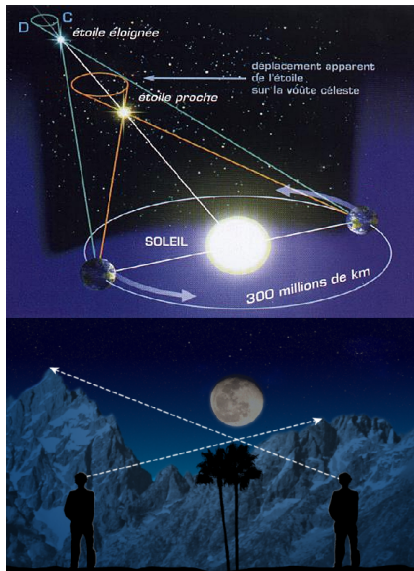


Le second nuage : questions autour de la lumière

- Quelle vitesse? infinie ou pas? cf débats autour de la réfraction (Newton : la lumière va + vite dans l'eau)
- mesures astronomiques (Rømer, **Bradley**) : grande vitesse, "voit" le mvt de la Terre
- mesure au sol (+ précises) : vitesse fct du milieu (maxi dans le "vide") - Fizeau, Foucault, Fresnel 1850-1870
- Maxwell → lumière = onde e.m.
- ⇒ milieu de propagation ("ether")? mvt de la Terre / celui-ci?
- incompatibilité Galilée/Newton - Maxwell :
 - ▶ interaction e.m. pas instantannée
 - ▶ eq. de Maxwell pas invariantes si transfo Galiléenne

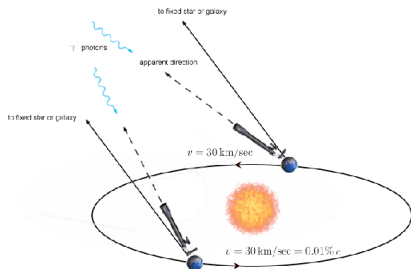
Bradley et la parallaxe (~ 1730)

- dès ~ 1650 on observe des déplacements apparents des étoiles "fixes"
- est-ce la **parallaxe**? (permet de mesurer la distance)
- ~ 1720 Bradley étudie systématiquement ces déplacements
- ... ce n'est pas la parallaxe! \exists déplacement perpendiculaire au plan (Terre, Soleil, étoile)
- ~ 1730 ... longues et patientes mesures : \Rightarrow **l'aberration**
- \Rightarrow la lumière se déplace à (grande) vitesse finie; la Terre aussi (dans le système solaire...)!
- une des 1eres mesure de la vitesse de la lumière (c)!
- \Rightarrow **mvt "absolu" de la Terre / ether** ("porteur" des ondes e.m.)?



Bradley et la parallaxe (~ 1730)

- dès ~ 1650 on observe des déplacements apparents des étoiles "fixes"
- est-ce la **parallaxe**? (permet de mesurer la distance)
- ~ 1720 Bradley étudie systématiquement ces déplacements
- ... ce n'est pas la parallaxe! \exists déplacement perpendiculaire au plan (Terre, Soleil, étoile)
- ~ 1730 ... longues et patientes mesures : \Rightarrow **l'aberration**
- \Rightarrow la lumière se déplace à (grande) vitesse finie; la Terre aussi (dans le système solaire...)!
- une des 1eres mesure de la vitesse de la lumière (c)!
- \Rightarrow **mvt "absolu" de la Terre / ether** ("porteur" des ondes e.m.)?



The apparent change in position of a fixed star or galaxy during an earth year is called aberration of starlight and its solution will be by means of derivation of relativistic aberration of starlight which Einstein accomplished in special relativity, 1905.



Questions sur la lumière (J. C. Maxwell)

- **vitesse de la lumière** (ds le vide? ds l'ether?) = un **paramètre fondamental**
 - **interaction e.m. à vitesse finie** (pas comme la gravitation)
- un **milieu de propagation** ("ether")?
 - mvt de la Terre / ether?
 - **mesure possible** en comparant les instants des éclipses de Io ds différentes configurations
 - Maxwell correspond avec D. Todd (un astronome) à ce sujet (1879)
 - Discute cette mesure en labo dans une de ces lettres, publiée en hommage posthume (Nature) ...
 - ... où il trouve que **l'effet est trop petit pour ça** : $\sim 10^{-15}$

Questions sur la lumière (J. C. Maxwell)

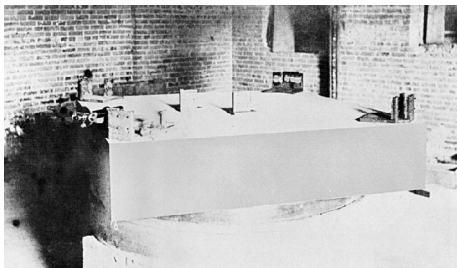
- **vitesse de la lumière** (ds le vide? ds l'ether?) = un **paramètre fondamental**
→ **interaction e.m. à vitesse finie** (pas comme la gravitation)
- un **milieu de propagation** ("ether")?
mvt de la Terre / ether?
→ **mesure possible** en comparant les instants des éclipses de Io ds différentes configurations
Maxwell correspond avec D. Todd (un astronome) à ce sujet (1879)
Discute cette mesure en labo dans une de ces lettres, publiée en hommage posthume (Nature) ...
... où il trouve que **l'effet est trop petit pour ça : $\sim 10^{-15}$**



lettre lue par Michelson

Experience(s) de Michelson

Utilise un interféromètre (inventé pour l'occasion) \Rightarrow gain en précision (donc très sensible à l'environnement)



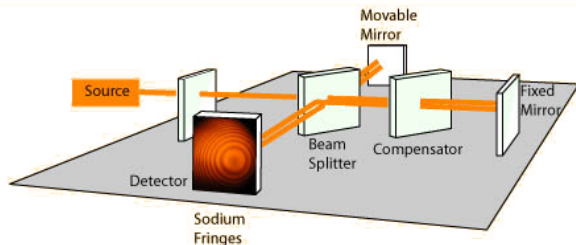
rapport des temps de vol attendu (mvt selon un bras) :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pas d'effet observé (malgré de nombreux perfectionnements)

Experience(s) de Michelson

Utilise un interféromètre (inventé pour l'occasion) \Rightarrow gain en précision (donc très sensible à l'environnement)

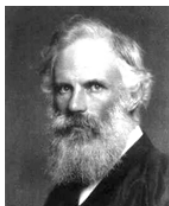


rapport des temps de vol attendu (mvt selon un bras) :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pas d'effet observé (malgré de nombreux perfectionnements)

FitzGerald, Lorentz : les 1ers pas



G. F. FitzGerald (1851-1901)
brilliant mathematical physicist



H. A. Lorentz (1853-1928)
Nobel Prize in Physics 1902

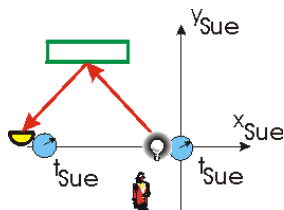
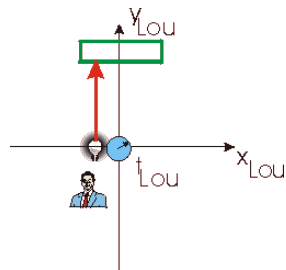
FitzGerald : on peut réconcilier $c = \text{cste}$ en changeant les distances
(facteur de "contraction" $1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$)

Lorentz : nécessité d'introduire aussi un "temps" local (fct du référentiel!?) pour conserver les eq. de Maxwell (temps qui change en fct du référentiel avec le même facteur)

Einstein (1905, et après)

- pose comme **principe l'invariance** des lois physiques (et donc de la vitesse de la lum. et des eq. de Maxwell) / mvt à **vitesse cste (Relativité restreinte)**
- examine les (multiples) conséquences de ce principe (**de relativité**) :
- plus de temps 'absolu' : temps = mesure physique
- outil de mesure = la lumière
- \Rightarrow temps et distance (espace) intimement liés (temps mesuré avec lumière + étalon, espace avec lumière + horloge) \Rightarrow espace-temps
- et **relatifs** à l'observateur - pas de **simultanéité** absolue non plus!

Dilatation des temps

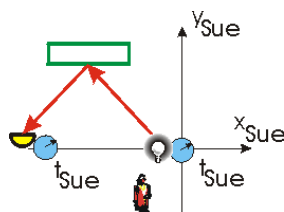
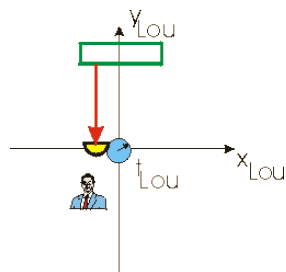


Sue est en mvt / Lou; tous les 2 mesurent le temps de trajet de la lumière
Pour Sue le trajet de la lumière est plus long \Rightarrow le temps écoulé est plus long (!)
 \Leftrightarrow "le temps de Lou va plus vite"

Ex.1 : les muons du rayonnement cosmique vivent plus "longtemps" dans notre référentiel que leur durée de vie propre $\sim 2.2\mu s$ - ils volent qq 10aines de km à une vitesse proche de c

Ex. 2 : Supernovæ lointaines

Dilatation des temps



Sue est en mvt / Lou; tous les 2 mesurent le temps de trajet de la lumière
Pour Sue le trajet de la lumière est plus long \Rightarrow le temps écoulé est plus long (!)
 \Leftrightarrow "le temps de Lou va plus vite"

Ex.1 : les muons du rayonnement cosmique vivent plus "longtemps" dans notre référentiel que leur durée de vie propre $\sim 2.2\mu\text{s}$ - ils volent qq 10aines de km à une vitesse proche de c

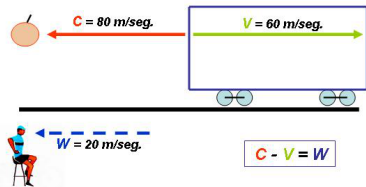
Ex. 2 : Supernovæ lointaines

Contraction des longueurs & composition des vitesses

- attachons nous à un muon formé dans la haute atmosphère (25km)
- Sa durée de vie est (pour nous) $2.2\mu\text{s}$
- Pendant ce temps nous avons atteint la Terre : elle était plus près que 25km! ? == contraction des longueurs :

$$L = L_0 \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Composition des vitesses :

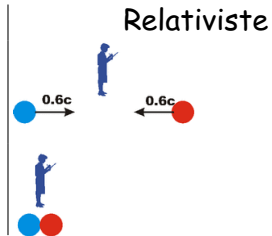
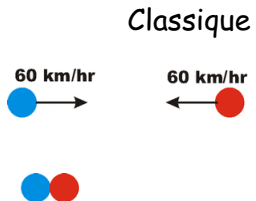


Pour le cas "relativiste" :

$$W = \frac{C - V}{1 - C \frac{V^2}{c^2}}$$

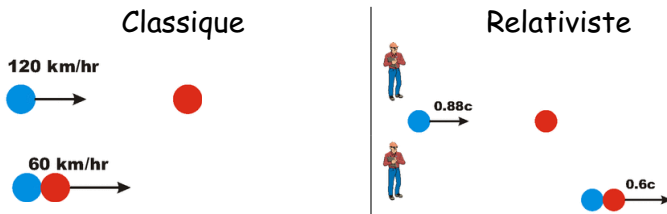
La pétanque relativiste

observateur au repos



La pétanque relativiste

observateur en mvt avec la boule rouge





Conservation de l'impulsion (mv) \Rightarrow masse **apparente** varie avec v

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

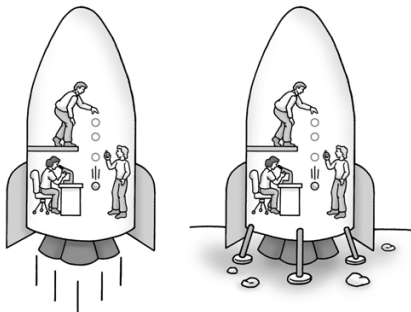
(m_0 == masse au repos)

Conséquences

- Dynamique newtonienne : m mesure l'inertie (= "résistance" à l'accélération)
- accélérer jusqu'à c ? $\Rightarrow m$ devient infinie / demande une énergie infinie
- énergie cinétique "classique" : $E_c = \frac{1}{2}m_0v^2$
 \rightarrow forme relativiste : $E_c = (m - m_0)c^2$ ( 1905)
- Extension ( 1907) : énergie **totale** : $E_{tot} = mc^2$
- ... il existe donc une énergie au repos : $E_0 = m_0c^2$
- Et c'est beaucoup : $E/m = c^2 \sim 9.0 \times 10^{16} \text{ J.kg}^{-1}$

Généralisation - AE (1907-1917)

Le point de départ d'Einstein



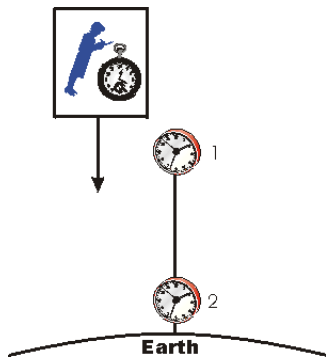
Les mêmes observations (lois physiques) dans les 2 cas?!

"masse" recouvre deux concepts :

- masse inertielle ("susceptibilité" aux forces)
- masse gravitationnelle ("susceptibilité" à la gravitation)

leur identité \approx principe d'équivalence

Conséquences (1)

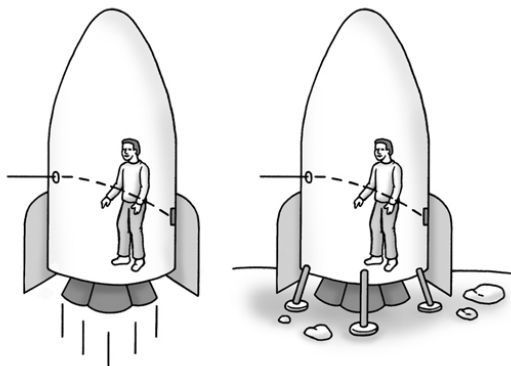


la vitesse de l'observateur (en chute libre) en face de la pendule du bas est + grande qu'en haut

⇒ retard + grand que celle du haut

⇒ **La gravitation "affecte" le temps : dilatation gravitationnelle**
(vérifié en labo, dans vos GPS ...)

Conséquences (2)

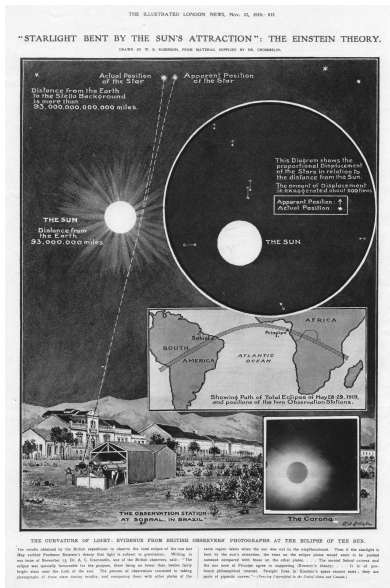


le rayonnement e.m. a une énergie \Rightarrow il a une masse
 \Rightarrow sensible au champ de gravitation!

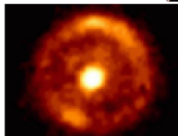
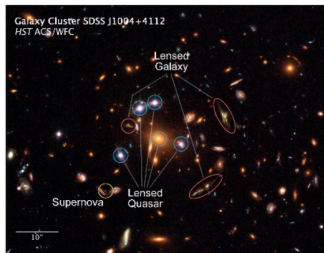
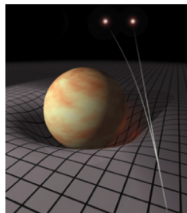
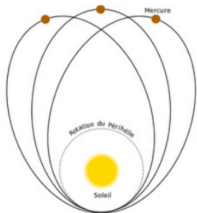
"la lumière se propage dans le vide en ligne droite" \Rightarrow lien profond
entre géométrie et gravitation (ou dynamique)

Première vérification : déviation de la lumière

- Einstein (1911) 1^{er} calcul (r. restreinte) ... **faux!**
- ⇒ vérifier pendant une **éclipse totale de Soleil** ?
- tentatives ratées : 1913 (mauvais temps), 1914 (21 août en Russie : guerre, observateurs allemands internés...)
- 1915 : second calcul (relativité générale!)
- 1916-1918 : théorie propagée en Angleterre - via les Pays-Bas, neutres (de Sitter) ... intérêt d'**Arthur Eddington**
- 1918 éclipse aux USA : mauvais temps, mesures peu probantes (et fausses...)
- ⇒ **1919** : Afrique : mauvais temps ... mais qq clichés, Brésil OK mais instrument principal défocalisé ...
- **Résultats en accord avec RG!**
- (1922 : observations + précises ...)



De nombreuses vérifications



Conclusions

- après le 1er nuage :
 - ▶ 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)
- après le 2d nuage :
 - ▶ Plus de temps ni d'espace absolus - **tout est relatif**
 - ▶ Equivalence masse - énergie $E = mc^2$
 - ▶ **Notions de temps et masse propres**
important surtout à **haute vitesse / énergie** (physique subatomique, astrophysique)
- mais des problèmes restent : mélange des mondes quantique et relat. (générale)?
Gravitation non quantifiée ... un nouvel orage nace-t-il?