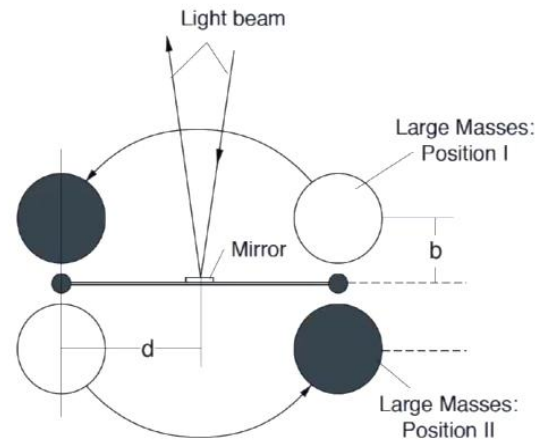




# Balance de Cavendish



- Vue de haut du pendule de torsion
- Les deux petites masses sont montées sur un fil vertical
- Les deux grosses masses sont placées d'un côté ou de l'autre des petites masses, provoquant une déviation angulaire

Mécanique | 2013 3

Bonjour. Bienvenue au cours de physique générale de l'EPFL. Dans cette leçon, on a parlé du problème de Kepler, et de la force de la gravitation de Newton. Ici, je vais montrer une expérience, la balance de Cavendish, qui permet de mesurer la force de la gravitation entre deux masses dans un laboratoire. Le principe de la mesure est le suivant. C'est, vous voyez sur ce graphique, l'expérience vue de haut. Vous avez deux masses, ici, qui forment un pendule de torsion. Il y a un fil, à la verticale de ce point qui assure, le couple de redressement du pendule de torsion. Il y a deux boules lourdes dessinées, ici, en grises, ou, en blanc, ici, il n'y a que deux boules, grosses boules extérieures. Elles sont ou bien, dans cette position-là, ou dans l'autre position. Donc, à cause de la gravitation, elles tirent, si on regarde de ce côté-là, la boule grise tire la petite boule vers elle, ou bien c'est la boule blanche sur le dessin qui tire la petite boule vers elle. Et on va donc, obtenir une déviation du pendule, qu'on va détecter grâce à un miroir fixé sur le pendule, et un jeu de faisceaux lumineux. Cette expérience est délicate.

Notes

Summary



# Balance de Cavendish



Mécanique | 2013 4

Dans notre auditoire de physique, nous avons réussi à montrer l'expérience aux étudiants pendant le cours, grâce au fait que la manip reste en tout temps accrochée au mur, dans un coin de l'auditoire.

Notes

Summary



1m 44s



# Balance de Cavendish



Mécanique | 2013 6

Voici le pendule de torsion : Le fil est contenu dans ce tube, les deux petites masses sont à l'intérieur de cette boîte, donc à l'abri des courants d'air et vous voyez, bien évidemment, les deux grosses masses extérieures qu'on peut faire tourner sur cet axe. Si on regarde d'un peu plus près, on voit le miroir fixé sur le pendule de torsion. Je disais que l'expérience était délicate. Si on veut faire une mesure aussi belle que celle que je vais vous présenter maintenant, le temps de deux périodes de 45 minutes ne suffit pas, il a fallu au technicien quatre heures pour enregistrer ce que je vais maintenant vous montrer.

Notes

Summary



2m 08s

# Balance de Cavendish



- Vision accélérée de l'oscillation puis la stabilisation du pendule de torsion pour les deux positions des deux grosses boules.
- Que vaut  $G$  ?

Mécanique | 2013 7

Vous allez voir l'horloge, mise en superposition qui avance très vite, parce que le film est accéléré. Vous allez voir quatre heures de travail en 18 secondes.

Notes

Summary




2m 53s



Vous voyez un oscillateur harmonique amorti, encore une fois, mais en accéléré, n'oublions pas. Et maintenant, je vous propose un petit exercice.

Notes

Summary

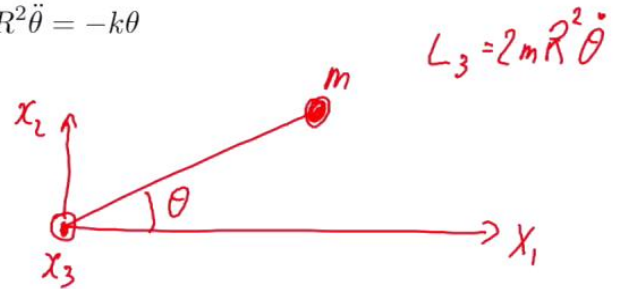




# Balance de Cavendish : ordre de grandeur

Oscillations du pendule de torsion :

$$2mR^2\ddot{\theta} = -k\theta$$



Mécanique | 2013 10

Je pense, comme tous mes collègues qui enseignent la physique, qu'il est très important d'apprendre à travailler les ordres de grandeur, et je vous propose, ici, de calculer l'ordre de grandeur de la constante de la gravitation universelle  $g$ . Je vous invite à faire une pause, essayez de voir comment vous allez pouvoir faire ce calcul, sur la base de la vidéo que je viens de vous montrer. Personnellement, je vous propose la démarche suivante. D'abord, on a un pendule de torsion qu'on a vu osciller. Alors, je vais modéliser ce pendule de torsion en écrivant son équation du mouvement dans la limite des petits angles, et j'ai écrit la chose suivante. D'où est-ce que ça vient? Et bien, si je prends ce point-là comme étant le centre du pendule de torsion, j'ai un bras de levier et une petite masse  $m$  au bout. Disons que ça, c'est un axe  $X1$  qui appartient au référentiel, donc au laboratoire, et voici l'angle  $\theta$ . Il est facile de se convaincre que le moment cinétique dans la direction  $z$ , ou dans la direction  $X3$  si vous voulez. On a un vecteur  $X3$  qui sort du tableau si on met  $X2$ , ici. Dans la direction  $3$ trois, on a  $L3$  qui vaut  $2m$ . Je vais écrire grand  $R$  au carré, fois  $\theta$  point.

Notes

Summary



3m 27s



# Balance de Cavendish : ordre de grandeur



Oscillations du pendule de torsion :

$$2mR^2\ddot{\theta} = -k\theta \quad \omega^2 = \frac{k}{2mR^2}$$

Déviations statiques du pendule de torsion :

Mécanique | 2013 12

Où  $R$ , c'est cette distance-là. Et vous appliquez le théorème du moment cinétique, qui implique  $dL_3$  sur  $dT$ , égal  $M_3$ , et pour  $M_3$ , on va supposer un couple de rappels, un moment de force proportionnel à  $\theta$ , moins  $k$  fois  $\theta$ . C'est la façon de représenter, l'action du fil du pendule de torsion sur la barre horizontale, comme ceci. Alors, vous reconnaissez, ici, l'équation d'un oscillateur harmonique, et vous connaissez la relation entre la pulsation et le coefficient qui intervient, ici. On a  $\omega^2$ . Si  $\omega$  est la pulsation,  $\omega^2$  vaut  $k$  sur  $2mR^2$ ,  $2m$  parce qu'on a, si vous voulez, 2 points matériels, mais qu'on peut décrire avec le même angle  $\theta$ . Sur l'image, on a vu l'oscillation. Donc, on a une idée de la fréquence de ce pendule. On ne sait pas très bien ce que vaut la masse; on peut la deviner. On n'a pas d'échelle, donc, on ne sait pas très bien ce que vaut  $R$ , mais je vous propose de continuer l'analyse, d'abord dans le principe, et voir qu'est-ce qu'on va pouvoir en déduire. Alors, l'expérience aboutit à un état d'équilibre avec une déviation du faisceau de lumière.

Notes

Summary



5m 04s

# Balance de Cavendish : ordre de grandeur

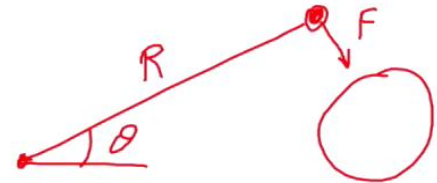


Oscillations du pendule de torsion :

$$2mR^2\ddot{\theta} = -k\theta \quad \omega^2 = \frac{k}{2mR^2}$$

Déviation statique du pendule de torsion :

$$k\Delta\theta \approx \frac{GMm}{b^2}R$$



Mécanique | 2013 13

Et la position d'équilibre est caractérisée par l'équilibre entre deux forces, la force de la pesanteur à la force de rappel, ou si vous voulez, entre le couple due à la force de la pesanteur, et le couple, ou le moment de force due, au rappel du pendule. Et j'ai donc, une relation de ce genre-là. Si vous voulez, je peux, encore une fois, dessiner un bras de mon pendule, et ici, maintenant, on a une grosse boule. On a donc, une force d'attraction qui s'exerce, comme ça, qui est la force de la gravitation. On a une distance R, donc on a un moment de force qui vaut R fois F et qui doit contrebalancer le couple, qui est défini par la constante K et l'angle  $\theta$ . Ce que j'ai écrit, K fois  $\Delta\theta$ , c'est la déviation à l'équilibre, doit être égale à, ce moment de la force de la gravitation.

Notes

Summary



6m 42s

# Balance de Cavendish : ordre de grandeur



Oscillations du pendule de torsion :

$$2mR^2\ddot{\theta} = -k\theta \quad \omega^2 = \frac{k}{2mR^2}$$

Déviations statiques du pendule de torsion :

$$k\Delta\theta \approx \frac{GMm}{b^2}R$$

Estimations :

$$b \approx R \quad R \approx \text{rayon de la grosse boule}$$

$$\Delta\theta \approx 1/20$$

$$G = \frac{(2\pi)^2}{T^2} \frac{2Rb^2}{(4/3)\pi R^3 \rho} \Delta\theta \approx 15 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$6.6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Mécanique | 2013 17

Alors, maintenant on doit passer aux estimations, et je vous propose de faire la chose suivante. Encore une fois, bien sûr, je peux descendre, aller regarder l'expérience avec un mètre et tout mesurer, mais, ce que j'aimerais vous enseigner, ici, c'est à quel point on peut avancer dans une analyse quantitative d'une expérience de physique avec simplement, des ordres de grandeur. Je vais prendre  $b$ , j'avais désigné par  $b$  la distance entre les masses. Je vais supposer que c'est à peu près égal à ce  $R$ , que j'avais utilisé pour désigner la distance entre le centre de la petite masse et l'axe du pendule de torsion. Je vais aussi supposer que les grosses boules ont un rayon  $R$ . Donc, au fond, toutes les distances qui apparaissent dans le problème, je vais les remplacer par  $R$ . Maintenant, la déviation angulaire, je l'estime à, à peu près un vingtième de radian, et quand je fais toutes les substitutions, la petite masse disparaît du problème. Le grand  $R$  me reste, mais ce que je vais faire c'est que je vais introduire pour la masse grand  $M$ , je vais introduire le volume fois la densité. Ici,  $\rho$ , c'est la densité de la matière. J'ai présumé que j'avais du plomb. Je suis allé voir les valeurs de la densité du plomb.

Notes

Summary



7m 57s

# Balance de Cavendish : ordre de grandeur



Oscillations du pendule de torsion :

$$2mR^2\ddot{\theta} = -k\theta \quad \omega^2 = \frac{k}{2mR^2}$$

Déviations statiques du pendule de torsion :

$$k\Delta\theta \approx \frac{GMm}{b^2}R$$

Estimations :

$$b \approx R \quad R \approx \text{rayon de la grosse boule}$$

$$\Delta\theta \approx 1/20$$

$$G = \frac{(2\pi)^2}{T^2} \frac{2Rb^2}{(4/3)\pi R^3 \rho} \Delta\theta \approx 15 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$6.6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Mécanique | 2013 17

Et j'ai aussi estimé  $T$ , la période du pendule, regardant le film attentivement. Et je suis tombé sur cette valeur-là: 15 fois 10 moins 11 kg moins un mètre cube seconde moins deux. D'abord, je suis content que mes unités soient correctes, ça veut dire que je ne me suis pas trompé dans mes formules. Enfin, il y a de fortes chances que je ne me sois pas trompé dans les formules. Ensuite, je trouve un résultat remarquablement proche. Cela ne veut pas dire que mes approximations sont meilleures que ce que je pensais. C'est un peu un coup de chance, mais le fait est que toutes ces distances sont voisines, et il y a peut-être des effets compensatoires dans mes erreurs. C'est quelque chose qui arrive souvent. Si j'avais trouvé une valeur 10 fois trop grande ou 10 fois plus petite, j'aurais toujours été content. Avec un facteur 100, peut-être que ça aurait mérité de regarder encore une fois ces approximations sur les distances. Enfin, voilà comment, un ordre de grandeur permet d'analyser quantitativement une expérience de physique où on ne connaît pas tous les paramètres.

Notes

Summary



9m 32s