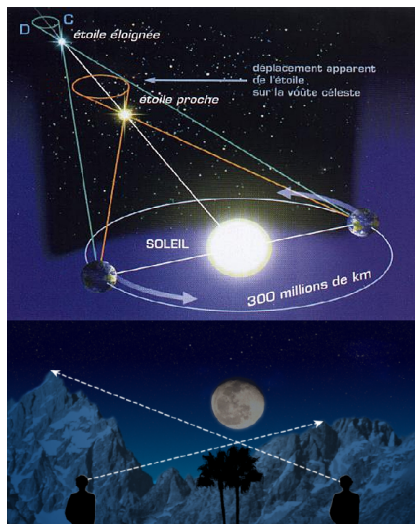


# Le second nuage : questions autour de la lumière

- incompatibilités Galilée/Newton - Maxwell :
  - ▶ eq. de Maxwell pas invariantes si transfo Galiléenne
  - ▶ la **vitesse de la lumière**  $c$  (ds le vide ? ds l'ether ?) = un **paramètre fondamental**
    - **interaction e.m. se propage à vitesse finie** (pas comme la gravitation)
- mesure au sol (de + en + précises) : vitesse fct du milieu (maxi dans le "vide") - Fizeau, Foucault, Fresnel 1850-1870
- mesures astronomiques (Røemer, **Bradley**) : on "voit" le mvt de la Terre

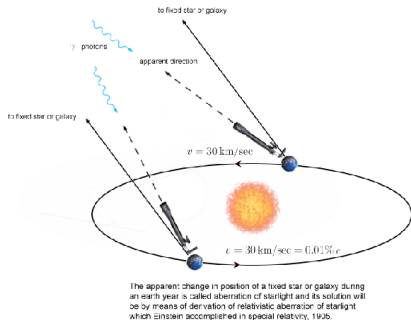
# une vitesse pour la lumière ? Bradley et la parallaxe ( $\sim 1730$ )

- dès  $\sim 1650$  on observe des déplacements apparents sur le ciel d'étoiles "fixes"
- est-ce la **parallaxe** ? (permet de mesurer la distance)
- $\sim 1720$  Bradley étudie systématiquement ces déplacements ( $< 40$  secondes d'arc)
- ... ce n'est pas la parallaxe !  
 $\exists$  déplacement perpendiculaire au plan (Terre, Soleil, étoile)
- $\sim 1730$  ... longues et patientes mesures :  
 $\Rightarrow$  c'est 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**



# une vitesse pour la lumière ? Bradley et la parallaxe ( $\sim 1730$ )

- dès  $\sim 1650$  on observe des déplacements apparents sur le ciel d'étoiles "fixes"
- est-ce la **parallaxe** ? (permet de mesurer la distance)
- $\sim 1720$  Bradley étudie systématiquement ces déplacements ( $< 40$  secondes d'arc)
- ... ce n'est pas la parallaxe !  
 $\exists$  déplacement perpendiculaire au plan (Terre, Soleil, étoile)
- $\sim 1730$  ... longues et patientes mesures :  
 $\Rightarrow$  c'est 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. ) ?



# Question(s) sur la lumière (J. C. Maxwell)

Quel est son **milieu de propagation** (“ether”) ?

Quid du mvt de la Terre / ether ?

→ **mesure possible** en comparant les instants des éclipses de lo 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** :  $\sim 10^{-15}$



# Question(s) sur la lumière (J. C. Maxwell)

Quel est son **milieu de propagation** (“ether”) ?

Quid du mvt de la Terre / ether ?

→ **mesure possible** en comparant les instants des éclipses de lo 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) ...

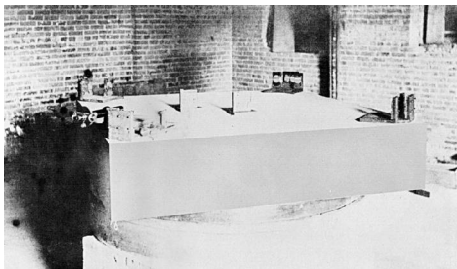
... où il trouve que l'**effet est trop petit pour ça** :  $\sim 10^{-15}$



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)



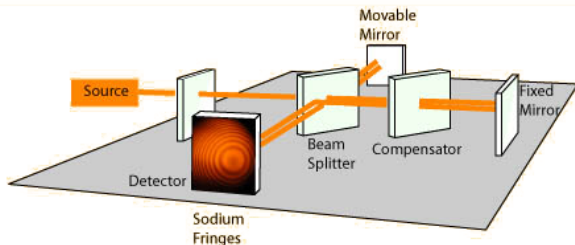
rapport des temps de vol attendu (mvt selon un bras) :

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

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)

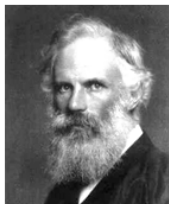


rapport des temps de vol attendu (mvt selon un bras) :

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

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

Comment réconcilier ce résultat avec les principe galiléens ?

FitzGerald : on peut accomoder  $c = \text{cste}$  en changeant les distances

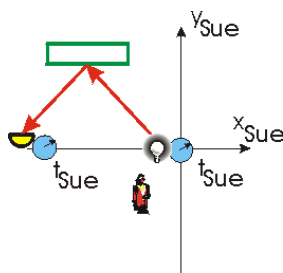
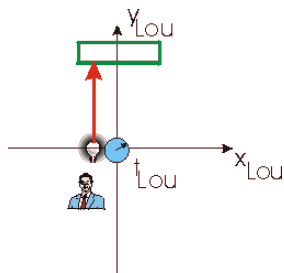
( facteur de “contraction” :  $1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  )

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) entre référentiels en mouvement **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

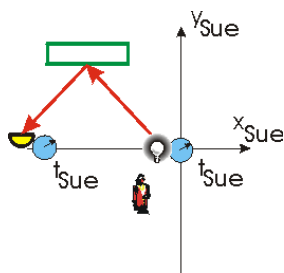
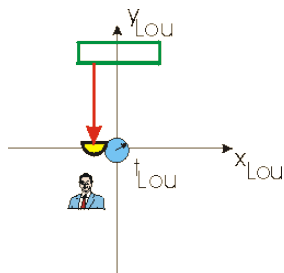


Sue est en mvt / Lou ; tous les 2 mesurent le temps de trajet de la lumière  
Pour Sue le trajet de la lumière est plus long  $\Rightarrow$  le temps écoulé est plus long (!)  
 $\Leftrightarrow$  "le temps de Lou va plus vite"

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  $\sim 2.2\mu s$  - ils volent qq 10aines de km à une vitesse proche de  $c$

Ex. 2 : Supernovæ lointaines

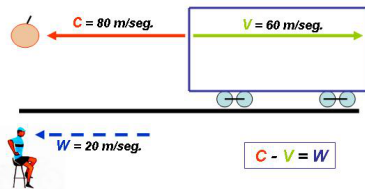
# Contraction des longueurs & composition des vitesses

## Contraction des longueurs :

- attachons nous à un muon formé dans la haute atmosphère (25km)
- Sa durée de vie est (pour nous)  $2.2\mu s$
- 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 :



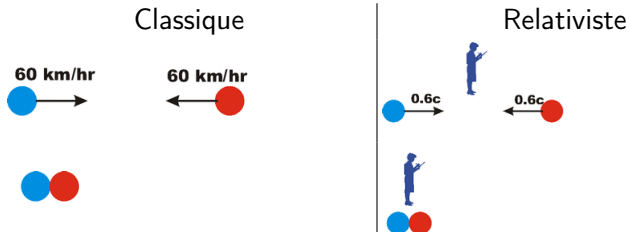
Pour le cas "relativiste" :

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



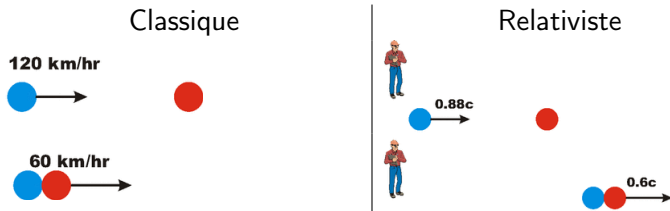
# La pétanque relativiste

Rappel : cas classique = conservation de l'impulsion  $\vec{p} = m\vec{v}$   
observateur au repos



# La pétanque relativiste

Rappel : cas classique = conservation de l'impulsion  $\vec{p} = m\vec{v}$   
observateur en mvt avec la boule rouge (initialement)





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

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

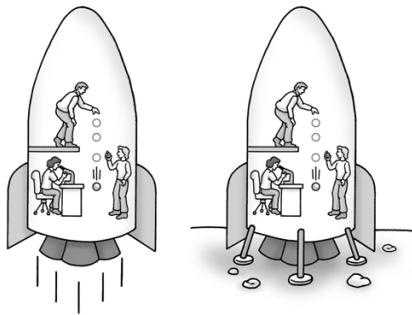
( $m_0$  == masse au repos)

# Une conséquence importante ...

- 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 - Einstein (1907-1917)

Le point de départ d'A. Einstein :



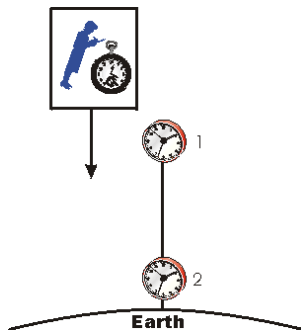
Principe : **mêmes observations (lois physiques) dans les 2 cas**

“masse” recouvre deux concepts :

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

leur identité  $\approx$  principe d'équivalence

# Conséquences (1)



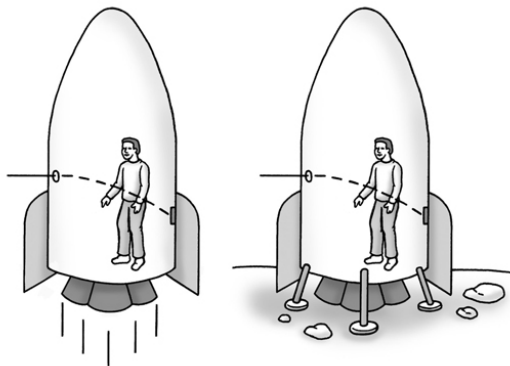
la vitesse de l'observateur (en chute libre) en face de la pendule du bas est + grande qu'en haut. Avec les lois de la relat. restreinte :

⇒ retard + grand que celle du haut

⇒ **La gravitation "affecte" le temps : dilatation gravitationnelle**

(vérifiée en labo, **dans vos GPS ! ...**)

## Conséquences (2)

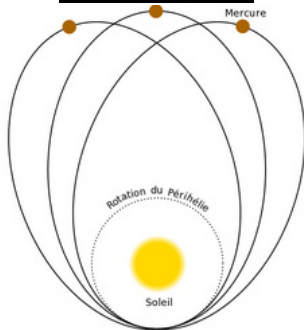
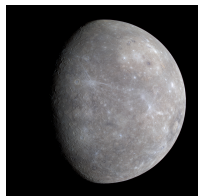


le rayonnement e.m. a une énergie  $\Rightarrow$  il a une masse  
 $\Rightarrow$  sensible au champ de gravitation !

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

# Première vérification : l'avance du périhélie de Mercure

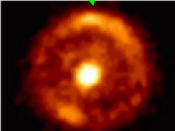
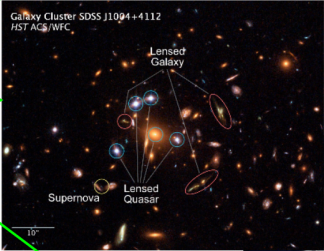
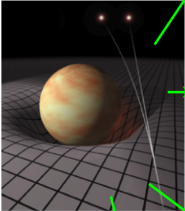
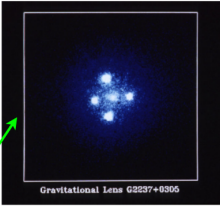
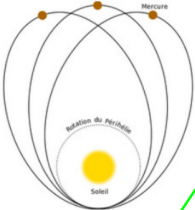
- Mercure = planète la plus proche du Soleil
- Kepler (Newton) : orbite = ellipse
- mais perturbations dues aux autres planètes  $\Rightarrow$  rotation lente de l'"ellipse"
- prédiction classique - 1842 Le Verrier (puis Newcomb) :  $\sim 537(532)$  secondes d'arc / siècle
- observation : 575 secondes d'arc : différence de **43 secondes d'arc/siècle**
- ... un nouvelle planète : Vulcain ?? (cf Neptune/Uranus) - pas observée
- (Einstein 1915) rotation **prédite** par la Relativité générale = **43 secondes d'arc/siècle**  
«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»







# De nombreuses vérifications



# Conclusions

- 1er nuage  $\mapsto$  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)
- 2d nuage  $\mapsto$  théories de la **relativité**
  - ▶ 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)
- dans les deux cas il s'agit d'extensions de la physique "classique" (qui reste "valable" à basse énergie et grande échelle)
- Et des problèmes restent : mélange des mondes quantique et relativiste à faire ?!  
 $\Rightarrow$  ... un nouvel orage menace-t-il ?