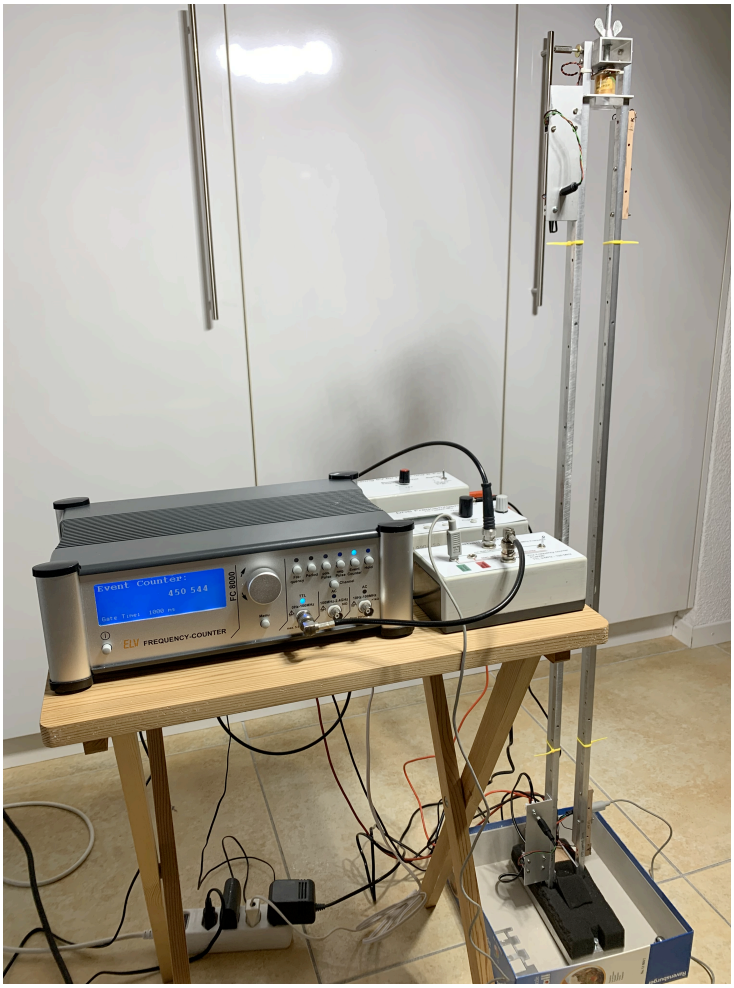
Le chronomètre de précision d'une microseconde

Mesure du temps pour tous les mouvements mécaniques entre deux rayons laser

Dr Franz Raemy

le 30 juin 2024



1 Résumé

Le travail décrit les mesures du temps à la précision d'une microseconde près entre deux rayons laser au cas de la chute libre, pour les mouvements sur des railles horizontales ou inclinées et le temps de parcours d'un objet à travers d'un seul rayon laser. Tous les mouvements de la mécanique sont mesurables à ±2 microsecondes près et les expériences deviennent compréhensibles.
Les quatre composantes suivantes sont nécessaires pour les expériences : Le compteur de fréquence FC8000 (on choisit Event-Counter) nous sert à mesurer la quantité de microsecondes qui ont pu traverser la porte ouverte entre les deux transitions par les rayons laser. Les deux rayons laser définissent la porte ouverte entre le signal « Départ » et « Stop ». Les impulsions microsecondes sont mises à disposition d'un générateur de fréquences ayant une fréquence d'un million d'impulsions par seconde. Les signaux de la porte et les impulsions sont envoyés par un élément « AND » électronique. On branche la sortie de cet élément avec l'entrée du compteur FC8000 qui compte les microsecondes pour la durée de la porte ouverte. L'appareil montre le temps en microsecondes.

2 Les composantes communes de tous les mesures du temps

2.1 L'alimentation des deux rayons laser et de l'aimant électrique

L'alimentation fournit une tension constante de 5 V. dans le même boitier se trouve l'alimentation de l'aimant électrique qui retient la sphère. Cette tension respectivement le courant peut être réglé par un potentiomètre. L'utilité de cette possibilité de réglage sera expliquée plus loin. Sur le boitier se trouve l'interrupteur du courant pour l'aimant électrique. Si le courant est déclenché la tension est inversée pour la prochaine expérience. Ainsi on évite une augmentation continuelle du champ magnétique sur la sphère.

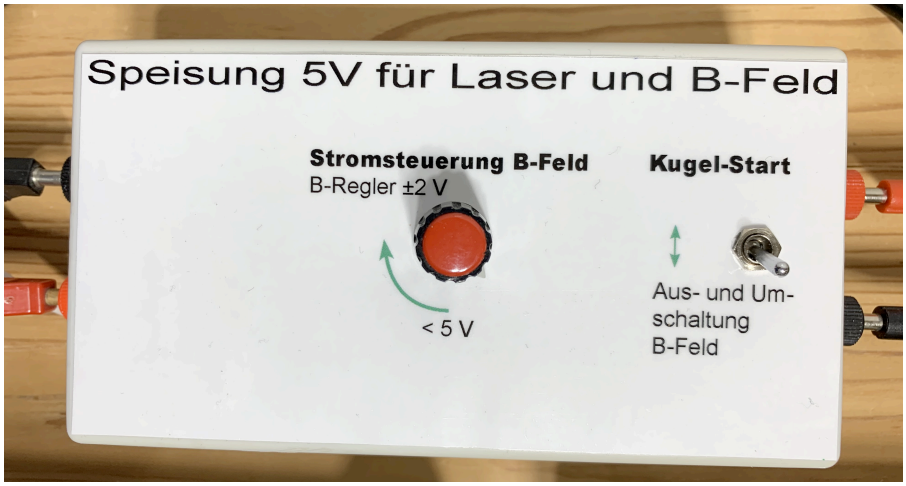


Figure 2.2.1

2.2 Le générateur de fréquence DDS

Le générateur de fréquences DDS engendre la fréquence de haute précision de 1 MHz pour le compteur. Cette option a été choisie pour pouvoir tester la précision d'autres sources de fréquences avec sorties TTL. J'utilise une générateur de fréquence que j'ai construit (voir figure 2.2.1).

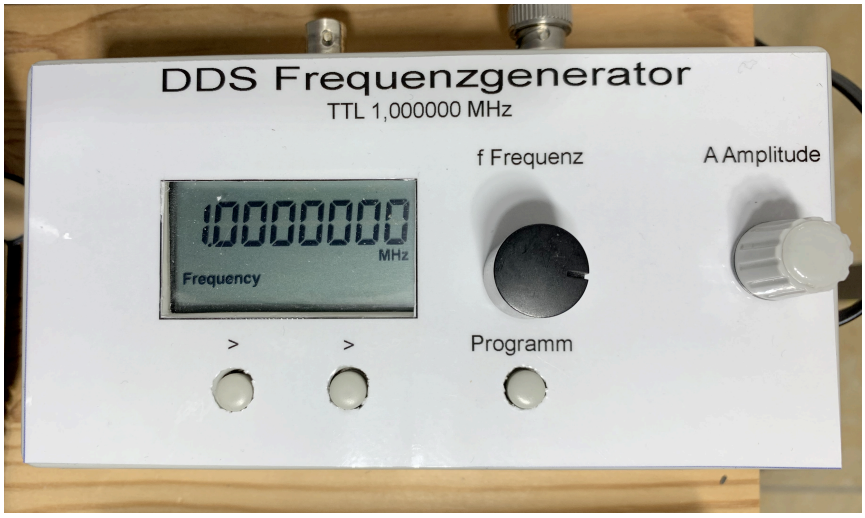


Figure 2.2.1

2.3 La gare des câbles et la préparation du signal

La gare des câbles consiste de deux entrées des signaux « Start » et « Stop » des barrières photoélectriques (prise jack). Les deux barrières photoélectriques définissent la porte (ouverte ou fermée). Le générateur de fréquences DDS fournit la fréquence de 1 MHz pour le compteur.
Le commutateur sur le boitier permet le choix entre la mesure avec une ou deux barrières photoélectriques. Si l'on choisit seulement la barrière photoélectrique « Départ » le temps mesuré correspond la durée de transition de l'objet par le rayon laser. La transition de l'objet de diamètre d et de durée t définit la vitesse de propagation v=d/t. L'électronique dans cette boite définit avec la porte ouverte et le générateur de fréquences DDS le signal pour l'entrée du compteur FC8000.

La figure 2.2.1 montre les entrées et la sortie de la gare des câbles

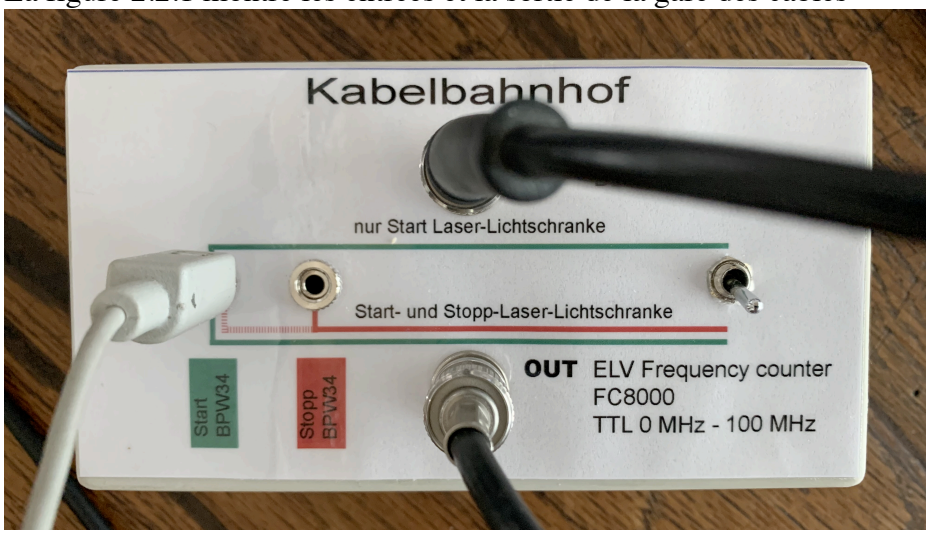


figure 2.2.1

2.4 Le compteur de fréquence : ELV Frequency Counter FC8000

Le FC 8000 compte les impulsions TTL de 1MHz. Cet appareil est un kit de construction qui est fournie partiellement monté avec les composantes électroniques. Le montage est très simple grâce à une description excellente.
Le FC8000 est relié avec la gare des câbles. Il compte les impulsions qui ont passe la porte ouverte entre le signal de départ et le signal d'arrivée. L'appareil montre le temps de mesure en microsecondes. L'erreur de l'appareil est autour de 2 microsecondes.



Figure 2.4.1 Der FC8000

3 L'expérience „la chute libre"

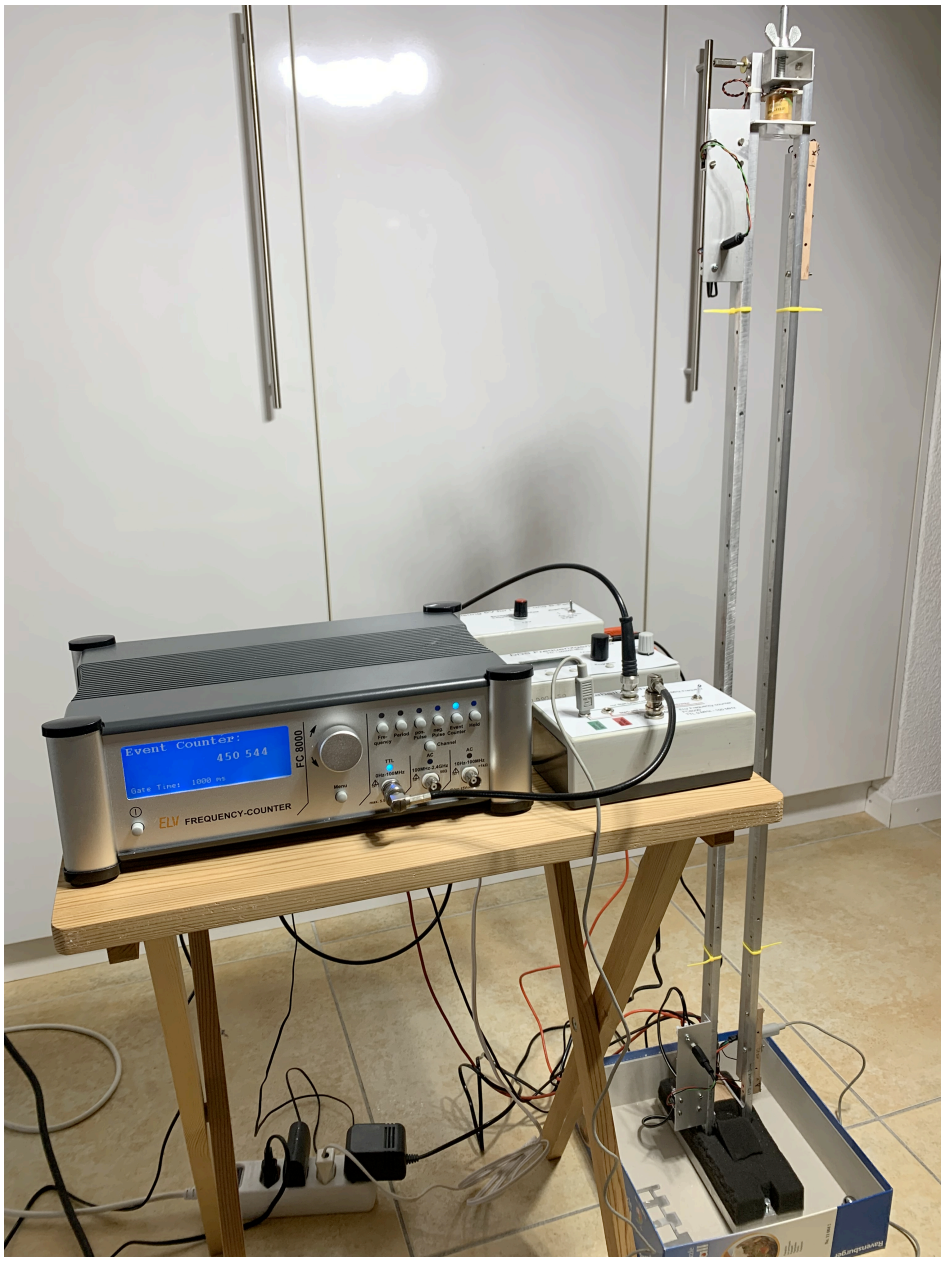
Le projet est la mesure de la accélération gravitationnelle par la mesure du temps d'une sphère en chute libre. On utilise une construction du support en aluminium et un chronomètre décrit dans le paragraphe 2. On mesure le temps d'une sphère en chute libre sur une distance de 1 mètre.

3.1 Remarques concernant le principe de mesure

La construction en aluminium est stable et porte l'aimant électrique en haut dont la hauteur peut être variée. La hauteur de la sphère est réglée de façon à ce que le signal « départ » n'est juste pas enclenché. Nous n'utilisons pas le déclenchement du courant par la bobine comme signal de départ mais une barrière photoélectrique indépendante qui enclenche la chute libre avec une précision beaucoup plus grande. Les expériences ont montré que l'incertitude la plus grande est à l'endroit du départ. Un autre avantage est la définition du point de départ qui reste toujours bien définie. Un rôle important est joué par l'aimant électrique. On peut diminuer le courant par la bobine et la sphère commence à tomber librement si le champ n'est plus suffisamment grand pour retenir la sphère. La sphère doit tomber précisément par les rayons laser pour garantir que le chemin parcouru n'e soit pas plus long que 1 mètre. Le contrôle de la chute libre se fait avec des jauges qui permettent de contrôler si la sphère en chute libre est tombée sans toucher la jauge. Les évènements qui montre que la sphère a touché la gauge sont éliminés. Le réglage de la verticale se fait à l'aide de trois visses.

3.2 Les composantes de l'expérience « la chute libre » “

La construction du support en aluminium a l'avantage que le champ magnétique n'est pas influencé. La figure suivante montre le système mécanique et électronique de mesure de l'expérience « la chute libre ».



3.3 L'électronique pour la préparation des impulsions en microsecondes

Entre la barrière du départ et celle de l'arrivée il y a les impulsions qui passent par la porte ouverte pour ce temps. La figure 3.3.1 montre l'électronique qui prépare le signal pour l'entrée du compteur FC8000 sous condition que le schéma est publié. Le signal TTL avec les s en microsecondes est branché à l'entrée du FC8000.



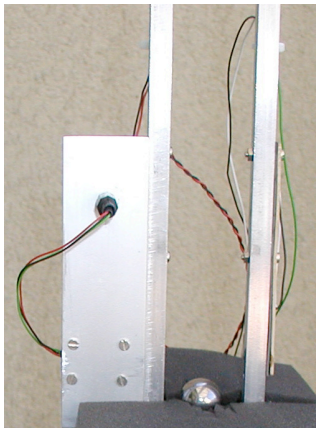
Figure 3.3.1

3.4 Les barrières photoélectriques (laser et diode photoélectrique)

Les capteurs électroniques et les lasers sont arrangés au point de départ et au point d'arrivée. La distance ainsi définie est de 1 mètre. Les figures suivantes montrent la barrière photoélectrique du départ et celle de l'arrivée.



Laser capteur du départ, sphère et aimant électrique



capteur d'arrivée

Les deux capteurs fonctionnent de la même façon. Si le rayon est interrompu par la sphère alors la résistance du capteur augmente et l'on obtient un flanc positif. Le signal est interprété come départ ou arrivée. Le deux signaux définissent la porte ouverte.

3.5 L'appareil de mesure FC8000

Le compteur de fréquence FC8000 est un kit de construction fourni par ELV. Beaucoup de composantes électroniques minces sont déjà montées sur les platines. Le reste de la construction de l'électronique est simple à effectuer. La figure suivante montre l'appareil ELV Frequency-Counter FC8000. L'appareil permet aussi les mesures du temps très écartes avec la même précision de ±2 microsecondes.



Figure 3.5.1 ELV Frequency-Counter FC8000

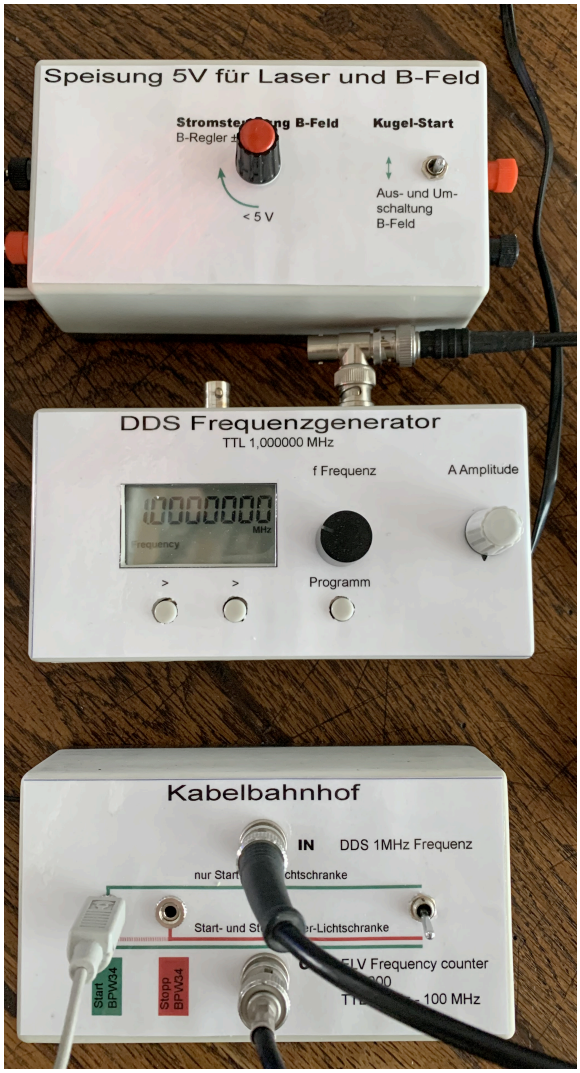


Figure 3.5.2 Alimentation, générateur de fréquences DDS, gare des câbles avec préparation des signaux pour le compteur FC8000.

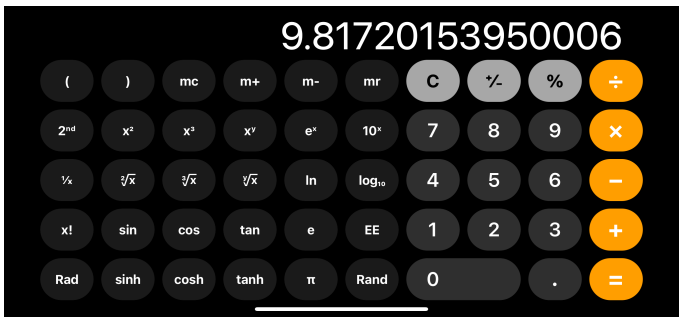
3.6 Mesure du temps d'une sphère en chute libre et la détermination de l'accélération gravitationnelle g

A partir de la mesure du temps t de la chute libre sur une distance d de 1 mètre on détermine l'accélération gravitationnelle g de la terre.



Figure 3.6.1 Le compteur de fréquence montre $451358\,\mu s$.

Ce temps permet de déterminer g :



Voici la formule qui détermine g:

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad \Rightarrow \quad g = \frac{2h}{t^2}$$

$$t = 451358\ \mu s \Rightarrow \quad \boxed{g = 9{,}817\ m/s^2}$$

4 L'expérience du pendule

4.1 L'expérience du pendule

La photo 4.1.2 montre l'expérience du pendule. A gauche se trouvent les lasers. Dans l'expérience nous utilisons que le laser de départ. Au milieu il y a le pendule et le compteur de fréquences FC8000. A droite se trouvent les trois boitiers gris contenant l'alimentation des lasers, le générateur DDS qui engendre la fréquence de 1 MHz et la première boite contient la gare des câbles avec la préparation du signal pour le compteur venant des deux capteurs lumineux BPW34 représentés a droite.



Photo 4.1.1

Dans la suite je montre trois mesures des vitesses de la sphère qui sont comparé avec les valeurs théoriques.

4.1.1 La première mesure de la vitesse de propagation

Le pendule a une longueur de 38,5 cm. Le temps du passage de la sphère à travers le rayon de départ est t. Le diamètre de la sphère vaut 1,38 cm. Au cas du pendule l'énergie potentielle de la sphère est transformée en énergie cinétique. La sphère n'a pas de l'énergie de rotation. Ceci va changer dans le cas de la sphère qui fait un mouvement de rotation sur les railles.

$$E_{cin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = E_{pot} = mgh \qquad \Rightarrow \qquad v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}385\, m}$$

$$\boxed{v = 2{,}75\, {}^{m}\!/_{s}}$$

A partir du diamètre de la sphère et du temps de passage par le rayon de départ, on trouve:

$$v = \frac{D}{t} = \frac{0{,}0138 m}{4978 \cdot 10^{-6} s} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v = 2{,}77\, {}^{m}\!/_{s}}$$

4.1.2 La deuxième mesure de la vitesse de propagation

La longueur du pendule reste 38,5cm, le temps de passage de la sphère par le rayon laser est t et le diamètre de la sphère est D=1,38 cm.

$$E_{cin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = E_{pot} = mgh \qquad \Rightarrow \qquad v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}385\, m}$$

$$\boxed{v = 2{,}75 \, {}^{m}/_{s^2}}$$

A partir du diamètre de la sphère et du temps de passage par le rayon de départ, on trouve:

$$v = \frac{D}{t} = \frac{0{,}0138 m}{5008 \cdot 10^{-6} s} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v = 2{,}77 \, {}^{m}/_{s}}$$

4.1.3 La troisième mesure de la vitesse de propagation

A partir du diamètre de la sphère et du temps de passage $t = 4946 \cdot 10^{-6} s$ par le rayon de départ, on trouve:

$$v = \frac{D}{t} = \frac{0{,}0138 m}{4946 \cdot 10^{-6} s} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v = 2{,}79 \, {}^{m}/_{s}}$$

4.1.4 La mécanique améliorée égal à celle de la chute libre

L'image suivant montre le pendule suspendu à un aimant électromagnétique. La mesure pour une longueur du pendule de h=31,2 cm, un diamètre d=1,38 cm et un temps de passage $t = 5589 \mu s$ donne la vitesse des la sphère au point le plus bas:

$$\boxed{v_{mesure} = \frac{1{,}38 cm}{5589 \mu s} = 247{,}4 \frac{cm}{s}}$$

La valeur théorique déduit de la conservation de l'énergie montre

$$\boxed{v_{théorique} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}312 m} = 247{,}4 \frac{cm}{s}}$$

Les valeurs théoriques et expérimentales sont en accord parfait.



Figure 4.1.4.1

5 La sphère sur les railles en U en respectant l'énergie de rotation

5.1 La transformation de l'énergie

la foto 5.1.1 montre les railles de la sphère. La sphère possède en même temps de l'énergie cinétique et de l'énergie de rotation.



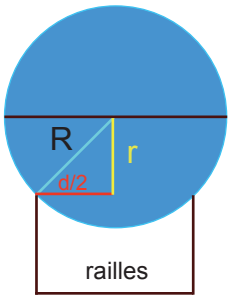
Photo 5.1.1

L'énergie potentielle de la sphère est transformée en énergie cinétique et en énergie de rotation avec le moment d'inertie I :

$$E_{pot} = mgh = E_{cin} + E_{rot} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I \cdot \omega^2}{2}$$

où

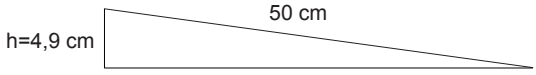
$$I = \frac{2}{5} m \cdot R^2 \qquad et \qquad v = \omega \cdot r \qquad et \qquad r^2 = R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2$$



$$\Rightarrow \qquad mgh = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I \cdot \omega^2}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} m \cdot R^2 \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow \qquad gh = \frac{v^2}{2} + \frac{1}{5} R^2 \cdot \frac{v^2}{r} = v^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{5} \cdot \frac{R^2}{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right)$$

$$\Rightarrow \qquad v = \sqrt{\frac{g \cdot h}{\frac{1}{2} + \frac{1}{5} \cdot \frac{R^2}{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}}$$



5.2 Comparaison de la valeur théorique avec la valeur expérimentale de la vitesse

La valeur théorique de la vitesse de la sphère sur les railles donne :

$g = 9{,}81\,{}^{m}\!/_{s^2}$ $\qquad d = 0{,}0084\,m$

$h_1 = 25{,}7\,cm$ $\qquad h_2 = 20{,}8\,cm$ $\qquad \Rightarrow \qquad h = 4{,}9\,cm$

$\Rightarrow \qquad \boxed{v_{théorique} = 0{,}787\,{}^{m}\!/_{s}}$

Les valeurs expérimentales des vitesses sont dérivés de la mesure du temps selon la formule $v_{mesure\,i} = \dfrac{2R}{t_i}$. La distance 2R est le diamètre de la sphère qui parcourt le rayon laser

$t_1 = 20483\mu s \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v_{mesure\,1} = 0{,}781\,\frac{m}{s}}$

$t_2 = 20181\mu s \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v_{mesure\,2} = 0{,}793\,\frac{m}{s}}$

$t_3 = 20154\mu s \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v_{mesure\,3} = 0{,}794\,\frac{m}{s}}$

$t_4 = 20103\mu s \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{v_{mesure\,4} = 0{,}796\,\frac{m}{s}}$

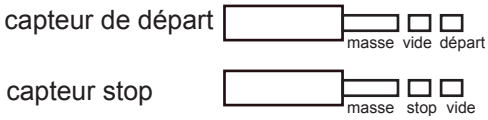
6 Annexe

6.1 Les prise jack sur la gare des câbles

Le racordement sur les prises jack de l'expérience « la chute libre » montre que les deux signaux sont transmis sur le même jack.



Le racordement sur les prises jack de l'expérience avec les deus rayons lumineuse séparés montre que les deux signaux sont transmis sur deux jacks. Il y a des mesures qui ont besoin seulement d'un capteur et d'un laser. Dans ce cas on utilise seulement l'entrée « départ ». (Start)



6.2 La diode photoélectrique BPW34

