • Consignes :

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuillet : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

## • Solution :



à rien du tout. Vous allez arriver fatigué à l'examen et vous allez perdre vos moyens. Il est important aussi de bien manger le soir d'avant, pas trop, mais d'avoir suffisamment mangé au petit déjeuner aussi, d'accord, et de faire quelque chose qui vous détend, qui vous fait du bien. Par exemple, regardez un film marrant. Donc le soir d'avant, vous pourriez, par exemple, c'est une petite, on va dire, c'est Nord-Ones-An, ce que je vous donne, vous pouvez regarder Astérix et Obélix Mission Cleopatra ou Dine et Co. Ça va vous détendre, d'accord, ou un autre film, un peu importe, dans Meddombor, si vous préférez ce genre du beau, avant de venir à l'examen. Voilà, sinon je crois qu'on a à peu près fait le tour. J'aimerais quand même terminer avec ce qui avait de plus beau dans ce cours, qui sont les expériences. J'ai montré deux, trois belles expériences, terminera comme ça. Et si vous avez encore des questions, je ne profite qu'à des questions par rapport à l'examen lui-même, la logistique de l'examen, éventuellement. Non ? Oui ? ... Non, toute forme de calculatrice, toute forme d'appareil électronique, quel qu'il soit, une montre connectée, par exemple, est strictement interdit. D'accord ? Parce qu'il est facile de programmer quelque chose dans la montre, voire pire, de communiquer avec la montre à l'extérieur, ce qu'on veut évidemment éviter. D'accord ? Ne trichez pas à des examens. Ça ne sert à rien, ça peut coûter très cher. D'accord ? Pas vu, pas pris, mais c'est quand même pas marcomondable. Oui ? ... Alors oui, il y a déjà moyen d'y avoir accès, selon vous qui avez un ordinateur devant vous. ... Allez sur le site Moodle du cours, et vous allez voir tout en bas, dans la rubrique, anciens examens, vous cliquez dessus, et, sauf erreur, vous avez les examens des deux années... Non, vous avez certains examens passés. Comme

notes

résumé

- Consignes :

- ❶ Carte camipro : placée visiblement sur votre table
- ❷ Dictionnaire : sans annotation (non francophones)
- ❸ Appareil électronique : tablette, calculatrice, smartphone, etc... **interdit**
- ❹ Feuille : **doit impérativement rester attaché**
- ❺ Ravitaillement : léger conseillé (à éviter : fondue et raclette)

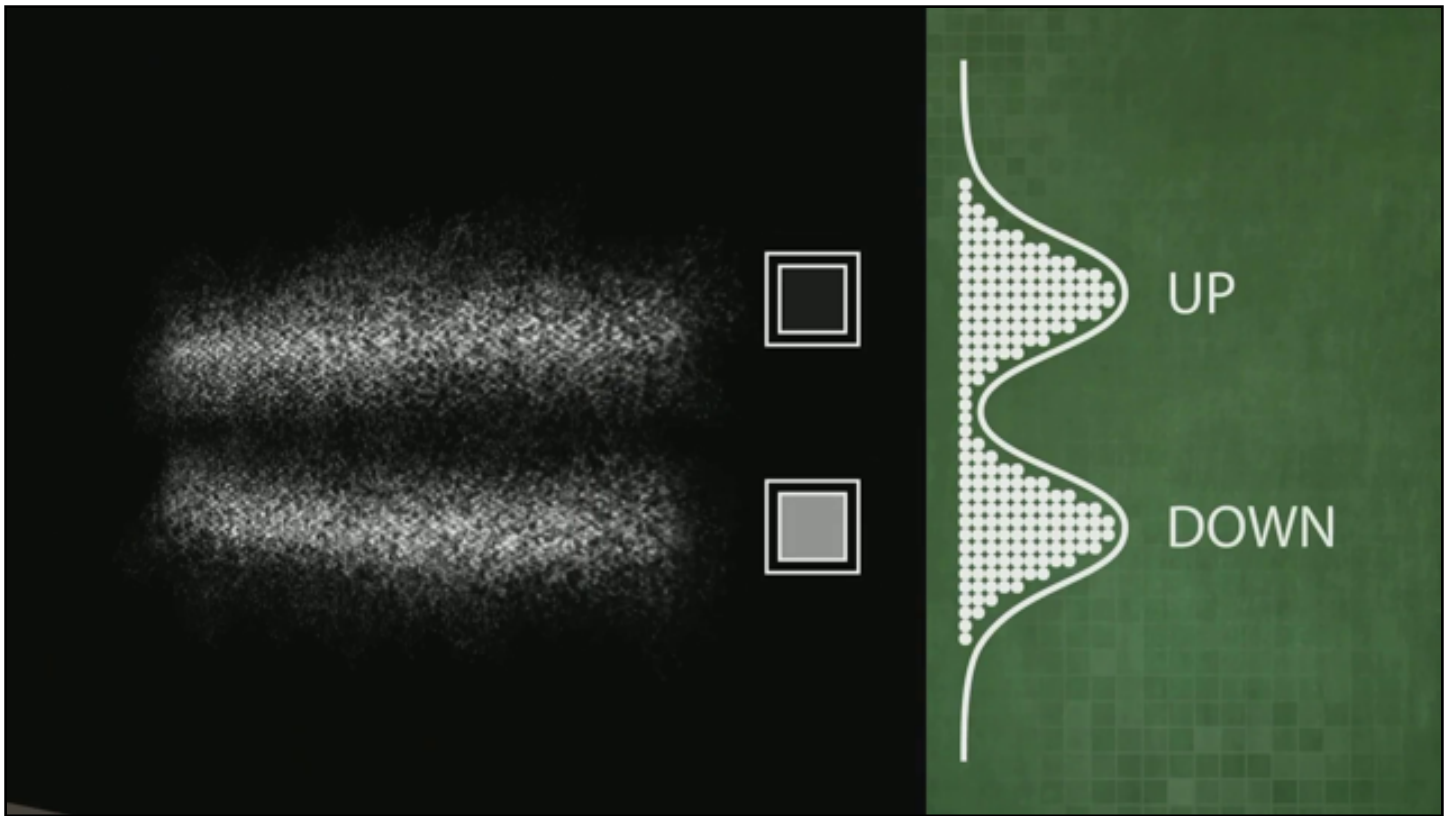
- Solution :



j'ai réutilisé un grand nombre de problèmes, tirés d'anciens examens, pour en faire des problèmes d'exercice

notes

résumé



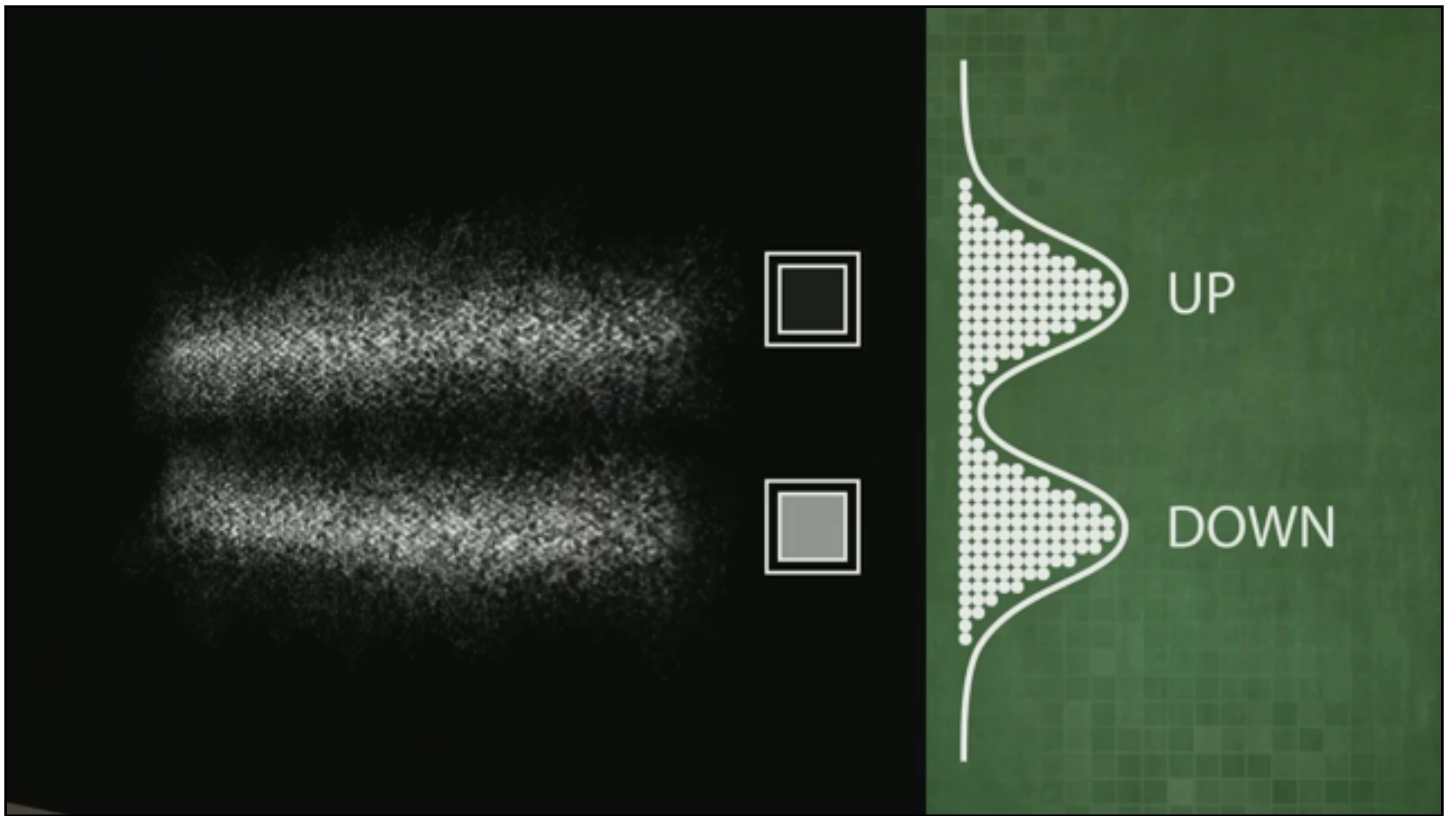
qui soient réalistes, et évidemment des overlaps. C'est pour ça que j'ai mis certains examens à disposition possible qui est des problèmes qui ont déjà été utilisés en série d'exercices. ... Alors, oui, il y en a un qui vient dans l'examen à blanc, sauf erreur. ... Donc il y a encore l'examen à blanc vendredi. Je vais le mettre à disposition demain soir, si vous voulez l'imprimer pour le faire. Si vous n'êtes pas en Suisse, puisque vous devez repartir à la maison pour les vacances de fin d'année, vous pouvez aussi le faire à distance, d'où le format qui a été adopté pour le faire. Vous allez recevoir le corrigé qui sera mis à disposition, un tout petit peu plus tard. Est-ce qu'il y a d'autres questions ? Oui ? ... Alors, le chemin du formulaire qui se trouve sur Moudal, il faut le reproduire à la main. D'accord ? C'est ça l'idée. ... Est-ce qu'il y a d'autres questions ? Alors, si ce n'est pas le cas, on va terminer par un petit pot pourri de Manip. D'accord ? On va introduire. Donc, qu'est-ce qu'on a ? Moi, il y a ces trois manip, là. Vous allez faire de l'électrostatique et de la magnéto-statique et de l'électromagnétisme le semestre prochain. Donc, je vais déjà vous mettre un petit peu au parfum. Alors, vous montrons une ou deux belles expériences. On va commencer par l'expérience de la canette de coca. Alors, c'est une canette traditionnelle. Je suis chez un grand distributeur. Elle a été vidée. Vous allez comprendre dans un instant pourquoi elle est vide, parce que si elle est pleine, il y a du coca qui jiclerait partout. On place la canette à l'intérieur du bobinage que vous voyez ici. On a des grands condensateurs qui se trouvent juste dessous. Et donc, on va les charger et, d'un coup, on va faire passer l'ensemble du courant

notes

résumé

109m 49s

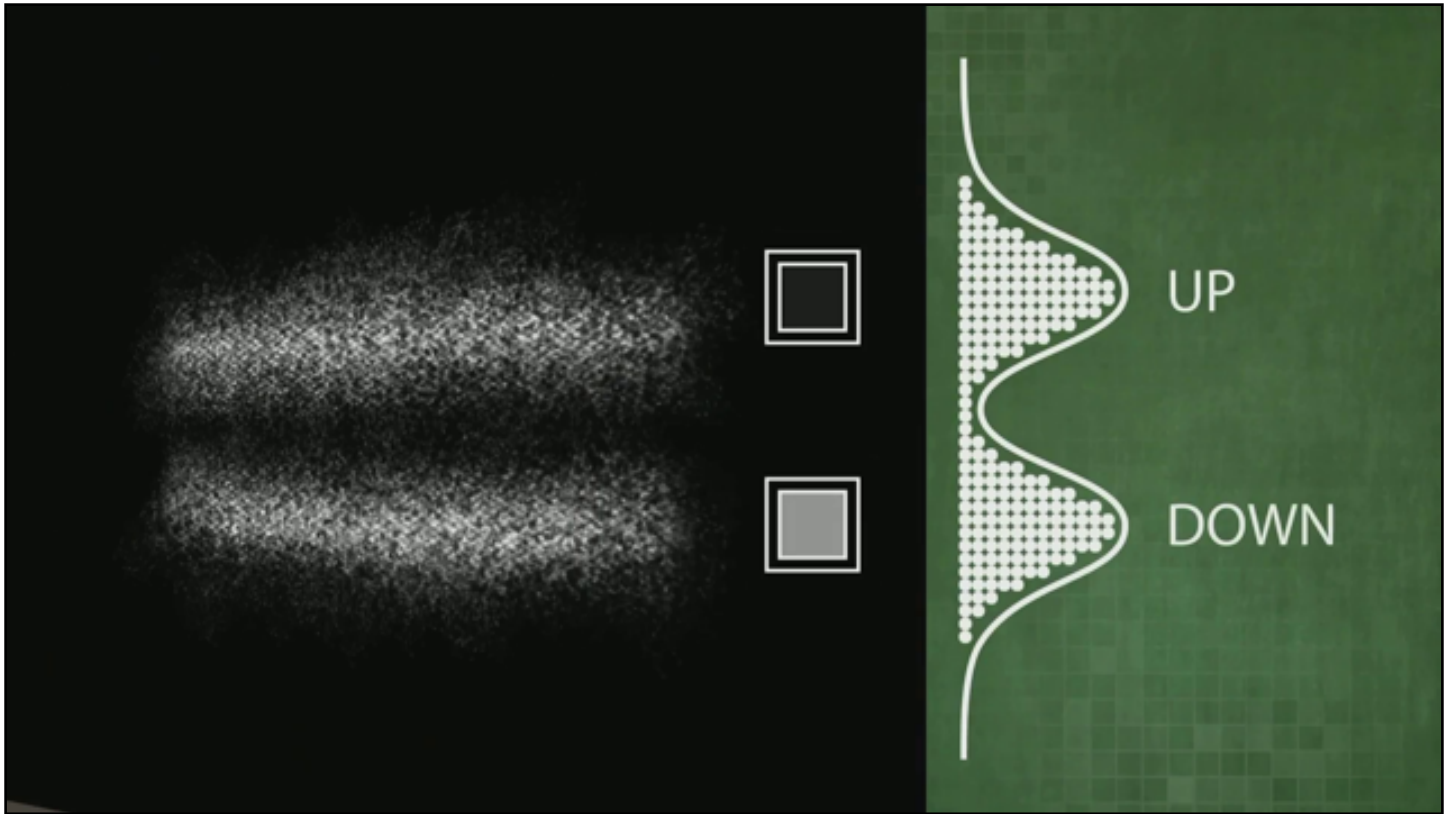




à travers la bobine. Donc, il y a un courant qui s'enclenche. Si le courant s'enclenche, on fait varier le champ magnétique à l'intérieur de la bobine. On fait varier le flux magnétique. Et la variation temporelle du flux magnétique va engendrer ce qu'on appelle des courants foucaux qui vont circuler au niveau de la bobine. Dans le plan de la bobine, les forces de la place qui vont agir entre les courants foucaux et le champ magnétique vont provoquer l'écraillement de la compression, si vous voulez, de la partie centrale de la canette. D'accord ? Seulement, les lignes de champ magnétique, elles sont bouclées. Et donc, aux extrémités de la canette, les composantes qui sont parallèles au plan de la bobine vont générer, en interagissant avec les courants foucaux, des forces qui vont propulser les deux parties de la canette à très haute vitesse de part et d'autre. D'accord ? On regarde ça ensemble ? OK. Ça va faire du bruit. Bon. Alors, je vais charger gentiment les condensateurs. D'accord ? Regardez. Vous avez les guilles qui bougent ici. On va attendre une valeur maximale de l'ordre de... de 15 kilovoltes, à peu près 10 à 15 kilovoltes. Lorsque le dispositif sera chargé, eh bien, on a la lettre verte qui va s'enclencher. Donc, dites-moi quand la lettre est verte et ensuite, je ferai circuler le courant d'un coup à travers le dispositif. C'est pas si ouvert ? Vous êtes... vous êtes prêts ? Si vous n'aimez pas les explosions, vous pouvez vous boucher les oreilles ? Alors, 1, 2... BAM ! ... Alors, prenons quelqu'un d'innocent. Toucher cette canette, elle est chaude, n'ose pas ? Elle est chaude, pourquoi ? C'est les courants par effet joule condiscipés de l'énergie dans la canette. Voilà, si vous voulez un petit souvenir. OK. Pour arriver à ce résultat, les courants de fouca ont été générés par ce qu'on appelle l'induction magnétique

notes

résumé



qui lie l'électricité au magnétisme. Ça, c'était une découverte majeure du XIXe siècle. Ce que prédisent les lois fondamentales de l'électromagnétisme, les lois de Maxwell, c'est l'existence d'ondes électromagnétiques qui se propagent dans le vide. Alors, on peut visualiser des ondes, en particulier des ondes stationnaires, qu'on va maintenant voir, sous une forme assez particulière, je vais éteindre la lumière. Je vais ouvrir ici l'entrée de gaz, attendez. Donc, vous avez ici un tube, qu'on appelle le tube de Ruhans. Vous avez une bonbonne de gaz, peut-être qu'il faut que je l'ouvre un tout petit peu plus. Voilà. Et donc, vous avez des trous à travers les couches. À travers lesquelles le gaz sort. Il faut attendre que l'air soit chassé, c'est pour ça que ça va vingt gentiment. Non. Alors, maintenant, on peut, grâce à un dispositif, envoyer une onde sonore, une onde acoustique à travers le tube. Ça sera une onde stationnaire. Et on va voir les nœuds apparaître et les ventres. Au niveau des ventres, la pression est maximale. Donc, on va voir des flammèches qui prennent la structure de l'onde. En fonction de la fréquence, c'est ce que je joue avec l'amplitude. Voilà. Vous voyez ? Donc, en changeant un peu la fréquence, on arrive à voir les nœuds, les ventres se déplacer. C'est joli à voir. Voilà. C'est ré-créatif. C'est pour ça que je vais vous présenter cette expérience-là. Et surtout, ça vous sensibilise à cette structure d'équation-onde qui est ici un peu plus grand. Une structure d'équation-onde qui est ici important. Allez, mon lamière. Hop. J'aimerais vous montrer maintenant une expérience assez incroyable où on va faire passer un fil de cuivre de l'état solide à l'état gazeux. C'est que vous avez toujours rêvé de faire, avec votre enseignant de physique, le vaporiser. On va maintenant le faire avec un fil de cuivre. D'accord ? Alors, hop. Si certains d'entre vous veulent s'approcher jusqu'ici, vous

#### notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

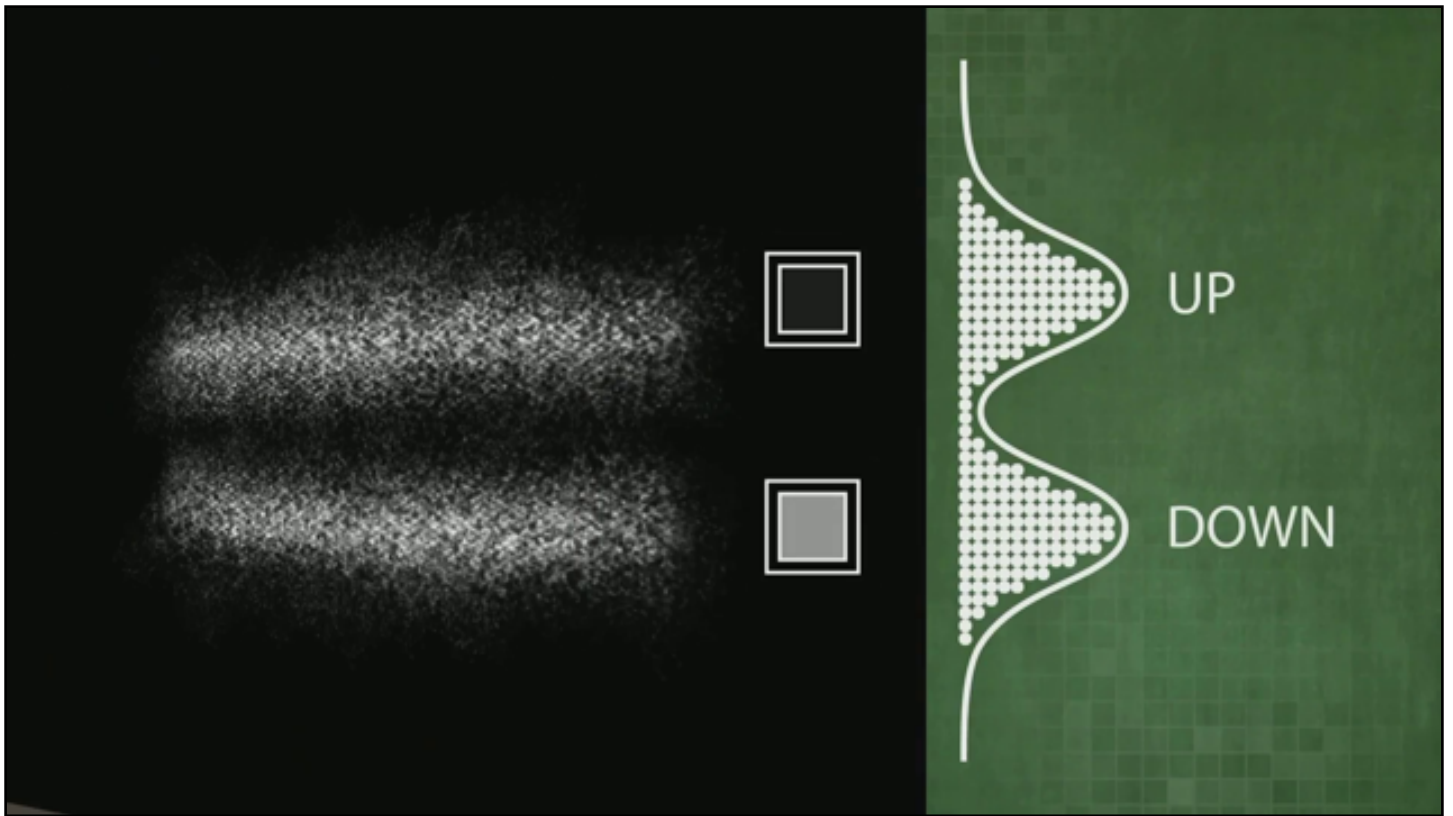
#### résumé

.....

.....

.....

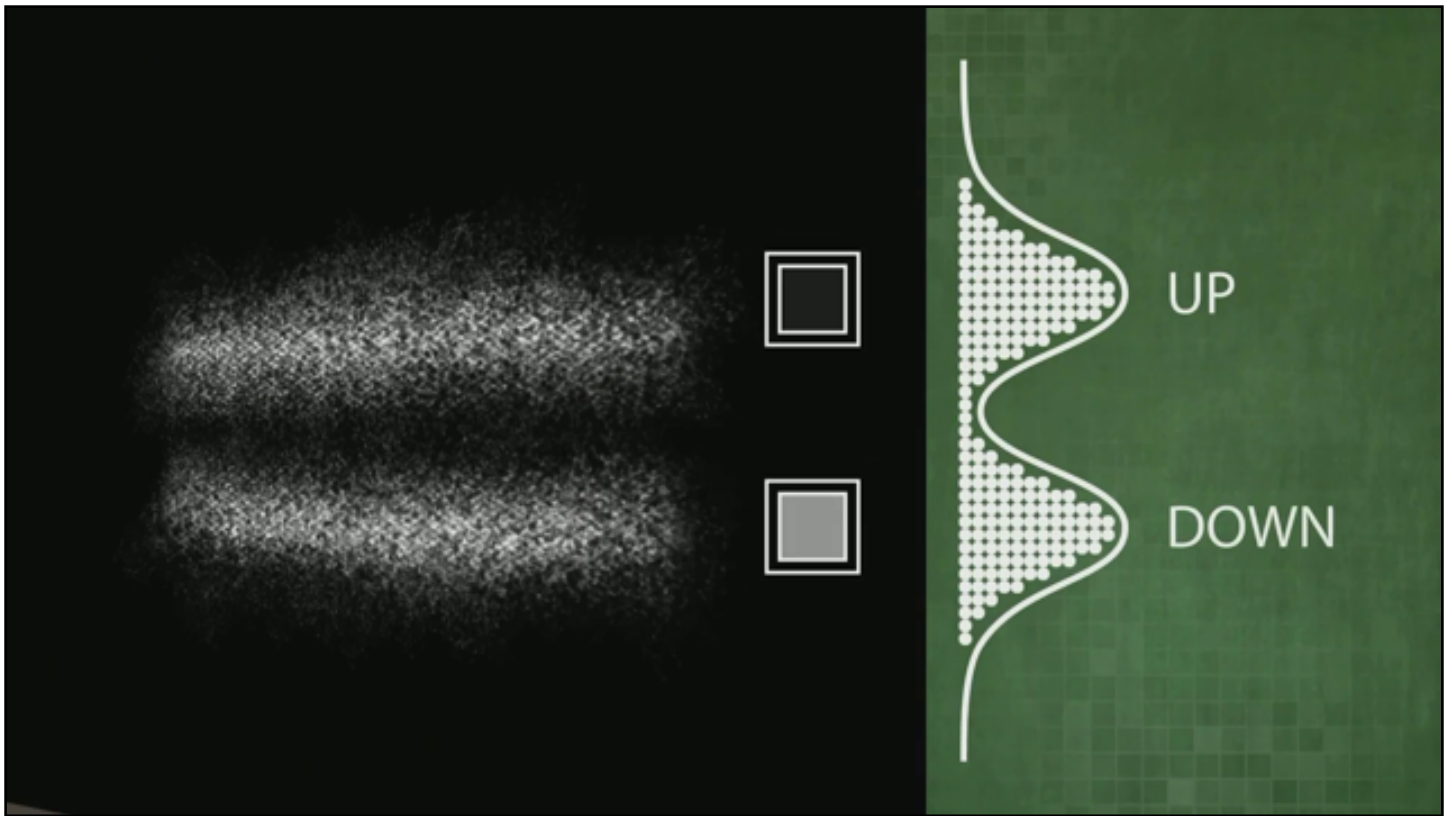
.....



pouvez le faire pour vraiment voir la poupe fumée qui va se dégager, mais ne venez pas trop près. Arrêtez-vous ici, à la première. Donc, vous allez pouvoir voir le spectacle. Vous étacque. Là, vous vous étaciez. Grâce à la caméra numéro 1. Non, la 2. Voilà. Donc, le fil que vous voyez ici va disparaître. Il va partir en fumée. Il faut juste que... Voilà, je suis sur la partie. Voilà, sur la partie fil, c'est bon. J'aurais eu un an chargé les condensateurs qui sont ici. Vous voyez les guillis qui se déplacent ? L'attention... Qui augmente. Et tout d'un coup, les guillis arrêtera de bouger puisqu'on aura atteint d'attention maximale qu'on peut atteindre avec ces condensateurs. C'est-à-dire qu'on les aura complètement chargés. Et puis, ça va bientôt arriver. Voilà. Est-ce que vous êtes prêts ? 1, 2, 3. C'est radical. L'énergie électrique qui a été injectée dans le fil est tellement grande que lorsqu'elle se transforme en chaleur, la matière passe instantanément de l'état solide à l'état gaz. On va en faire une autre qui est assez intéressante. On a ici un anneau. On va faire passer un courant assez important à travers la bobine. Et surtout, on va l'enclencher de manière assez subite, de sorte que la variation de flux magnétique à travers le petit anneau qui est ici soit très grande. Et donc, le moment magnétique dipolaire, si vous voulez, l'aie-mens qui va être ainsi généré, par les courants de foucaux qui vont circuler dans l'anneau, va être opposé au champ magnétique généré par la bobine, ce qui donne lieu à une force répulsive. Et vous allez voir l'anneau juclé. C'est pour ça qu'il y a un support en face de la vitre, puisque l'anneau va atterrir sur un morceau de bois qui est là-bas. Donc, ça va être assez violent. Donc, là aussi, on va charger les condensateurs pour voir ce qui se passe

notes

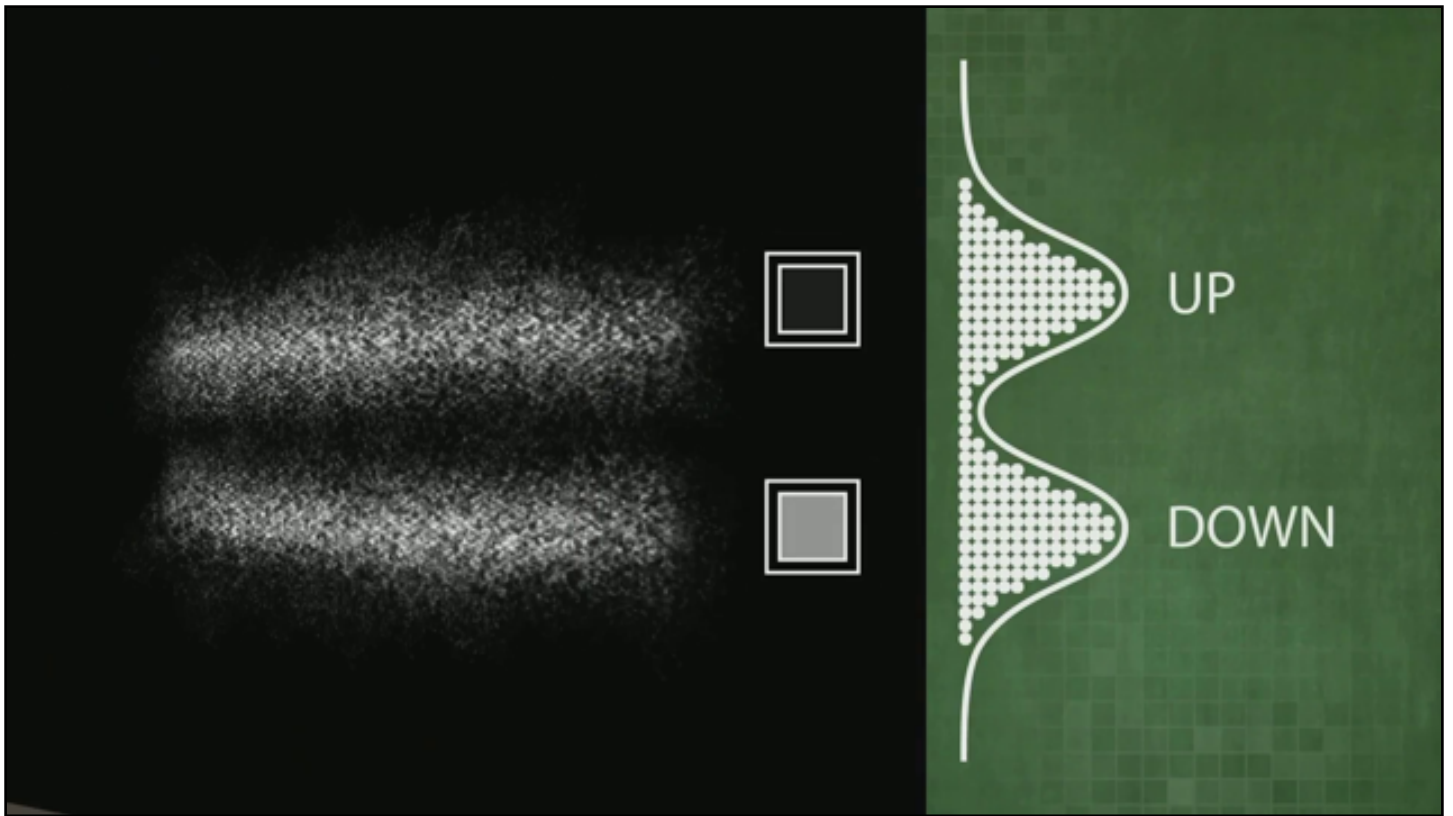
résumé



avec cet anneau de Thompson. Est-ce que vous êtes prêts ? Attendez, je crois que... j'ai pas appuyé sur le bon bouton. Voilà. Ça augmente gentiment. Ça devrait. Voilà. Donc, là aussi, ça va être un peu brutal. Vous êtes prêts ? Vous ne risquez rien, là, vous êtes assis. Ceux qui sont au premier rang, là, y a aucun souci au fond. Alors, 1, 2, 3. Merci. Alors, pour terminer, on va éteindre la lumière et je vais vous présenter l'effet corona qui n'a rien à voir avec le Covid. Je vous assure tout de suite. Qu'est-ce que c'est que l'effet corona ? L'effet corona, c'est un phénomène qui se présente lorsqu'on a une tension appliquée sur un métal qui est très important. On va avoir une ionisation de l'air environnant. C'est-à-dire qu'on va se retrouver proche des pointes avec un champ électrique qui est très intense. Et on va être capable d'arracher des électrons, d'accord ? Et ces électrons vont permettre de ioniser en fait l'azote qui se trouve autour de la structure métallique. Et ça va permettre chimiquement de créer de l'ozone, donc il y a une odeur caractéristique qui ressemble à celle qu'on retrouve près des piscines ou près des photocopiers où là aussi l'azote est générée à haute température. D'accord ? Donc voilà notre petit arbre. On va allumer le dispositif. On va faire augmenter la tension. Vous voyez les petites flamèches qui apparaissent de couleurs violettes. C'est la couleur caractéristique d'un plasma pour l'azote. Evidemment, si la tension est trop grande, ça fait des décharges électriques. Alors maintenant, on va allumer la lumière. Pour ceux qui sont devant, vous sentez peut-être même l'odeur. C'est un peu ? Ça, c'est l'ozone. C'est l'odeur d'ozone, ça. C'est pas du tout dangereux pour la santé, c'est pas toxique, ne vous inquiétez pas. D'accord ? Alors maintenant, si on rallume la lumière, qu'est-ce que vous pouvez dire derrière

notes

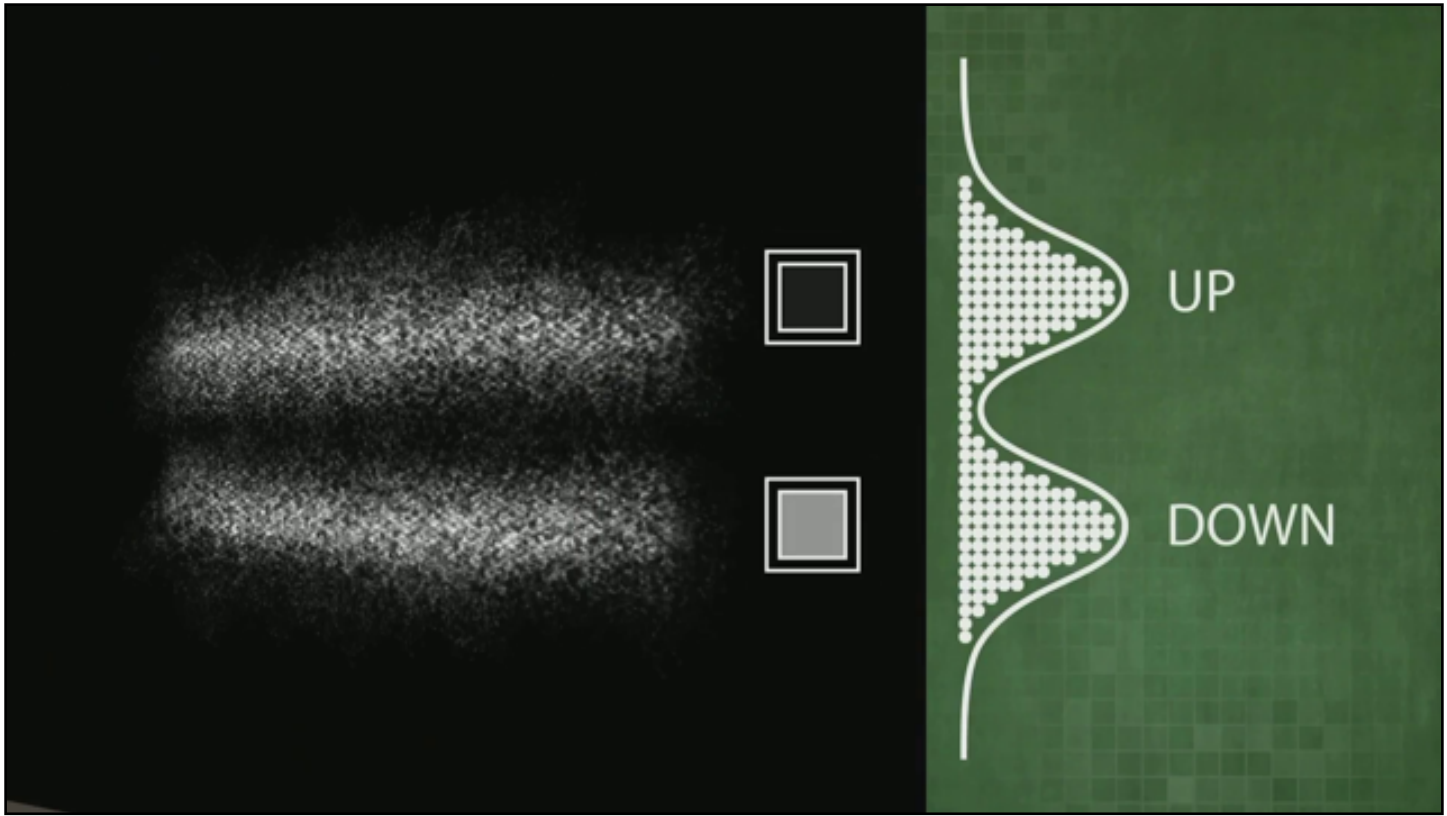
résumé



la structure ? Je voyais Noël. D'accord ? Et bonne fête. En fait c'est un mix qui a été préparé par le préparateur de cours par Pierre Vets. On se basant sur une expérience que vous verrez tous qui est celle de la cage de Faraday si vous appliquez une tension importante entre la bobine de Tesla et la cage. Vous pouvez avoir des décharges électriques qui terminent sur la cage mais qui ne peuvent pas pénétrer à l'intérieur de la cage puisque comme c'est un conducteur, le champ électrique doit être nul à l'intérieur de la cage de Faraday. Vous pouvez avoir des éclairs qui par exemple quand vous prenez un avion, ça bat sur l'avion, c'est très fréquent. Si vous avez pris plusieurs fois un transatlantique, la probabilité que vous ayez été déjà foudroyé à votre insu est énorme. Ça peut même vous être pas rendu compte. Et c'est ce qui se passe, c'est pour ça que les voitures sont fabriquées encore aujourd'hui en tôle et pas en plastique. Parce que la voiture fait office de cage de Faraday si par exemple la foudre devait la frapper. Voilà, donc je vous souhaite tout de bon. Je formule mes meilleurs vœux pour de réussite pour l'ensemble de vos examens. Si vous êtes là, ça sera un plaisir de vous revoir vendredi pour l'examen à blanc. Sinon, n'hésitez pas à venir avec vos questions le 10 janvier. Il n'y aura pas de réponse aux questions dans l'intermédiaire, d'accord ? Par contre, il y a des réponses qui seront apportées le 10 janvier. Donc n'hésitez pas à venir ce jour-là. Donc par exemple, la discussion ne fonctionnera plus à partir d'à fin de cette semaine. En revanche, on répondra les assistants et moi-même à vos questions le 10 janvier. Et si vous avez encore des questions pressantes en ce qui concerne le cours et les séries d'exercice, n'hésitez pas à venir

notes

résumé



me trouver et j'y répondrai maintenant. Ce qui veut dire que cet après-midi, si vous voulez faire autre chose, vous pouvez faire autre chose puisqu'il n'y aura pas de cours de 3 heures à 4 heures. D'accord ? Vous serez libre comme l'air. Voilà.

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....