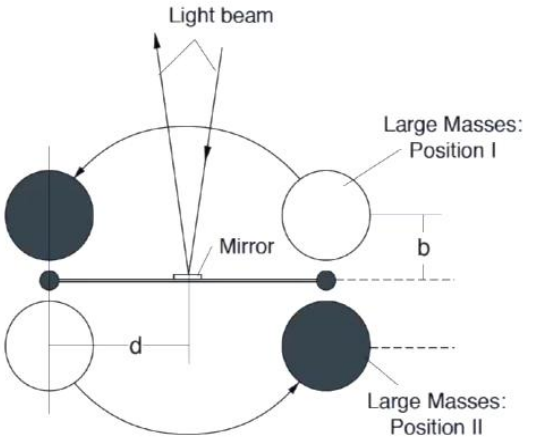
Expériences : loi de gravitation

Mécanique, cours 13.exp

Jean-Philippe Ansermet

Video

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

Guten Tag und und willkommen zur Vorlesung "Allgemeine Physik" an der EPFL. In dieser Lektion haben wir von Keplers Gesetzen und Netwons Gravitationskraft gesprochen. Hier werde ich ein Experiment, die Gravitastionswage, zeigen, welche es ermöglicht in einem Labor die Gravitationskraft zwischen zweier Massen zu messen Das Prinzip der Messung ist das Folgende. Auf dieser Graphik erkennt ihr das Experiment, wenn es von oben betrachtet wird. Es hat zwei Massen, welche ein Torsions- pendel bilden. In diesem Punkt hat es einen vertikal aufgehängten Faden, welcher zu einem Rückstellmomentum des Torsion- pendels führt. Es hat zwei schwere Kugeln, welche hier in grau oder weiss gezeichnet sind. Es hat nur zwei schwere Kugeln. Sie sind entweder in dieser Position hier oder in der anderen Position. Also aufgrund der Gravitation ziehen sie, wenn man diese Seite betrachtet, die kleine graue Kugel an sich. Oder die, auf dieser Zeichnung weisse Kugel, zieht die kleine Kugel an sich. Als Konsequenz erfährt das Pendel eine Auslenkung, welche wir durch einen auf dem Pendel fixierten Spiegel und einem Lichtstrahl messen werden. Dieses Experiment ist sehr empfindlich.

Notes

Summary

0m 03s

Balance de Cavendish

Mécanique | 2013 4

Wir haben es geschafft, den Studenten das Experiment während des Unterrichts im Vorlesungsaal zu zeigen, weil der Versuchsaufbau während der ganzen Zeit an der Wand in einer Ecke des Vorlesungsaal fixiert war.

Notes

Summary

1m 44s

Ich werde euch nun den Versuchsaufbau etwas genauer präsentieren. Hier das Torsionspendel: Die Schnur befindet sich in diesem Rohr.

Notes

Summary

2m 01s

Balance de Cavendish

Mécanique | 2013 6

Die zwei kleinen Massen sind im Innern dieser Kiste, also geschützt vor möglichen Luftströmen. Ihr seht die beiden äusseren grossen Massen, Ihr seht die beiden äusseren grossen Massen, Wenn man ein bisschen genauer hinschaut, sieht man den auf dem Pendel fixierten Spiegel. Ich sagte das Experiment ist empfindlich. Wenn man eine so schöne Messung machen möchte wie diese hier, welche ich euch jetzt zeigen werden, reichen zwei Lektionen à 45 Minuten nicht aus. Der Techniker benötigte vier Stunden um alles aufzuzeichnen, was ich euch nun zeigen werde.

Notes

Summary

2m 11s

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 ?

Ihr werdet sehen, dass die Uhr sehr schnell voranschreitet, da der Film beschleunigt ist. Ihr werdet vier stunden Arbeit in 18 Sekunden sehen.

Notes

Summary

2m 53s

Ihr seht einen gedämpften harmonischen Oszillator. Noch einmal. Das Video ist beschleunigt. Vergesst das nicht. Ich schlage euch nun eine kleine Übung vor.

Notes

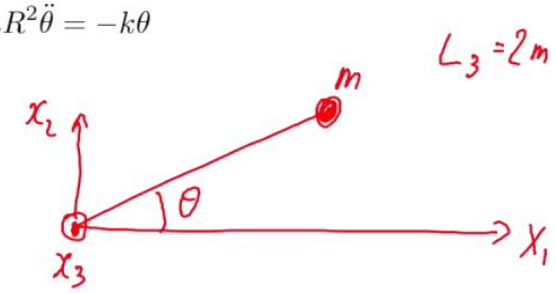
Summary

3m 14s

Balance de Cavendish : ordre de grandeur

Oscillations du pendule de torsion :

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



Mécanique | 2013 10

Ich denke, wie all meine Kollegen, welche die Physik unterrichten, dass es sehr wichtig ist zu lernen, die Grössenordnungen zu erarbeiten. Ich schlage euch vor, die Grössenordnung der universellen Gravitationskonstante g zu bestimmen. Ich lade euch ein eine Pause zu machen. Überlegt wie ihr mithilfe des zuvor gezeigten Videos diese Berechnungen machen könntet. Persönlich schlage ich euch den folgenden Lösungsweg vor. Als erstes haben wir ein Torsionpendel, wessen Oszillationen wir beobachtet haben. Also werde ich dieses Torsionpendel modellieren, indem ich seine Bewegungs- gleichung mit der Annäherung der kleinen Winkel schreibe. Ich habe das folgende geschrieben. Woher kommt das? Wenn ich diesen Punkt hier als das Zentrum des Torsionspendels betrachte, habe ich einen Hebelarm mit einer Masse m am Ende. Sagen wir, dass dies hier die Achse X1 ist, welche Teil des Bezugssystems ist. Hier haben wir den Winkel Theta. Es ist einfach, sich davon zu überzeugen, dass der Drehimpuls in der Z-Richtung oder, wenn sie möchten, in der Richtung X3. Wir haben einen Vektor X3, welcher aus der Tafel hinaustritt, wenn wir X2 hier setzen. In der Richtung drei, haben wir L3, welches zwei m entspricht.

Notes

Summary

3m 27s

Balance de Cavendish : ordre de grandeur

Oscillations du pendule de torsion :

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

Mécanique | 2013 11

Ich werde schreiben: Gross R im Quadrat mal theta Punkt. Wobei R diese Distanz hier darstellt. Das Theorem des Drehimpulses impliziert, dass dL3 durch dT M3 entspricht. Und für M3 nehmen wir ein Rückstellmoment an, welches proportional zu Theta ist, respektive dem Term minus k mal Theta entspricht. Dies ist die Art und Weise, die Aktion der Schnur des Torsionpenels auf den horizontalen Stab zu beschreiben. Also ihr erkennt hier die Gleichung eines harmonischen Oszillators. Und ihr kennt alle das Verhältnis zwischen der Frequenz und dem Koeffizienten, welcher hier interveniert. Wir haben Omega im Quadrat. Wenn Omega die Pulsation darstellt, entspricht Omega im Quadrat k durch zwei m R im Quadrat. Zwei m, da wir zwei Massen besitzen, welche mit demselben Winkel Theta beschrieben werden können. Auf dem Video haben wir die Oszillation gesehen. Also haben wir schon eine Idee von der Frequenz dieses Pendels. Wir kennen die Masse der beiden Kugel nicht genau. Man kann sie jedoch herausfinden. Wir haben keinen Masstab. Also kennen wir R nicht genau. Ich schlage euch vor die Analyse fortzuführen, als erstes nur theoretisch, und wir werden sehen, was wir herleiten können.

Notes

Summary

4m 58s

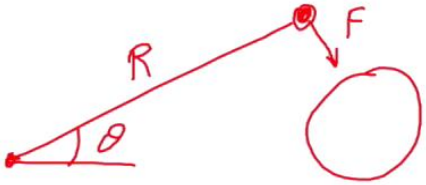
Balance de Cavendish : ordre de grandeur

Oscillations du pendule de torsion :

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

Déviation statique du pendule de torsion :

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



Mécanique | 2013 13

Also, das Experiment resultiert in einem Gleichgewichtszustand mit einer Ablenkung des Lichtstrahls. Dieser Gleichgewichtszustand ist durch das Gleichgewicht zwischen zweier Kräfte, der Gravitationskraft und der Rückstellkraft, charakterisiert, oder wenn ihr möchtet, zwischen zweier Drehmomente, das Moment ausgelöst durch die Gravitationskraft und das Rückstellmoment des Pendels. Ich habe also ein Verhältnis dieser Art hier. Wenn ihr möchtet, kann ich noch einmal einen Arm meines Pendels zeichnen und hier haben wir jetzt eine grosse Kugel. Wir haben also eine Anziehungskraft, respektive die Gravitationskraft, welche so wirkt. Wir haben eine Distanz R, also haben wir ein Drehmoment, welches sich als R mal F schreibt und das Drehmoment, welches durch die Konstante k und den Winkel theta beschrieben ist, ausgleichen muss. Was ich hier geschrieben habe, k mal delta theta, ist, ist die Auslenkung im Gleichgewicht, welche dem durch die die Gravitationskraft ausgelösten Drehmoment entsprechen muss.

Notes

Summary

6m 33s

Balance de Cavendish : ordre de grandeur

Oscillations du pendule de torsion :

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

Déviation statique du pendule de torsion :

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

Estimations :

$b \approx R$ $\quad R \approx$ rayon de la grosse boule

$\Delta\theta \approx 1/20$

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

6.6 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}

Also jetzt wechseln wir zu den Schätzungen und ich schlage euch vor das Folgende zu machen. Noch einmal, natürlich kann ich das Experiment mit einem Masstab betrachten und alles messen. Aber ich möchte euch hier aufzeigen, bis wohin man durch eine quantitative Analyse eines physikalischen Experiments fortschreiten kann, indem man nur die Grössenordnungen betrachtet. Ich werde b nehmen. b habe ich als die Distanz zwischen den beiden Massen definiert. Ich werde annehmen, dass dies ungefähr R entspricht, was ich als die Distanz zwischen dem Zentrum der kleinen Kugel und der Achse des Torsionpendels definiert habe. Des Weiteren werde ich annehmen, dass die Grossen Kugeln einen Radius R besitzen. Also im Grunde genommen werde ich alle Distanzen, welche im Problem vorkommen, duch R ersetzen. Nun, die Ablenkung schätze ich ein, ein Zwanzigstel eines Radianten zu sein. Wenn ich alle Substitutionen mache, verschwindet die kleine Masse in der Problemformulierung. Hier bleibt das grosse R. Aber für die masse M hier werde ich das Produkt von Volumen und Dichte einfügen. Hier ist rho die Dichte. Ich habe angenommen, dass ich Blei habe. Ich habe die Dichte von Blei nachgeschlagen.

Notes

Summary

7m 57s

Balance de Cavendish : ordre de grandeur

Oscillations du pendule de torsion :

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

Déviation statique du pendule de torsion :

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

Estimations :

$b \approx R$ $\quad R \approx$ rayon de la grosse boule

$\Delta\theta \approx 1/20$

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

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

Des Weiteren habe ich T, die Periode des Pendels, mithilfe des Films geschätzt. Ich fand den Wert hier: 15 mal 10 hoch minus 11 Kilogramm hoch minus eins, Kubikmeter, Sekunden hoch minus zwei. Als Erstes bin ich zufrieden, dass meine Einheiten korrekt sind. Das heisst, dass ich mich höchstwahrscheinlich nicht in den Formeln geirrt habe. Darauf finde ich ein Resultat, welches beachtlich nahe ist. Dies will nicht heissen, dass meine Annäherungen besser sind, als ich gedacht habe. Dies ist ein bisschen ein Zufall. Vielleicht sind diese Distanzen wirklich alle vergleichbar gross oder die Annäherungen haben sich glücklicherweise gegenseitig kompensiert. Dies ist etwas, was häufig auftritt. Wenn ich einen zehnmal zu grossen oder zu kleinen Wert gefunden hätte, wäre ich trotzdem zufrieden gewesen. Bei einem Faktor 100 wäre es lohnenswert, die Annäherungen noch einmal genauer zu betrachten. Also seht wie das Betrachten der Grössenordnung des Resultats es uns erlaubt, ein physikalisches Experiment qualitativ zu analysieren, von welchem wir nicht alle Parameter kennen.

Notes

Summary

9m 32s