

L'espace & le temps :

ce que nous a dit la lumière

Mesurer l'espace, mesurer le temps.

Qu'est-ce que l'espace-temps ?

La place de la lumière dans la compréhension des propriétés de l'espace-temps

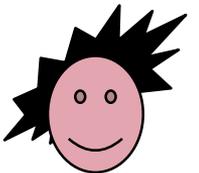
Bertrand Chauvineau

Université Côte d'Azur

Observatoire de la Côte d'Azur / UMR Lagrange

chauvineau@oca.eu

... avec la participation de ...

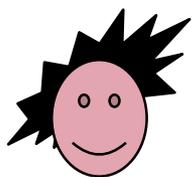


Mesurer l'espace, mesurer le temps

Chaque observateur est sensible à une notion d'espace

→ **espace = ensemble de tous les lieux possibles**

Fait d'expérience : **3 dimensions spatiales** (directement accessibles ...)



devant-derrrière
gauche-droite
haut-bas

toute autre direction
est une « composition »
de ces 3 possibilités

**On peut explorer
chaque lieu
à sa guise !!!**

Repérages dans l'espace : à l'aide de « **règles** » & de « **sextants** » (par exemple ...)

Mesurer des distances,
des longueurs, ...

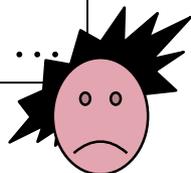
Mesurer des angles,
entre 2 directions

Chaque observateur est sensible à une notion de temps

→ **temps = ensemble de tous les instants possibles**

Fait d'expérience : **une seule dimension temporelle, orientée !**

On va irrémédiablement
du passé vers le futur ...



On **NE PEUT PAS**
explorer chaque date
à sa guise !!!

Repérages dans le temps : réalisable par toute successions d'évènements ...

... phénomènes « périodiques » (se reproduisent avec une certaine « régularité »)

Horloges

Ok, mais tout ceci ne nous dit rien de précis sur les propriétés de l'espace et du temps ...

Or, la physique a l'ambition de **décrire comment les objets** de son étude **évoluent dans l'espace** au cours du **temps**

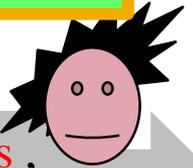
par ex : orbites (trajectoires) des planètes autour du Soleil, et ce qui détermine ces orbites

Une **connaissance précise** des propriétés de l'espace et du temps est donc nécessaire pour :

- une **description** quantitative **précise** des phénomènes physiques/astronomiques observés
- la construction de **théories fiables** pour donner un cadre cohérent à ces phénomènes

→ **Notre but** : en « **savoir plus** » sur les **propriétés** de l'espace et du temps.

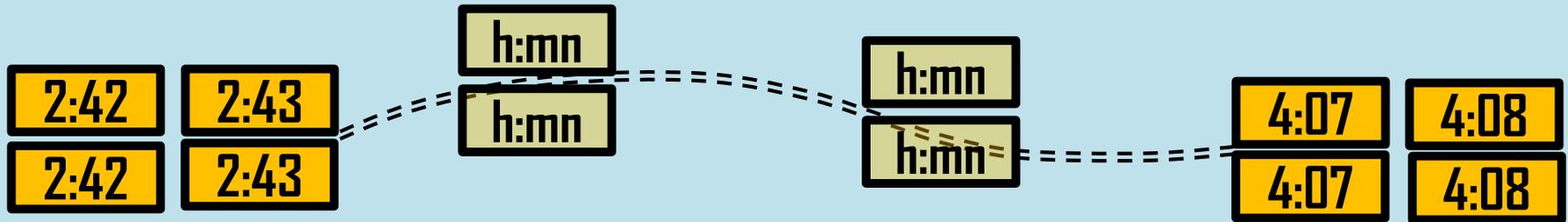
Pour illustrer qu'on ne sait rien de précis sur les propriétés de l'espace et du temps , **posons ...**



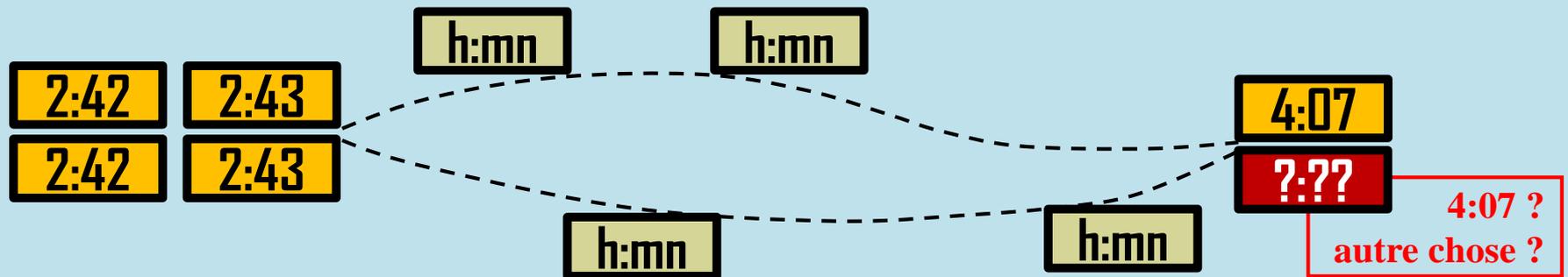
... deux questions « naïves » (1) :

Question 1 : le problème de la synchronisation de deux horloges identiques

Par **définition**, 2 horloges sont **identiques** (et synchronisées) si elles donnent les **mêmes indications horaires** lorsqu'elles **décrivent un même mouvement** (qui peut être le repos)



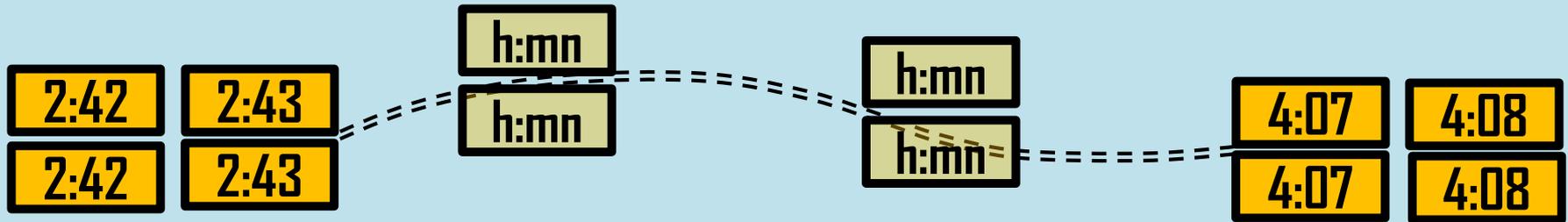
Question : si 2 horloges identiques & synchronisées (1) décrivent le même mvt jusqu'à 2:43,
(2) sont alors **séparées** pendant « un certain temps », puis
(3) **sont à nouveau rassemblées** → seront-elles **à nouveau synchronisées** ?



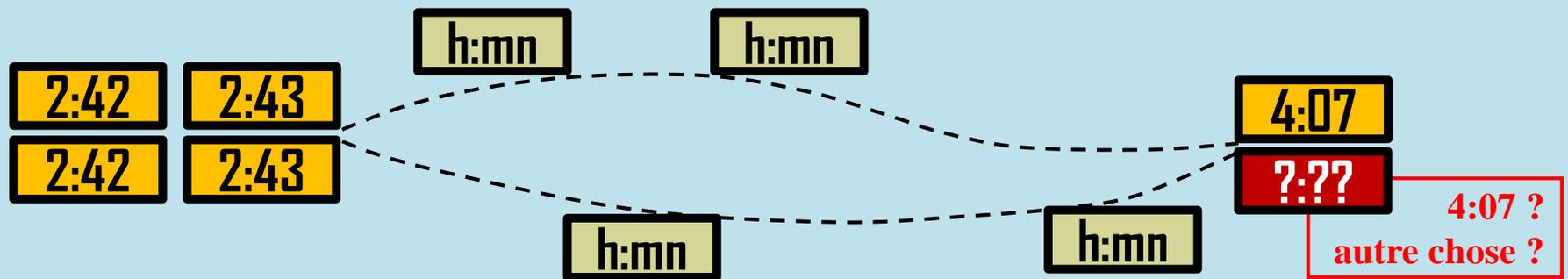
... deux questions « naïves » (1) :

Question 1 : le problème de la synchronisation de deux horloges identiques

Par **définition**, 2 **horloges** sont **identiques** (et synchronisées) si elles donnent les **mêmes indications horaires** lorsqu'elles **décrivent un même mouvement** (qui peut être le repos)



Question : si 2 horloges identiques & synchronisées (1) décrivent le même mvt jusqu'à 2:43,
(2) sont alors **séparées** pendant « un certain temps », puis
(3) **sont à nouveau rassemblées** → seront-elles **à nouveau synchronisées ?**



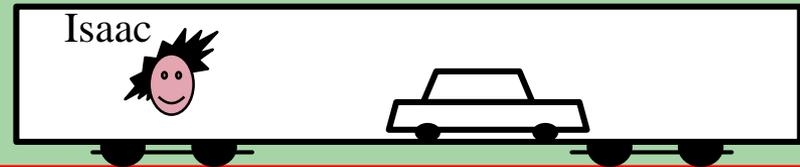
→ PAS de réponse a priori !!!

La réponse dépend des propriétés (inconnues a priori ...) de l'espace et du temps !

... deux questions « naïves » (2) :

Question 2 : le problème de la composition des vitesses

Soient un train en mvt, et un objet (voiture) en mvt dans le train



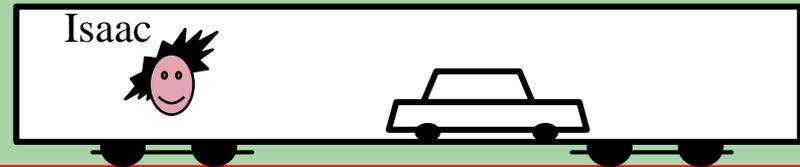
- Isaac mesure la vitesse de la voiture $\rightarrow v_{voiture}^{(I)}$
- Albert mesure la vitesse du train $\rightarrow v_{train}^{(A)}$
- Albert mesure la vitesse de la voiture $\rightarrow v_{voiture}^{(A)}$

Question : quelle **relation** existe-t-il **entre ces 3 vitesses ?**

... deux questions « naïves » (2) :

Question 2 : le problème de la composition des vitesses

Soient un train en mvt, et un objet (voiture) en mvt dans le train



- Isaac mesure la vitesse de la voiture $\rightarrow v_{voiture}^{(I)}$
- Albert mesure la vitesse du train $\rightarrow v_{train}^{(A)}$
- Albert mesure la vitesse de la voiture $\rightarrow v_{voiture}^{(A)}$

Question : quelle **relation** existe-t-il **entre ces 3 vitesses ?**

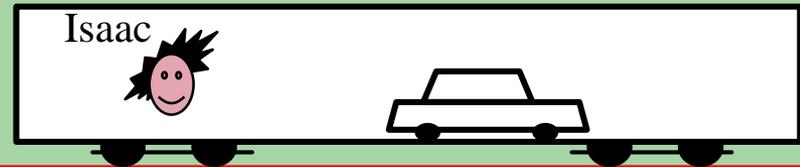
\rightarrow PAS de réponse a priori !!!

La réponse dépend des propriétés (inconnues a priori ...) de l'espace et du temps !

... deux questions « naïves » (2) :

Question 2 : le problème de la composition des vitesses

Soient un train en mvt, et un objet (voiture) en mvt dans le train



- Isaac mesure la vitesse de la voiture $\rightarrow v_{voiture}^{(I)}$
- Albert mesure la vitesse du train $\rightarrow v_{train}^{(A)}$
- Albert mesure la vitesse de la voiture $\rightarrow v_{voiture}^{(A)}$

Question : quelle **relation** existe-t-il **entre ces 3 vitesses ?**

\rightarrow PAS de réponse a priori !!!

La réponse dépend des propriétés (inconnues a priori ...) de l'espace et du temps !

Convaincu qu'on ne sait rien de **précis** sur les **propriétés** de l'espace et du temps ?

Si oui, on continue ...!

Comment obtenir une **réponse** ? → faire des **expériences**, des mesures ...

MAIS : que conclure d'une expérience ?

→ Reprenons le cas des horloges, dans le but de répondre à la question suivante :

le mouvement relatif de deux horloges identiques les désynchronise-t-il ?

(←→ le temps s'écoule-t-il « de la même façon »
pour deux observateurs en mouvement relatif ?)

SI le résultat de l'expérience est le suivant :

2:43:28
2:43:28

4:07:39
4:07:37

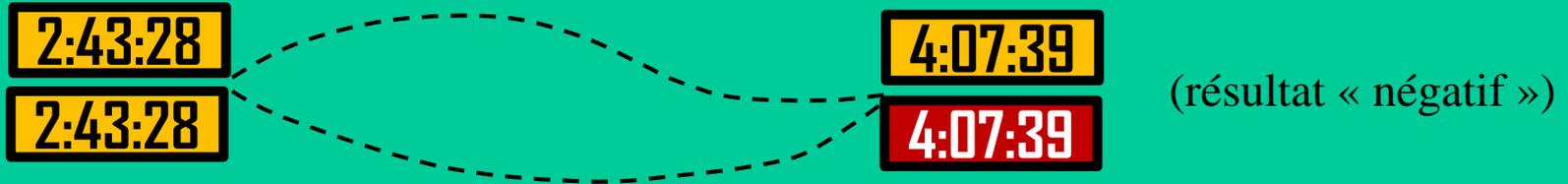
!!! C'est vraiment une
propriété du temps (et
de l'espace) qu'on met
en évidence !!!

(résultat « positif »)

CONCLUSION : deux horloges identiques sont désynchronisées quand l'une se
déplace par rapport à l'autre

(l'écoulement du temps dépend du mouvement de celui qui en fait la mesure)

SI le résultat de l'expérience est le suivant :



→ **peut-on conclure** que deux horloges identiques ne sont pas désynchronisées quand l'une se déplace par rapport à l'autre ?
(... que l'écoulement du temps ne dépend pas du mouvement de celui qui en fait la mesure ?)

SI le résultat de l'expérience est le suivant :

2:43:28
2:43:28

4:07:39
4:07:39

(résultat « négatif »)

→ **peut-on conclure** que deux horloges identiques ne sont pas désynchronisées quand l'une se déplace par rapport à l'autre ?
(... que l'écoulement du temps ne dépend pas du mouvement de celui qui en fait la mesure ?)

Ce serait le cas **si la précision de nos mesures était infinie !...**
... ce qui n'est **JAMAIS le cas !!!**

CONCLUSION : **SI** deux horloges identiques sont **désynchronisées** quand l'une se déplace par rapport à l'autre, **la différence** introduite par l'expérience réalisée **est trop petite pour être mise en évidence** par les mesures effectuées (avec une précision de l'ordre de la seconde).

**Impossible
de trancher
a priori !!!**

- le mvt relatif n'introduit pas de désynchronisation
- le mvt relatif introduit une désynchronisation < 1 seconde

L'espace-temps (E-T)

Dans la **vie quotidienne**, on fait **systématiquement référence à l'espace-temps !!!**

rendez-vous = un lieu + une date



prendre un rendez-vous

=

choisir un élément de l'espace-temps

un évènement = une date + un lieu

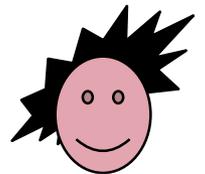
(définition du physicien → ne s'y passe pas forcément quelque chose de médiatisable !!!)

De même que : **espace = ensemble des lieux** & **temps = ensemble des dates** ,

Espace-temps = ensemble de tous les évènements possibles

Rien de difficile dans le concept même d'espace-temps !!!

Espace-temps = « cadre » des phénomènes physiques



→ Une **théorie physique**, pour être compréhensible et utilisable, requiert donc l'existence d'une **théorie de l'espace-temps**

... préalable (???)

Une **théorie** suffisamment précise de l'espace-temps doit permettre de répondre (proposer une réponse) aux 2 questions que nous avons posées ...

... mais aussi à beaucoup d'autres !!!

Théories différentes → réponses différentes



→ faire une (des) **théorie(s) de l'espace-temps** ?

Distinguons bien :

- **l'espace-temps** « réel », dans lequel nous vivons ; il a des propriétés :
 - * que nous ne **connaissons pas** a priori (et auxquelles on ne peut rien ...)
 - * auxquelles on **accède approximativement** en faisant des **expériences**
- **un** (et pas « l' », car vaste choix !) **espace-temps théorique** :
 - * **construction de l'esprit**, arbitraire, que nous connaissons parfaitement, car il a **les propriétés qu'on a décidé de lui donner !!!** (explicitement ou implicitement)
 - * sur lequel on est capable de **faire des prévisions** (calculs) **exactes** (dans la mesure où on est capable de résoudre les équations ...)

Comparaison nécessaire des **prédictions théoriques** aux **résultats d'expériences**
pour quantifier l' **intérêt pratique** de cette construction

L'espace-temps de Newton

Newton (les « principia », 1687) : 2 notions bien « séparées »

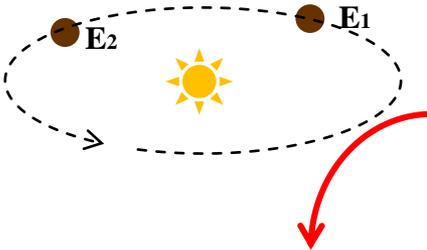
- l'espace (3 dimensions) est **euclidien**

→ **homogène & isotrope**

- le **temps** est **uniforme**

& **en plus (!)** sa mesure ne dépend pas de l'observateur

**Significations
expérimentales**



La « **séparation spatiale** » entre 2 évts **dépend de l'observateur**,
mais pas leur « séparation » temporelle !!!

On peut considérer
les problèmes de datation
indépendamment du reste

Temps « absolu » : le **même** pour **tous les obs !**

L'espace-temps de Newton

Newton (les « principia », 1687) : 2 notions bien « séparées »

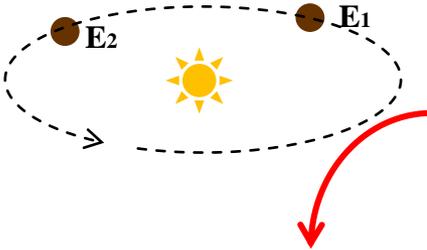
- l'espace (3 dimensions) est **euclidien**

→ **homogène & isotrope**

- le **temps** est **uniforme**

& en plus (!) sa mesure ne dépend pas de l'observateur

Significations
expérimentales



La « **séparation spatiale** » entre 2 évts **dépend de l'observateur**,
mais pas leur « **séparation** » temporelle !!!

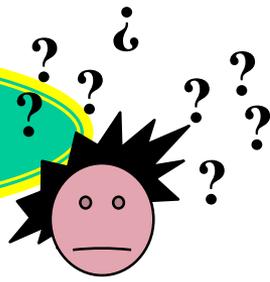
On peut considérer
les problèmes de datation
indépendamment du reste

Temps « absolu » : le **même** pour **tous les obs !**

Réponse à la 1^{ère} question !



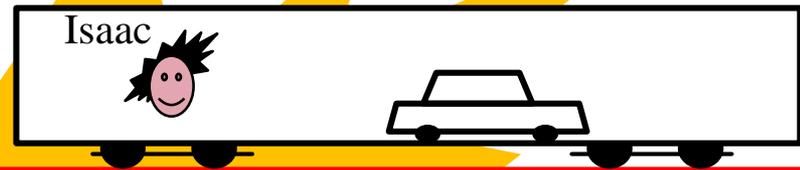
2^{ème} question ???



2^{ème} question ???

Retour sur les expériences : la lumière

Propriétés de l'espace-temps de Newton → une loi de composition des vitesses



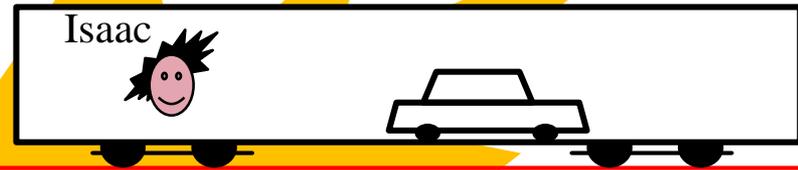
- Isaac mesure la vitesse de la voiture → $v_{voiture}^{(I)}$
- Albert mesure la vitesse du train → $v_{train}^{(A)}$
- Albert mesure la vitesse de la voiture → $v_{voiture}^{(A)}$

Relation entre ces
3 vitesses ?

Retour sur les expériences : la lumière

2^{ème} question ???

Propriétés de l'espace-temps de Newton → une loi de **composition des vitesses**



- Isaac mesure la vitesse de la voiture → $v_{voiture}^{(I)}$
- Albert mesure la vitesse du train → $v_{train}^{(A)}$
- Albert mesure la vitesse de la voiture → $v_{voiture}^{(A)}$

Relation entre ces 3 vitesses ?

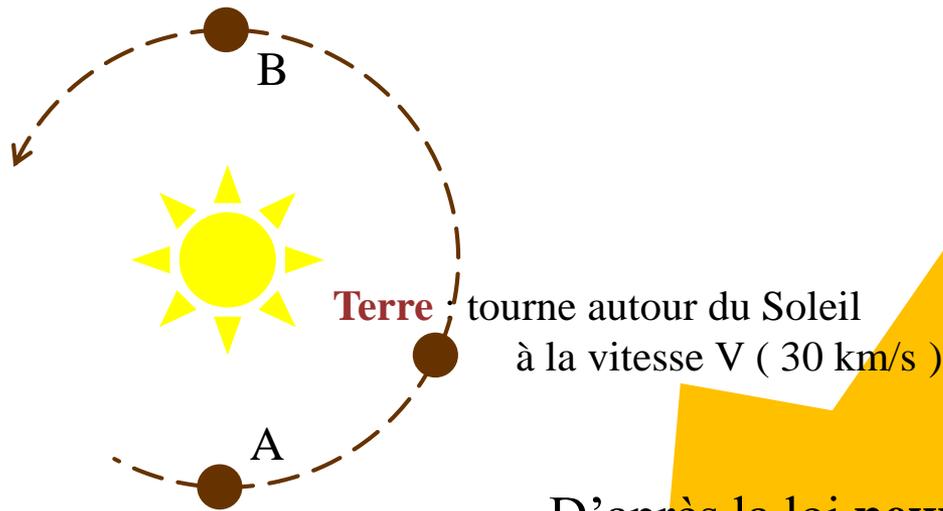
ET de Newton
(temps absolu,...)

$$v_{voiture}^{(A)} = v_{train}^{(A)} + v_{voiture}^{(I)}$$

$$(\vec{v}_{voiture}^{(A)} = \vec{v}_{train}^{(A)} + \vec{v}_{voiture}^{(I)})$$



Tout va très bien avec l'E-T de Newton au 17ème, 18ème, (presque tout le) 19ème ...



Lumière : de l'étoile vers le Soleil
à la vitesse c (300 000 km/s)

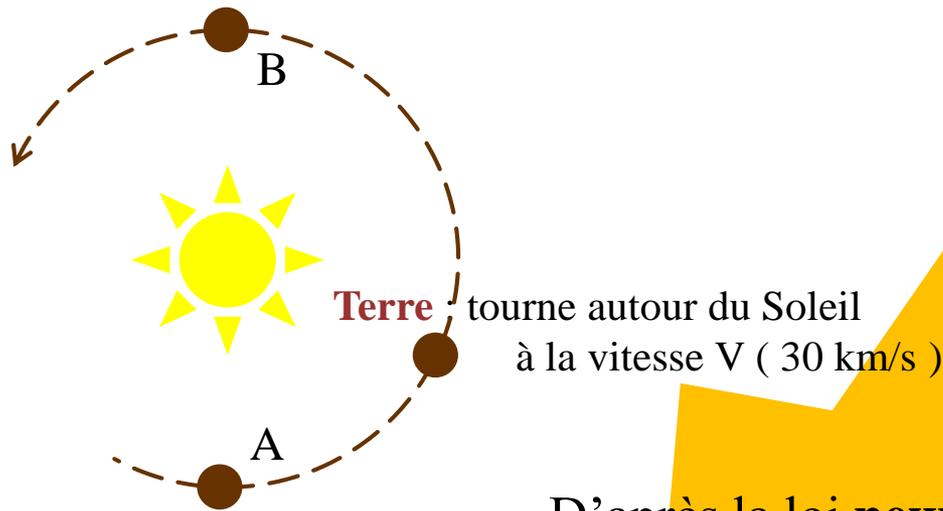


D'après la loi **newtonienne** de composition des vitesses, un observateur terrestre **devrait** voir la lumière venant de l'étoile arriver à la vitesse :

- en A : $c + V$ (= 300 030 km/s)
- en B : $c - V$ (= 299 970 km/s)

Michelson & Morley (1881, ...)

Expériences ???



Lumière : de l'étoile vers le Soleil
à la vitesse c (300 000 km/s)

D'après la loi **newtonienne** de composition des vitesses, un observateur terrestre **devrait** voir la lumière venant de l'étoile arriver à la vitesse :

- en A : $c + V$ (= 300 030 km/s)
- en B : $c - V$ (= 299 970 km/s)

Michelson & Morley (1881, ...)

Expériences ???

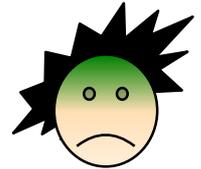
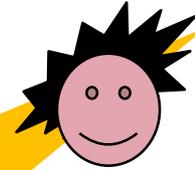
La « vitesse » de la **lumière** :

- ne dépend pas du mvt
de la source/l'observateur
- ne dépend pas de la direction



Moralité : **l'E-T de Newton n'est pas adapté** pour décrire **tout** ce qu'on observe dans notre univers !

- ok tant que **toutes** les vitesses considérées $\ll c$...
- ... mais pas dès que certaines vitesses comparables à c



→ repenser les notions d'espace & de temps, pour construire un espace-temps dont les propriétés :

- sont proches de celles de l'E-T de Newton si TOUTES les vitesses considérées sont $\ll c$...
- ... tout en rendant compte des propriétés révélées par l'expérience de Michelson & Morley

... Il faut que la « composition des vitesses » dans ce nouvel E-T soit compatible avec ces 2 points, donc diffère de la loi de composition newtonienne « $w=u+v$ » ...

... → il faut **renoncer au caractère absolu du temps** (dont « $u+v$ » découle ...)

L'espace-temps de Minkowski

Minkowski (1905-7, espace-temps de la relativité restreinte (1905)) :

→ propriétés identiques à celles de l'espace-temps de Newton

→ homogénéité & isotropie de l'espace, uniformité du temps ...

SAUF : la mesure du temps dépend de l'observateur

~~simultanéité~~

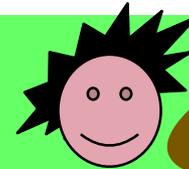


On ne peut plus considérer les problèmes de datation indépendamment du reste !!!

Dans le détail : la définition de l'espace-temps de Minkowski, qui « mélange » espace et temps, contient naturellement une vitesse de référence V :

- (1) dont le « module » (le nombre de km/s) ne dépend pas de l'observateur ;
- (2) exp Michelson-Morley & (1) → incite à identifier V à la vitesse de la lumière c ($V=c$) ;
- (3) **loi induite de composition des vitesses** →
 - (3a) si toutes les vitesses composées sont $\ll V$ → « $w=u+v$ » s'applique (modulo erreur infime)
 - (3b) si une des vitesses = V → la vitesse obtenue par composition avec toute autre vitesse = V [voir (1)]

Remarque



Applications
très concrètes !!!

→ dans l'E-T de M., il est légitime de parler de LA vitesse de la lumière ...

Expériences (accélérateurs de particules, aberration de la lumière, ...) →

L'espace-temps dans lequel on vit a les propriétés (localement)
de l'espace-temps de Minkowski / ~~Newton~~

Découverte (des propriétés) **de l'espace-temps** (de Minkowski) :

→ LA plus grande **découverte** de la physique théorique !!!

Tous les progrès importants de la physique du XX/XXIèmes siècles ont été réalisés (n'ont pu être possibles qu') en incorporant les **idées relativistes sur l'espace-temps**

Quelques ordres de grandeur ...

2:43:28

2:43:28

(5 km/h)

4:07:39,000 000 000 000 000

4:07:38,999 999 999 999 946
=4:07:39 - 0,000 000 000 000 054 s !!!

2:43:28

2:43:28

(100 km/h)

4:07:39,000 000 000 000 000

4:07:38,999 999 999 978 379

2:43:28

2:43:28

(100 000 km/s)

4:07:39

4:02'50

2:43:28

2:43:28

(297 000 km/s)

4:07:39

2:54'56

2:43:28

2:43:28

(299 750 km/s)

4:07:39

2:44'53



Application : certaines particules élémentaires sont « stables », d'autres « instables »

se désintègrent spontanément
au bout d'un « certain temps »

Temps de $\frac{1}{2}$ vie : - du neutron (isolé) : 15 minutes environ
- du muon (produit dans la haute atmosphère
par le rayonnement cosmique) :

$$2.2 \times 10^{-6} \text{ s} \\ = 0.000\,002\,2 \text{ s}$$

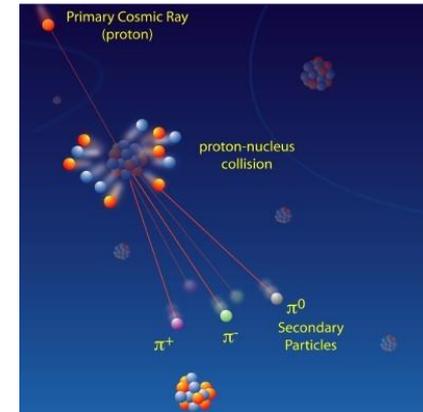
$$(2.2 \times 10^{-6} \text{ s}) \times (300\,000 \text{ km/s}) \cong 660 \text{ m}$$

On ne devrait donc pas, si notre esp-tps **était** newtonien,
détecter les muons du rayonnement cosmique sur Terre ...

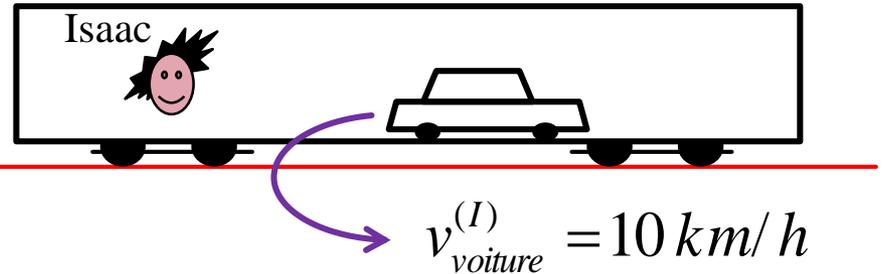
... mais les rayons cosmiques produits se déplacent à une vitesse proche
de celle de la lumière \rightarrow temps de $\frac{1}{2}$ vie observé $\gg \gg 0.000\,000\,22 \text{ s}$

distance franchie dans l'atmosphère :

$\gg \gg 660 \text{ m}$ (qlq dizaines, centaines de km) \rightarrow arrivent au niveau du sol



Moins d'applications « directes », mais pour le fun ... (+ répondre aux questions) ...



$$v_{train}^{(A)} = 40 \text{ km/h} \rightarrow v_{voiture}^{(A)} = 49.999\,999\,78 \text{ km/h} = 50 \text{ km/h} - (0.22 \text{ mm/h})$$

$$v_{train}^{(A)} = 300 \text{ km/h} \rightarrow v_{voiture}^{(A)} = 309.999\,990 \text{ km/h} = 300 \text{ km/h} + (9.999\,990 \text{ km/h})$$

$$v_{train}^{(A)} = 100\,000 \text{ km/s} \rightarrow v_{voiture}^{(A)} = \dots = 100\,000 \text{ km/s} + (8.89 \text{ km/h})$$

diff = 1 cm/h

$$v_{train}^{(A)} = 297\,000 \text{ km/s} \rightarrow v_{voiture}^{(A)} = \dots = 297\,000 \text{ km/s} + (0.185 \text{ km/h})$$

Tous ces effets relativistes sont le **quotidien du physicien des particules !**

- particules accélérées à des vitesses (très) proches de celle de la lumière
- collisions à très haute énergie / produits de réactions, ...
- ... impossible de décrire correctement ce qui se passe dans un accélérateur sans faire les calculs dans un **cadre relativiste !!!**



Émission : t_1

... mais nous sommes aussi quotidiennement concernés !

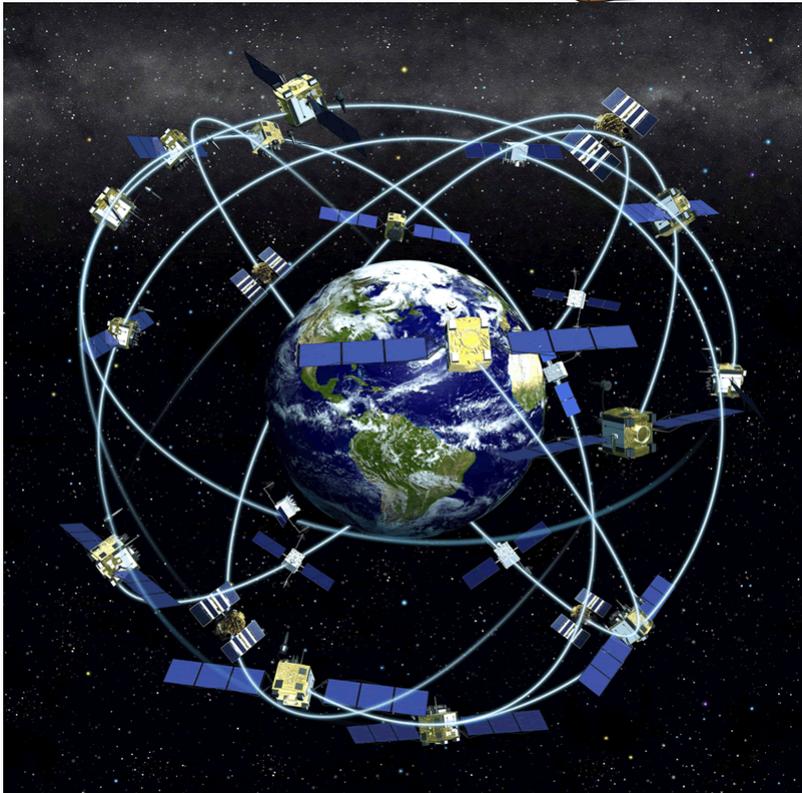
LA vitesse de la lumière ...

GPS (Global Positioning System)



Réception : t_2

Dist ém-réc = $c \cdot (t_2 - t_1)$ → petite erreur de datation → grande erreur sur Dist !!!



Altitude ~ 20 000 km → $v \sim 4$ km/s

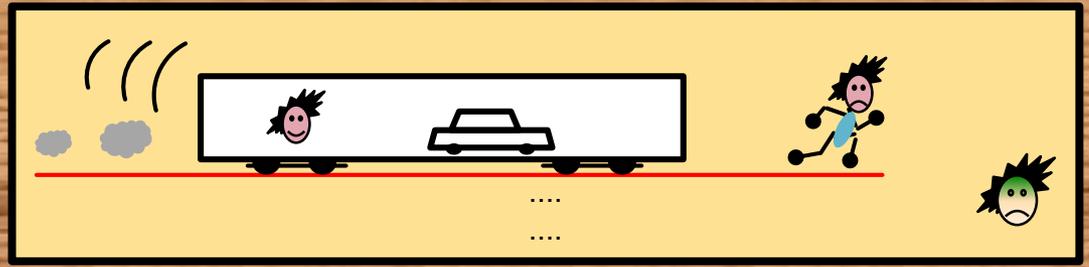
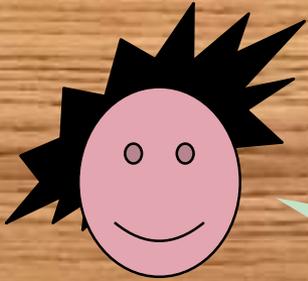
$$(v/c)^2 \approx 2 \cdot 10^{-10}$$

Dérive des horloges : $\approx 1.5 \times 10^{-5}$ s/ jour

Dérive induite sur le positionnement : ≈ 4.5 km/ jour !!!

sans tenir compte des « effets de relativité générale »

Propriétés de l'espace-temps dues à ce qu'il contient (→ théorie de la gravitation)



... et merci pour votre attention !!!

