

Cent ans de relativité générale

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique,
Département de Physique,
Université de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

Centre Galois

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... **Albert Einstein (1879-1955)**



1915, théorie de la **relativité générale** :

- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'**espace**, de **temps**, d'**énergie** et de **masse** ;
- ▶ remise en cause de la **gravitation universelle newtonienne** (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, **cadre de pensée encore actuel de la physique**.

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... **Albert Einstein (1879-1955)**



1915, théorie de la relativité générale :

- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'espace, de temps, d'énergie et de masse ;
- ▶ remise en cause de la gravitation universelle newtonienne (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, cadre de pensée encore actuel de la physique.

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... **Albert Einstein (1879-1955)**



1915, théorie de la relativité générale :

- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'espace, de temps, d'énergie et de masse ;
- ▶ remise en cause de la gravitation universelle newtonienne (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, cadre de pensée encore actuel de la physique.

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... **Albert Einstein (1879-1955)**



1915, théorie de la relativité générale :

- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'espace, de temps, d'énergie et de masse ;
- ▶ remise en cause de la gravitation universelle newtonienne (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, cadre de pensée encore actuel de la physique.

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... **Albert Einstein (1879-1955)**



1915, théorie de la relativité générale :

- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'espace, de temps, d'énergie et de masse ;
- ▶ remise en cause de la gravitation universelle newtonienne (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, cadre de pensée encore actuel de la physique.

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... [Albert Einstein \(1879-1955\)](#)



1915, théorie de la **relativité générale** :

- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'**espace**, de **temps**, d'**énergie** et de **masse** ;
- ▶ remise en cause de la **gravitation universelle newtonienne** (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, **cadre de pensée encore actuel de la physique.**

Centenaire de la Relativité Générale

Il y a environ un siècle... [Albert Einstein \(1879-1955\)](#)



1915, théorie de la **relativité générale** :

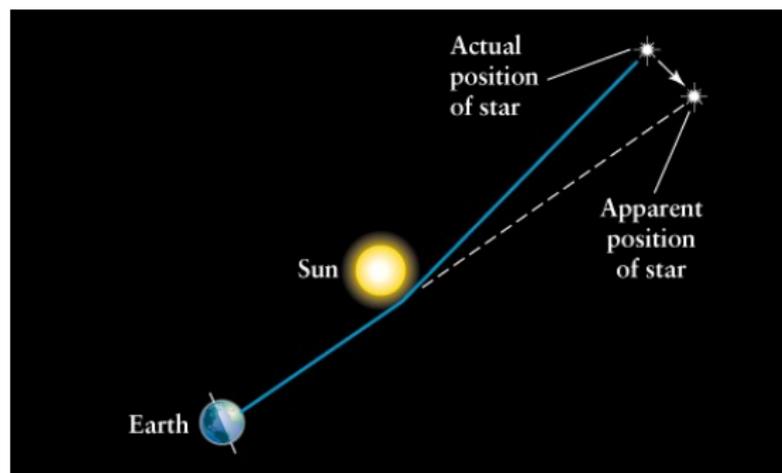
- ▶ extension de la relativité restreinte (1905), laquelle avait déjà révolutionné les concepts d'**espace**, de **temps**, d'**énergie** et de **masse** ;
- ▶ remise en cause de la **gravitation universelle newtonienne** (~ 1687), laquelle avait prédit et expliqué de nombreux phénomènes (forme de la Terre, lois de Kepler, existence de Neptune, etc.) ;
- ▶ par de nombreux aspects, **cadre de pensée encore actuel de la physique**.

Relativité et célébrité

1919, Arthur Eddington (1882-1944) : expédition **britannique** pour vérifier la **dévi**ation de la lumière d'étoiles lointaines par le Soleil

→ annonce, à **Londres** sous le portrait de **Newton**, qu'Einstein (**allemand**) a raison

→ symbole important et célébrité immédiate.

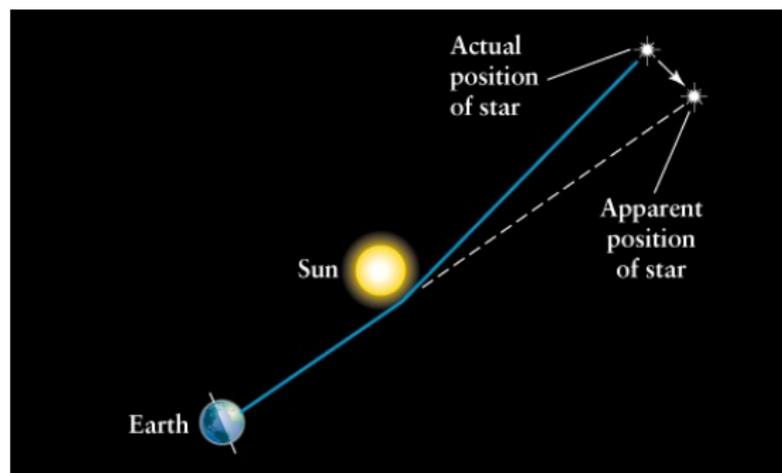


Relativité et célébrité

1919, Arthur Eddington (1882-1944) : expédition **britannique** pour vérifier la **dévi**ation de la lumière d'étoiles lointaines par le Soleil

→ annonce, à **Londres sous le portrait de Newton**, qu'Einstein (**allemand**) a raison

→ symbole important et célébrité immédiate.

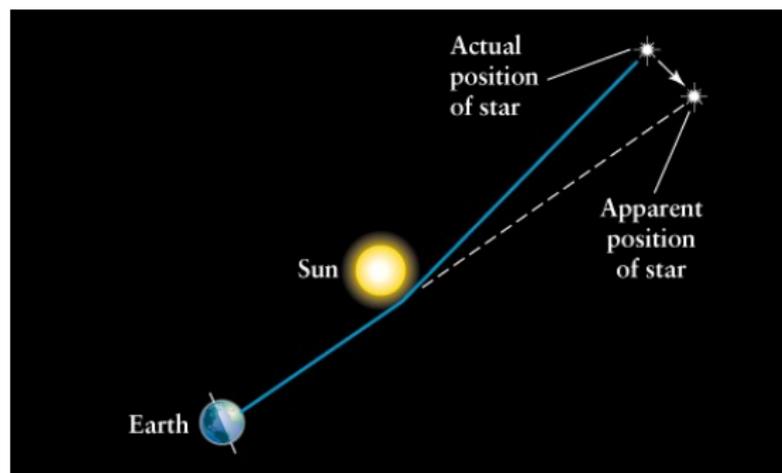


Relativité et célébrité

1919, Arthur Eddington (1882-1944) : expédition **britannique** pour vérifier la **dévi**ation de la lumière d'étoiles lointaines par le Soleil

→ annonce, à **Londres sous le portrait de Newton**, qu'Einstein (**allemand**) a raison

→ symbole important et célébrité immédiate.



Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps, espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Tout est relatif ?

- ▶ théories d'Einstein surtout connues pour la **relativité du temps** : « *Placez votre main sur une plaque chaude pendant une minute et cela vous semblera une heure. Asseyez-vous en compagnie d'une jolie fille pendant une heure et cela vous paraîtra une minute. C'est cela la relativité.* » ;
- ▶ image amusante mais incorrecte en ce qui concerne la physique : **grandeurs mesurables/objectives**
- ▶ extrapolations du véritable sens de la théorie → relativisme culturel (*il n'y a pas une unique vérité.*)
- ▶ en physique (et autres domaines) : **tout n'est pas relatif** → **invariants** ;
- ▶ l'une des leçons de la relativité : certains concepts (longtemps crus) *a priori* (**temps**, **espace**, etc.) sont plus complexes qu'on ne le pense... et sont même plutôt des « **concepts a posteriori** » (expériences nécessaires).

Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ construction de **modèles** (\sim **cartes**) et **confrontation avec le réel** (**science expérimentale**) ;
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.**

Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ construction de **modèles** (\sim **cartes**) et **confrontation avec le réel** (**science expérimentale**) ;
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.**

Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ construction de **modèles** (\sim **cartes**) et **confrontation avec le réel** (**science expérimentale**) ;
- ▶ trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.

Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ construction de **modèles** (\sim **cartes**) et **confrontation avec le réel** (**science expérimentale**) ;
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.**

Physique et mathématique

Galilée (1564–1642) : *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.*

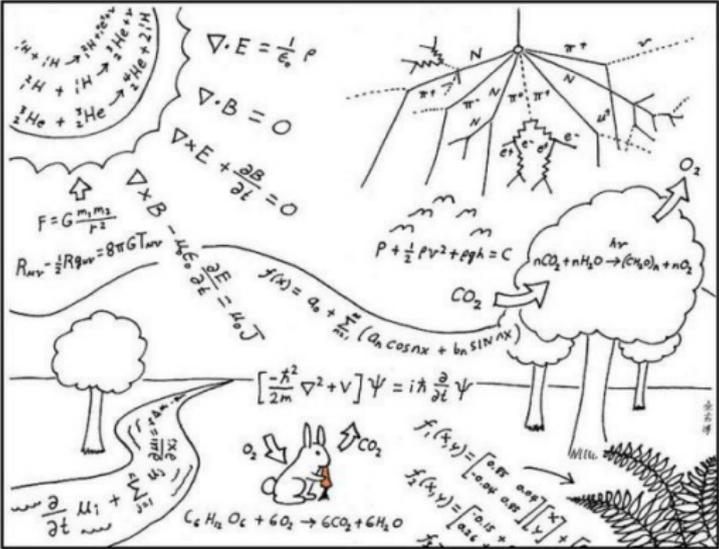
Physique et mathématique

Galilée (1564–1642) : *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.*



Physique et mathématique

Galilée (1564–1642) : *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.*



Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Le(s) principe(s) de relativité ?

Un principe « démocratique »

- ▶ tous les **observateurs** sont égaux pour décrire les **lois de la physique** ;
- ▶ **idée ancienne (Galilée vers 1632)** mais qui a évolué : initialement certains étaient « plus égaux » que d'autres et tous les phénomènes physiques n'étaient pas inclus

Relativité restreinte : premier élargissement

- ▶ **1905, Einstein** : relativité « restreinte » inclut toutes les lois physiques **sauf la gravitation** → **temps et espace « relatifs »** ;
- ▶ **1908, Minkowski** : théorie géométrique → notion d'**espace-temps absolu**.

Relativité générale et gravitation relativiste

- ▶ **1915, Einstein** : approche **géométrique** → généralisation du principe de relativité à **tous les observateurs en incluant la gravitation** ;
- ▶ en **relativité générale**, espace-temps = système physique influençable ;
- ▶ gravitation = manifestation de la « **courbure de l'espace-temps** ».

Plan

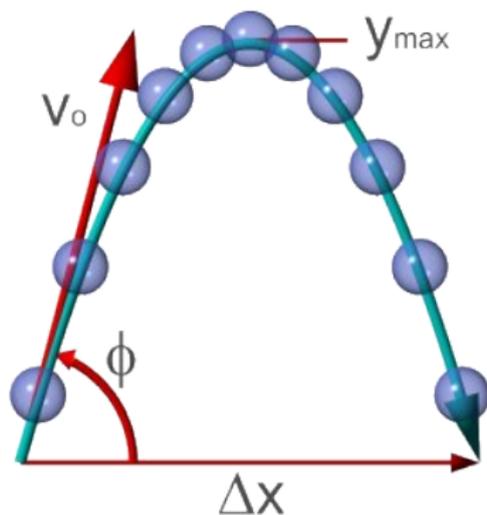
Relativité et physique classique

Lumière et relativité restreinte

Espace-temps et relativité générale

1

Relativité et physique classique



Galileo Galilei (1564-1642, Italie)



- ▶ surtout connu pour la défense du **Système héliocentrique de Copernic** (procès par l'Église)
- ▶ nombreuses contributions à la science : père de la **physique moderne et de l'astronomie**
- ▶ arguments en faveur de Copernic : **mécaniques et astronomiques**

Galileo Galilei (1564-1642, Italie)



- ▶ surtout connu pour la défense du **Système héliocentrique de Copernic** (procès par l'Église)
- ▶ nombreuses contributions à la science : père de la **physique moderne et de l'astronomie**
- ▶ arguments en faveur de Copernic : **mécaniques et astronomiques**

Galileo Galilei (1564-1642, Italie)



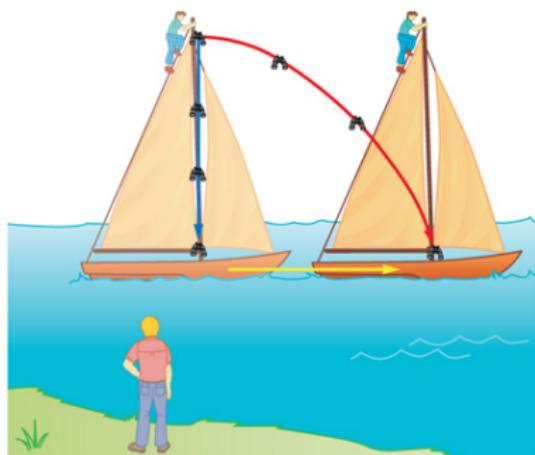
- ▶ surtout connu pour la défense du **Système héliocentrique de Copernic** (procès par l'Église)
- ▶ nombreuses contributions à la science : père de la **physique moderne et de l'astronomie**
- ▶ arguments en faveur de Copernic : **mécaniques et astronomiques**

Galileo Galilei (1564-1642, Italie)



- ▶ surtout connu pour la défense du **Système héliocentrique de Copernic** (procès par l'Église)
- ▶ nombreuses contributions à la science : père de la **physique moderne et de l'astronomie**
- ▶ arguments en faveur de Copernic : **mécaniques et astronomiques**

Relativité galiléenne

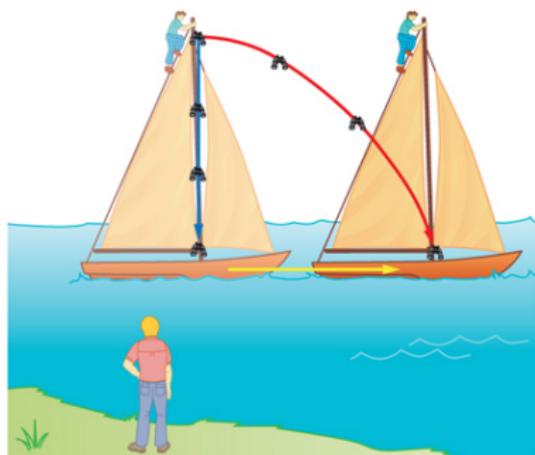


Relativité du mouvement (~ 1632) :
 objet chute identiquement dans un navire en
 mouvement à vitesse constante ou au repos
 à quai

rouge : trajectoire vue depuis le quai si navire mobile.

Remarque : pour l'observateur sur le **navire**, le déplacement est **purement vertical** ; pour celui sur le **quai**, il est à la fois **horizontal et vertical**...

Relativité galiléenne



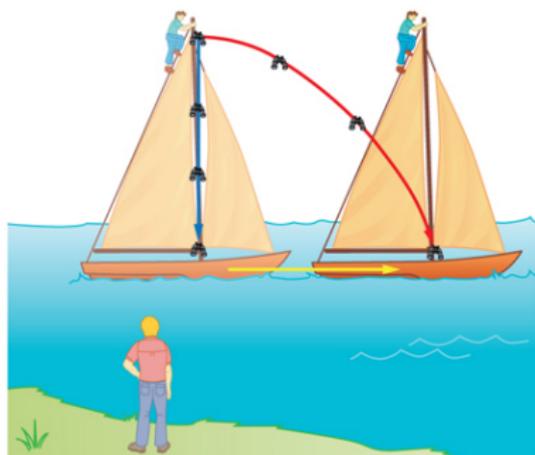
Relativité du mouvement (~ 1632) :

objet chute identiquement dans un navire en mouvement à vitesse constante ou au repos à quai

rouge : trajectoire vue depuis le quai si navire mobile.

Remarque : pour l'observateur sur le **navire**, le déplacement est **purement vertical** ; pour celui sur le **quai**, il est à la fois **horizontal et vertical**...

Relativité galiléenne

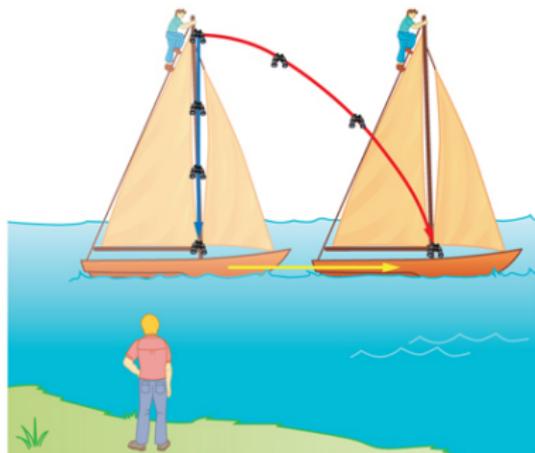


Relativité du mouvement (~ 1632) :
 objet chute identiquement dans un navire en
 mouvement à vitesse constante ou au repos
 à quai

rouge : trajectoire vue depuis le quai si navire mobile.

Remarque : pour l'observateur sur le **navire**, le déplacement est **purement vertical** ; pour celui sur le **quai**, il est à la fois **horizontal et vertical**...

Relativité galiléenne



Relativité du mouvement (~ 1632) :
 objet chute identiquement dans un navire en
 mouvement à vitesse constante ou au repos
 à quai

rouge : trajectoire vue depuis le quai si navire mobile.

Remarque : pour l'observateur sur le **navire**, le déplacement est **purement vertical** ; pour celui sur le **quai**, il est à la fois **horizontal et vertical**...

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !

Relativité du mouvement

- ▶ « **le mouvement est comme rien** » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ **argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !**

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !

Relativité du mouvement

- ▶ « **le mouvement est comme rien** » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ **argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !**

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !

Relativité du mouvement

- ▶ « le mouvement est comme rien » : un corps en mouvement à vitesse constante n'est pas affecté par sa vitesse (\neq **Aristote**) → vitesse impossible à mettre en évidence sans se référer à un autre corps
- ▶ vitesse : notion **relative** (à un autre objet, à un observateur, etc.) et pas **absolue** ou **intrinsèque**
- ▶ **Illustration du caractère relatif** : doute possible quand, dans un train en gare, on en voit un autre démarrer lentement
- ▶ **Disciples d'Aristote** : *si la Terre était en mouvement, une pierre lâchée ne tomberait pas verticalement* (argument contre Copernic)
→ **argument erroné s'il n'y a que des vitesses relatives !**

Formulation moderne de la relativité galiléenne

- ▶ deux observateurs **en mouvement à vitesse constante l'un par rapport à l'autre** obtiennent les mêmes résultats pour toute expérience de **chute libre** ;

Formulation moderne de la relativité galiléenne

- ▶ deux observateurs **en mouvement à vitesse constante l'un par rapport à l'autre** obtiennent les mêmes résultats pour toute expérience de **mécanique** ;

Formulation moderne de la relativité galiléenne

- ▶ deux observateurs **en mouvement à vitesse constante l'un par rapport à l'autre** obtiennent les mêmes résultats pour toute expérience de **mécanique** ;
- ▶ **Remarque** : accélération pas (complètement) relative (cf. sensations dans une voiture qui accélère à comparer à celles d'un piéton sur le trottoir) ;



Formulation moderne de la relativité galiléenne

- ▶ deux observateurs **en mouvement à vitesse constante l'un par rapport à l'autre** obtiennent les mêmes résultats pour toute expérience de **mécanique** ;
- ▶ **Remarque** : accélération pas (complètement) relative (cf. sensations dans une voiture qui accélère à comparer à celles d'un piéton sur le trottoir) ;
- ▶ **Principe de relativité galiléenne** : **les lois de la mécanique sont les mêmes pour tous les observateurs inertiels**



Formulation moderne de la relativité galiléenne

- ▶ deux observateurs **en mouvement à vitesse constante l'un par rapport à l'autre** obtiennent les mêmes résultats pour toute expérience de **mécanique** ;
- ▶ **Remarque** : accélération pas (complètement) relative (cf. sensations dans une voiture qui accélère à comparer à celles d'un piéton sur le trottoir) ;
- ▶ **Principe de relativité galiléenne** : **les lois de la mécanique sont les mêmes pour tous les observateurs inertiels** (\sim tous les observateurs qui ne sont pas accélérés).



Grandeurs absolues et relatives en physique classique

- ▶ **absolues (invariantes)** : masse, taille, vieillissement, charge électrique, température, etc.
- ▶ **relatives** : direction du déplacement, vitesse, énergie cinétique (= due au mouvement), etc.

Remarque : taille et vieillissement absolus car **espace et temps absolus** supposés en mécanique newtonienne (\sim « boîtes » obéissant aux règles de la **géométrie euclidienne**)

Conséquence : **addition des vitesses** : $V = u + v$

Grandeurs absolues et relatives en physique classique

- ▶ **absolues (invariantes)** : masse, taille, vieillissement, charge électrique, température, etc.
- ▶ **relatives** : direction du déplacement, vitesse, énergie cinétique (= due au mouvement), etc.

Remarque : taille et vieillissement absolus car **espace et temps absolus** supposés en mécanique newtonienne (\sim « boîtes » obéissant aux règles de la **géométrie euclidienne**)

Conséquence : **addition des vitesses** : $V = u + v$

Grandeurs absolues et relatives en physique classique

- ▶ **absolues (invariantes)** : masse, taille, vieillissement, charge électrique, température, etc.
- ▶ **relatives** : direction du déplacement, vitesse, énergie cinétique (= due au mouvement), etc.

Remarque : taille et vieillissement absolus car **espace et temps absolus** supposés en mécanique newtonienne (\sim « boîtes » obéissant aux règles de la **géométrie euclidienne**)

Conséquence : **addition des vitesses** : $V = u + v$

Grandeurs absolues et relatives en physique classique

- ▶ **absolues (invariantes)** : masse, taille, vieillissement, charge électrique, température, etc.
- ▶ **relatives** : direction du déplacement, vitesse, énergie cinétique (= due au mouvement), etc.

Remarque : taille et vieillissement absolus car **espace et temps absolus** supposés en mécanique newtonienne (\sim « boîtes » obéissant aux règles de la **géométrie euclidienne**)

Conséquence : **addition des vitesses** : $V = u + v$

Grandeurs absolues et relatives en physique classique

- ▶ **absolues (invariantes)** : masse, taille, vieillissement, charge électrique, température, etc.
- ▶ **relatives** : direction du déplacement, vitesse, énergie cinétique (= due au mouvement), etc.

Remarque : taille et vieillissement absolus car **espace et temps absolus** supposés en mécanique newtonienne (\sim « boîtes » obéissant aux règles de la **géométrie euclidienne**)

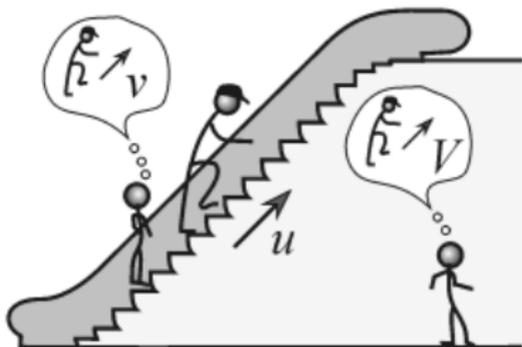
Conséquence : addition des vitesses : $V = u + v$

Grandeurs absolues et relatives en physique classique

- ▶ **absolues (invariantes)** : masse, taille, vieillissement, charge électrique, température, etc.
- ▶ **relatives** : direction du déplacement, vitesse, énergie cinétique (= due au mouvement), etc.

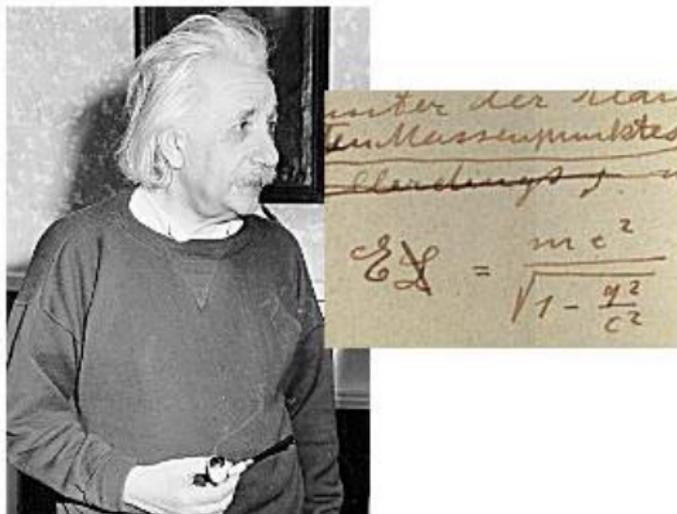
Remarque : taille et vieillissement absolus car **espace et temps absolus** supposés en mécanique newtonienne ($\sim \ll$ boîtes \gg obéissant aux règles de la **géométrie euclidienne**)

Conséquence : **addition des vitesses** : $V = u + v$



2

Lumière et relativité restreinte



Lumière et électromagnétisme

1864, James Clerk Maxwell (1831-1879) : théorie des phénomènes électriques et magnétiques

→ existence d'ondes électromagnétiques (vitesse : $c \sim 300\,000$ km/s)

→ lumière visible = onde électromagnétique parmi d'autres !

Lumière et électromagnétisme

1864, James Clerk Maxwell (1831-1879) : théorie des phénomènes électriques et magnétiques

→ existence d'**ondes électromagnétiques** (vitesse : $c \sim 300\,000$ km/s)

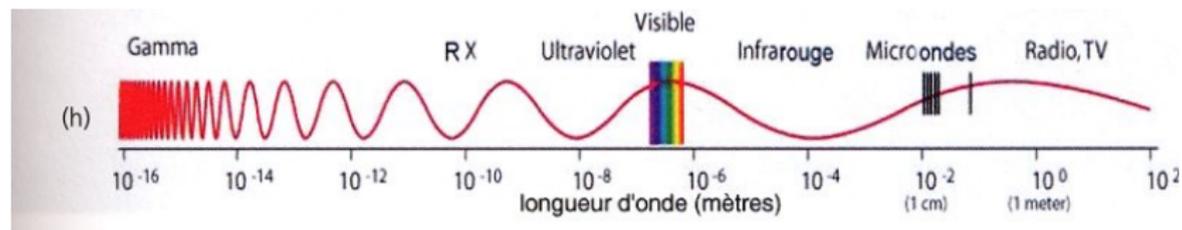
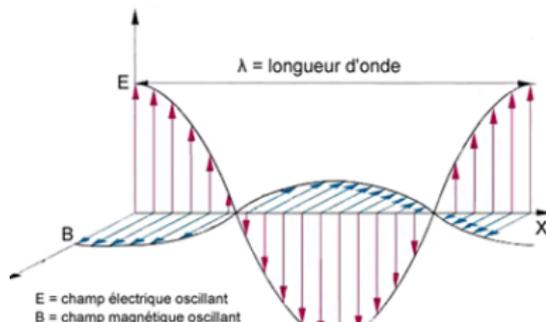
→ lumière visible = onde électromagnétique parmi d'autres !

Lumière et électromagnétisme

1864, James Clerk Maxwell (1831-1879) : théorie des phénomènes électriques et magnétiques

→ existence d'**ondes électromagnétiques** (vitesse : $c \sim 300\,000$ km/s)

→ **lumière visible = onde électromagnétique** parmi d'autres !



Propagation de la lumière et éther

- ▶ ondes électromagnétiques = perturbations de l'« éther » (milieu mécanique, cf. vagues sur l'eau)
 - propagation à la vitesse c ($\sim 300\,000$ km/s) par rapport à l'éther
- ▶ détermination de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther par mesure de celle de la lumière par rapport à la Terre
- ▶ échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**

Propagation de la lumière et éther

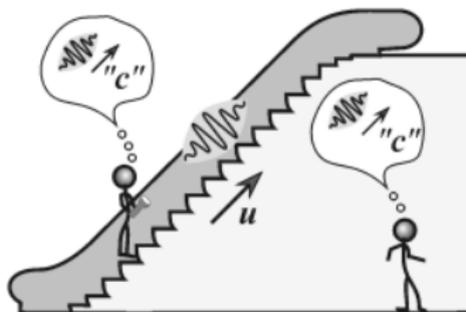
- ▶ ondes électromagnétiques = perturbations de l'« éther » (milieu mécanique, cf. vagues sur l'eau)
→ propagation à la vitesse c ($\sim 300\,000$ km/s) **par rapport à l'éther**
- ▶ détermination de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther par mesure de celle de la lumière par rapport à la Terre
- ▶ échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**

Propagation de la lumière et éther

- ▶ ondes électromagnétiques = perturbations de l'« éther » (milieu mécanique, cf. vagues sur l'eau)
→ propagation à la vitesse c ($\sim 300\,000$ km/s) **par rapport à l'éther**
- ▶ **détermination de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther** par mesure de celle de la lumière par rapport à la Terre
- ▶ échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**

Propagation de la lumière et éther

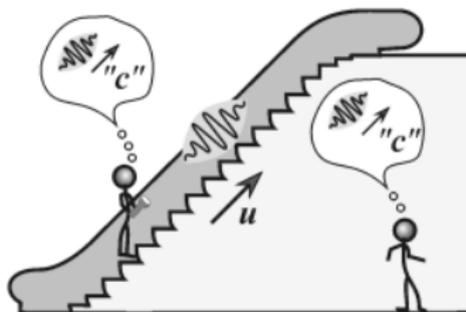
- ▶ ondes électromagnétiques = perturbations de l'« éther » (milieu mécanique, cf. vagues sur l'eau)
→ propagation à la vitesse c ($\sim 300\,000$ km/s) **par rapport à l'éther**
- ▶ **détermination de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther** par mesure de celle de la lumière par rapport à la Terre
- ▶ échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**



pas d'effet observé $\rightarrow c \pm V_{Terre/Ether} = c$ même quand $V_{Terre/Ether}$ varie!!!

Propagation de la lumière et éther

- ▶ ondes électromagnétiques = perturbations de l'« éther » (milieu mécanique, cf. vagues sur l'eau)
→ propagation à la vitesse c ($\sim 300\,000$ km/s) **par rapport à l'éther**
- ▶ **détermination de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther** par mesure de celle de la lumière par rapport à la Terre
- ▶ échec de plusieurs expériences dont celle de **Michelson & Morley (1887)**



pas d'effet observé $\rightarrow c \pm V_{Terre/Ether} = c$ même quand $V_{Terre/Ether}$ varie!!!
la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs

Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :

hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer l'absence de variations mesurables de c

→ Poincaré parle de « complot de la Nature »

Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :
hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer
l'absence de variations mesurables de c
→ Poincaré parle de « complot de la Nature »

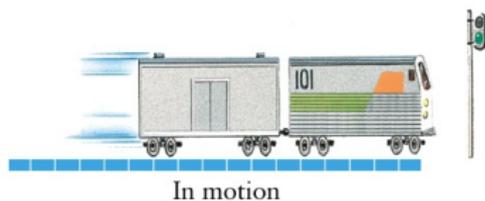
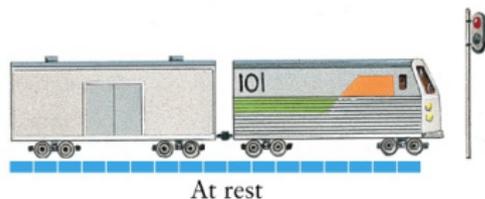
Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :
hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer
l'absence de variations mesurables de c
→ Poincaré parle de « complot de la Nature »

Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :
 hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer
 l'absence de variations mesurables de c
 → Poincaré parle de « **complot de la Nature** »

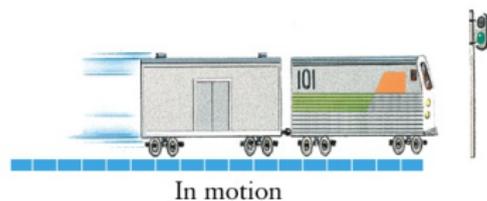
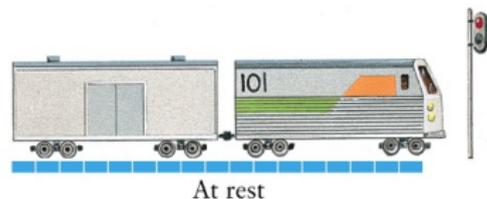
- ▶ **contraction des longueurs** : explique certains résultats expérimentaux,



a Length contraction

Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :
 hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer
 l'absence de variations mesurables de c
 → Poincaré parle de « **complot de la Nature** »



- ▶ **contraction des longueurs** : explique certains résultats expérimentaux, **mais pas tous...**

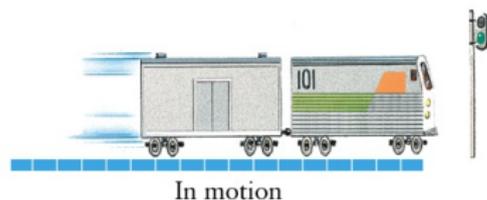
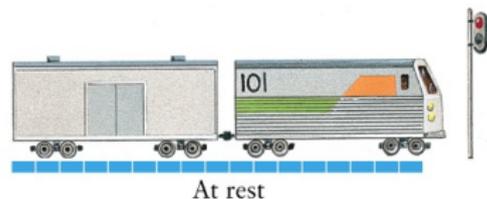
a Length contraction

Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :

hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer l'absence de variations mesurables de c

→ Poincaré parle de « **complot de la Nature** »



a Length contraction

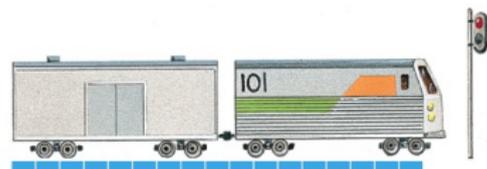
- ▶ **contraction des longueurs** : explique certains résultats expérimentaux, **mais pas tous...**
- ▶ besoin de supposer un « **temps local** » (?!)

Lorentz et Poincaré

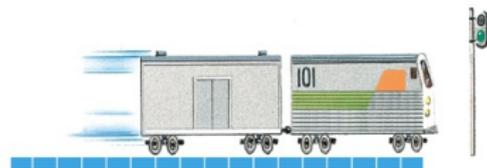
Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :

hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer l'absence de variations mesurables de c

→ Poincaré parle de « **complot de la Nature** »



At rest



In motion

a Length contraction

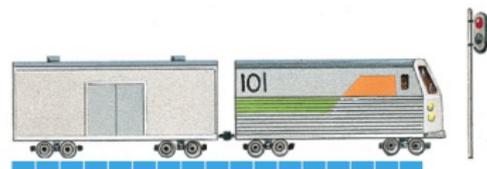
- ▶ **contraction des longueurs** : explique certains résultats expérimentaux, **mais pas tous...**
- ▶ besoin de supposer un « **temps local** » (?!)
- ▶ « **explication** » : problème de **synchronisation** des horloges en mouvement par rapport à l'éther

Lorentz et Poincaré

Hendrik Lorentz (1853-1928) et Henri Poincaré (1854-1912) :

hypothèses électromagnétiques obscures nécessaires uniquement pour expliquer l'absence de variations mesurables de c

→ Poincaré parle de « **complot de la Nature** »



At rest



In motion

a Length contraction

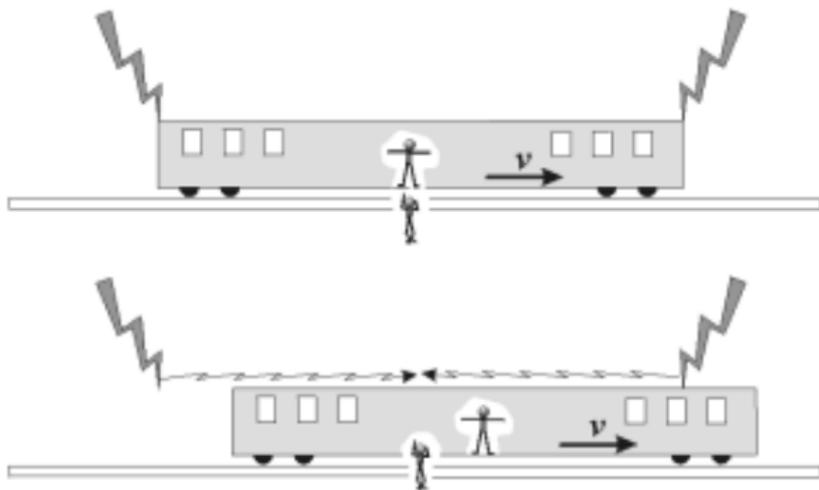
- ▶ **contraction des longueurs** : explique certains résultats expérimentaux, **mais pas tous...**
- ▶ besoin de supposer un « **temps local** » (?!)
- ▶ « **explication** » : problème de **synchronisation** des horloges en mouvement par rapport à l'éther
→ **temps affiché non physique (?)** mais « **vrai temps** » inobservable

Einstein et la notion de simultanéité (1905)

Simultanéité : notion pas *a priori* mais *a posteriori* et **relative** à un outil d'observation/**mesure**/communication

Einstein et la notion de simultanéité (1905)

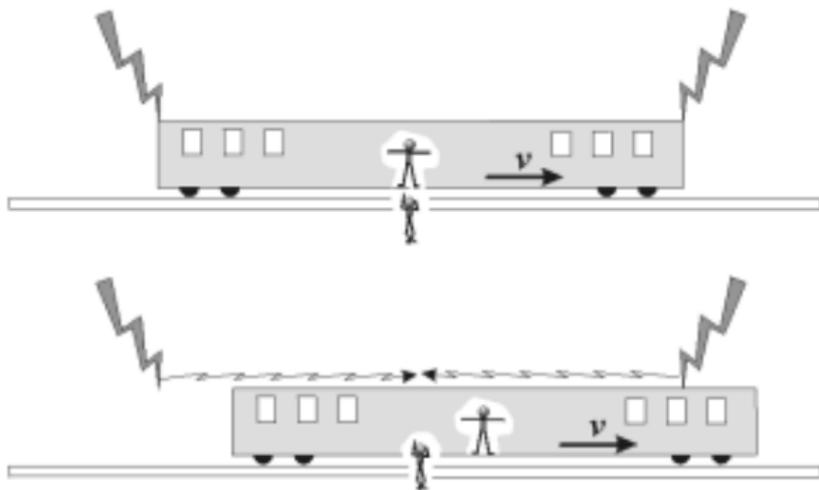
Simultanéité : notion pas *a priori* mais *a posteriori* et **relative** à un outil d'observation/**mesure**/communication



deux éclairs simultanés pour un observateur ne le sont pas pour un autre...

Einstein et la notion de simultanéité (1905)

Simultanéité : notion pas *a priori* mais *a posteriori* et **relative** à un outil d'observation/**mesure**/communication



deux éclairs simultanés pour un observateur ne le sont pas pour un autre...
 → remise en cause de l'idée d'un **temps absolu** ?

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité restreinte (Einstein, 1905) : les lois de la **physique** (mécanique et électromagnétisme) sont les mêmes pour tous les observateurs **inertiels**

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité restreinte (Einstein, 1905) : les lois de la **physique** (mécanique et électromagnétisme) sont les mêmes pour tous les observateurs **inertiels**

→ pas de temps ou d'espace absolus mais **notions de distance ou de durée relatives**

Principe de relativité selon Einstein (1905)

Conclusions partielles :

- ▶ notion de simultanéité directement liée à une procédure de **synchronisation d'horloges** et donc à des transferts d'information
 - ▶ vitesse de la lumière (c) = **plus grande vitesse connue** (gravitation ?)
 - ▶ invariance **constatée expérimentalement** (par tous les observateurs **inertiels**) de la vitesse de la lumière
- c semble être un **absolu** plutôt qu'une grandeur relative (comme les autres vitesses)

Principe de relativité restreinte (Einstein, 1905) : les lois de la **physique** (mécanique et électromagnétisme) sont les mêmes pour tous les observateurs **inertiels**

- pas de temps ou d'espace absolus mais **notions de distance ou de durée relatives**
- mêmes prédictions que Lorentz et Poincaré (**contraction des longueurs, dilatation des durées**) mais sans étranges hypothèses microscopiques...

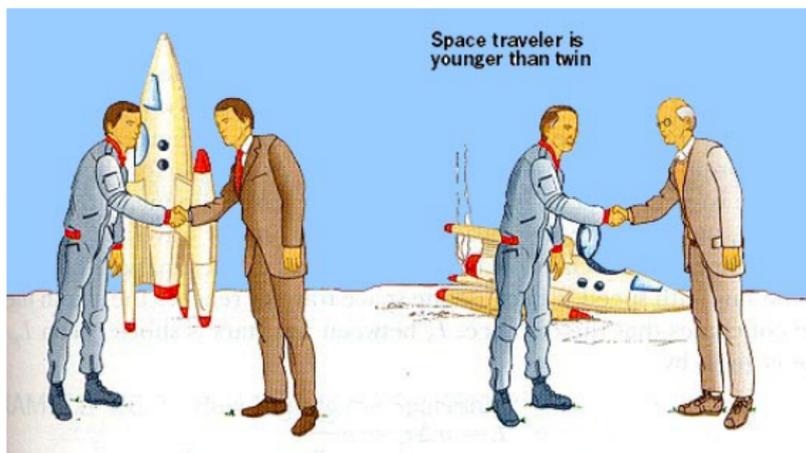
Conséquences directes du principe de relativité (1905)



Contraction des longueurs de Lorentz-Fitzgerald et dilatation temporelle symétriques !

pas de mouvement de la Terre par rapport à l'éther observé car **pas d'éther** !

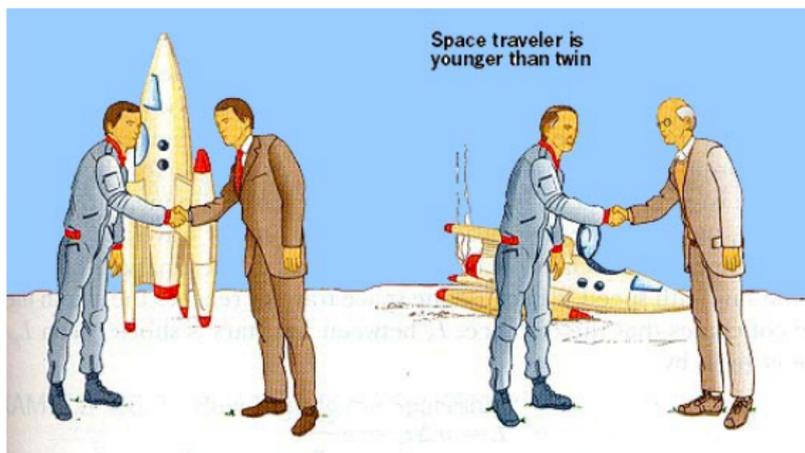
Vérifications expérimentales : dilatation temporelle



horloges atomiques dans des avions autour de la Terre (**Hafele & Keating, 1971**)
 → désynchronisation (cf. paradoxe des jumeaux : pas de symétrie car accélération pour demi-tour)

À prendre en compte au quotidien pour le bon fonctionnement du GPS

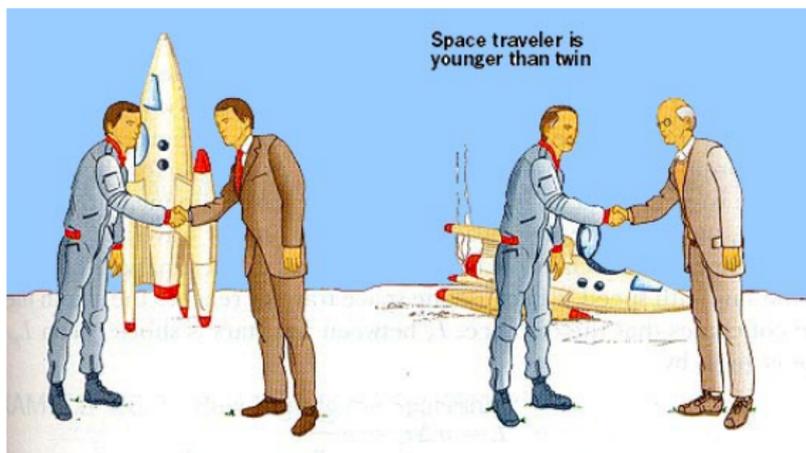
Vérifications expérimentales : dilatation temporelle



horloges atomiques dans des avions autour de la Terre (**Hafele & Keating, 1971**)
 → désynchronisation (cf. paradoxe des jumeaux : pas de symétrie car accélération pour demi-tour)

À prendre en compte au quotidien pour le bon fonctionnement du GPS

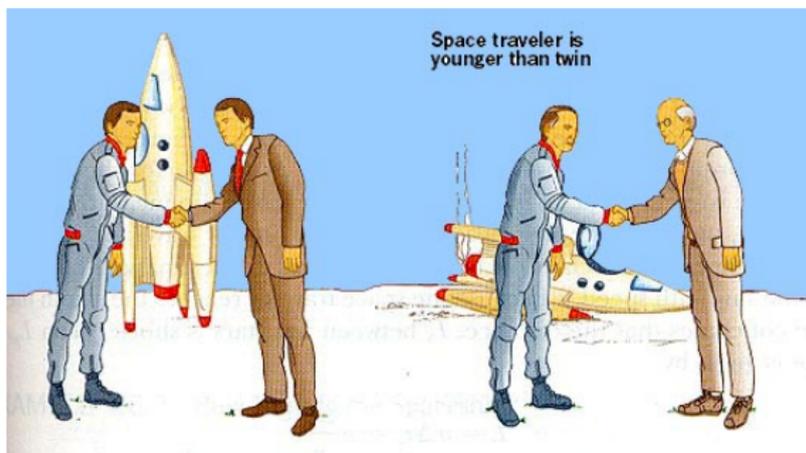
Vérifications expérimentales : dilatation temporelle



horloges atomiques dans des avions autour de la Terre (**Hafele & Keating, 1971**)
 → désynchronisation (cf. paradoxe des jumeaux : pas de symétrie car accélération pour demi-tour)

À prendre en compte au quotidien pour le bon fonctionnement du GPS

Vérifications expérimentales : dilatation temporelle



horloges atomiques dans des avions autour de la Terre (**Hafele & Keating, 1971**)
 → désynchronisation (cf. paradoxe des jumeaux : pas de symétrie car accélération pour demi-tour)

À prendre en compte au quotidien pour le bon fonctionnement du GPS

Bilan de la relativité selon Einstein

- ▶ équations newtoniennes modifiées
- ▶ la masse est l'une des formes prises par l'énergie : $E = mc^2$
 - seule l'énergie est conservée, pas la masse
 - particules de masse nulle, création de paires, annihilation, etc. (prédictions vérifiées dans les collisionneurs de particules, l'astrophysique des hautes énergies, les rayons cosmiques, mais aussi les **hôpitaux**!)
- ▶ impossible d'atteindre ou de dépasser la vitesse c

Bilan de la relativité selon Einstein

- ▶ équations newtoniennes modifiées
- ▶ la masse est l'une des formes prises par l'énergie : $E = mc^2$
 - seule l'énergie est conservée, pas la masse
 - particules de masse nulle, création de paires, annihilation, etc. (prédictions vérifiées dans les collisionneurs de particules, l'astrophysique des hautes énergies, les rayons cosmiques, mais aussi les **hôpitaux**!)
- ▶ impossible d'atteindre ou de dépasser la vitesse c

Bilan de la relativité selon Einstein

- ▶ équations newtoniennes modifiées
- ▶ la masse est l'une des formes prises par l'énergie : $E = mc^2$
 - seule l'énergie est conservée, pas la masse
 - particules de masse nulle, création de paires, annihilation, etc. (prédictions vérifiées dans les collisionneurs de particules, l'astrophysique des hautes énergies, les rayons cosmiques, mais aussi les **hôpitaux**!)
- ▶ **impossible d'atteindre ou de dépasser la vitesse c**

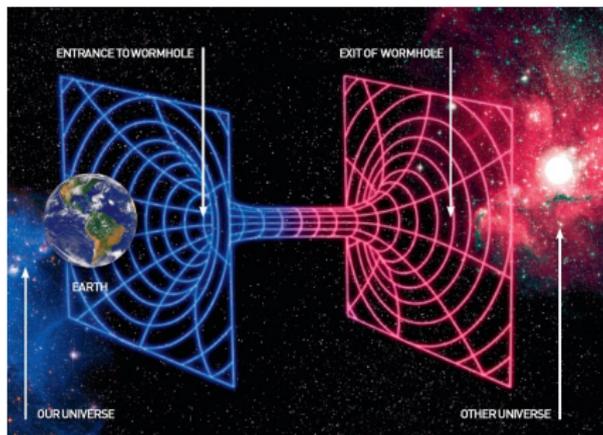
Bilan de la relativité selon Einstein

- ▶ équations newtoniennes modifiées
- ▶ la masse est l'une des formes prises par l'énergie : $E = mc^2$
 - seule l'énergie est conservée, pas la masse
 - particules de masse nulle, création de paires, annihilation, etc. (prédictions vérifiées dans les collisionneurs de particules, l'astrophysique des hautes énergies, les rayons cosmiques, mais aussi les **hôpitaux** !)
- ▶ **impossible d'atteindre ou de dépasser la vitesse c**

théorie reposant sur des **hypothèses simples**, mais en « pratique » **pas très intuitive** et équations **compliquées**...

3

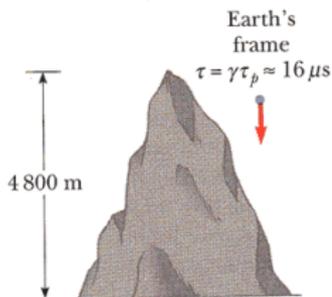
Espace-temps et relativité générale



Ni espace, ni temps, mais un peu des deux...



(a)



(b)

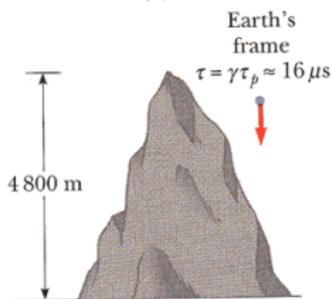
Muons (**instables**) produits dans la **haute atmosphère**. **Problème** : nombre de muons détectés au sol supérieur à la prédiction classique

- ▶ point de vue **relativiste terrestre** : les muons vivent au ralenti, ils se désintègrent moins vite que prévu (dilatation temporelle)
- ▶ point de vue **relativiste des muons** : l'atmosphère est contractée dans la direction de son mouvement vers les muons → épaisseur plus faible à traverser pour atteindre le sol (contraction des longueurs)

Ni espace, ni temps, mais un peu des deux...



(a)



(b)

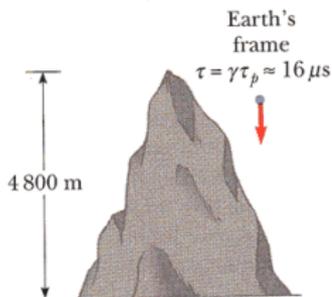
Muons (**instables**) produits dans la **haute atmosphère**. **Problème** : nombre de muons détectés au **sol** supérieur à la prédiction classique

- ▶ point de vue **relativiste terrestre** : les muons vivent au ralenti, ils se désintègrent moins vite que prévu (dilatation temporelle)
- ▶ point de vue **relativiste des muons** : l'atmosphère est contractée dans la direction de son mouvement vers les muons → épaisseur plus faible à traverser pour atteindre le sol (contraction des longueurs)

Ni espace, ni temps, mais un peu des deux...



(a)



(b)

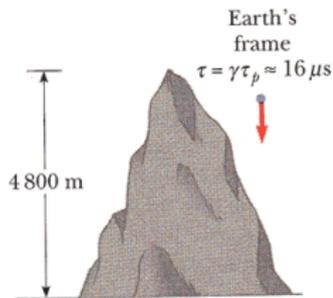
Muons (**instables**) produits dans la **haute atmosphère**. **Problème** : nombre de muons détectés au **sol** supérieur à la prédiction classique

- ▶ point de vue **relativiste terrestre** : les muons vivent au ralenti, ils se désintègrent moins vite que prévu (**dilatation temporelle**)
- ▶ point de vue **relativiste des muons** : l'atmosphère est contractée dans la direction de son mouvement vers les muons → épaisseur plus faible à traverser pour atteindre le sol (**contraction des longueurs**)

Ni espace, ni temps, mais un peu des deux...



(a)



(b)

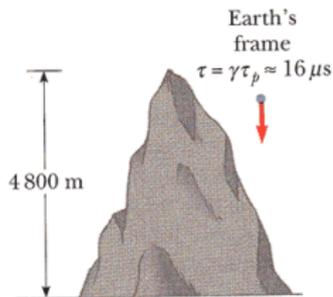
Muons (**instables**) produits dans la **haute atmosphère**. **Problème** : nombre de muons détectés au **sol** supérieur à la prédiction classique

- ▶ point de vue **relativiste terrestre** : les muons vivent au ralenti, ils se désintègrent moins vite que prévu (**dilatation temporelle**)
- ▶ point de vue **relativiste des muons** : l'atmosphère est contractée dans la direction de son mouvement vers les muons → épaisseur plus faible à traverser pour atteindre le sol (**contraction des longueurs**)

Ni espace, ni temps, mais un peu des deux...



(a)



(b)

Muons (**instables**) produits dans la **haute atmosphère**. **Problème** : nombre de muons détectés au **sol** supérieur à la prédiction classique

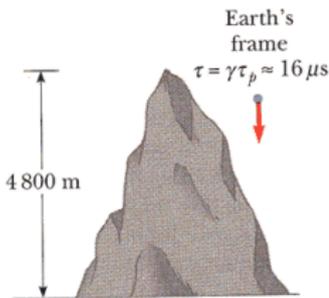
- ▶ point de vue **relativiste terrestre** : les muons vivent au ralenti, ils se désintègrent moins vite que prévu (**dilatation temporelle**)
- ▶ point de vue **relativiste des muons** : l'atmosphère est contractée dans la direction de son mouvement vers les muons
→ épaisseur plus faible à traverser pour atteindre le sol (**contraction des longueurs**)

→ explication par un **phénomène spatial ou temporel selon le point de vue** (cf. déplacement vertical ou horizontal selon l'observateur en physique classique)

Ni espace, ni temps, mais un peu des deux...



(a)



(b)

Muons (**instables**) produits dans la **haute atmosphère**. **Problème** : nombre de muons détectés au **sol** supérieur à la prédiction classique

- ▶ point de vue **relativiste terrestre** : les muons vivent au ralenti, ils se désintègrent moins vite que prévu (**dilatation temporelle**)
- ▶ point de vue **relativiste des muons** : l'atmosphère est contractée dans la direction de son mouvement vers les muons
→ épaisseur plus faible à traverser pour atteindre le sol (**contraction des longueurs**)

→ explication par un **phénomène spatial ou temporel selon le point de vue** (cf. déplacement vertical ou horizontal selon l'observateur en physique classique)

→ l'**espace-temps** est le concept **absolu** !

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« espace-temps » à 4 dimensions
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- ▶ **contraction et dilatation de Lorentz** \equiv effets de **perspective spatio-temporelle**
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**)

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à **4 dimensions**
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- ▶ **contraction et dilatation de Lorentz** \equiv effets de **perspective spatio-temporelle**
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et **vitesse de toute particule sans masse** (**pas uniquement la lumière**)

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à **4 dimensions**
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales (= en moments présents)
- ▶ contraction et dilatation de Lorentz \equiv effets de perspective spatio-temporelle
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**)

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à **4 dimensions**
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales (= en moments présents)
- ▶ contraction et dilatation de Lorentz \equiv effets de perspective spatio-temporelle
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**)

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à 4 dimensions
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- ▶ contraction et dilatation de Lorentz \equiv effets de **perspective spatio-temporelle**
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**)

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à 4 dimensions
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- ▶ **contraction et dilatation** de Lorentz \equiv effets de **perspective spatio-temporelle**
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**)

Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à 4 dimensions
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- ▶ **contraction et dilatation** de Lorentz \equiv effets de **perspective spatio-temporelle**
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**)

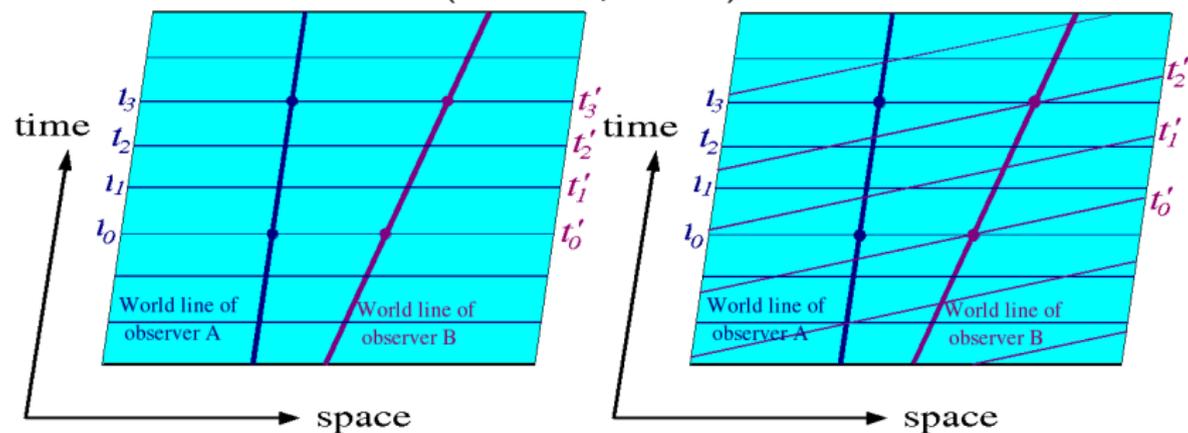
Espace-temps : Hermann Minkowski (1864-1909)

1908, Minkowski :

- ▶ la relativité restreinte s'exprime plus simplement à l'aide d'**objets géométriques** → **ingrédient clef** : l'« **espace-temps** » à 4 dimensions
- ▶ **points** de l'espace-temps = **événements** (ont lieu quelque part et à un instant donné)
- ▶ espace-temps est **identique** pour tous les observateurs et n'est pas affecté par eux : « **objet** » **absolu**
- ▶ relativité de la simultanéité \leftrightarrow **relativité dans le découpage de l'espace-temps en tranches spatiales** (= en moments présents)
- ▶ **contraction et dilatation** de Lorentz \equiv effets de **perspective spatio-temporelle**
- ▶ les grandeurs relatives sont incluses dans des **invariants géométriques**
- ▶ « **vitesse de la lumière** » = « **constante géométrique** » → vitesse maximale pour l'information et **vitesse de toute particule sans masse** (**pas uniquement la lumière**)

Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** (cf. école primaire) :

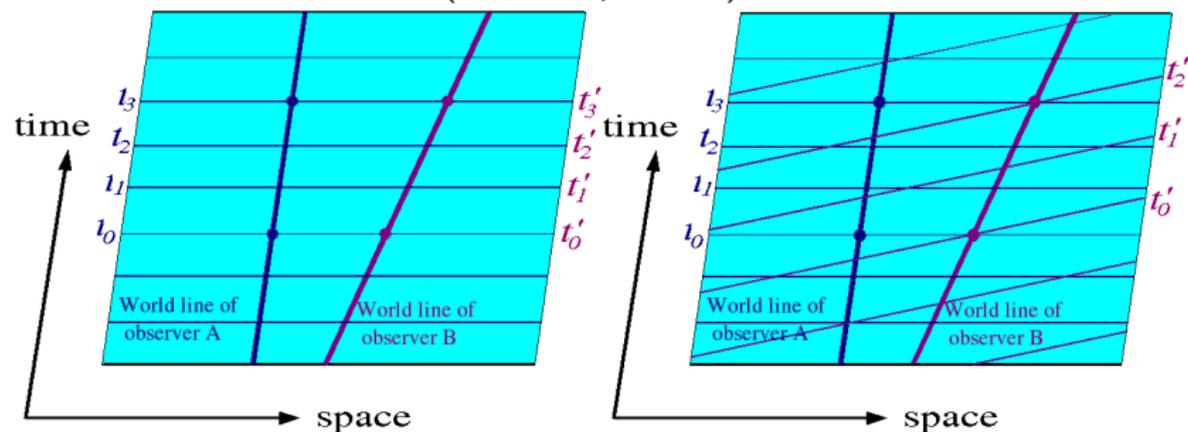


À gauche : selon Newton, chacun a le même temps et le même espace ; les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t

À droite : pour Minkowski, l'espace (= ensemble des événements simultanés) dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**.

Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains**
(cf. école primaire) :

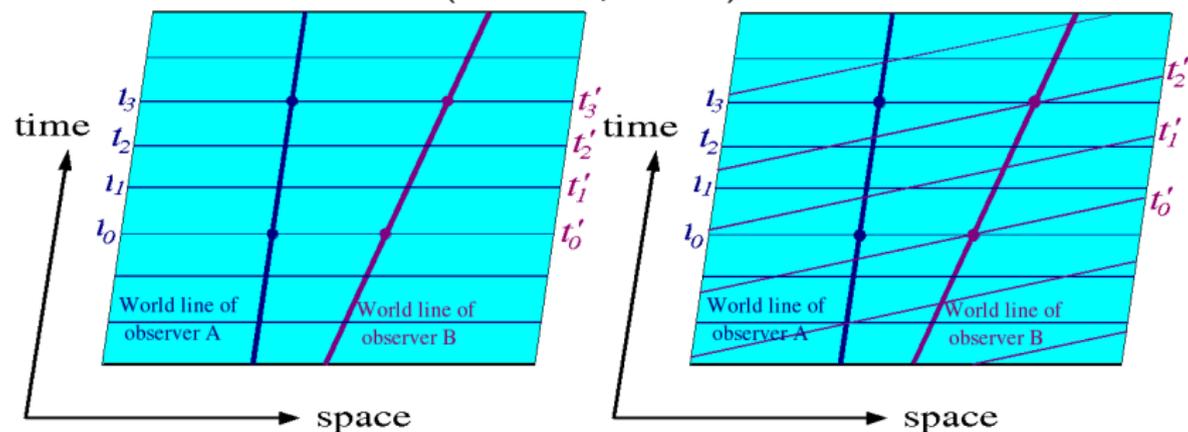


À gauche : selon **Newton**, chacun a le **même temps** et le **même espace** ;
les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite**
horizontale → il s'agit de l'espace à la date t

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés)
dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**.

Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** (cf. école primaire) :

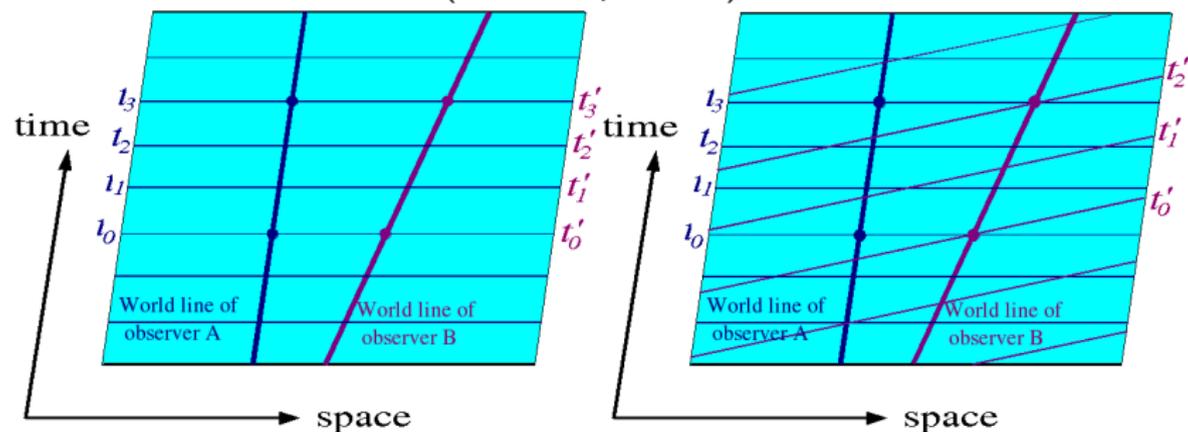


À gauche : selon **Newton**, chacun a le **même temps** et le **même espace** ; les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés) dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**.

Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains**
(cf. école primaire) :

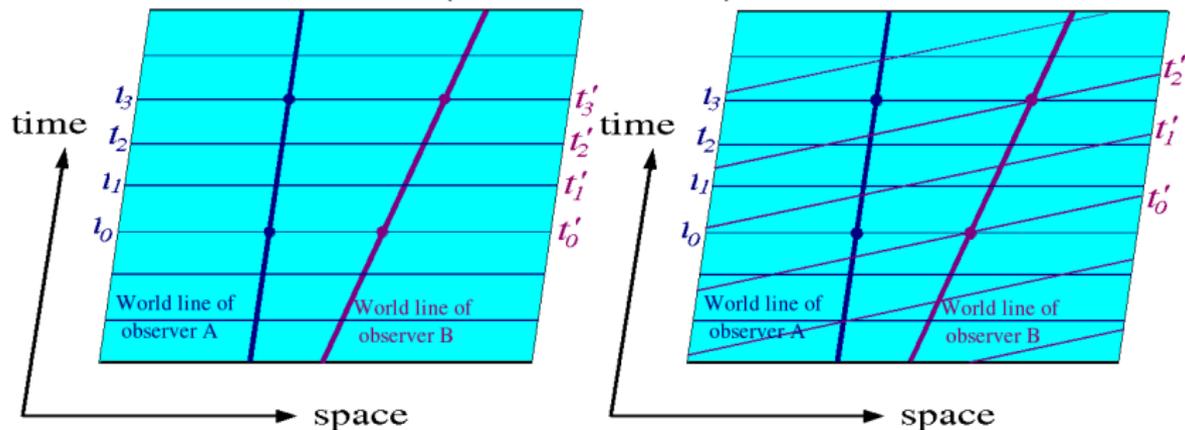


À gauche : selon **Newton**, chacun a le **même temps** et le **même espace** ;
les événements simultanés (**même date** t) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés)
dépend de l'observateur → droite horizontale ou inclinée.

Observateurs inertiels et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** (cf. école primaire) :



À gauche : selon **Newton**, chacun a le **même temps** et le **même espace** ; les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés) dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**.

Grandeurs absolues et relatives en relativité restreinte

- ▶ **absolues** : masse, charge électrique, **espace-temps et distance spatio-temporelle**, vitesse de la lumière (incluse dans les lois de l'électromagnétisme), **relation de causalité**, etc.
- ▶ **relatives** : vitesse, taille (espace), vieillissement (temps), **ordre chronologique**, énergie, température, etc.

Questions :

- ▶ Pourquoi seuls les observateurs inertiels sont égaux ?
- ▶ Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune information ne peut voyager plus vite que c ?

Grandeurs absolues et relatives en relativité restreinte

- ▶ **absolues** : masse, charge électrique, **espace-temps et distance spatio-temporelle**, vitesse de la lumière (incluse dans les lois de l'électromagnétisme), **relation de causalité**, etc.
- ▶ **relatives** : vitesse, taille (espace), vieillissement (temps), **ordre chronologique**, énergie, température, etc.

Questions :

- ▶ Pourquoi seuls les observateurs inertiels sont égaux ?
- ▶ Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune information ne peut voyager plus vite que c ?

Grandeurs absolues et relatives en relativité restreinte

- ▶ **absolues** : masse, charge électrique, **espace-temps et distance spatio-temporelle**, vitesse de la lumière (incluse dans les lois de l'électromagnétisme), **relation de causalité**, etc.
- ▶ **relatives** : vitesse, taille (espace), vieillissement (temps), **ordre chronologique**, énergie, température, etc.

Questions :

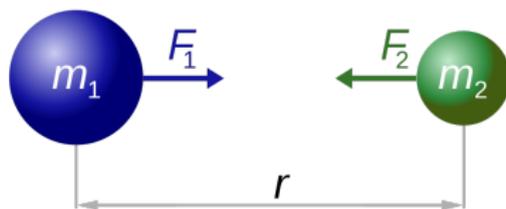
- ▶ Pourquoi seuls les observateurs inertiels sont égaux ?
- ▶ Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune information ne peut voyager plus vite que c ?

Grandeurs absolues et relatives en relativité restreinte

- ▶ **absolues** : masse, charge électrique, **espace-temps et distance spatio-temporelle**, vitesse de la lumière (incluse dans les lois de l'électromagnétisme), **relation de causalité**, etc.
- ▶ **relatives** : vitesse, taille (espace), vieillissement (temps), **ordre chronologique**, énergie, température, etc.

Questions :

- ▶ Pourquoi seuls les observateur inertiels sont égaux ?
- ▶ Qu'en est-il de la **gravitation** selon Newton si aucune information ne peut voyager plus vite que c ?



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Universalité de la chute libre selon Einstein



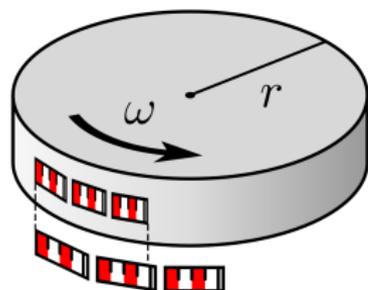
universalité de la chute libre → pas de différence **localement** entre un champ de gravitation et une accélération du référentiel
 (cf. ascenseur qui accélère, voiture qui tourne, etc.)
 → principe d'équivalence

Universalité de la chute libre selon Einstein



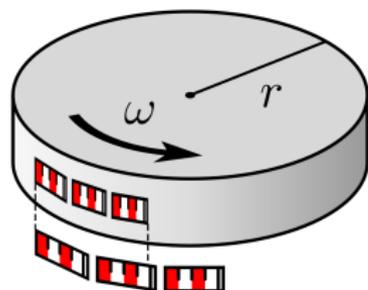
universalité de la chute libre → pas de différence **localement** entre un champ de gravitation et une accélération du référentiel
 (cf. ascenseur qui accélère, voiture qui tourne, etc.)
 → principe d'équivalence

Accélérations et géométrie



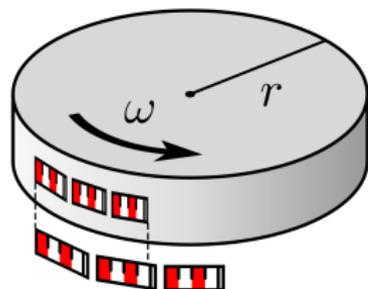
- ▶ **Disque en rotation** : contraction de Lorentz dans la direction du mouvement (pas pour le rayon)
- **Circonférence** $< 2\pi \times \text{rayon}$
- la **géométrie euclidienne n'est plus valable** !
- l'espace semble **« courbe »** et de **géométrie relative**

Accélérations et géométrie

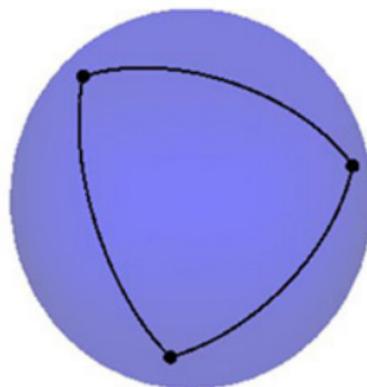


- ▶ **Disque en rotation** : contraction de Lorentz dans la direction du mouvement (pas pour le rayon)
- **Circonférence** $< 2\pi \times \text{rayon}$
- la géométrie euclidienne n'est plus valable !
- l'espace semble « courbe » et de géométrie relative

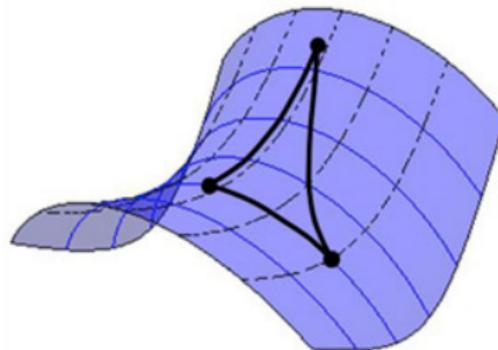
Accélérations et géométrie



- ▶ **Disque en rotation** : contraction de Lorentz dans la direction du mouvement (pas pour le rayon)
- **Circonférence** $< 2\pi \times$ **rayon**
- la **géométrie euclidienne n'est plus valable!**
- l'espace semble « **courbe** » et de **géométrie relative**



positively curved space
sphere



negatively curved space
saddle

Gravitation et géométrie

- ▶ **Principe d'équivalence** → un champ de **gravitation** doit aussi **affecter la géométrie**
- ▶ Extension de la formulation de Minkowski de la relativité restreinte → la gravitation témoigne de la **courbure de l'espace-temps**
- ▶ le principe de relativité est valable pour **tous les observateurs** et **tous les phénomènes physiques**, mais cela nécessite de compliquer la **géométrie apparente** de l'espace et du temps : ils semblent **courbes** à un observateur accéléré
- ▶ en **présence de masse et d'énergie**, la **géométrie réelle** de l'espace-temps est modifiée : l'espace-temps n'est plus absolue mais affecté par son contenu et la **courbure** se traduit par une déviation des trajectoires → **gravitation**

Gravitation et géométrie

- ▶ **Principe d'équivalence** → un champ de **gravitation** doit aussi **affecter la géométrie**
- ▶ Extension de la formulation de Minkowski de la relativité restreinte → **la gravitation témoigne de la courbure de l'espace-temps**
- ▶ le principe de relativité est valable pour **tous les observateurs** et **tous les phénomènes physiques**, mais cela nécessite de compliquer la **géométrie apparente** de l'espace et du temps : ils semblent **courbes** à un observateur accéléré
- ▶ en **présence de masse et d'énergie**, la **géométrie réelle** de l'espace-temps est modifiée : **l'espace-temps n'est plus absolue** mais affecté par son contenu et la **courbure** se traduit par une déviation des trajectoires → **gravitation**

Gravitation et géométrie

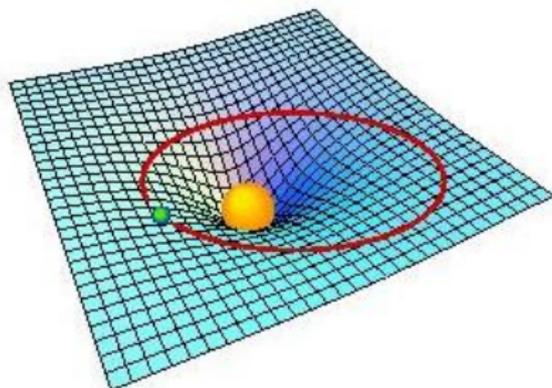
- ▶ **Principe d'équivalence** → un champ de gravitation doit aussi affecter la géométrie
- ▶ Extension de la formulation de Minkowski de la relativité restreinte → la gravitation témoigne de la **courbure de l'espace-temps**
- ▶ le principe de relativité est valable pour tous les observateurs et tous les phénomènes physiques, mais cela nécessite de compliquer la géométrie apparente de l'espace et du temps : ils semblent courbes à un observateur accéléré
- ▶ en présence de masse et d'énergie, la géométrie réelle de l'espace-temps est modifiée : l'espace-temps n'est plus absolue mais affecté par son contenu et la courbure se traduit par une déviation des trajectoires → gravitation

Gravitation et géométrie

- ▶ **Principe d'équivalence** → un champ de gravitation doit aussi affecter la géométrie
- ▶ Extension de la formulation de Minkowski de la relativité restreinte → la gravitation témoigne de la **courbure de l'espace-temps**
- ▶ le principe de relativité est valable pour tous les observateurs et tous les phénomènes physiques, mais cela nécessite de compliquer la géométrie apparente de l'espace et du temps : ils semblent courbes à un observateur accéléré
- ▶ en présence de masse et d'énergie, la géométrie réelle de l'espace-temps est modifiée : l'espace-temps n'est plus absolue mais affecté par son contenu et la courbure se traduit par une déviation des trajectoires → gravitation

Gravitation relativiste

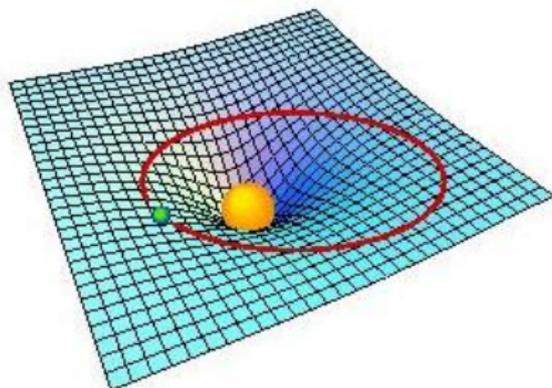
- ▶ description **relativiste** de la **gravitation** requiert un **espace-temps courbe**
- ▶ la présence d'énergie ou de matière modifie ses propriétés
 - la gravitation affecte aussi le « **rythme du temps** » qui devient **local**
 - la **lumière** doit être également **déviée** par un champ de gravitation



Raison pour laquelle la Terre orbite autour du Soleil selon la relativité générale

Gravitation relativiste

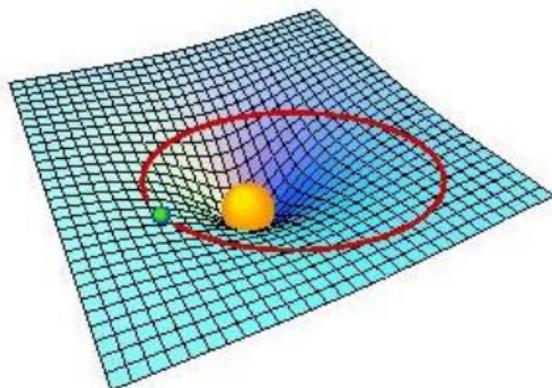
- ▶ description **relativiste** de la **gravitation** requiert un **espace-temps courbe**
- ▶ la présence d'énergie ou de matière modifie ses propriétés
 - la gravitation affecte aussi le « rythme du temps » qui devient **local**
 - la lumière doit être également **déviée** par un champ de gravitation



Raison pour laquelle la Terre orbite autour du Soleil selon la relativité générale

Gravitation relativiste

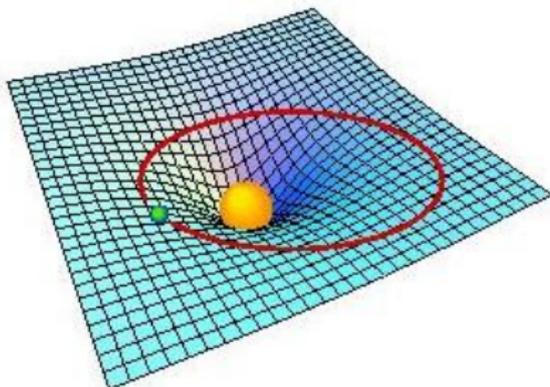
- ▶ description **relativiste** de la **gravitation** requiert un **espace-temps courbe**
- ▶ la présence d'énergie ou de matière modifie ses propriétés
 - la **gravitation affecte aussi le « rythme du temps »** qui devient **local**
 - la **lumière** doit être également **déviée** par un champ de gravitation



Raison pour laquelle la Terre orbite autour du Soleil selon la relativité générale

Gravitation relativiste

- ▶ description **relativiste** de la **gravitation** requiert un **espace-temps courbe**
- ▶ la présence d'énergie ou de matière modifie ses propriétés
 - la **gravitation affecte aussi le « rythme du temps »** qui devient **local**
 - la **lumière** doit être également **déviée** par un champ de gravitation



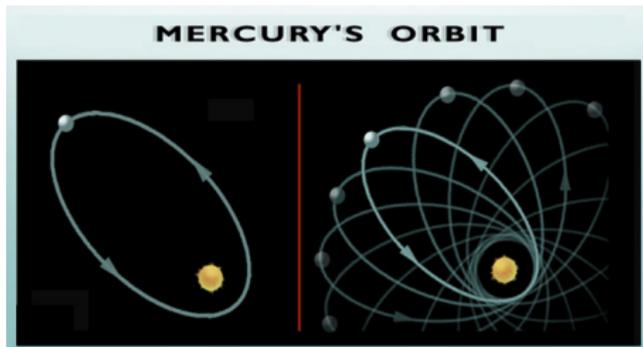
Raison pour laquelle la Terre orbite autour du Soleil selon la relativité générale

Prédictions et tests directs de la relativité générale

Avance du périhélie de Mercure :

Mouvement de Mercure imparfaitement compris : orbite tourne plus vite que prévu par les calculs newtoniens

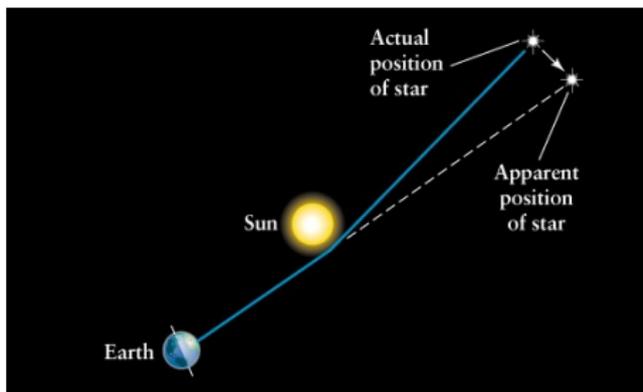
→ **post-diction** du résultat exact



Déviatoin de la lumière :

Lumière d'étoiles lointaines déviée en passant à côté du Soleil

→ plus facile à constater pendant une **éclipse de Soleil (1919, Eddington)**

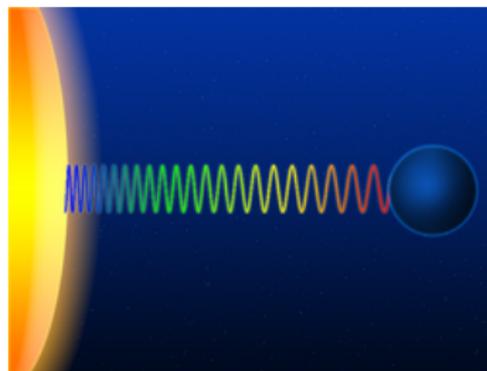
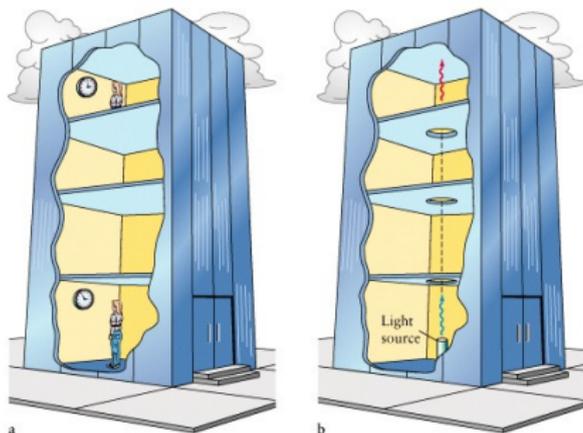


Mirage gravitationnel : plusieurs images d'une même galaxie lointaine



Effet Einstein et décalage vers le rouge

- ▶ influence d'un champ de gravitation sur le temps : **crucial pour le GPS**
- ▶ une onde émise avec une **certaine fréquence** dans un champ de gravitation intense aura une **fréquence plus faible** là où le champ est moins intense
→ **décalage vers le rouge gravitationnel** (\neq effet Doppler lié à un mouvement relatif)
- ▶ vérifié dans le **champ de gravitation terrestre** (distance de 22 mètres) dès 1960 par Pound et Rebka



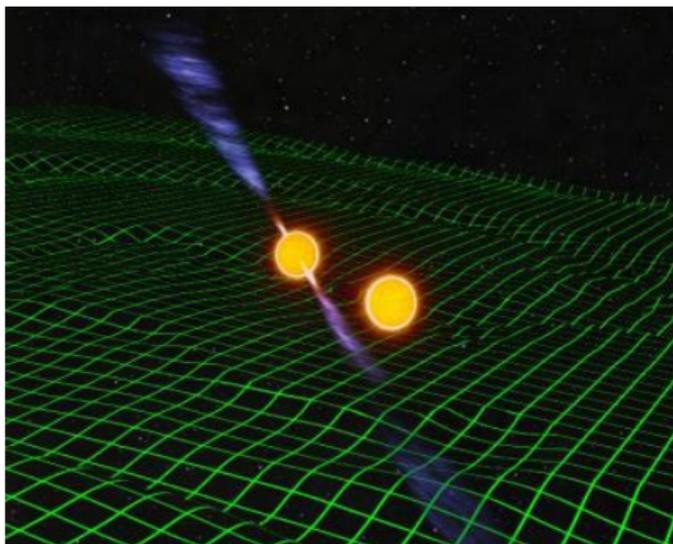
Trous noirs

- ▶ **trou noir** = région de l'espace-temps dont rien ne sort (même la lumière)
 - ▶ frontière = **horizon** du trou noir
 - **accélération infinie** pour rester **immobile** à cet endroit
 - **décalage vers le rouge infini** par rapport aux observateurs lointains : **matière semble gelée / temps arrêté** (cf. Interstellar)
-
- ▶ résidu d'étoiles massives en fin de vie
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible
 - ▶ **observables** par **effet gravitationnel** sur objets proches



Nouvelle fenêtre sur l'Univers : les ondes gravitationnelles

- ▶ espace-temps dynamique → possibilité d'avoir des **ondes gravitationnelles**
- ▶ pas encore directement observées, mais existence démontrée par **observation minutieuse d'un pulsar binaire** → test précis de la relativité générale (Nobel 1993, Hulse & Taylor)
- ▶ « télescopes gravitationnels » (VIRGO, LIGO, LISA) en service ou en projet

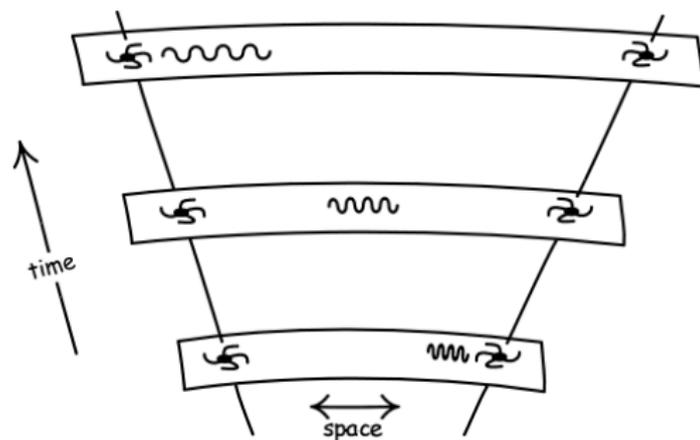


Décalage vers le rouge et expansion de l'Univers

- ▶ espace-temps \equiv objet physique \rightarrow Univers aussi \rightarrow cosmologie scientifique
- ▶ 1922-1940, Friedman, Lemaître, Hubble, Gamow : idée d'un Univers dynamique en expansion (grands décalages vers le rouge observés)
- ▶ espace-temps dynamique et PAS une explosion !
- ▶ Lemaître : par le passé, \ll atome primitif \gg (modèle du \ll Big Bang \gg)

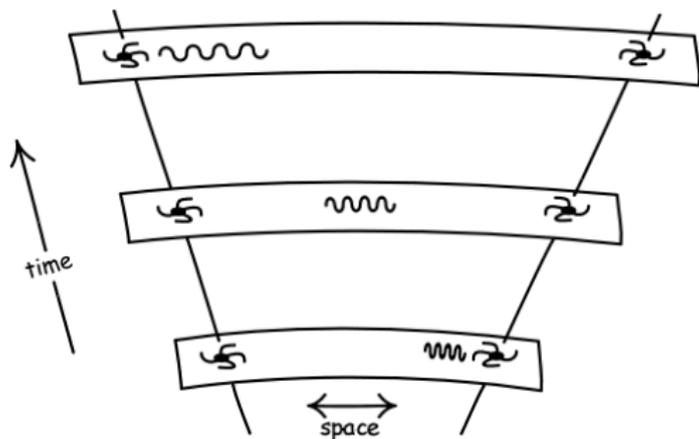
Décalage vers le rouge et expansion de l'Univers

- ▶ espace-temps \equiv objet physique \rightarrow Univers aussi \rightarrow cosmologie scientifique
- ▶ **1922-1940, Friedman, Lemaître, Hubble, Gamow** : idée d'un Univers dynamique en expansion (grands décalages vers le rouge observés)
- ▶ espace-temps dynamique et PAS une explosion !
- ▶ Lemaître : par le passé, \ll atome primitif \gg (modèle du \ll Big Bang \gg)



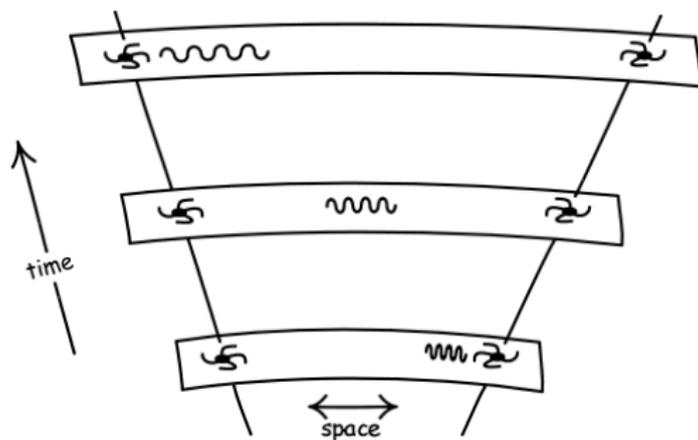
Décalage vers le rouge et expansion de l'Univers

- ▶ espace-temps \equiv objet physique \rightarrow Univers aussi \rightarrow **cosmologie scientifique**
- ▶ **1922-1940, Friedman, Lemaître, Hubble, Gamow** : idée d'un **Univers dynamique en expansion** (grands décalages vers le rouge observés)
- ▶ **espace-temps dynamique** et **PAS une explosion !**
- ▶ **Lemaître** : par le passé, \ll **atome primitif** \gg (modèle du \ll **Big Bang** \gg)

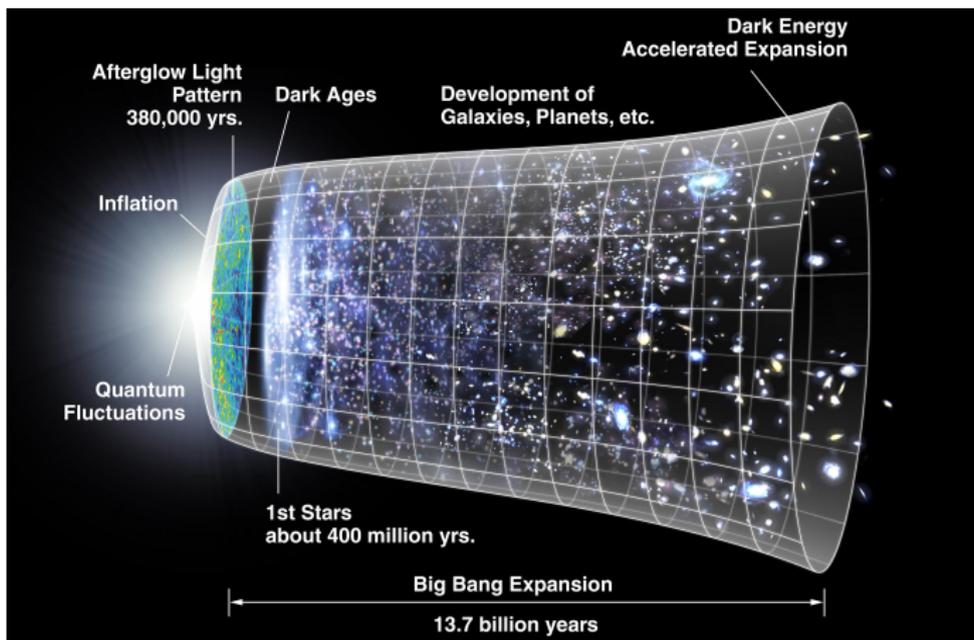


Décalage vers le rouge et expansion de l'Univers

- ▶ espace-temps \equiv objet physique \rightarrow Univers aussi \rightarrow cosmologie scientifique
- ▶ 1922-1940, **Friedman, Lemaître, Hubble, Gamow** : idée d'un Univers dynamique en expansion (grands décalages vers le rouge observés)
- ▶ espace-temps dynamique et **PAS une explosion !**
- ▶ **Lemaître** : par le passé, « atome primitif » (modèle du « Big Bang »)

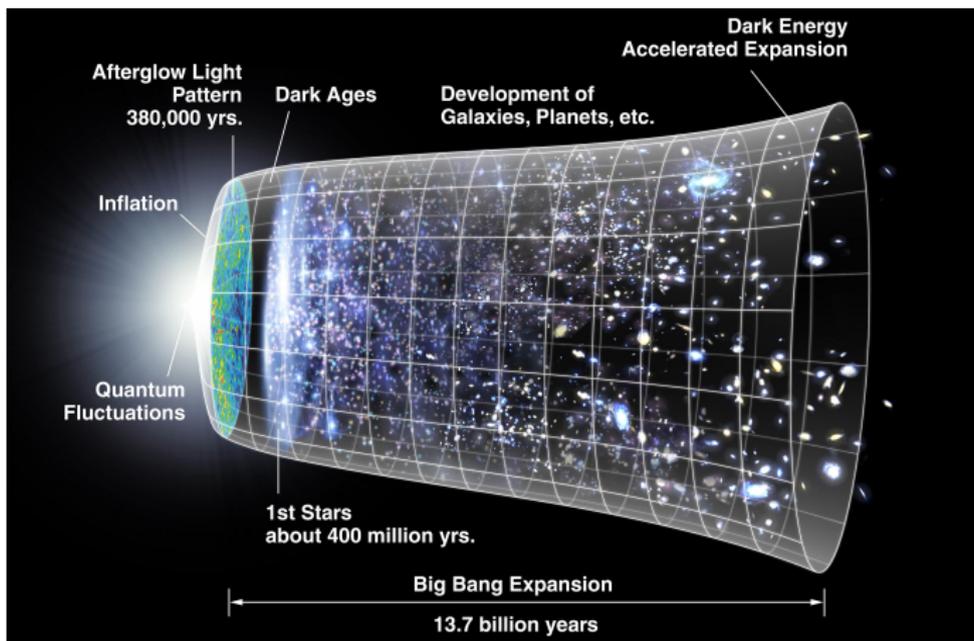


Univers primordial et commencement du temps



plasma primordial et « naissance » de l'espace-temps → frontière
 si on revient trop en arrière dans l'histoire, la notion de temps perd son sens !

Univers primordial et commencement du temps



plasma primordial et « naissance » de l'espace-temps → frontière
 si on revient trop en arrière dans l'histoire, **la notion de temps perd son sens !**

Résumé

Principe de relativité

- ▶ **principe très fécond** pour la physique depuis Galilée jusqu'à Einstein
- ▶ la **relativité restreinte** et la **relativité générale** sont deux théories très élégantes mathématiquement et fortement soutenues par les expériences
- ▶ nombreuses vérifications de l'une et l'autre en **astrophysique** et même dans la **vie de tous les jours** (laser, radioactivité, antimatière utilisée en médecine, GPS, etc.)
- ▶ le principe de relativité est devenu un **principe (de symétrie) fondamental** de la physique et il est incorporé **dans toutes les théories modernes (en particulier physique des particules)**

Résumé

Principe de relativité

- ▶ principe très fécond pour la physique depuis Galilée jusqu'à Einstein
- ▶ la relativité restreinte et la relativité générale sont deux théories très élégantes mathématiquement et fortement soutenues par les expériences
- ▶ nombreuses vérifications de l'une et l'autre en astrophysique et même dans la vie de tous les jours (laser, radioactivité, antimatière utilisée en médecine, GPS, etc.)
- ▶ le principe de relativité est devenu un principe (de symétrie) fondamental de la physique et il est incorporé dans toutes les théories modernes (en particulier physique des particules)

Résumé

Principe de relativité

- ▶ principe très fécond pour la physique depuis Galilée jusqu'à Einstein
- ▶ la relativité restreinte et la relativité générale sont deux théories très élégantes mathématiquement et fortement soutenues par les expériences
- ▶ nombreuses vérifications de l'une et l'autre en astrophysique et même dans la vie de tous les jours (laser, radioactivité, antimatière utilisée en médecine, GPS, etc.)
- ▶ le principe de relativité est devenu un principe (de symétrie) fondamental de la physique et il est incorporé dans toutes les théories modernes (en particulier physique des particules)

Résumé

Principe de relativité

- ▶ principe très fécond pour la physique depuis Galilée jusqu'à Einstein
- ▶ la relativité restreinte et la relativité générale sont deux théories très élégantes mathématiquement et fortement soutenues par les expériences
- ▶ nombreuses vérifications de l'une et l'autre en astrophysique et même dans la vie de tous les jours (laser, radioactivité, antimatière utilisée en médecine, GPS, etc.)
- ▶ le principe de relativité est devenu un principe (de symétrie) fondamental de la physique et il est incorporé dans toutes les théories modernes (en particulier physique des particules)

Perspectives

mais...

- ▶ questions encore ouvertes : matière noire ? énergie noire ? gravitation aux petites échelles ? structure interne des trous noirs ?
- ▶ les implications sur nos conceptions de la matière (masse/énergie), de l'espace et du temps sont révolutionnaires et pas complètement comprises
- ▶ on sait qu'aux énergies très élevées la relativité générale ne doit plus être adaptée : elle ne prend pas en compte les effets quantiques
- ▶ selon certaines théories de physique des particules, on pourrait même la mettre en défaut autrement (dimensions supplémentaires, etc.)

Perspectives

mais...

- ▶ **questions encore ouvertes** : matière noire ? énergie noire ? gravitation aux petites échelles ? structure interne des trous noirs ?
- ▶ les implications sur nos conceptions de la matière (masse/énergie), de l'espace et du temps sont révolutionnaires et pas complètement comprises
- ▶ on sait qu'aux énergies très élevées la relativité générale ne doit plus être adaptée : elle ne prend pas en compte les effets quantiques
- ▶ selon certaines théories de physique des particules, on pourrait même la mettre en défaut autrement (dimensions supplémentaires, etc.)

Perspectives

mais...

- ▶ **questions encore ouvertes** : matière noire ? énergie noire ? gravitation aux petites échelles ? structure interne des trous noirs ?
- ▶ les implications sur nos **conceptions de la matière (masse/énergie), de l'espace et du temps** sont révolutionnaires et pas complètement comprises
- ▶ on sait qu'aux **énergies très élevées** la relativité générale ne doit plus être adaptée : elle ne prend **pas en compte les effets quantiques**
- ▶ selon certaines théories de physique des particules, on pourrait même la mettre en défaut autrement (**dimensions supplémentaires**, etc.)

Perspectives

mais...

- ▶ **questions encore ouvertes** : matière noire ? énergie noire ? gravitation aux petites échelles ? structure interne des trous noirs ?
- ▶ les implications sur nos **conceptions de la matière (masse/énergie), de l'espace et du temps** sont révolutionnaires et pas complètement comprises
- ▶ on sait qu'aux **énergies très élevées** la relativité générale ne doit plus être adaptée : elle ne prend **pas en compte les effets quantiques**
- ▶ selon certaines théories de physique des particules, on pourrait même la mettre en défaut autrement (**dimensions supplémentaires**, etc.)

Perspectives

mais...

- ▶ **questions encore ouvertes** : matière noire ? énergie noire ? gravitation aux petites échelles ? structure interne des trous noirs ?
- ▶ les implications sur nos **conceptions de la matière (masse/énergie), de l'espace et du temps** sont révolutionnaires et pas complètement comprises
- ▶ on sait qu'aux **énergies très élevées** la relativité générale ne doit plus être adaptée : elle ne prend **pas en compte les effets quantiques**
- ▶ selon certaines théories de physique des particules, on pourrait même la mettre en défaut autrement (**dimensions supplémentaires**, etc.)

Perspectives

mais...

- ▶ **questions encore ouvertes** : matière noire ? énergie noire ? gravitation aux petites échelles ? structure interne des trous noirs ?
- ▶ les implications sur nos **conceptions de la matière (masse/énergie), de l'espace et du temps** sont révolutionnaires et pas complètement comprises
- ▶ on sait qu'aux **énergies très élevées** la relativité générale ne doit plus être adaptée : elle ne prend **pas en compte les effets quantiques**
- ▶ selon certaines théories de physique des particules, on pourrait même la mettre en défaut autrement (**dimensions supplémentaires**, etc.)

Toutes les approches modernes semblent aller dans le sens d'une révolution encore plus grande à venir de nos conceptions de la matière, de l'espace et du temps...
 mais les théories sont encore incomplètes et spéculatives : du travail pour les chercheurs actuels (au LMPT) mais aussi les générations à suivre...

Références

Livres sur la relativité générale et ses conséquences :

- [S. Collin-Zahn](#), *Des quasars aux trous noirs*, EDP Sciences (2009)
- [T. Damour](#), *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi (2005)
- [J. Eisenstaedt](#), *Einstein et la relativité générale*, CNRS Éditions (2007)
- [B. Greene](#), *L'Univers élégant*, Folio Essais, Gallimard (2005)
- [JP. Luminet](#), *Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre*, Fayard (2010)
- [Singh](#), *Le roman du Big Bang*, JC Lattès (2005)
- [K. Thorne](#), *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion (1997)

Sur le web :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : dossier sur la relativité restreinte
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : dossier sur la relativité générale
- à chercher (youtube, etc.) « ce qu'Einstein ne savait pas encore » (3 parties : vidéos accompagnant le livre « l'Univers élégant »)