

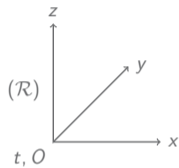
## Relativité en général

Xavier Garrido

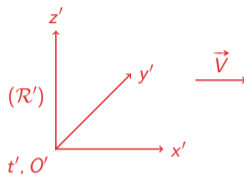
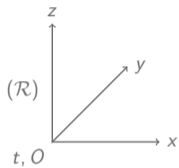
 [xavier.garrido@u-psud.fr](mailto:xavier.garrido@u-psud.fr)

- ▶ Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  **dans tout référentiel galiléen**

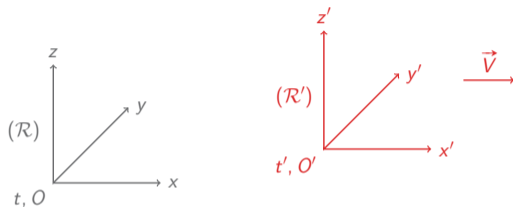
- Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  **dans tout référentiel galiléen**



- Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  **dans tout référentiel galiléen**



- Lois de Newton (1687):  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  **dans tout référentiel galiléen**



- Transformation galiléenne → **loi de composition des vitesses**

$$\begin{cases} t' = t \\ x' = x - Vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \rightarrow v = v' + V$$

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne

- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne



- ▶ Galilée (1564 – 1642), premier à considérer que **la vitesse de la lumière est finie**
- ▶ Premières mesures de la vitesse de la lumière : Rømer (satellite de Jupiter – 1676), Bradley (aberration stellaire – 1725)
- ▶ **La lumière et sa vitesse** ne satisfont pas à la loi de composition galiléenne des vitesses
- ▶ Les lois de l'électromagnétisme (Maxwell – 1865) ne sont par ailleurs pas invariantes par transformation galiléenne

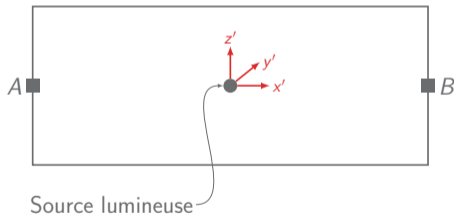
- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

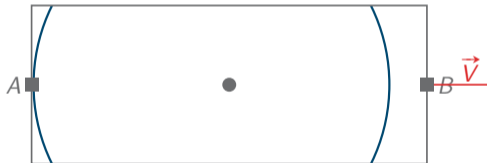
- ▶ Simultanéité des événements

# La relativité selon Einstein

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Simultanéité des événements



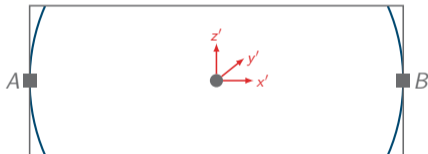
$$t_A = \frac{\ell}{2(c+V)} \quad \ell \rightarrow t_A < t_B$$

**La notion de simultanéité, de temps est relative à l'observateur**

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Contraction des longueurs



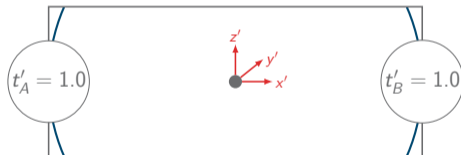
$$t'_A = t'_B = \frac{\ell}{2c}$$



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Contraction des longueurs

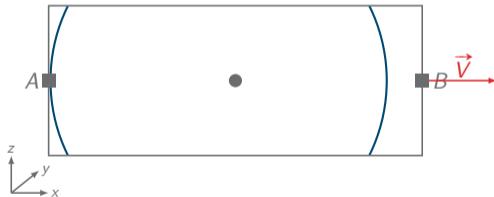


$$t'_A = t'_B = \frac{\ell}{2c}$$

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

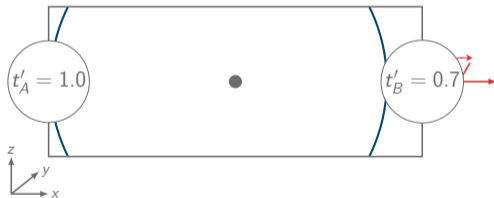
- ▶ Contraction des longueurs



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

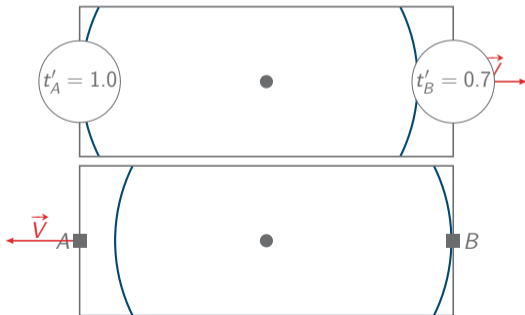
- ▶ Contraction des longueurs



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

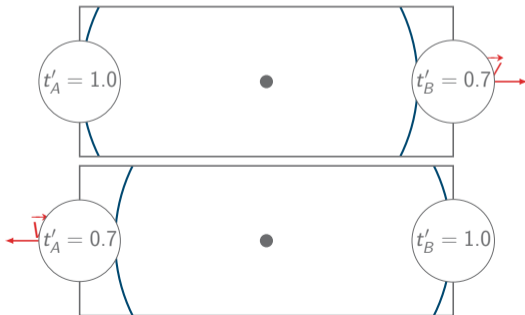
- ▶ Contraction des longueurs



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

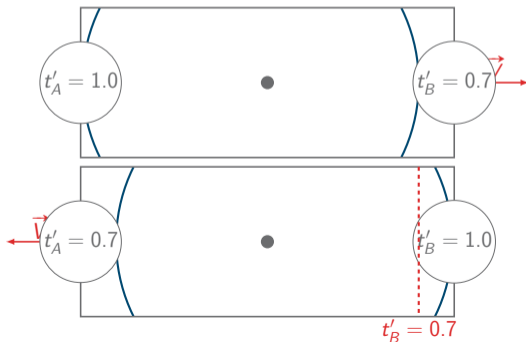
- ▶ Contraction des longueurs



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

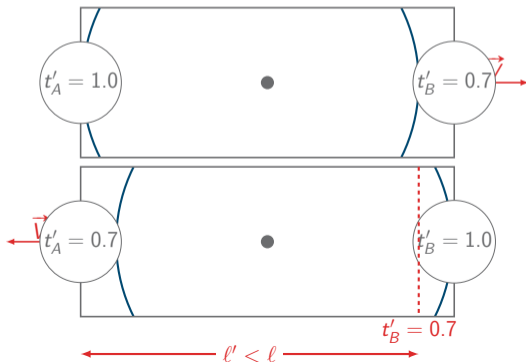
- ▶ Contraction des longueurs



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Contraction des longueurs



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Relativité restreinte

- ▶ Transformation de Lorentz → nouvelle loi de composition des vitesses

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

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

- ▶ Facteur de Lorentz :

- ▶ Vitesse du train  $V = 200 \text{ km/h}$  :  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-7}$  et  $\gamma \sim 1.00000000000000173$
- ▶ Au repos,  $V = 0$ ,  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$
- ▶  $V \rightarrow c$ ,  $\beta \rightarrow 1$  et  $\gamma \rightarrow \infty$



- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Relativité restreinte

- ▶ Transformation de Lorentz → nouvelle loi de composition des vitesses

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

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

- ▶ Facteur de Lorentz :

- ▶ Vitesse du train  $V = 200 \text{ km/h}$  :  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-7}$  et  $\gamma \sim 1.00000000000000173$
- ▶ Au repos,  $V = 0$ ,  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$
- ▶  $V \rightarrow c$ ,  $\beta \rightarrow 1$  et  $\gamma \rightarrow \infty$

- ▶ Einstein (1905) postule que **la vitesse de la lumière est constante** quelque soit le référentiel

$$c = \text{constante} \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$

- ▶ Relativité restreinte

- ▶ Transformation de Lorentz → nouvelle loi de composition des vitesses

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

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

- ▶ Facteur de Lorentz :

- ▶ Vitesse du train  $V = 200 \text{ km/h}$  :  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-7}$  et  $\gamma \sim 1.00000000000000173$
- ▶ Au repos,  $V = 0$ ,  $\beta = 0$  et  $\gamma = 1$
- ▶  $V \rightarrow c$ ,  $\beta \rightarrow 1$  et  $\gamma \rightarrow \infty$

► Contraction des longueurs

$$l = \frac{l_0}{\gamma} \text{ où } l_0 \text{ est la longueur dans le référentiel au repos}$$

Pour un train à  $V = 200 \text{ km/h}$ ,  $l_0 - l \sim 7 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

► Dilatation des intervalles de temps

$$\tau = \gamma \cdot \tau_0 \text{ où } \tau_0 \text{ est l'intervalle de temps dans le référentiel au repos}$$

Découverte du muon – Anderson 1936 :  $\tau_0 = 2.2 \mu\text{s}$

- ▶ Contraction des longueurs

$$l = \frac{l_0}{\gamma} \text{ où } l_0 \text{ est la longueur dans le référentiel au repos}$$

Pour un train à  $V = 200 \text{ km/h}$ ,  $l_0 - l \sim 7 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

- ▶ **Dilatation des intervalles de temps**

$\tau = \gamma \cdot \tau_0$  où  $\tau_0$  est l'intervalle de temps dans le référentiel au repos

Découverte du muon – Anderson 1936 :  $\tau_0 = 2.2 \mu\text{s}$

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = T + \underbrace{m_0 c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein - 1907)

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0c^2 = T + \underbrace{m_0c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein - 1907)

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $E = mc^2 = \gamma m_0c^2 = T + \underbrace{m_0c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein - 1907)

- ▶ Conservation de l'impulsion : **augmentation de la masse inertielle**

$$m = \gamma \cdot m_0 \text{ où } m_0 \text{ est la masse au repos ou masse invariante}$$

- ▶ Accélérer jusqu'à  $c \rightarrow$  masse infinie et donc énergie infinie
- ▶ Énergie cinétique classique  $T = \frac{1}{2}m_0v^2$  devient en relativité restreinte

$$T = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2$$

- ▶ Énergie totale  $\mathbf{E} = \mathbf{mc}^2 = \gamma\mathbf{m_0c}^2 = \mathbf{T} + \underbrace{m_0c^2}_{\text{énergie au repos}}$  (Einstein - 1907)

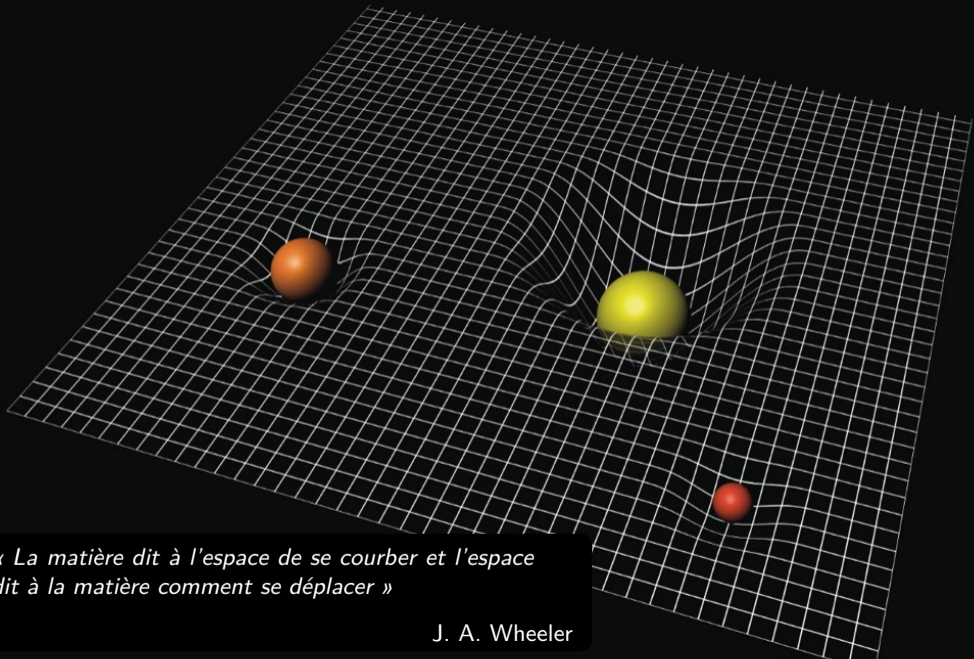


- ▶ Einstein (1915) : intégration de la gravitation au sein de la relativité restreinte

- ▶ Einstein (1915) : intégration de la gravitation au sein de la relativité restreinte

**Relativité Générale = Théorie de la gravitation**

= Relativité Restreinte + **Principe d'équivalence**



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

J. A. Wheeler

- ▶ Première vérification : **avance du périhélie de Mercure**

*« Voici venue la fin de mes tourments. Ce qui m'a fait le plus plaisir, c'est de constater que ma théorie concorde avec le déplacement du périhélie de Mercure »*

- ▶ Première prédiction vérifiée : **déviations de la lumière**

- ▶ Observation de la déviation des rayons lumineux d'une étoile pendant une éclipse totale du soleil – Arthur Eddington 1919
- ▶ Effet de lentille gravitationnelle

- ▶ Découverte des ondes gravitationnelles : LIGO/VIRGO 2016

- ▶ Première vérification : **avance du périhélie de Mercure**

*« Voici venue la fin de mes tourments. Ce qui m'a fait le plus plaisir, c'est de constater que ma théorie concorde avec le déplacement du périhélie de Mercure »*

- ▶ Première prédiction vérifiée : **déviations de la lumière**

- ▶ Observation de la déviation des rayons lumineux d'une étoile pendant une éclipse totale du soleil – Arthur Eddington 1919
- ▶ Effet de lentille gravitationnelle

- ▶ Découverte des ondes gravitationnelles : LIGO/VIRGO 2016

- ▶ Première vérification : **avance du périhélie de Mercure**

*« Voici venue la fin de mes tourments. Ce qui m'a fait le plus plaisir, c'est de constater que ma théorie concorde avec le déplacement du périhélie de Mercure »*

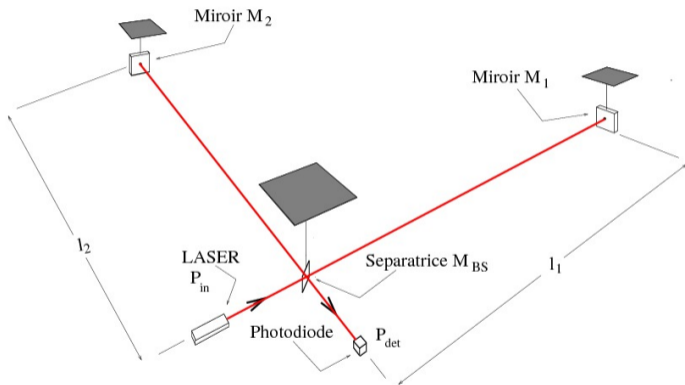
- ▶ Première prédiction vérifiée : **déviations de la lumière**

- ▶ Observation de la déviation des rayons lumineux d'une étoile pendant une éclipse totale du soleil – Arthur Eddington 1919
- ▶ Effet de lentille gravitationnelle

- ▶ Découverte des ondes gravitationnelles : LIGO/VIRGO 2016

# Découverte des ondes gravitationnelles

Phys. Rev. Lett. 116, 2016



# Découverte des ondes gravitationnelles

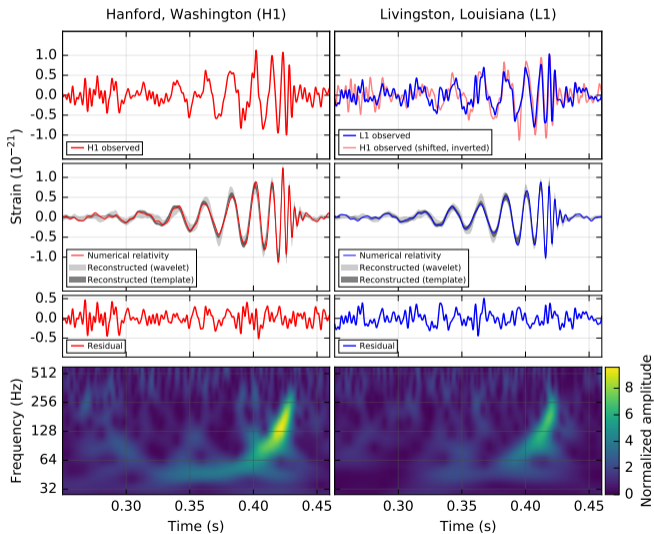
Phys. Rev. Lett. 116, 2016 [↗](#)





# Découverte des ondes gravitationnelles

Phys. Rev. Lett. 116, 2016



- ▶ 1<sup>er</sup> nuage → **Mécanique Quantique**
  - ▶ Nature corpusculaire des ondes e.m.  $E = h\nu$
  - ▶ Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$
  - ▶ Interactions quantifiées – **particules médiatrices**
  - ▶ Nombres quantiques
  - ▶ Théorie **probabiliste** (non déterministe)
  
- ▶ 2<sup>nd</sup> nuage → **théories de la relativité**
  - ▶ Plus de temps ni d'espace absolu – "tout est relatif"
  - ▶ Équivalence masse – énergie  $E = mc^2$
  - ▶ Notions de temps et masse propres
  - ▶ important surtout à haute vitesse/énergie (physique subatomique, astrophysique)
  
- ▶ Dans les deux cas il s'agit de généralisations de la physique "classique" (qui demeure "valable" à basse énergie et grande échelle)

- ▶ 1<sup>er</sup> nuage → **Mécanique Quantique**
  - ▶ Nature corpusculaire des ondes e.m.  $E = h\nu$
  - ▶ Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$
  - ▶ Interactions quantifiées – **particules médiatrices**
  - ▶ Nombres quantiques
  - ▶ Théorie **probabiliste** (non déterministe)
  
- ▶ 2<sup>nd</sup> nuage → **théories de la relativité**
  - ▶ Plus de temps ni d'espace absolu – "tout est relatif"
  - ▶ Équivalence masse – énergie  $E = mc^2$
  - ▶ Notions de temps et masse propres
  - ▶ important surtout à **haute vitesse/énergie** (physique subatomique, astrophysique)
  
- ▶ Dans les deux cas il s'agit de généralisations de la physique "classique" (qui demeure "valable" à basse énergie et grande échelle)

- ▶ 1<sup>er</sup> nuage → **Mécanique Quantique**
  - ▶ Nature corpusculaire des ondes e.m.  $E = h\nu$
  - ▶ Nature ondulatoire des corpuscules  $\lambda = h/p$
  - ▶ Interactions quantifiées – **particules médiatrices**
  - ▶ Nombres quantiques
  - ▶ Théorie **probabiliste** (non déterministe)
  
- ▶ 2<sup>nd</sup> nuage → **théories de la relativité**
  - ▶ Plus de temps ni d'espace absolu – "tout est relatif"
  - ▶ Équivalence masse – énergie  $E = mc^2$
  - ▶ Notions de temps et masse propres
  - ▶ important surtout à **haute vitesse/énergie** (physique subatomique, astrophysique)
  
- ▶ Dans les deux cas il s'agit de généralisations de la physique "classique" (qui demeure "valable" à basse énergie et grande échelle)

- ▶ Cours en ligne de Richard Taillet – [Université de Savoie](#) ↗
- ▶ Notes de cours de Nicolas Pavloff – [Université Paris-Sud](#) ↗
- ▶ Notes de cours de Patrick Puzo