

Introduction à la Relativité

Nicolas **Morange**, *IJCLab*

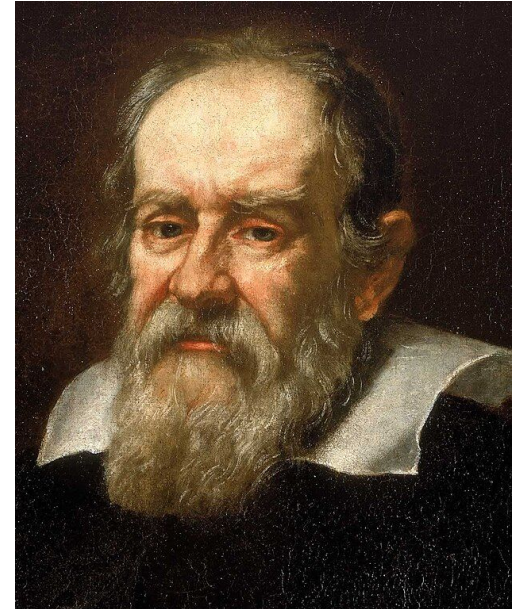
Ecole PHYSDET24, 25/11/2024



Galilée et la naissance de la physique moderne

Physique == Comprendre les lois de la nature par la réalisation d'expériences et d'observations rigoureuses

- **Nombreuses expériences sur la chute des corps**
 - Chute libre, mouvement parabolique...
 - Fondation de la mécanique moderne
- **Lunette astronomique**
 - Observation des satellites de Jupiter
 - Héliocentrisme



Galilée (1564 – 1642)

Relativité selon Galilée

- Les résultats d'une expérience (et donc les lois de la physique) sont les **mêmes** au repos ou dans un véhicule en mouvement à **vitesse constante**
- Il y a **relativité**, car il n'y a pas de **référentiel privilégié**



Dialogue sur les deux grands systèmes du monde (1632)

Enfermez-vous avec un ami dans la plus grande cabine sous le pont d'un grand navire [...] **Quand le navire est immobile** observez soigneusement [...] ; si vous lancez quelque chose à votre ami vous n'avez pas besoin de le jeter plus fort dans une direction que dans une autre lorsque les distances sont égales ; si vous sautez à pieds joints, comme on dit, vous franchirez des espaces égaux dans toutes les directions. Quand vous aurez soigneusement observé cela [...], faites aller le navire **à la vitesse que vous voulez ;** **pourvu que le mouvement soit uniforme** [...], vous ne remarquerez **pas le moindre changement** dans tous les effets qu'on vient d'indiquer ; aucun ne vous permettra de vous rendre compte si le navire est en marche ou immobile ; en sautant, vous franchirez sur le plancher les mêmes distances qu'auparavant, et **ce n'est pas parce que le navire ira très vite que vous ferez de plus grands sauts vers la poupe que vers la proue.**

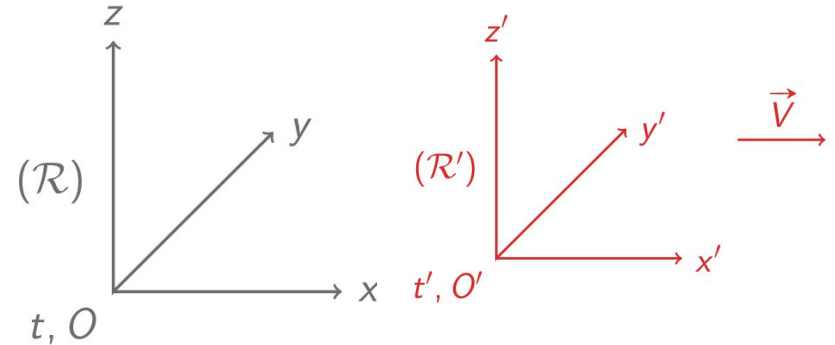
Conséquences: la mécanique de Newton

- Lois de Newton s'appliquent dans les référentiels galiléens:

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

- Loi de composition des vitesses**
pour passage d'un référentiel à un autre:
Si le référentiel r' se déplace à la
vitesse \vec{v} par rapport à r , alors:

$$\vec{V}' = \vec{V} - \vec{v}$$

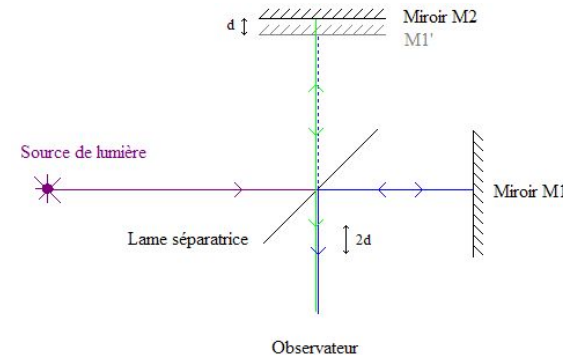
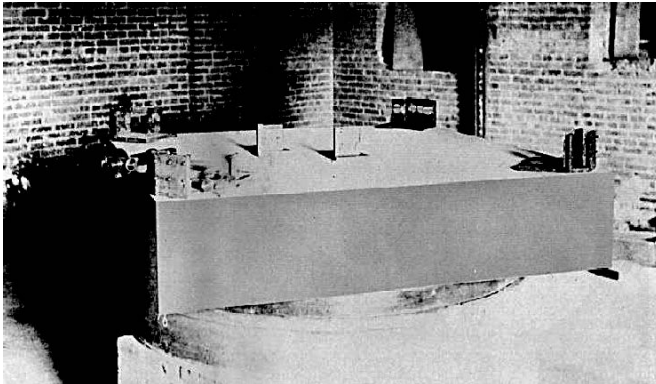
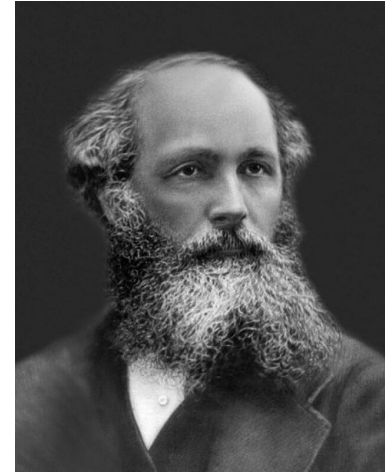


- Un changement de référentiel n'affecte **que les positions**: en mécanique newtonienne **le temps est absolu**, le même dans tous les référentiels

Le temps absolu, vrai & mathématique, sans relation à rien d'extérieur coule uniformément (Newton, Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle)

19ème siècle: électromagnétisme et difficultés

- Maxwell (1865): lois de l'électromagnétisme
- Pas invariantes par transformations de Galilée !
- Hypothèse de l'éther comme milieu où se propagent les ondes électromagnétiques
 - Donc existence d'un référentiel privilégié
- Michelson et Morley (1887): invalidation de l'hypothèse de l'éther



A quoi rêviez-vous quand vous étiez ado ?

SCIENCE & VIE

JUNIOR

DOSSIER HORS SERIE

- Espace-temps : les histoires qui rendent fou
- Plongeon dans un trou noir
- Autopsie d'un cerveau génial

$$E = mc^2$$

La relativité



EINSTEIN

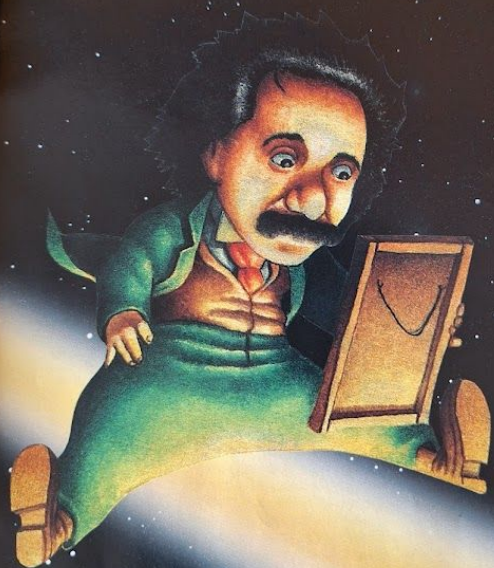
VOUS ALLEZ ENFIN COMPRENDRE

04 7 233 78 - 3,20 F. - 50 D. - 2,00 D. - PORTAGE CONT. 70 F. - FRAN. 35 - Numéro 42 - Adm. 40 Rue de Valenciennes 92 F. 93341 0251 9890

T 3377 - 0024 - 30,00 F - RD



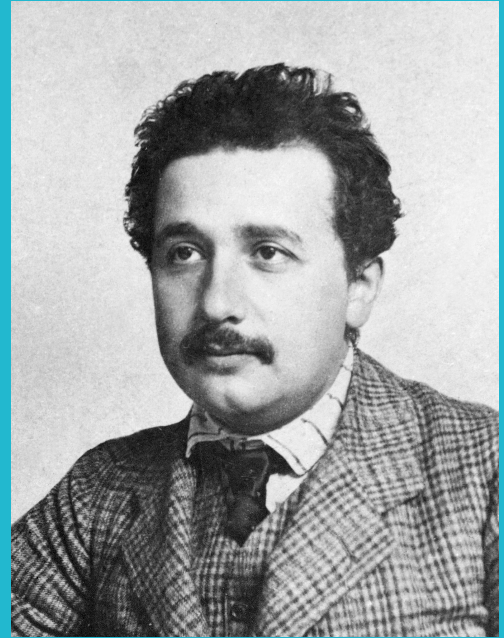
RESTREINTE



Quel sens donner à la rêverie du jeune Albert ? Il se voit chevauchant un gros rayon de lumière. Sa vitesse de passage est celle de la lumière, c'est-à-dire 300 000 km/s dans le vide.

Admettons que son image se forme sur le miroir : pourra-t-il la voir ? Réponse pas évidente pour les scientifiques de cette fin du XIX^e siècle. En effet, l'image d'Einstein est elle-même transportée par un petit rayon de lumière. Ce rayon se déplaçant aussi à 300 000 km/s, pourra-t-il jamais rattraper les rétines d'Albert qui filent devant à 300 000 km/s ? Réponse page 28.

Einstein (1905)
**Sur l'électrodynamique des
corps en mouvement**

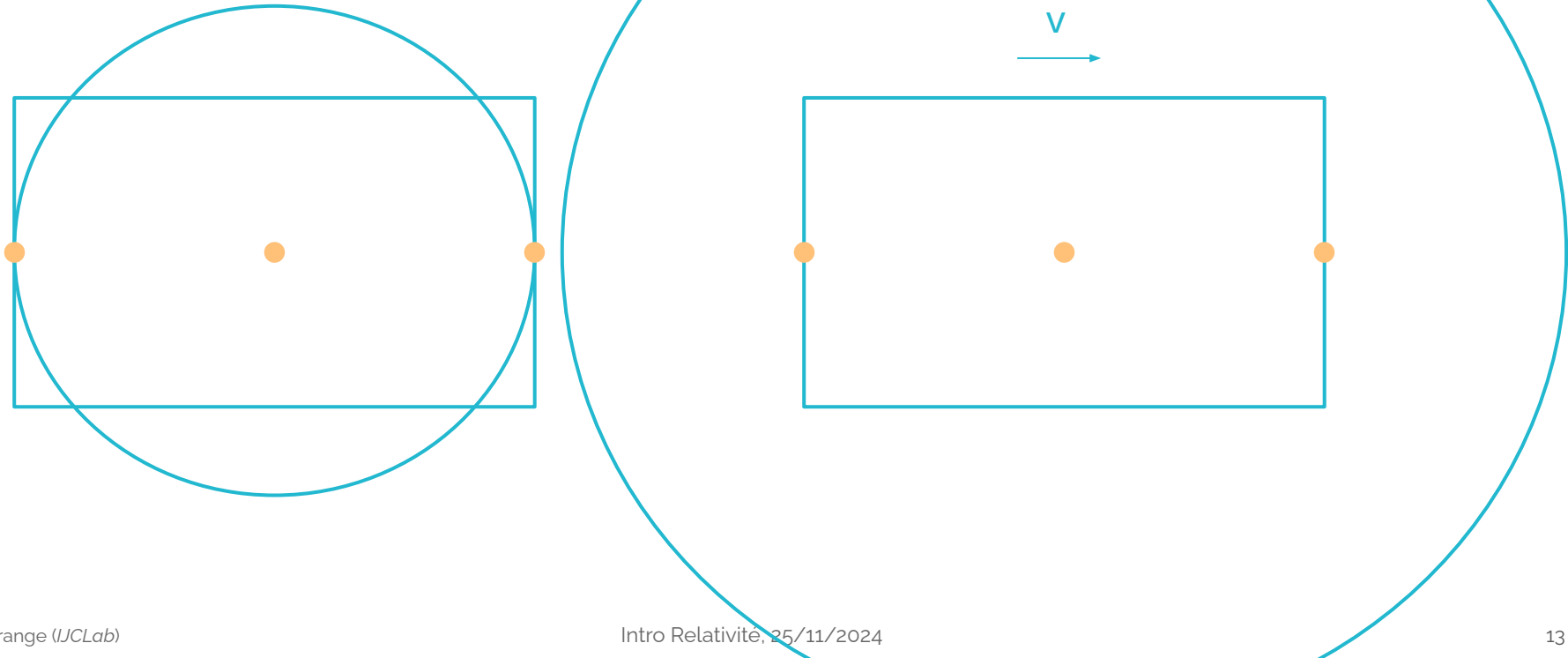


1. Hypothèses: l'espace est **homogène** et **isotrope**
2. Postulat: il existe une infinité de référentiels, dits Galiléens (ou inertiels), en **mouvement uniforme** les uns par rapport aux autres.
Toutes les lois de la nature sont les mêmes dans ces référentiels.
3. Postulat: **la vitesse de la lumière dans le vide (c) est la même** dans tous les référentiels Galiléens

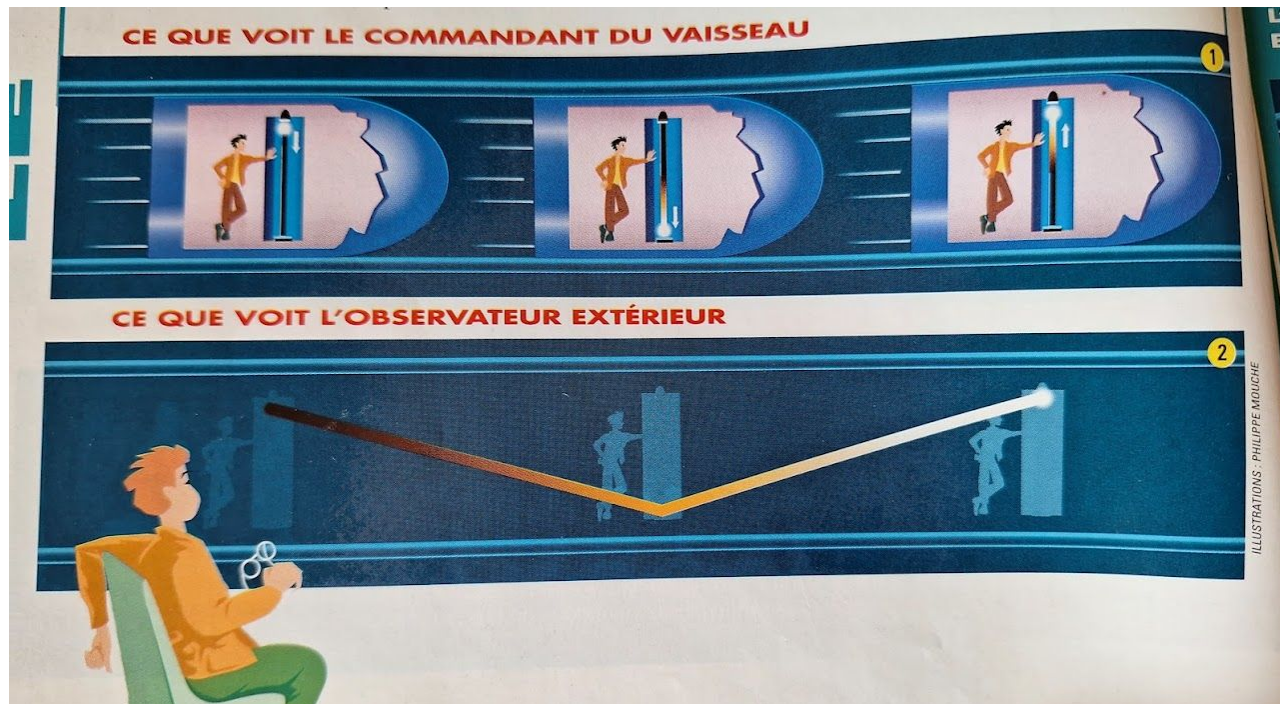
**Les conséquences sont laissées en
exercice au lecteur**

Le temps est relatif !

La simultanéité de deux événements dépend du référentiel



Dilatation des temps

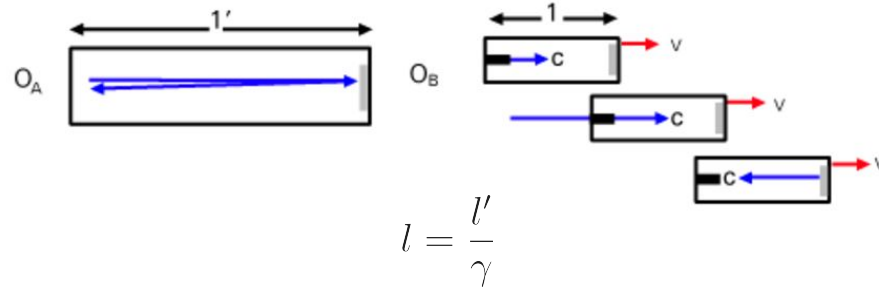


- Calcul de la transformation par Pythagore:
$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t'$$
- “Augmentation” du temps de vie des particules ! Muons: $\tau_0 = 2.2 \mu\text{s}$

Contraction des longueurs

Mesure d'une longueur == c / Mesure du temps de propagation de la lumière

- Mesure de la longueur d'une règle par un photon faisant l'aller-retour:



Illusions relativistes

Ce qu'on imagine...



Illusions relativistes

Animations Alain Riazuelo, <https://www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar/index.php>



Changements de coordonnées

Transformations de Lorentz

- Modification des formules de changement de coordonnées:

$$\begin{cases} ct' &= \gamma(ct - \beta x) \\ x' &= \gamma(x - \beta ct) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{cases} \quad \text{où } \beta = \frac{V}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \text{Facteur de Lorentz}$$

$$\text{et } v = \frac{v' + V}{1 + v' \frac{V}{c^2}}$$

Espace et temps sont liés !

- Exemples
 - Au repos, $V=0$: $\beta=0$ et $\gamma=1$
 - $V \rightarrow c$: $\beta \rightarrow 1$ et $\gamma \rightarrow \infty$
 - Train à $V = 200 \text{ km/h}$: $\beta=2 \cdot 10^{-7}$ et $\gamma=1.000000000000000173$
 - Proton dans le LHC: $V \sim c$, $\beta=0.9999999796$ et $\gamma=7000$

Espace-temps de Minkowski: formulation géométrique de la relativité restreinte

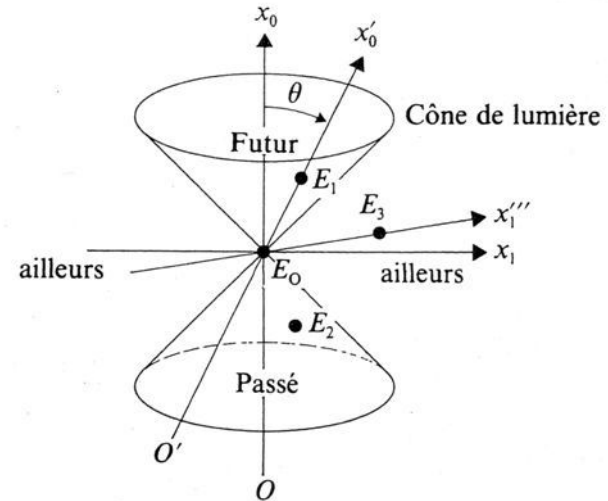
- Notion de distance d'espace-temps:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

- **Quadrivecteur**: point d'espace-temps

$$X = (ct, x, y, z)$$

- $X^2 > 0$: quadrivecteur de genre temps
- $X^2 = 0$: quadrivecteur de genre lumière
- $X^2 < 0$: quadrivecteur de genre espace



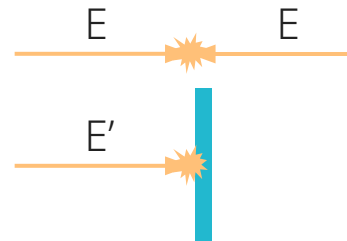
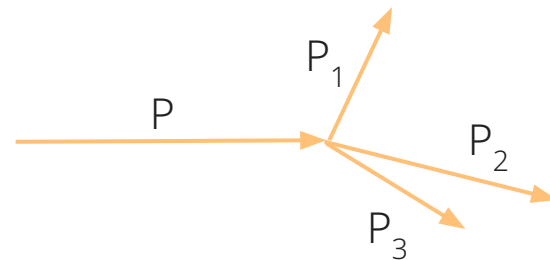
- On peut ensuite définir les transformations de Lorentz sur les quadrivecteurs

Mécanique relativiste

- Mécanique classique: conservation dans une interaction de:
 - L'énergie totale: $\sum_i E_i$
 - La quantité de mouvement: $\sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_i \vec{v}_i$
 - Mais la conservation de $\sum_i m_i \vec{v}_i$ n'est pas invariante par transformation de Lorentz
- Solution relativiste: **quadrivecteur énergie-impulsion** d'une particule
 - $P = (E/c, \vec{p}) = (\gamma mc, \gamma m\vec{v})$
 - **$\sum_i P_i$ est conservée** dans une interaction, et correspond à la conservation de l'énergie et de l'impulsion
 - La conservation de $\sum_i P_i$ est valable dans tous les référentiels
 - Norme du quadrivecteur: $P^2 = (E/c)^2 - p^2 = m^2 c^2$
 - Accélérer proche de la vitesse de la lumière: $c \rightarrow c: \beta \rightarrow 1, \gamma \rightarrow \infty$ donc $E \rightarrow \infty$
- Relation avec la mécanique classique: $v \ll c$ donc $\gamma \approx 1 - \frac{1}{2} v^2/c^2$
 - $\vec{p} \approx m\vec{v}$
 - $E \approx mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 =$ énergie au repos + énergie cinétique
 - Pour une particule au repos, **$E = mc^2$**

Quelques remarques et conséquences

- Les équations de Maxwell sont invariantes dans tous les référentiels inertiels
 - Ouf !
- Notion de “**masse invariante**”:
 - Une particule se désintègre en plusieurs
 - $P = \sum_i P_i \Rightarrow M^2 = 1/c^2 |\sum_i P_i|^2$
 - **Mesure de la masse de la particule mère à partir des énergies et impulsions des particules filles !**
- Collisionneurs de particules
 - Collisionneurs vs cible fixe:
 - Pour obtenir la même énergie dans le centre de masse de la collision:
 $E' = 2\gamma E$
 - LHC: $E = 7 \text{ TeV}$; il faudrait $E' = 98 \text{ PeV}$!!!



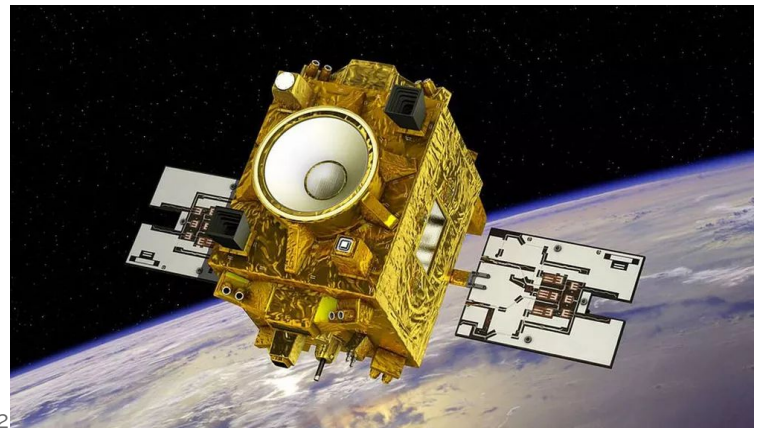
Le principe d'équivalence

- Principe d'équivalence en mécanique newtonienne:

- Masse inertielle: $\vec{F} = m_I \vec{a}$
- Masse grave: $\vec{P} = m_G \vec{g}$
- Expérimentalement: $\vec{a} = m_G/m_I \vec{g}$ est indépendante de l'objet
- Donc $m_I = m_G$

- Preuves expérimentales:

- Chute des corps de Galilée, puis Newton: précision 10^{-3}
- Satellite MICROSCOPE, 2022: précision 10^{-15}



Expérience de pensée: l'ascenseur en chute libre

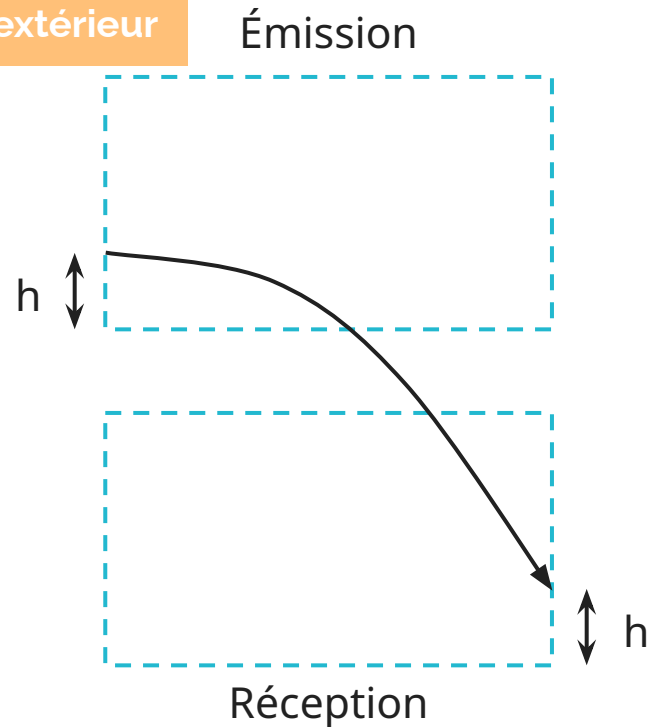
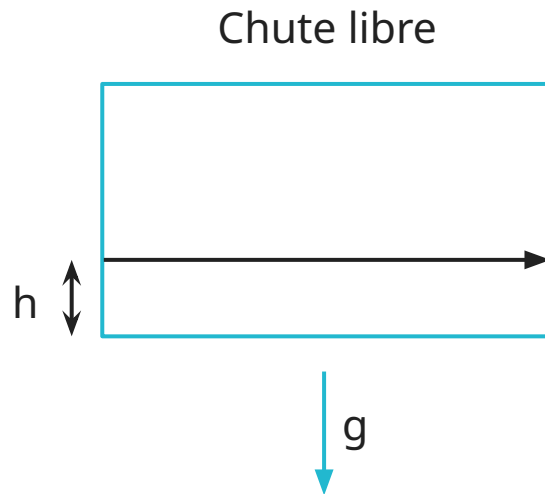


Principe d'équivalence

Dans un laboratoire en chute libre, occupant une région suffisamment petite de l'espace-temps, **toutes** les lois de la physique sont celles de la relativité restreinte

Déviation des rayons lumineux

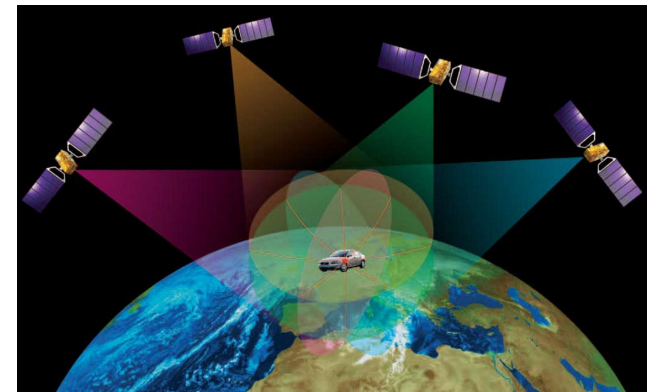
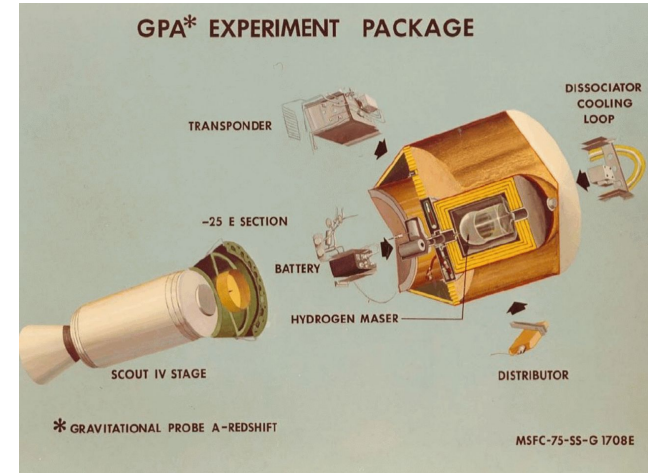
La gravitation dévie la lumière pour un observateur extérieur



- Confirmation expérimentale: Eddington, 1919
 - Observation d'une dizaine d'étoiles situées proche de soleil lors d'une éclipse totale
 - Précision: 20%

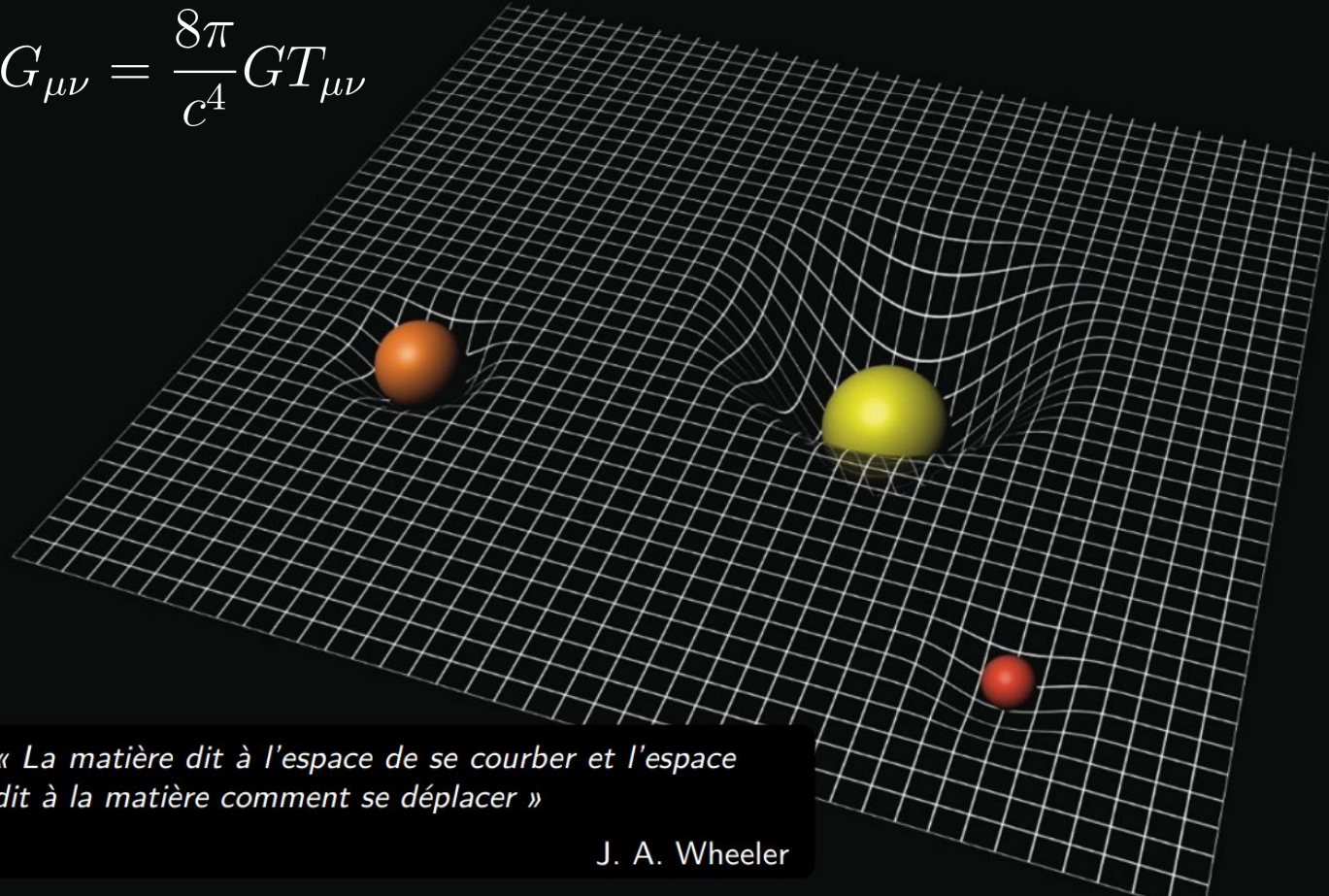
Écoulement du temps

- Conséquence: **effet Doppler dans un champ de pesanteur**
 - Rayon émis vers le haut devient plus rouge
 - Rayon émis vers le bas devient plus bleu
- Conséquence: désynchronisation des horloges
Le temps s'écoule plus vite dans un satellite que sur Terre
- Expérience de Vessot et Levine (1976)
 - Horloge dans une fusée envoyée à 10000 km d'altitude
 - Précision: $7 \cdot 10^{-5}$
- Dans la vie de tous les jours: le GPS
 - Correction de la relativité: $40 \mu\text{s}$ par jour
 - Correspond à une **dérive de position de 12 km !!!**



Relativité générale (1916)

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} GT_{\mu\nu}$$

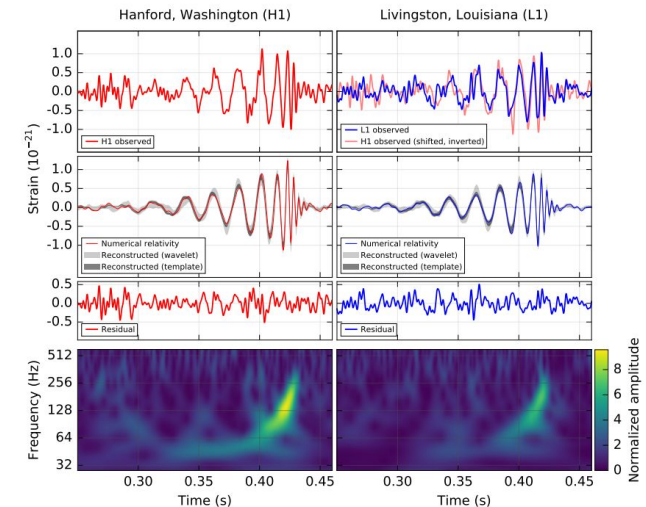


« La matière dit à l'espace de se courber et l'espace dit à la matière comment se déplacer »

J. A. Wheeler

Innombrables confirmations

- Calcul de l'avance du périhélie de Mercure
- Déviation des rayons lumineux au voisinage des objets célestes
 - Lentilles gravitationnelles
 - Mirages gravitationnels
- Trous noirs
- Ondes gravitationnelles
 - Première détection: 2016 LIGO-VIRGO



Conclusions

- La relativité restreinte est l'un des piliers de la physique moderne avec la mécanique quantique
 - Pas de référentiel privilégié
 - Constante de la vitesse de la lumière
- Mise en commun des deux: théories quantiques des champs, base de la physique des particules
- Relativité + principe d'équivalence \Rightarrow Relativité générale
 - Perspective complètement différente sur la gravitation