ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

http://go.epfl.ch/traite-meca-1-22

Principe de relativité

Mécanique, cours 22.1

Jean-Philippe Ansermet

Search MOOC

Video

EPFL

Principe de relativité

- Galilée
- Einstein
- Transformation de coordonnées

Mécanique | 2013 5

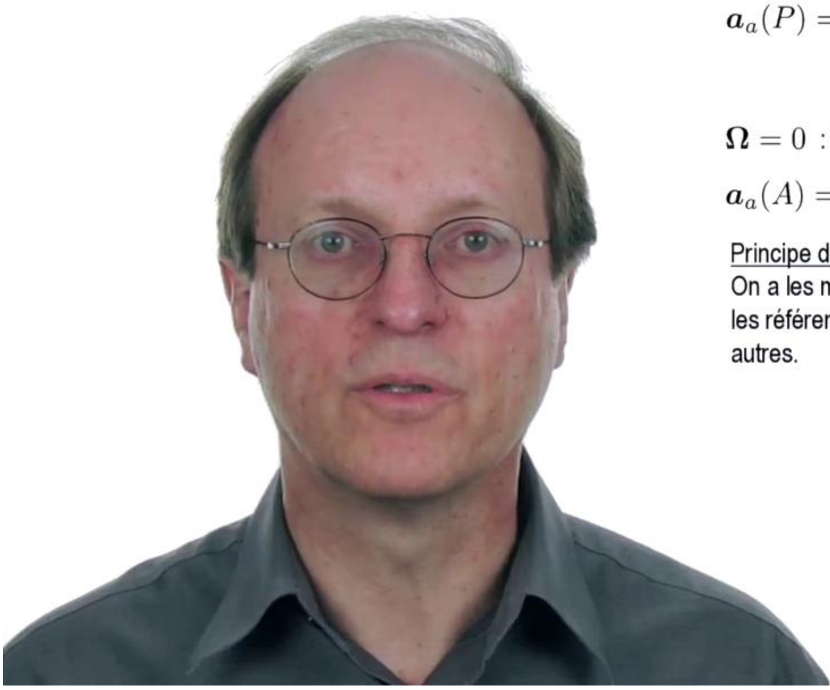
Bonjour! Bienvenue au cours de physique générale de l'EPFL. Dans la dernière partie de ce cours, j'aimerais faire une introduction à la théorie de la relativité. Je vois deux raisons principales pour avoir des notions de relativité. D'abord c'est une théorie dont on a tous entendu parler et dans le cadre d'une formation polytechnique il serait bon de savoir exactement de quoi il s'agit. D'autre part, il y a des résultats de la relativité qui ont un impact direct sur les développements de la technologie moderne, notamment, lorsqu'on veut faire un GPS de haute résolution, on doit tenir compte des faits décrits par la cinématique relativiste. Un ingénieur devrait aussi connaître quelques rudiments de la dynamique relativiste, il doit par exemple pouvoir calculer l'énergie libérée par la fission ou la fusion nucléaire. Dans cette leçon, on va voir le principe de la relativité. D'abord, on verra comment Galilée l'a exprimé. Et ensuite comment Einstein a étendu ce principe. On verra enfin la question de transformation de coordonnées qui soit compatible avec le principe de relativité.

Notes

Summary

0m 00s

Principe de relativité de Galilée



$$\boldsymbol{a}_a(P) = \boldsymbol{a}_a(A) + \boldsymbol{a}_r(P) + 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \boldsymbol{v}_r(P)$$
$$+\boldsymbol{\Omega} \wedge (\boldsymbol{\Omega} \wedge \boldsymbol{AP}) + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \wedge \boldsymbol{AP}$$

$\boldsymbol{\Omega} = 0$: translation

$\boldsymbol{a}_a(A) = 0$: translation uniforme

$$\boldsymbol{a}_r(P) = \boldsymbol{a}_a(P)$$

<u>Principe de relativité de Galilée</u> :
On a les mêmes lois du mouvement et les mêmes forces pour tous les référentiels en translation uniforme les uns par rapport aux autres.

Mécanique | 2013 10

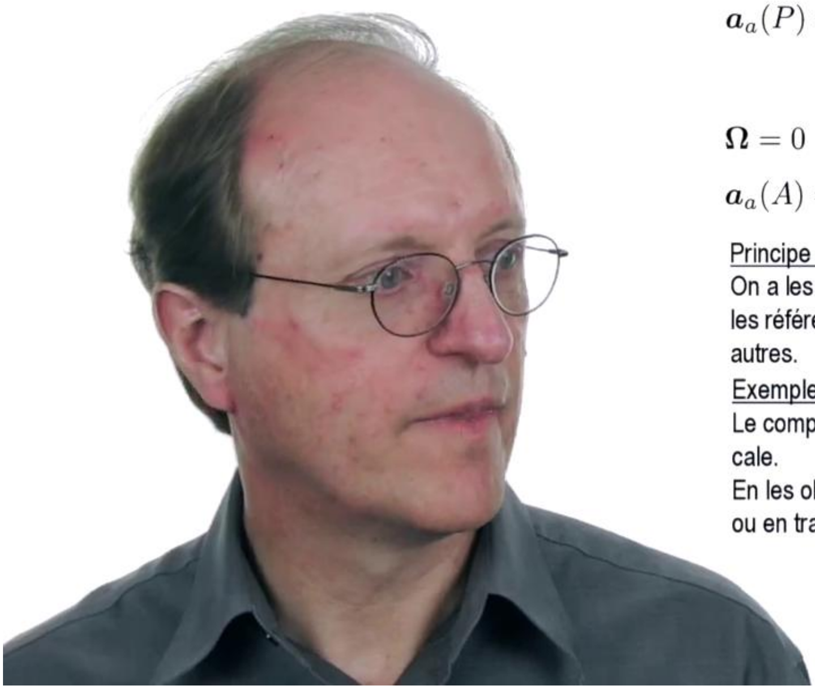
Je commence avec le principe de relativité classique, celui de Galilée. Et je rappelle ici une formule très longue qu'on avait obtenue donnant l'accélération d'un point matériel P par rapport à un référentiel dit absolu en fonction de l'accélération relative à un référentiel qui est caractérisé par son mouvement par rapport au référentiel absolu. On avait donné l'accélération d'un point A du référentiel relatif et le vecteur vitesse angulaire oméga décrivant l'orientation du référentiel relatif par rapport au référentiel absolu. Et maintenant, je considère la situation où les deux référentiels sont en translation l'un à par, l'un par rapport à l'autre. On a donc l'oméga qui est nul. De plus, je considère une translation uniforme d'un référentiel par rapport à l'autre, on a donc l'accélération du point A qui est nulle, et qu'est-ce qu'il reste de cette grand formule? Il reste que l'accélération du point P est la même dans tous les référentiels en translation uniforme l'un par rapport à l'autre. Ce résultat-là Galilée en avait connaissance. Et il a formulé le principe de relativité que voici: on a les mêmes lois du mouvement et les mêmes forces pour tous les référentiels en translation uniforme les uns par rapport aux autres.

Notes

Summary

1m 25s

Principe de relativité de Galilée



$$\boldsymbol{a}_a(P) = \boldsymbol{a}_a(A) + \boldsymbol{a}_r(P) + 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \boldsymbol{v}_r(P)$$
$$+\boldsymbol{\Omega} \wedge (\boldsymbol{\Omega} \wedge \boldsymbol{AP}) + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \wedge \boldsymbol{AP}$$

$\boldsymbol{\Omega} = 0$: translation

$\boldsymbol{a}_a(A) = 0$: translation uniforme $\qquad \boldsymbol{a}_r(P) = \boldsymbol{a}_a(P)$

Principe de relativité de Galilée :
On a les mêmes lois du mouvement et les mêmes forces pour tous les référentiels en translation uniforme les uns par rapport aux autres.

Exemple de Galilée :
Le comportement de mouches dans un bol observé à fond de cale.
En les observant, on ne peut pas décider si le bateau et immobile ou en translation uniforme par rapport à la côte.

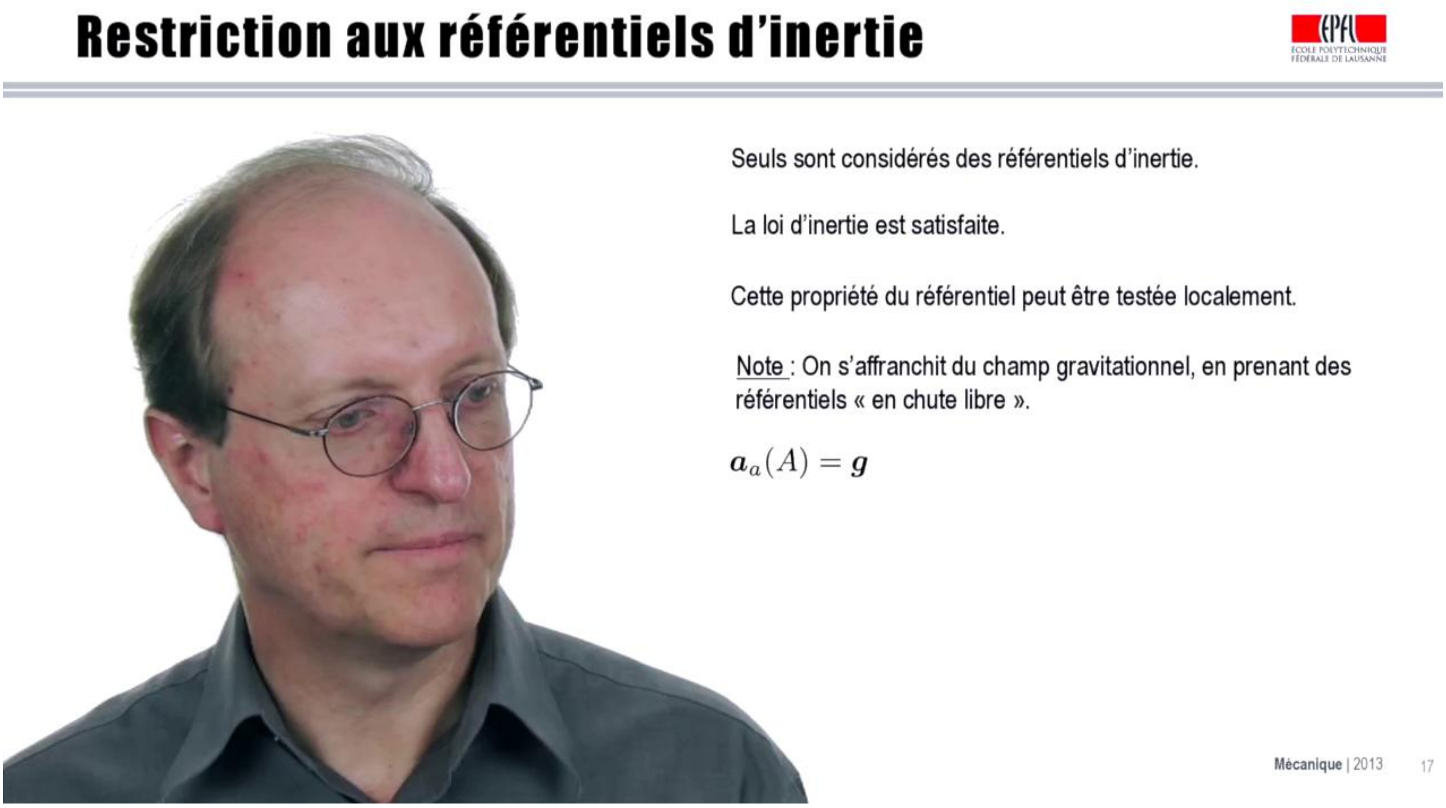
Mécanique | 2013 11

Galilée donnait un excellent exemple de ce qu'il entendait par ce principe de relativité. Il imagine qu'on a un bol rempli de mouches. Et on prend ce bol à bord d'un bateau, on va au fond de cale, là où on ne peut pas voir la côte. Eh bien, Galilée dit, quand le bateau est à vitesse constante par rapport au rivage, en regardant le comportement des mouches dans le bol, on ne peut pas dire si le bateau bouge ou pas. Tel est le principe de relativité de Galilée.

Notes

Summary

3m 01s



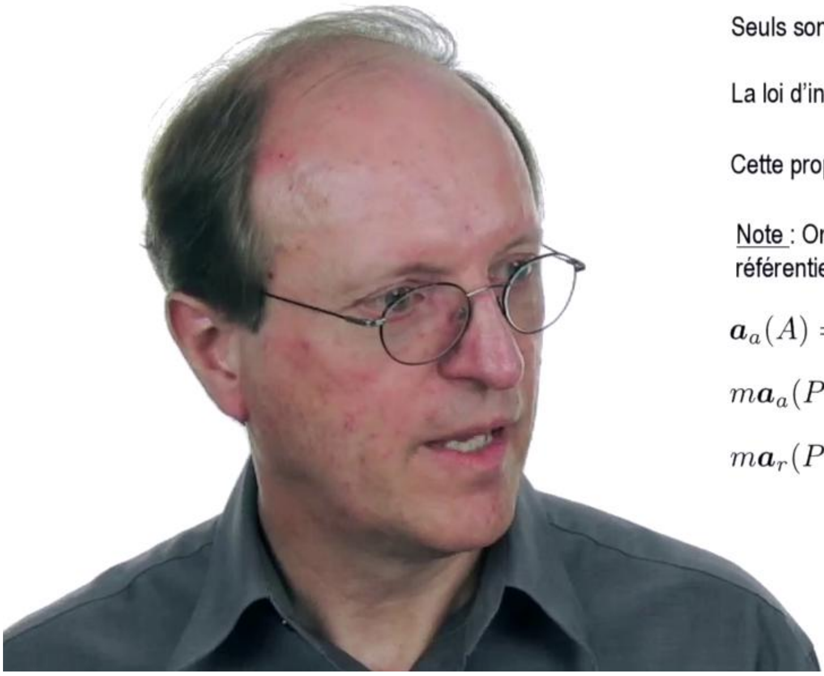
Bien sûr, on a vu en mécanique la loi de Newton sur les référentiels d'inertie, on va donc travailler avec des référentiels d'inertie, c'est-à-dire des lou, des vais, des référentiels où la loi d'inertie est vérifiée. Vous remarquerez que cette vérification peut être faite localement dans le référentiel dans lequel on fait nos observations. C'est un point de nuance mais ici on est tout en nuances parce que on est en train de, d'opérer une révolution conceptuelle de la mécanique, et on doit faire très attention à tous les termes qu'on introduit et les concepts qu'on utilise. On va se débarrasser de tous les effets gravitationnels. Si on veut étudier la théorie de la gravitation, alors il faut faire la théorie de la relativité générale. On veut supprimer les effets gravitationnels, pour ce faire, on va considérer des référentiels qui sont, euh, en quelque sorte en chute libre dans le champ de la gravitation. Je vous montre maintenant pourquoi. On va supposer dans la notation de tout à l'heure que l'accélération du point A est donnée par le g qui caractérise le champ gravitationnel.

Notes

Summary

3m 44s

Restriction aux référentiels d'inertie



Seuls sont considérés des référentiels d'inertie.

La loi d'inertie est satisfaite.

Cette propriété du référentiel peut être testée localement.

Note : On s'affranchit du champ gravitationnel, en prenant des référentiels « en chute libre ».

$$\boldsymbol{a}_a(A) = \boldsymbol{g}$$

$$m\boldsymbol{a}_a(P) = m\boldsymbol{a}_a(A) + m\boldsymbol{a}_r(P) = m\boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}^{\text{autre}}$$

$$m\boldsymbol{a}_r(P) = \boldsymbol{F}^{\text{autre}}$$

Mécanique | 2013 19

Alors on a la chose suivante, on applique la deuxième loi de Newton pour l'accélération absolue du point P, qui est la somme de l'accélération du point A et de l'accélération relative du point P, et on a deux forces: m g, la gravitation, plus les autres forces. Maintenant, si on a pour, on a un référentiel en chute libre, et que l'accélération absolue du point A c'est g, le terme en m g s'annule, et pour le référentiel dans lequel on aimerait travailler qui est en chute libre, on a ma égal toutes les forces sauf la force de la gravitation. C'est ce qu'on voulait.

Notes

Summary

5m 02s

Principe de relativité d'Einstein

Le principe de relativité doit être vrai pour toutes les lois de la physique.

Les constantes physiques comme
- la vitesse de la lumière,
- la charge de l'électron,

doivent avoir des valeurs indépendantes du référentiel d'inertie considéré.

Mécanique | 2013 25

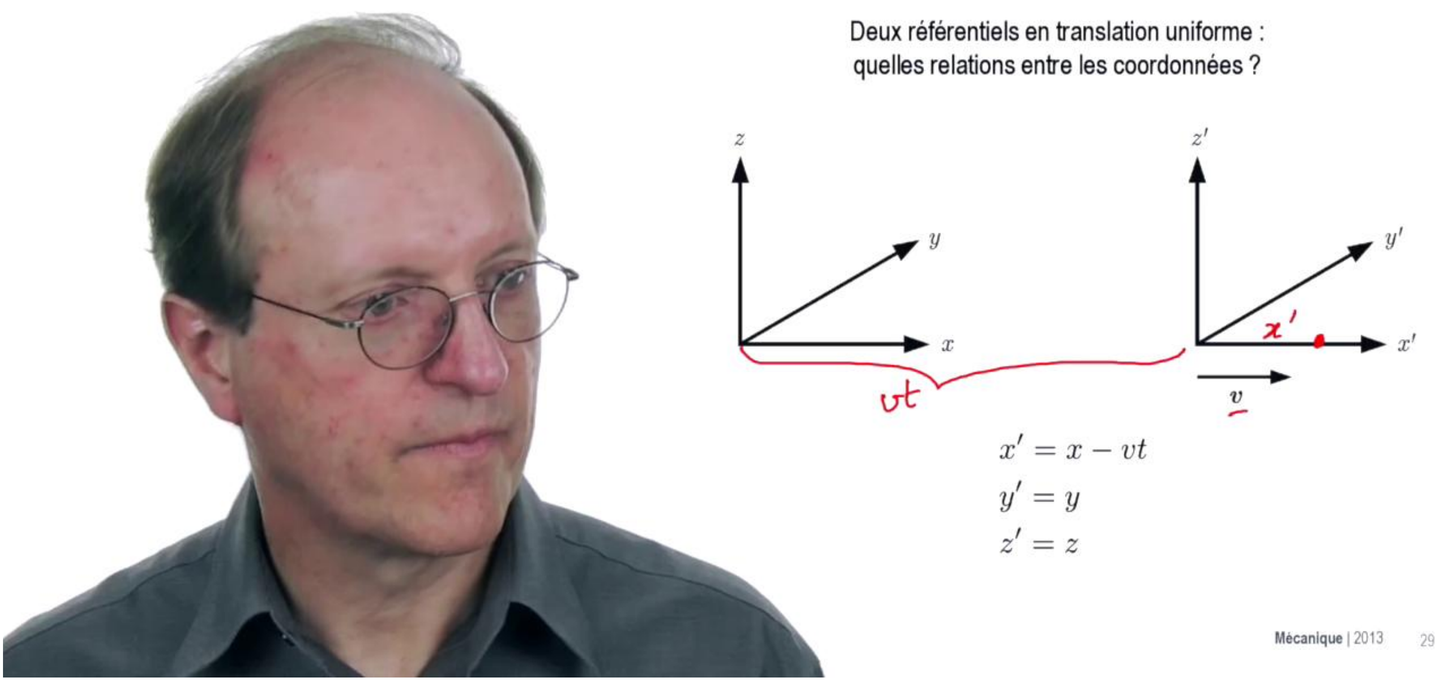
Maintenant Einstein reprend le principe de relativité de Galilée et il dit: Le principe de relativité doit être vrai pour toutes les lois physiques. Pas simplement pour les lois de la mécanique mais aussi pour les lois, notamment, de la, de l'électro-magnétisme. Il dit aussi que les constantes physiques telles que la vitesse de la lumière ou la charge de l'électron doivent être indépendantes du référentiel d'inertie qu'on choisit.

Notes

Summary

5m 42s

Transformation de Galilée



Regardons maintenant de quoi a l'air une transformation de coordonnées lorsque on travaille classiquement. On a donc deux référentiels caractérisés par des systèmes de coordonnées comme ceux-ci. Vous avez un référentiel x y z, et un autre x prime, y prime, z prime, qui se déplace à la vitesse v par rapport au référentiel x y z. Et on demande quelles sont les relations entre les coordonnées. Alors, les voici, c'est assez simple. Si on a un point matériel ici, là on a x prime, là, on a v fois t; v c'est la vitesse d'un référentiel par rapport à l'autre. Et on a donc x prime qui vaut x; x c'est cette distance-là, moins vt. Et dans les directions perpendiculaires il ne se passe rien.

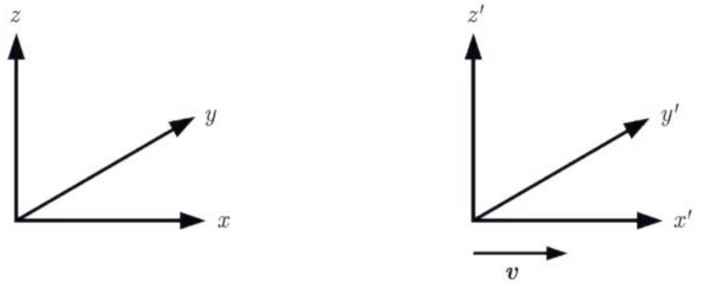
Notes

Summary

6m 18s

Transformation de Lorentz

Lorentz et Poincaré se demandent :
'Quelle transformation de coordonnées préservent les lois de l'électromagnétisme lors d'un changement de référentiel ?'



$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Mécanique | 2013 33

Maintenant, à la fin du dix-neuvième siècle, deux scientifiques, Lorentz et Poincaré, se demandent, quelle est la transformation de coordonnées, les coordonnées étant liées à deux référentiels, quelle est la transformation de coordonnées qui va laisser les lois de l'électro-dynamique de la même forme, afin de satisfaire au principe de relativité. Donc même situation, on a deux systèmes de coordonnées liées à deux référentiels et ces auteurs obtiennent le résultat suivant, que je donne ici. Et vous voyez, il y a d'abord une très grande surprise, c'est que on introduit des temps associés aux référentiels. On a des temps t prime et t qui sont distincts, et la formule qu'on avait tout à l'heure, x prime égal x moins v t est modifiée par ce terme racine de un moins v carré sur c carré. Et pour le temps, il y a aussi une expression non triviale, comme ceci. Alors, la physique a un problème. Parce que lorsqu'on fait de la mécanique, on a l'habitude de travailler avec les transformations de Galilée, et voilà que pour l'électro-dynamique, il faudrait utiliser une autre transformation de coordonnées. Alors c'est dans l'article signé par Einstein en 1905 que on voit qu'un raisonnement mécaniste permet d'aboutir à ces formules-là. Et ça, on le verra dans la prochaine leçon.

Notes

Summary

7m 32s