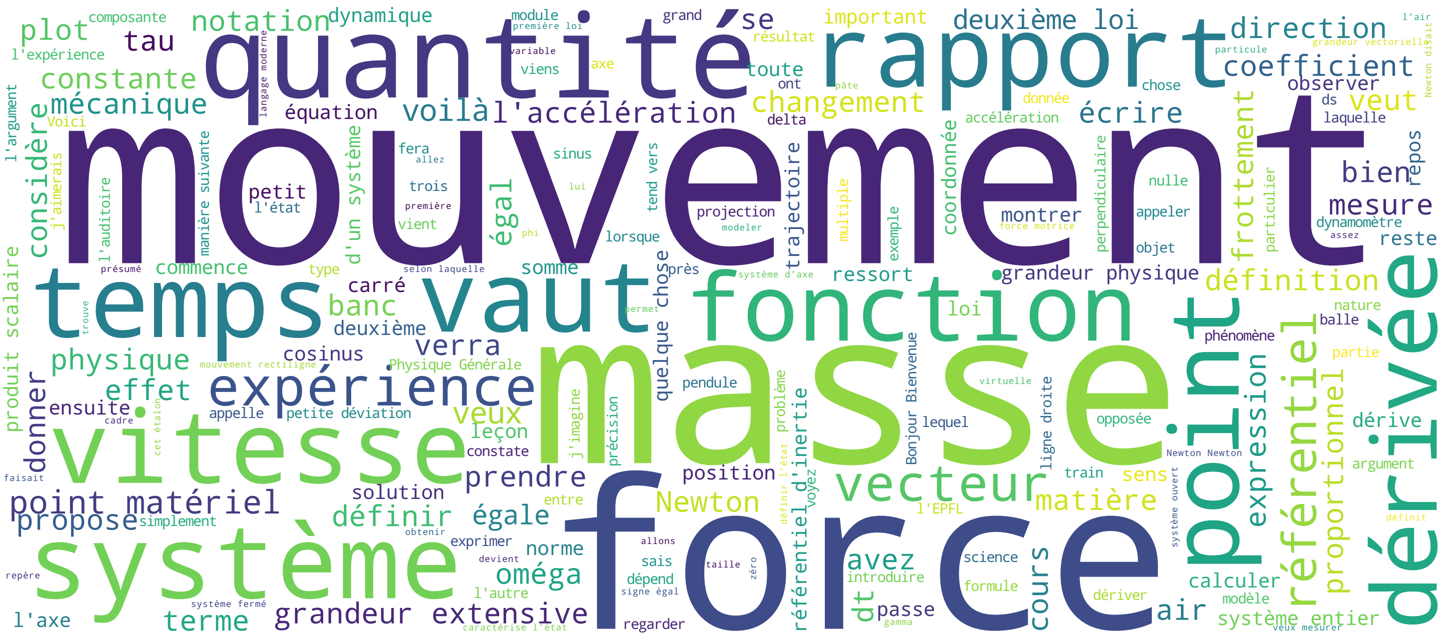
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Les lois de Newton

Mécanique, cours 3.1

Jean-Philippe Ansermet

http://go.epfl.ch/traite-meca-1-3



EPFL

Search MOOC

Video

Les lois de Newton

Bonjour Bienvenue au cours de Physique Générale de l'EPFL Dans cette leçons je vais introduire les bases de la dynamique Newtonienne. Suivant Newton, je vais commencer par définir la quantité de mouvement par analogie avec ce qu'on appelle la quantité de matière. Je vais ainsi définir l'état de mouvement d'un système. Ayant une grandeur physique pour définir l'état de mouvement je vais pouvoir énoncer comme Newton deux lois, la loi dite d'inertie et la loi sur la dynamique.

Notes

Summary

0m 03s

Définition : la quantité de matière

- La masse : une grandeur ***extensive***
- Une grandeur ***conservée,*** système fermé/ouvert

Mécanique | 2013 5

Je commence avec la définition de la quantité de matière. La quantité de matière, d'habitude on l'appelle la masse. Cette masse est une grandeur physique dite extensive. Ce qu'on veut dire par extensive c'est que si on considère un système formé de deux sous-parties, et qu'on connait la masse de chacune des sous-parties, alors pour le tout, le système entier a une masse qui vaut la somme des masses. Ce caractère additif d'une grandeur physique on appelle l'extensivité. Alors la quantité de matière, la masse, est une grandeur extensive. La masse est aussi une grandeur conservée. Ce que je veux dire par là c'est que si un système devait changer de masse c'est ou bien de la matière quitte le système ou arrive dans le système. Vous pouvez penser à une fusée, une fusée éjecte de la matière alors sa masse varie. Mais la masse globale reste conservée. Par exemple, on peut définir un système fermé, un système qui n'échange pas de matière avec le monde extérieur. À propos, l'opposé s'appelle un système ouvert, un système qui échange de la matière avec l'extérieur est un système ouvert. Si on a un système fermé la masse, quelle que soit l'évolution du système, est constante.

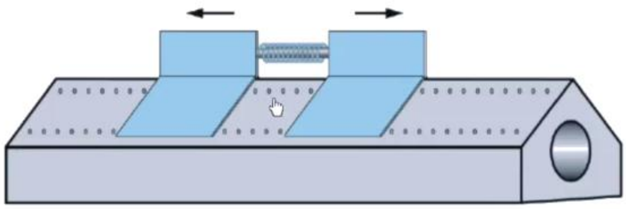
Notes

Summary

0m 44s

Définition : la quantité de matière

- La masse : une grandeur ***extensive***
- Une grandeur ***conservée,*** système fermé/ouvert
- Le Système International (SI) définit une masse étalon
- On se donne une expérience virtuelle pour mesurer une masse



Mécanique | 2013 8

ou, comme on dit aussi, est conservée. Pour me conformer avec le Système International des unités, j'imagine que j'ai une fois pour toute, défini un étalon de masse. Ça veut dire que j'ai aussi des copies de cet étalon et des multiples de cet étalon. Et je dois maintenant définir une expérience par laquelle je décide si la masse que je considère est égale à un certain multiple de l'étalon. C'est important en physique de définir des expériences même virtuelles mais qui explicite un concept. Einstein avait popularisé cette façon d'expliquer les sciences et ici j'applique cette approche, je veux définir une méthode expérimentale qu'on ne réalisera peut-être pas parce qu'il y a trop de difficultés mais qui conceptuellement nous permet d'identifier ce qu'on appelle l'égalité des masses. Alors je vous propose le schéma suivant : Vous avez un banc à air, ceci est un banc à air, on insuffle de l'air ici, l'air sort par les trous, on peut ainsi négliger le frottement qui s'exerce sur les deux plots. Un des plots sera multiple de l'étalon connu, un multiple connu, et l'autre c'est la masse qu'on veut mesurer. Alors, j'imagine qu'entre les deux il y a un dispositif tel un ressort comprimé et j'imagine que je peux délicatement relâcher le ressort.

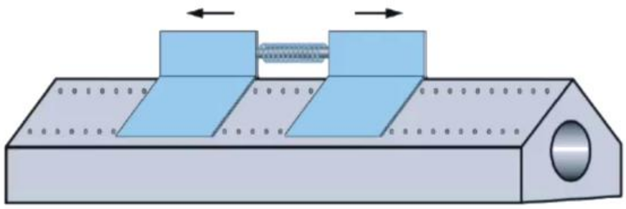
Notes

Summary

2m 18s

Définition : la quantité de matière

- La masse : une grandeur ***extensive***
- Une grandeur ***conservée,*** système fermé/ouvert
- Le Système International (SI) définit une masse étalon
- On se donne une expérience virtuelle pour mesurer une masse



Mécanique | 2013 8

à partir d'un état au repos, donc le système entier est au repos par rapport au banc à air qui est présumé être dans le référentiel. Alors je dois observer si les deux masses sont égales je dois observer des vitesses d'éjection des deux plots égales et opposées.

Notes

Summary

4m 08s

Maintenant ayant défini une quantité de matière, la masse, j'aimerais définir une quantité de mouvement. Je veux une grandeur physique qui caractérise l'état du mouvement. Cette grandeur doit avoir un caractère vectoriel. Je dois avoir une direction du mouvement, un sens du mouvement et une intensité du mouvement. Donc je veux une grandeur vectorielle. Je veux aussi une grandeur extensive à nouveau. Cela veut dire que si j'ai deux sous-systèmes qui ont des quantités de mouvement données la quantité de mouvement du système entier est la somme des quantités de mouvement des deux sous-systèmes. Donc je veux une grandeur extensive. Je peux maintenant passer à la première loi de Newton.

Notes

Summary

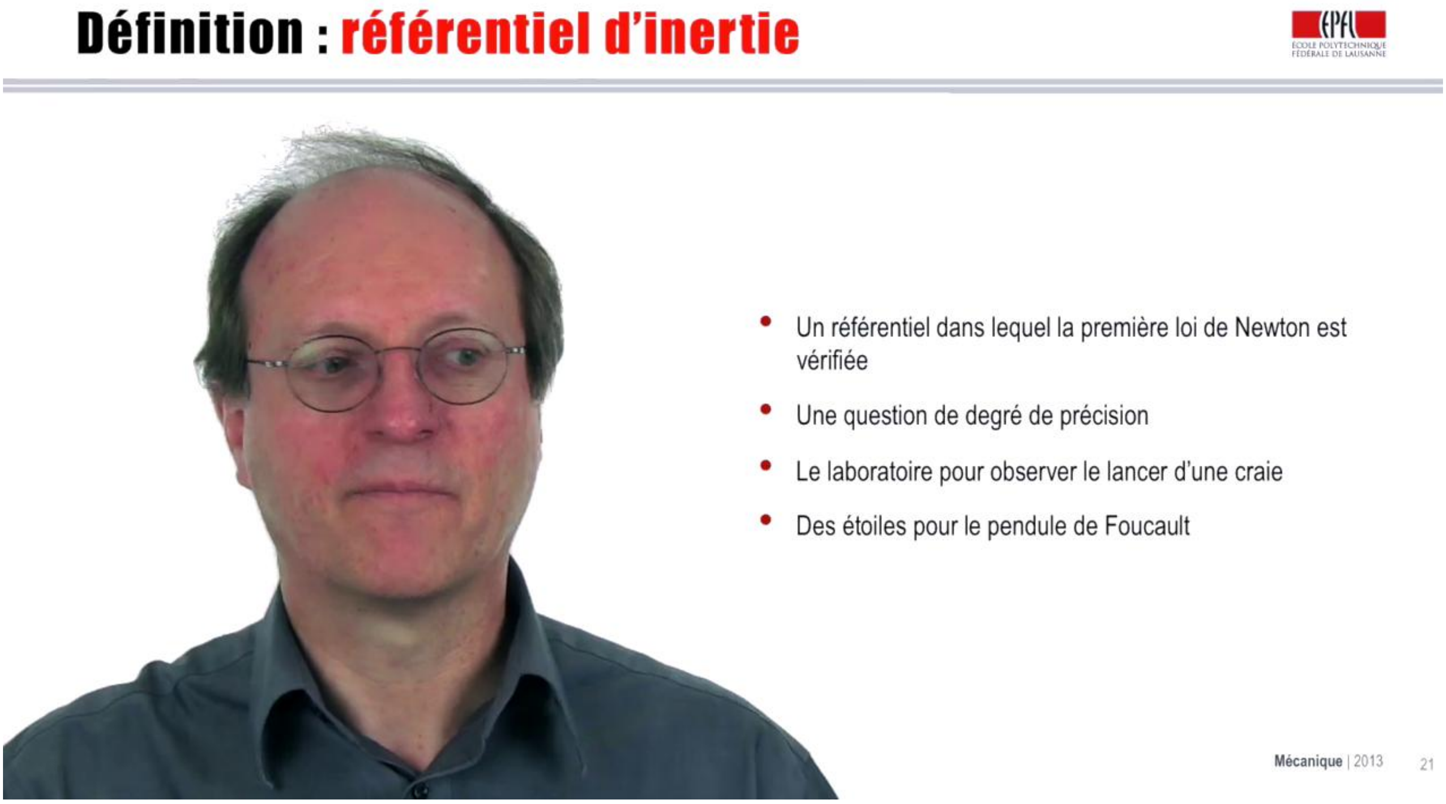
4m 32s

Newton disait : Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. D'abord je note qu'on parle de mouvement donc on doit s'être donné un référentiel et on verra avec la pratique que cette première loi de Newton au fond, nous définit un certain type de référentiel. D'ailleurs on va leur donner un nom tout à l'heure. D'autre part je constate que l'idée d'avoir un corps libre de toute force, est présumé être une idée évidente. On verra que lorsqu'on travaille avec les référentiels accélérés cela devient moins évident. Enfin, il faut noter du point de vue de l'histoire des sciences, une évolution extraordinaire; on a maintenant érigé en principe l'observation selon laquelle, observation que faisait déjà Galilée, selon laquelle un point matériel libre de force suit un mouvement rectiligne uniforme, Galilée avait appelé ce mouvement le mouvement naturel. On n'est plus du tout en train de chercher une cause à un mouvement existant.

Notes

Summary

5m 30s



On va définir comme référentiel d'inertie, un référentiel dans lequel la loi d'inertie est vérifiée. On appellera ce référentiel un référentiel d'inertie. J'aimerais faire une remarque à ce sujet, on n'est pas en train de faire des maths, on fait de la physique, il y a un coté pragmatique à cette définition, en effet, si vous voulez considérer quelque chose, un phénomène comme la trajectoire d'une craie que vous lancez dans l'auditoire, alors, probablement que l'auditoire est un assez bon référentiel. On verra quand on fera la dynamique terrestre, on verra que si on s'aventurait à faire des mesures extrémement précises, on serait obligé de se dire il y a une petite déviation c'est une très petite déviation, il y a une petite déviation dont on ne rend pas compte et cela vient du fait que le référentiel n'est pas un référentiel d'inertie. On peut aussi faire une expérience particulièrement subtile et on la fera, c'est l'expérience du pendule de Foucault qui permet en l'espace de dix minutes de voir que décidément cet auditoire n'est pas un référentiel d'inertie. Donc le choix du référentiel, déclarer si ce référentiel est d'inertie ou pas va dépendre du type de mesure, de la nature de l'expérience et de la précision des mesures qu'on va faire.

Notes

Summary

7m 00s

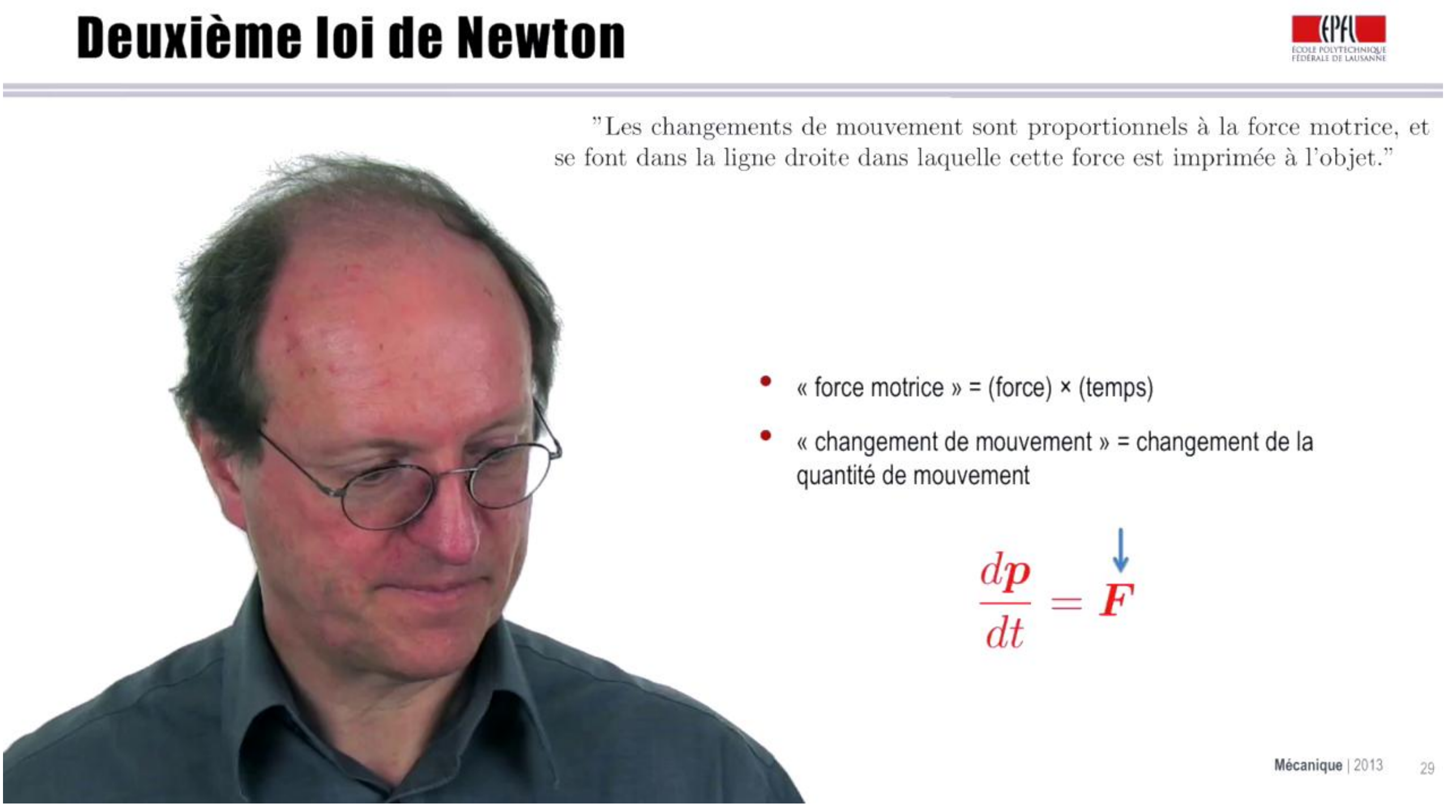
Définition : force

Je veux maintenant donner une définition de la force. Je veux donner une expérience même virtuelle qui me définit la force. Alors je suppose qu'un point matériel subit une force que je veux mesurer. Je me munis d'un dynamomètre et j'accroche ce dynamomètre avec l'aide d'un fil à mon point matériel qui subit la force que je veux mesurer et bien la lecture du dynamomètre me donnera l'intensité de la force et la direction du fil me donnera la direction de la force. Encore une fois, il est important que les grandeurs physiques que l'on veut traiter puissent être définies par des expériences, même si ces expériences sont délicates à conduire avec précision.

Notes

Summary

8m 39s



Je passe maintenant à la deuxième loi de Newton. Newton disait : les changements de mouvements sont proportionnels à la force motrice et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force est imprimée à l'objet. Alors il faut un peu traduire en langage moderne, l'expression de Newton, la deuxième loi. D'abord ce que l'on appelait force motrice à l'époque de nos jours c'est la force fois le temps pendant lequel la force est appliquée. Ensuite quand Newton dit le changement de mouvement, il faut y comprendre le changement de l'état du mouvement donc le changement de la quantité de mouvement. Si je veux transcrire la deuxième loi de Newton dans le langage moderne avec la notation vectorielle, je vais écrire ce que j'ai indiqué ici, P c'est la quantité de mouvement, et j'ai donc la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement qui est égale à la force.

Notes

Summary

9m 38s

Propriété : quantité de mouvement et masse

La masse est une grandeur extensive $\Longrightarrow$
quand le système est k fois plus grand, la masse est k fois plus grande.

La quantité de mouvement est une grandeur extensive $\Longrightarrow$
on doit avoir pour k masses m de même vitesse:
$\boldsymbol{p}(km) = k\boldsymbol{p}(m)$.

Mécanique | 2013 31

À ce stade-là, j'ai admis qu'il existe une grandeur vectorielle, extensive qui caractérise l'état du mouvement mais je ne sais pas encore comment exprimer la quantité de mouvement en particulier en fonction de la masse et de la vitesse. Je donne maintenant un argument qui va nous convaincre que la quantité de mouvement c'est la masse fois la vitesse. Je commence avec la masse. Alors, le fait que la masse est une grandeur extensive et la quantité de mouvement est aussi une grandeur extensive a une conséquence dans cette histoire. En effet, si maintenant je considère un système de taille donnée et j'en prends des multiples, alors je vais en prendre des multiples réels, je vais appeler k ce nombre réel, j'imagine que j'augmente la taille du système par un coefficient k. La masse du système est une grandeur extensive alors on aura k fois la masse d'un système. Et pour la quantité de mouvement on aura quelque chose de semblable; on doit écrire que la quantité de mouvemement d'un système qui a k fois la masse m à une vitesse donnée on va prendre tous les systèmes à la même vitesse, ça doit être k fois la quantité de mouvement qu'on aurait pour un système à cette vitesse.

Notes

Summary

10m 52s

Propriété : quantité de mouvement et masse

La masse est une grandeur extensive $\Longrightarrow$
quand le système est k fois plus grand, la masse est k fois plus grande.

La quantité de mouvement est une grandeur extensive $\Longrightarrow$
on doit avoir pour k masses m de même vitesse:
$\boldsymbol{p}(km) = k\boldsymbol{p}(m)$.

Dérivation par rapport à k : $m\dfrac{\partial \boldsymbol{p}}{\partial m} = \boldsymbol{p}$

Mécanique | 2013 33

Et maintenant je considère cette expression là comme contenant de chaque coté du signe égal une fonction de k. Alors ici on a un fonction de k assez simple, ici on a p qui est une fonction de k(m) et k(m) est une fonction de k. Et je veux en calculer la dérivée. Je vais l'écrire de la manière suivante : Ici, j'ai une petite difficulté parce que j'ai un argument qui vaut k(m) ce que je veux c'est dériver p par rapport à cet argument et ensuite je dois dériver l'argument par rapport à k. Cette dernière va donner m, la dérivée de l'argument, c'est à dire k(m) par rapport à k, ça nous donne m. Voilà le m, et maintenant on a la dérivée de p par rapport à l'argument, on va le prendre à k égal un donc on va écrire d de p sur d de m. Cette notation là est tout à fait conventionnelle. Elle intervient chaque fois qu'on a des fonctions de plusieures variables Ce d rond indique qu'il y a plusieurs variables et ici en écrivant d(m) je spécifie quelle est la variable par rapport à laquelle on dérive en supposant que toutes les autres variables sont maintenues constantes. C'est une notation qu'on utilise beaucoup en physique. De l'autre coté du signe égal, je dois dériver par rapport à k p de m n'a rien à voir avec k donc j'ai simplement la dérivée de k qui vaut un, donc j'ai p.

Notes

Summary

12m 30s

Propriété : quantité de mouvement et masse

La masse est une grandeur extensive $\Longrightarrow$
quand le système est k fois plus grand, la masse est k fois plus grande.

La quantité de mouvement est une grandeur extensive $\Longrightarrow$
on doit avoir pour k masses m de même vitesse:
$\boldsymbol{p}(km) = k\boldsymbol{p}(m)$.

Dérivation par rapport à k : $m\dfrac{\partial \boldsymbol{p}}{\partial m} = \boldsymbol{p}$

$\dfrac{\partial \boldsymbol{p}}{\partial m}$ doit être indépendant de la taille du système.

Mécanique | 2013 34

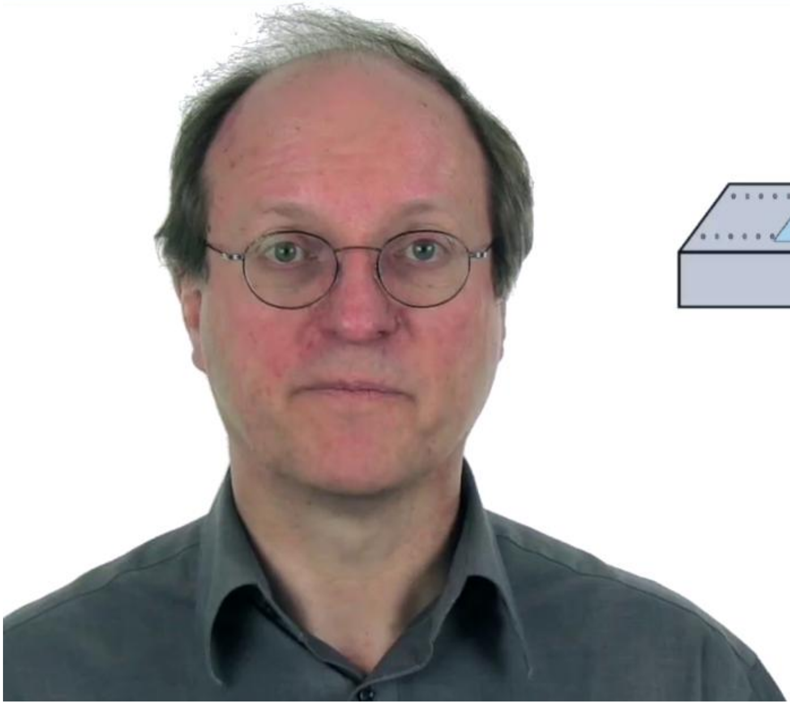
Alors voilà, je trouve que p est proportionnel à m et à ce coefficient là. Ce coefficient là est le rapport de deux grandeurs extensives. Alors je sais en plus que ce coefficient là ne dépend pas de la taille du système. Maintenant je vous ai annoncé le résultat p égal m(v) je viens de montrer que le caractère extensif de p nous impose que p soit proportionnel à la masse m.

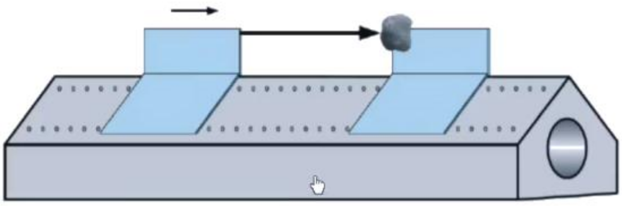
Notes

Summary

14m 10s

Propriété : quantité de mouvement et vitesse





Mécanique | 2013 36

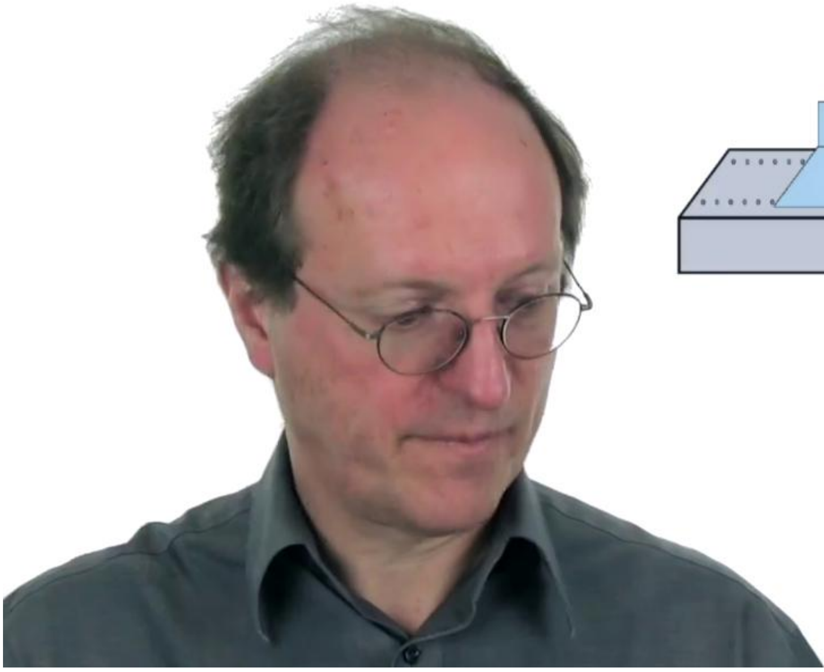
Il me reste à vous montrer que p est proportionnel à la vitesse. Alors cela je vais le faire mais je ne peux pas le faire par une approche disons axiomatique. Je dois envisager des expériences, faire des expériences et observer que p est proportionnel à m. Je vous propose une expérience si on la faisait, qui pourrait prendre l'allure suivante : on a encore une fois mon banc à air et j'ai deux plots. Un plot est monté avec une pointe fixe, elle est fixée au plot et l'autre plot contient une boule de pâte à modeler ou de suif et je présume que lorsque je fais une collision entre les deux plots la pointe s'enfiche dans la pâte à modeler et y reste donc les deux systèmes sont ensemble. Je considère maintenant des collisions qui laissent les deux plots assemblés à une vitesse nulle par rapport à mon référentiel défini par le banc à air. Alors je pourrais avoir dans un premier temps deux masses égales et des vitesses égales et opposées. Je constate que j'ai donc la quantité de mouvement totale nulle et en effet lorsque les deux systèmes se rassemblent, le système entier est immobile, la quantité de mouvement est nulle.Et maintenant j'observe que si un des plots est deux fois plus lourd je vais devoir diminuer la vitesse d'un facteur deux pour obtenir le même effet, c'est à dire l'immobilité du système après le choc.

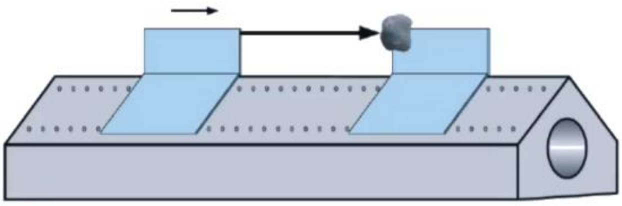
Notes

Summary

14m 46s

Propriété : quantité de mouvement et vitesse





Expériences :
La quantité de mouvement
apparaît proportionnelle
à la vitesse

Mécanique | 2013 37

Par conséquent avec des expériences de ce type, j'ai juste pris un facteur deux mais on pourrait multiplier les expériences et on devrait conclure que la quantité de mouvement est proportionnelle à la vitesse. Ce que je viens de vous dire dépend de la nature des expériences que je considère et depuis Newton la physique a évolué, vous allez voir d'autres circonstances d'autres champs de force pour lequel la quantité de mouvement a une autre allure et dans le cadre de ce cours, nous allons voir une expression relativiste de la quantité de mouvement donc la théorie d'Einstein qui va nous donner une autre expression de la vitesse.

Notes

Summary

16m 42s

Dynamique pour un point matériel

- Conclusion : en dynamique newtonnienne

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$$

- Alors la 2ème loi de Newton peut s'écrire :

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$$

Si je résume notre dynamique du point matériel nous avons conclu que p égal mv pour le genre d'expérience qu'on veut bien considérer et si maintenant je dérive cette expression là par rapport au temps, la dérivée de la vitesse par rapport au temps ça va nous donner l'accélération la dérivée de p par rapport au temps, la deuxième loi de Newton nous dit que cela vaut la force donc j'ai la force qui vaut la masse fois l'accélération pour un point matériel.

Notes

Summary

17m 31s