La gravitation et les ondes gravitationnelles

De quoi s'agit-il ?

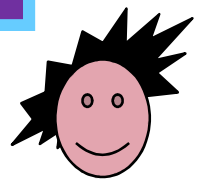
Bertrand Chauvineau

Université Côte d'Azur / Observatoire de la Côte d'Azur

UMR Lagrange

chauvineau@oca.eu

… avec la participation de …
(... & friends …)



But(s) de cet exposé

1 – Espace, temps, espace-temps

Espace-temps : de quoi s'agit-il ? Est-ce « compliqué » ?
Newton et l'espace-temps : « sa » vision de l'espace & du temps

2 – Eléments de relativité restreinte & générale

Relativité Restreinte : théorie de l'espace-temps (« meilleure » que celle de Newton)
Relativité Générale : théorie de la gravitation (comme propriété de l'espace-temps)
→ Gravitation : « phénomène instantané » ou « retardé » ?
→ Ondes gravitationnelles

3 – Insister sur un point : ces théories sont étrangères à la lumière

La lumière ne joue aucun rôle fondamental dans la **construction** de ces théories !
Elle a cependant **joué un rôle expérimentalement décisif dans leur élaboration**
→ lumière = « révélateur » plutôt que « pilier » des propriétés de l'espace-temps
Que faut-il entendre/comprendre quand on parle de la « vitesse de la lumière » ?

4 – Et l'astronomie, dans tout ça ?

La chasse aux trous noirs est ouverte …
Matière ultra-dense dans l'univers (étoiles à neutrons), génèse d'éléments lourds
Observer l'(optiquement) inobservable

Organisation de cet exposé

1. Considérations générales : 7/12 slides
2. Espace-temps de Newton : 3 slides
3. Espace-temps de Minkowski/Relativité Restreinte : 6/8 slides
4. Relativité Générale/gravitation : 4/5 slides
5. Ondes gravitationnelles : 2/5 slides
6. Astronomie gravitationnelle : 5/9 slides

27/42 slides

Résumé : 1 slide

Préambule : mesurer l'espace, mesurer le temps …

« Mesurer l'espace » : avec des règles, pour mesurer des ***distances*** (rapporteurs pour les angles)
« Mesurer le temps » : avec des horloges, pour mesurer des ***intervalles de temps***

Comparer les mesures faites par différents observateurs → Disposer d'instruments de mesure **identiques**

qu'est-ce que ça veut dire ?

Règles identiques : elles ont la même longueur quand on les maintient « côte à côte » (en un même lieu …)
Horloges identiques : elles pulsent à la même fréquence quand on les maintient « côte à côte » (…)

Définitions évidentes ? Peut-être … (probablement …)
… mais remarquer tout de même que le verbe « **maintenir** » signifie qu'il n'y a **pas de mouvement d'un objet par rapport à l'autre**

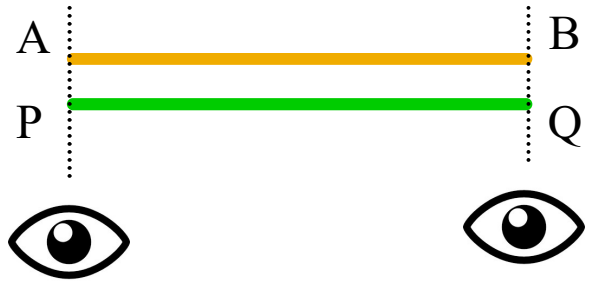
Ceci étant précisé, nous serons amenés à considérer différents observateurs, chacun équipé de ses règles et horloge(s), étant entendu que celles-ci (d'un observateur à l'autre) **sont identiques dans le sens qu'on vient de définir, ce qui donne un sens à la comparaison des mesures** (de longueurs, d'intervalles de temps, …) **effectuées par les uns et les autres.**

Comment sont reliées les mesures faites par différents observateurs ? ← **propriétés de l'espace-temps !!**

→ **Une question « toute bête »** (mais … peut-être pas tant que ça …)

Soient 2 règles de même longueur (au sens précédent), d'extrémités AB et PQ :

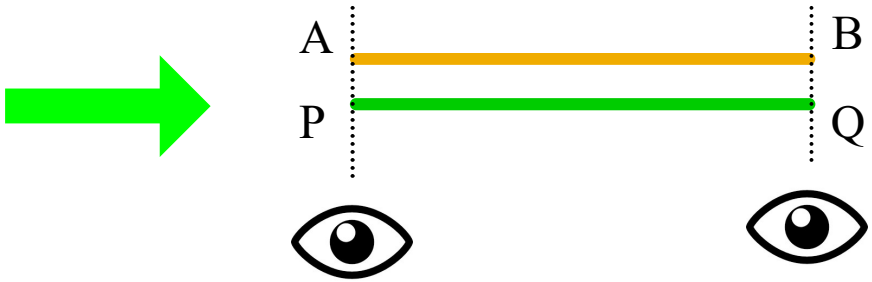
pas de mouvement relatif
(de l'une par rapport à l'autre)



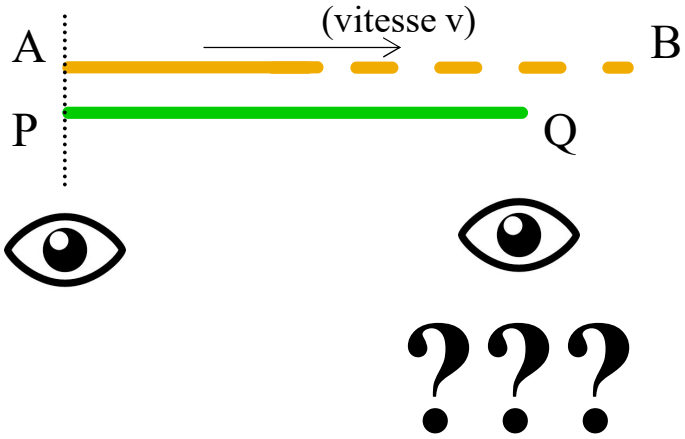
→ **Une question « toute bête »** (mais … peut-être pas tant que ça …)

Soient 2 règles de même longueur (au sens précédent), d'extrémités AB et PQ :

pas de mouvement relatif
(de l'une par rapport à l'autre)



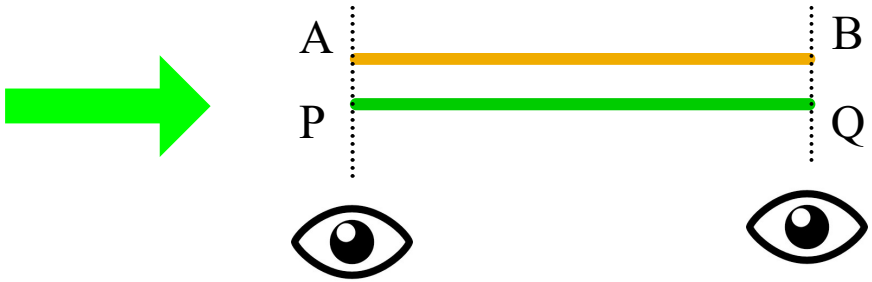
Si maintenant la règle AB est en mouvement par rapport à la règle PQ, que peut-on dire des extrémités B & Q lorsque A & P passent « l'une à côté » de l'autre ?



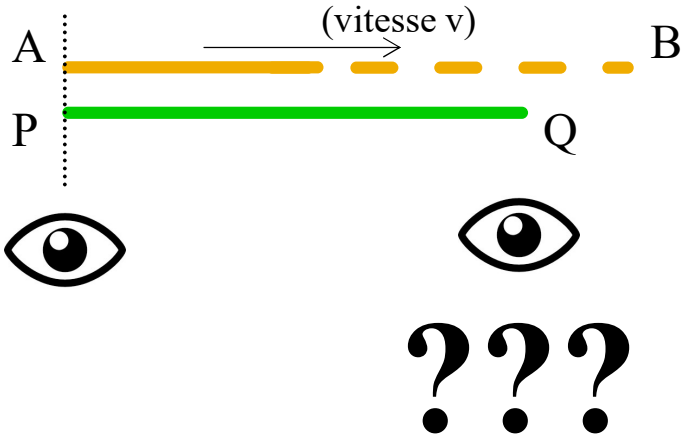
→ **Une question « toute bête »** (mais … peut-être pas tant que ça …)

Soient 2 règles de même longueur (au sens précédent), d'extrémités AB et PQ :

pas de mouvement relatif
(de l'une par rapport à l'autre)



Si maintenant la règle AB est en mouvement par rapport à la règle PQ, que peut-on dire des extrémités B & Q lorsque A & P passent « l'une à côté » de l'autre ?



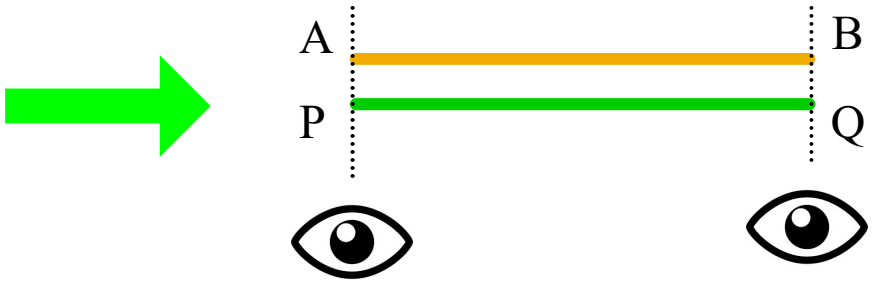
Les extrémités B & Q sont-elles **à ce moment là** l'une à côté de l'autre également ?

À cause du mouvement, une considération « temporelle » se superpose à une question « spatiale »

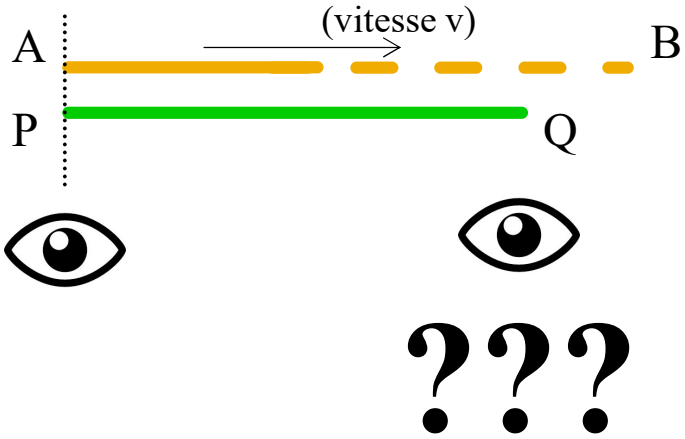
→ **Une question « toute bête »** (mais … peut-être pas tant que ça …)

Soient 2 règles de même longueur (au sens précédent), d'extrémités AB et PQ :

pas de mouvement relatif
(de l'une par rapport à l'autre)



Si maintenant la règle AB est en mouvement par rapport à la règle PQ, que peut-on dire des extrémités B & Q lorsque A & P passent « l'une à côté » de l'autre ?



Présupposer de ce que « doit être » la réponse, <u>c'est faire</u> (implicitement) <u>une hypothèse très forte sur ce que sont les propriétés de l'espace et du temps</u> (de l'espace-temps) !!!

1

→ **Une (autre) question « toute bête »** (mais peut-être pas tant que ça non plus …)

Deux amis, Isaac et Albert, possédant des montres identiques, se rendent à 17h à une conférence se terminant à 18h. Isaac va suivre la conf, mais Albert préfère finalement aller se promener, et doit retrouver Isaac à la fin de la conf. Ils se séparent à 17h, indication sur leurs 2 montres (identiques).

Question (peut-être pas si bête) : quand Albert rejoint Isaac (conférence terminée), leurs 2 montres (identiques, toujours …) indiquent-elles toujours la même heure ?

1

→ **Une (autre) question « toute bête »** (mais peut-être pas tant que ça non plus …)

Deux amis, Isaac et Albert, possédant des montres identiques, se rendent à 17h à une conférence se terminant à 18h. Isaac va suivre la conf, mais Albert préfère finalement aller se promener, et doit retrouver Isaac à la fin de la conf. Ils se séparent à 17h, indication sur leurs 2 montres (identiques).

Question (peut-être pas si bête) : quand Albert rejoint Isaac (conférence terminée), leurs 2 montres (identiques, toujours …) indiquent-elles toujours la même heure ?

Remarquons que, à cause du mouvement, une considération « spatiale » se superpose à une question « temporelle »

1

→ **Une (autre) question « toute bête »** (mais peut-être pas tant que ça non plus …)

Deux amis, Isaac et Albert, possédant des montres identiques, se rendent à 17h à une conférence se terminant à 18h. Isaac va suivre la conf, mais Albert préfère finalement aller se promener, et doit retrouver Isaac à la fin de la conf. Ils se séparent à 17h, indication sur leurs 2 montres (identiques).

Question (peut-être pas si bête) : quand Albert rejoint Isaac (conférence terminée), leurs 2 montres (identiques, toujours …) indiquent-elles toujours la même heure ?

Présupposer de ce que « doit être » la réponse, c'est faire (implicitement) une hypothèse très forte sur ce que sont les propriétés de l'espace-temps !!!

Terminologie : un **lieu** + une **date** = un **événement** (évt)

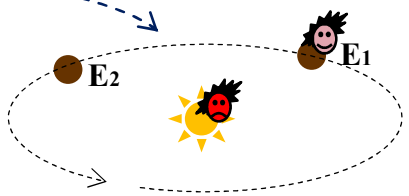
(définition du physicien → ne s'y passe pas forcément quelque chose d'extraordinaire !!!)

Soient 2 événements E_1 & E_2 :

- ont lieu en 2 points différents P_1 & P_2 → distance dist(P_1,P_2)
- ont lieu à 2 dates différentes t_1 & t_2 → intervalle de temps $t_2 - t_1$

Question

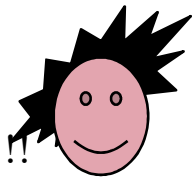
O sur Terre, O' sur le Soleil



Si 2 observateurs O & O' observent ces 2 évts E_1 & E_2 , et mesurent chacun les distances dist(P_1,P_2) et intervalles de temps (t_2–t_1) entre ces 2 évts, quel liens y a-t-il entre les mesures de l'un et de l'autre ?

- P_1 & P_2 → $dist\left(P_1, P_2\right)_{O'} \neq dist\left(P_1, P_2\right)_O$ → « relativité » de l'espace

On le sait (expérimentalement) depuis longtemps !!!



➔ question (induite !) : en est-il de même pour le temps ?

- t_1 & t_2 → $\left(t_2 - t_1\right)_{O'} =$ ou $\neq \left(t_2 - t_1\right)_O$??? → « relativité » du temps ou pas ???

L'expérience quotidienne et sa signification

La réponse peut sembler évidente :

la vie « de tous les jours » nous apprend que s'il s'écoule 1h33min sur ma montre entre ces deux événements, alors il s'écoule également 1h33min sur la montre d'une autre personne entre ces deux mêmes événements, si nos deux montres sont identiques, et ceci même si cette autre personne n'est pas restée « à côté de moi » → mouvement relatif.

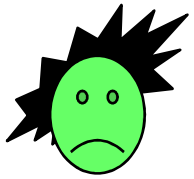
Deux remarques :

- comparaison toujours faite avec une précision limitée : si je refais la même expérience, mais avec une lecture beaucoup plus précise des intervalles de temps, et que je trouve 1h33min27.891 207 748s sur ma montre (précision au milliardième de seconde …), va-t-on lire la même chose sur la montre (identique, et aussi précise) d'un autre ?

- conditions expérimentales : celles de l'expérience quotidienne → vitesses relatives de l'ordre de 10, 100 ou 1000 km/h (marche/vélo, voiture, avion). Qu'aurais-je conclu de mes observations (effectuées avec la même précision) si les vitesses en jeu avaient été beaucoup plus grandes ?

Préjuger de la réponse (par exemple supposer que ce que nous *suggère* l'expérience quotidienne est *exactement* vrai), c'est faire ***implicitement*** une hypothèse (forte !) sur les propriétés de l'**espace-temps !!!**

➔ ***Espace-temps ? Mais qu'est-ce donc ???***



Terminologie (bis) : un **lieu** + une **date** = un **événement**

Ensemble des lieux = **espace**

Ensemble des dates = **temps**

Ensemble des événements = espace-temps

➔ Comment répondre à la question ?

Expérimentalement ? → il « suffit » de faire l'expérience et de comparer les mesures pour « savoir » ce qu'il en est …

MAIS toute mesure est faite avec une **précision limitée**

On n'accède qu'**approximativement** à la réponse

Théoriquement ? → on a besoin d'une **théorie de l'espace-temps** (description théorique de ce que sont ses propriétés), qui **préjuge** (explicitement ou implicitement) de la réponse !

Construction de l'esprit !
→ n'a *a priori* rien à voir avec le « monde réel » (celui dans lequel nous vivons …)

-1- démarche axiomatique : on fait des hypothèses sur les propriétés de l'espace-temps, et on s'intéresse aux conséquences de ces hypothèses (calculs) …
-2- … puis (démarche expérimentale !) on regarde dans quelle mesure des conséquences sont confirmées par des expériences faites par ailleurs

Newton

→ définit/imagine (1687) un espace-temps dans lequel l'intervalle de temps mesuré entre 2 évts donnés est **exactement** le même pour tous les observateurs (et dans lequel l'espace est « euclidien »)

Il y a un « **invariant** » entre les mesures effectuées par différents observateurs : c'est l'intervalle de temps (entre différents évts)

$$\boxed{(t_2 - t_1)_{O'} = (t_2 - t_1)_O}$$

(en accord avec les connaissances expérimentales de son époque)

le **temps** est **absolu** (contrairement à l'espace)

L'espace-temps de Newton domine la physique des XVIIIème et XIXème siècles

Dans le cadre de cette théorie de l'espace-temps, on peut construire (dans une 2ème étape) :

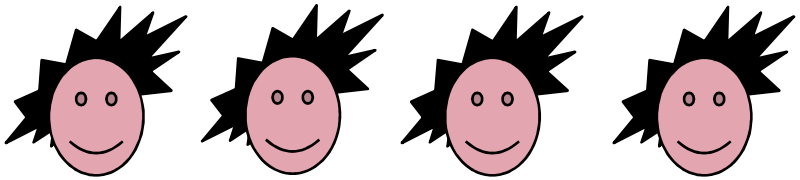
- une théorie du mvt des corps sous l'action d'une force
- une théorie de la gravitation

Succès & développement spectaculaires de la mécanique céleste

Lois de Képler (interprétation), comète de Halley, découverte de Neptune (par le calcul), théorie de la Lune, mouvement de Sirius, satellites planétaires, éphémérides, systèmes stellaires, … **Tout est compris !!!** Tout, sauf …

→ **confirmation des conceptions newtoniennes** sur (1) l'espace & le temps, (2) la théorie du mouvement, (3) la théorie de la gravitation

… au niveau de la précision des mesures de l'époque !



Un peu plus en détail …

- théorie du **mvt** sous l'action d'une force → notion d'**inertie** : résistance des corps à se « mettre en mvt » (subir une accélération)

- théorie de la **gravitation** → **aptitude** de tous les corps **à attirer** (et à être attiré par) tous les autres corps (à exercer sur ceux-ci une certaine force)

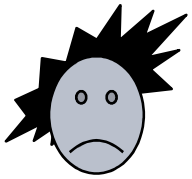
→ **inertie & gravitation** : deux notions bien différentes, sans **aucun rapport** !!!

… et pourtant … un **fait expérimental** : l'**universalité de la chute libre**

→ tout se passe (constatation expérimentale) comme si l'inertie d'un corps est à l'**origine** de la gravitation qu'il engendre (et qu'il subit)

→ un point que les idées newtoniennes n'expliquent pas, bien qu'elles puissent s'en accommoder : faire cette **hypothèse supplémentaire** n'induit aucune incohérence …
→ problème « gênant », mais pas vraiment grave …

Il y a **deux autres « problèmes »** en gravitation newtonienne !!!
L'un est « gênant », lui aussi …
… mais l'autre est **franchement grave** … (pour un physicien !)



Pb 2 - Dans la théorie de Newton, la gravitation est un **phénomène instantané**

2

Si le Soleil disparaissait soudainement, alors :
- la Terre cesserait instantanément de tourner autour de lui …
- … alors qu'il serait encore visible (pendant 8 minutes !!!)

Propriété théorique (pas de support expérimental)

Newton : c'est un **défaut sérieux** de la théorie !

« Je ne m'explique pas les causes de ce fait …
Mais tout colle avec cette loi ! »

Rien de tel n'est connu en physique !!!

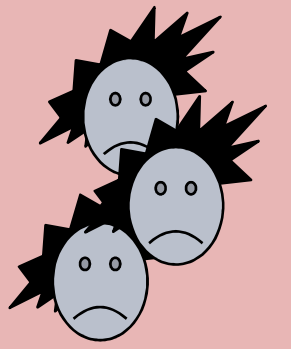
… étrange, mais compatible avec le cadre spatio-temporel newtonien (temps absolu !)

Pb 3 - Anomalie du mouvement de Mercure (remarqué au XIX siècle)

Ça, **c'est vraiment grave !!!** ← **pb observationnel !**

Effet d'un corps (Vulcain) non répertorié ? **Jamais trouvé …**

→ **la théorie ne rend pas compte de ce fait d'observation**

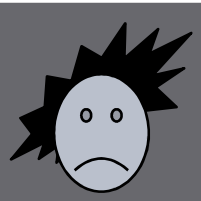


Minkowski

(espace-temps de la relativité restreinte)

→ ce qui ne dépend pas de l'observateur, ce **n'est pas $t_2 - t_1$**, mais une grandeur qui se calcule à partir de $t_2 - t_1$ **et** de dist(P_1,P_2)

Plus précisément, c'est : $\text{Invariant}(E_1,E_2) = V^2(t_2-t_1)^2 - \text{dist}(P_1,P_2)^2$



V = vitesse de Minkowski

(peu importe la forme précise de l'invariant …) comme on est amené à « combiner » des temps et des longueurs, la définition même d'un tel espace-temps contient nécessairement une grandeur homogène à une vitesse (se comptant en « mètres par seconde ») pour que la définition d' « intervalle invariant » ait un sens

Remarquons que :
- il n'y a aucun rapport a priori entre V et la vitesse de la lumière …
- … car on fait une théorie de l'espace-temps, **pas de la lumière**

- le *c* qui intervient un peu partout en relativité restreinte (transformation de Lorentz, composition des vitesses, $E = mc^2$, …), c'est V en fait …
  (… on n'a jamais besoin de parler de la « lumière » pour établir ces diverses expressions & « formules » !)

La vitesse de Minkowski possède toutefois une **propriété remarquable :**

Si un obs (O) trouve qu'un objet X se déplace à la vitesse V (nombre de m/s, km/h …), alors

TOUS LES OBSERVATEURS (O') trouveront aussi que X se déplace à la vitesse V !

Traduction (fréquente) : **la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs**

Il ne s'agit que de son module (nombre de m/s …) mais pas de sa direction !!!

Aucune raison a priori pour que cette vitesse soit celle de la lumière !!!

Cependant, l'expérience montre que la lumière possède précisément cette propriété, avec une précision (meilleures exp à ce jour) de :

$$\frac{1}{100 \text{ millions de milliards}} = \frac{3.10^{-6}\ mm/s}{300\,000\ km/s} = \frac{30\ Angstrom/s}{300\,000\ km/s}$$

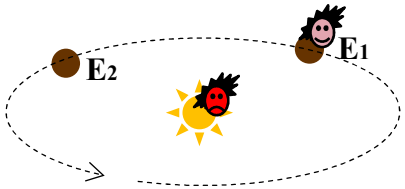
Historiquement, l'expérience de Michelson-Morley a révélé une propriété de la lumière incompréhensible en termes newtoniens, ce qui a conduit à l'élaboration de l'espace-temps de Minkowski **dont la construction ne fait pas « intervenir la lumière », mais permet à cette dernière de posséder la propriété observée si on admet que la lumière (ondes électromagnétiques) se déplace(nt) à la vitesse de Minkowski**

3

Ainsi, l'aptitude de la « relativité restreinte » (physique dans l'esp-tps de Minkowski) à proposer une interprétation du comportement de la lumière tient au fait que, dans cet esp-tps, il existe une classe de mvts, ceux dont le module (nb de km/s) est égal à V (vitesse de Minkowski), dont une propriété (précisément le module de la vitesse) est indépendante de tout observateur.
Alors qu'**une telle classe de mvts n'existe pas dans l'espace temps de Newton**, d'où l'incapacité de celle-ci à permettre une compréhension du comportement de la lumière.

→ en ce sens, **du point de vue cinématique**, la relativité restreinte est **« moins relativiste »** que la physique newtonienne, puisqu'il existe une classe de mvts dont une propriété est indépendante de l'observateur !!!

Par contre, **du point de vue de la mesure des intervalles de temps** (entre 2 évts donnés), la relativité restreinte est (de beaucoup !) **« plus relativiste »** que la physique de Newton, puisque dans la première, toute mesure de l'intervalle de temps entre 2 évts dépend de l'observateur, alors que ce n'est pas le cas dans la deuxième …



$$R\left[t_2 - t_1, dist\left(P_1, P_2\right)\right] = R\left[t'_2 - t'_1, dist'\left(P_1, P_2\right)\right]$$
$$dist\left(P_1, P_2\right) \neq dist'\left(P_1, P_2\right)$$

$$t_2 - t_1 \neq t'_2 - t'_1$$

Vrai pour $\underbrace{R[\mathrm{dt},\mathrm{dist}] = \mathrm{V}^2\mathrm{dt}^2 - \mathrm{dist}^2}_{\text{intervalle invariant de Minkowski}}$, mais aussi pour tout R dépendant ***à la fois*** de dt & dist …

L'expérience (quotidienne … dans les accélérateurs de particules !) montre que les propriétés de l'espace-temps dans lequel on vit sont localement (c-à-d à l'échelle des laboratoires typiquement) celles de l'espace-temps de Minkowski, et pas celles de celui de Newton.

→ En ce sens, la théorie de l'espace-temps de Newton est « moins bonne » que celle de Minkowski

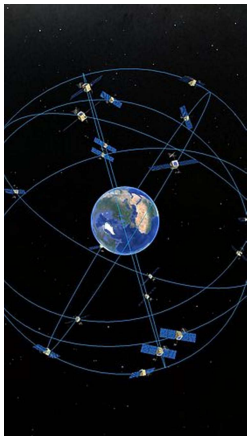
→ **ne veut pas pour autant dire « théorie fausse » !!!**

(ce n'est qu'une question de précision, et d' « adéquation » au monde dans lequel nous vivons)

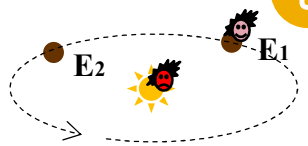
3

L'expérience (quotidienne … dans les accélérateurs de particules !) montre que les propriétés de l'espace-temps dans lequel on vit sont localement (c-à-d à l'échelle des laboratoires typiquement) celles de l'espace-temps de Minkowski, et pas celles de celui de Newton.

… mais … pas que dans les accélérateurs de particules !!!

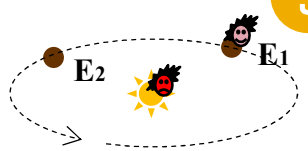


La technologie GPS est une **utilisation quotidienne concrète** des propriétés de l'esp-tps relativiste !
Une telle technologie serait inconcevable si notre esp-tps était newtonnien, et ne pas prendre en compte les effets relativistes dans les « calculs GPS » conduirait à une dérive de la précision GPS de plusieurs km/jour !



Retour à une de nos questions bêtes (mais peut-être …) → **relativité du temps :**

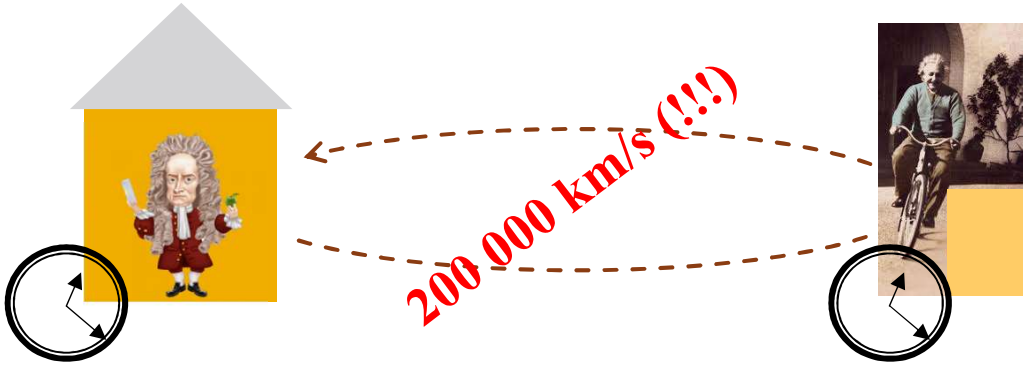
deux amis, Isaac et Albert, possédant des montres identiques, se rendent à 17h à une conférence se terminant à 18h. Isaac va suivre la conf, mais Albert préfère finalement aller se promener, et doit retrouver Isaac à la fin de la conf. Ils se séparent à 17h, indication sur leurs 2 montres. Mais comme il est « en mouvement », lorsqu'il rejoint Isaac, l'indication de la montre d'Albert ne sera pas la même que celle de Isaac au retour !!!



Retour à une de nos questions bêtes (mais peut-être …) → **relativité du temps** :

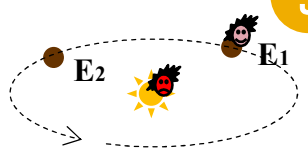
deux amis, Isaac et Albert, possédant des montres identiques, se rendent à 17h à une conférence se terminant à 18h. Isaac va suivre la conf, mais Albert préfère finalement aller se promener, et doit retrouver Isaac à la fin de la conf. Ils se séparent à 17h, indication sur leurs 2 montres. Mais comme il est « en mouvement », lorsqu'il rejoint Isaac, l'indication de la montre d'Albert ne sera pas la même que celle de Isaac au retour !!!

… avec des chiffres ?



1h20 ←←←←←←←←←←←←←←←←←← 1h00

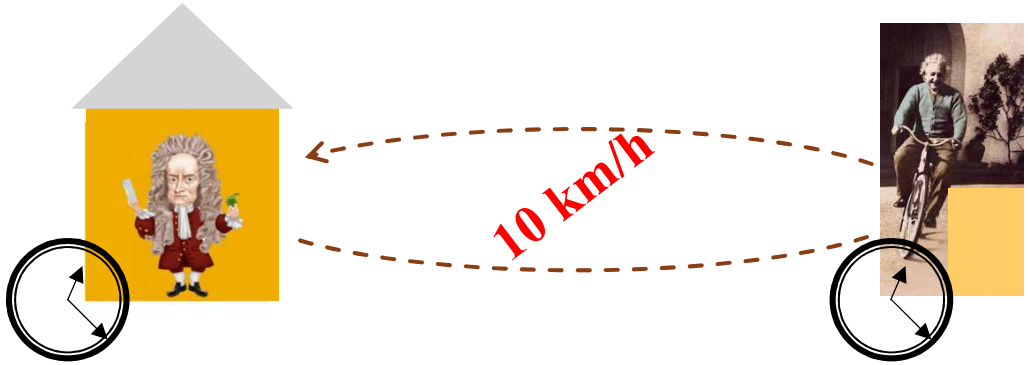
1h00 →→→→→→→→→→→→→→→→→→ 0h45



Retour à une de nos questions bêtes (mais peut-être …) → **relativité du temps** :

deux amis, Isaac et Albert, possédant des montres identiques, se rendent à 17h à une conférence se terminant à 18h. Isaac va suivre la conf, mais Albert préfère finalement aller se promener, et doit retrouver Isaac à la fin de la conf. Ils se séparent à 17h, indication sur leurs 2 montres. Mais comme il est « en mouvement », lorsqu'il rejoint Isaac, l'indication de la montre d'Albert ne sera pas la même que celle de Isaac au retour !!!

… avec des chiffres ?



différence = 1.54 dix mille milliardième de s …

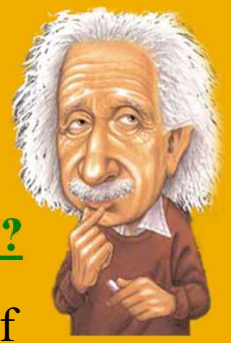
Gravitation, Relativité Générale : une idée en or !!!

Rappel : … et pourtant … un **fait expérimental** : l'**universalité de la chute libre**

Einstein : l'universalité de la chute libre nous apprend que le mouvement d'un corps soumis à la gravitation ne dépend pas (des propriétés) de ce corps

il ne peut donc dépendre que des propriétés de ce dans quoi il se meut …

… c'est-à-dire des propriétés de l'espace-temps (→ mouvement libre)



→ peut-on renoncer à la force gravitationnelle (description à la Newton) ???

- Espace sans courbure + temps uniforme (esp-tps Newton) → mvt libre = rect unif
- ***Espace-temps*** sans courbure (relativité restreinte / Einstein, Minkowski) → idem
- Einstein (relativité générale) : étant donné que la gravitation → mvts non rect unif …

… et qu'on veut renoncer à toute notion de force gravitationnelle, alors, **nécessairement** :

le phénomène de gravitation nous apprend que l'espace-temps :

(1) n'a pas (exactement) les propriétés de l'espace-temps de Minkowski

(2) possède (donc) une certaine « courbure »

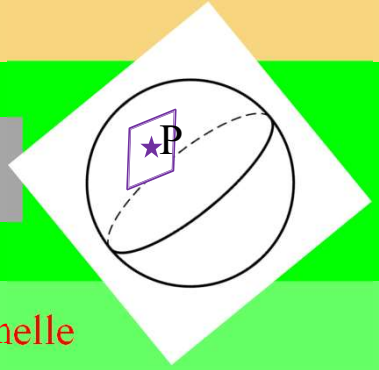
(3) la gravitation est un effet de cette « courbure » de l'espace-temps.

Gravitation, Relativité Générale : une idée en or !!!

… pourtant, ça marchait bien, Minkowski … comment concilier cette interprétation de la gravitation à ce qu'on a appris dans les accélérateurs de particules ?

De même que la sphère possède une courbure qui « ne se voit pas » à petite échelle, les effets de la courbure de l'espace-temps

la sphère est dotée d'une courbure, mais ça « ne se voit pas » à petite échelle



(**<u>différence</u> de gravitation** d'un point à un autre) ne se ressentent pas à petite échelle

→ à l'échelle d'un laboratoire, l'espace-temps ~ espace-temps de Minkowski

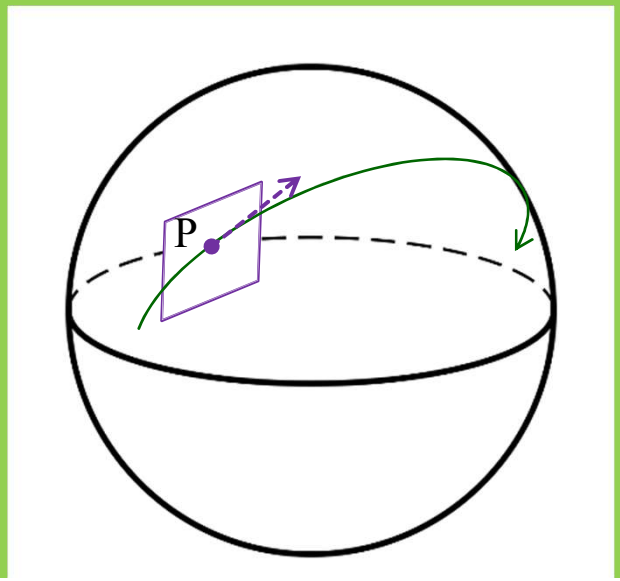
L'idée de la relativité générale (répond à 3 (presque) questions en une théorie) :

0 – en l'absence de tout corps massif (ou loin de ceux-ci) (et sans « constante cosmologique »), l'esp-tps est Minkowski (sans courbure), et les mvts libres (les « plus directs ») sont rectilignes uniformes ;

1 – la présence d'un corps massif M détermine la courbure de l'espace-temps dans son voisinage ;
→ action (locale) de la matière sur la structure de l'espace-temps

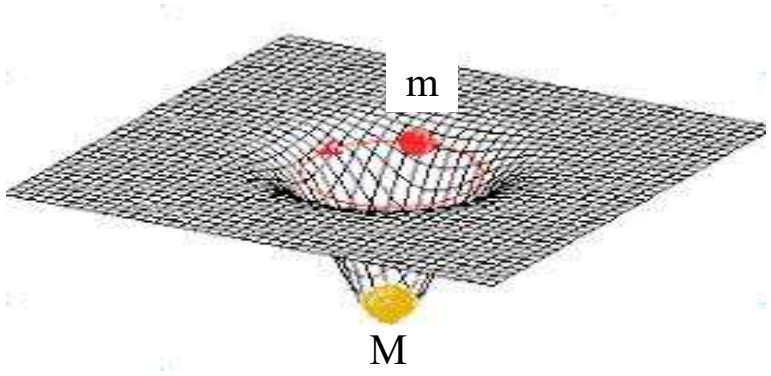
2 – un corps m se déplaçant dans le voisinage du corps massif M suit le mouvement le « plus direct » prenant en compte la courbure. A chaque instant, c'est le mouvement rectiligne uniforme dans l'espace-temps de Minkowski tangent au point (événement) ou se trouve m (notion mathématique de « géodésique »). → action de la structure de l'espace-temps sur le mouvement de la matière

L'idée du mvt en relativité générale illustrée sur la sphère (géodésiques de la sphère)



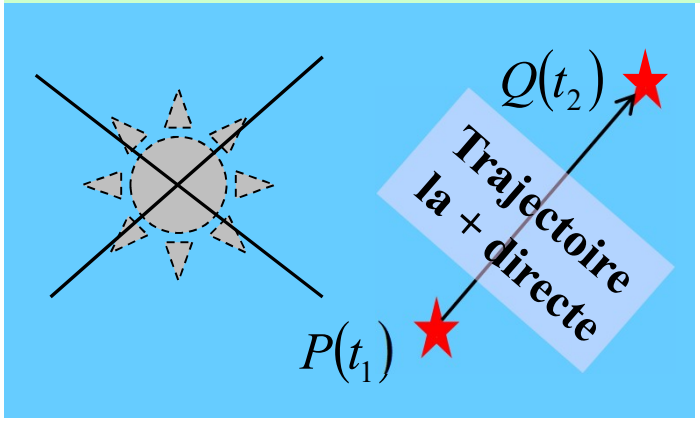
L'idée illustrée sur une surface présentant une courbure dans le voisinage d'un corps M. **!!! ATTENTION !!! :**

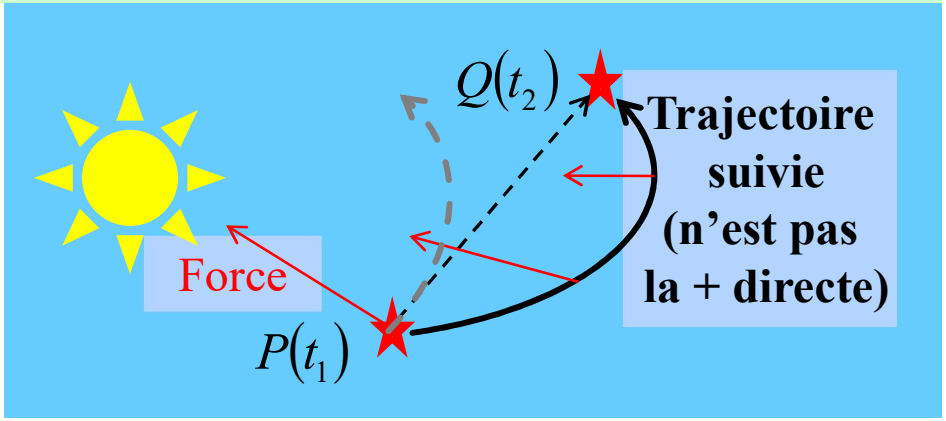
- bonne image pour représenter l'action de la courbure sur le mvt de m ;
- **MAUVAISE IMAGE** pour représenter ***COMMENT*** la masse M « courbe » **l'espace/l'espace-temps** dans son voisinage



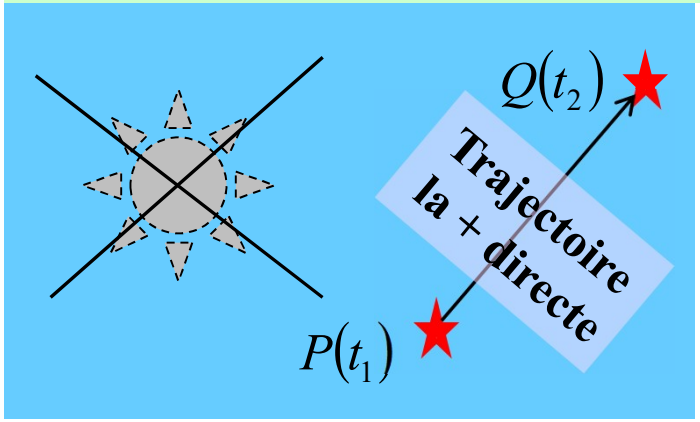
Résumé : relativité générale versus gravitation newtonienne:

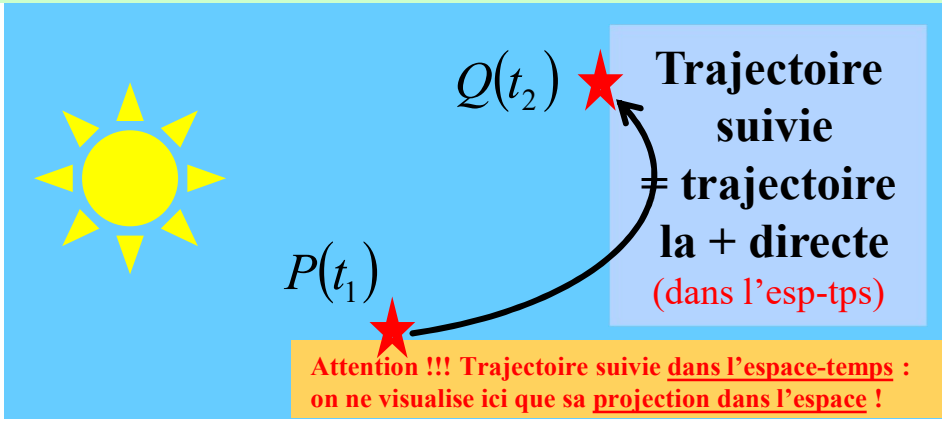
Newton : propriétés de l'espace-temps indépendantes du contenu matériel





Einstein : geométrie de l'espace-temps dépend du contenu matériel



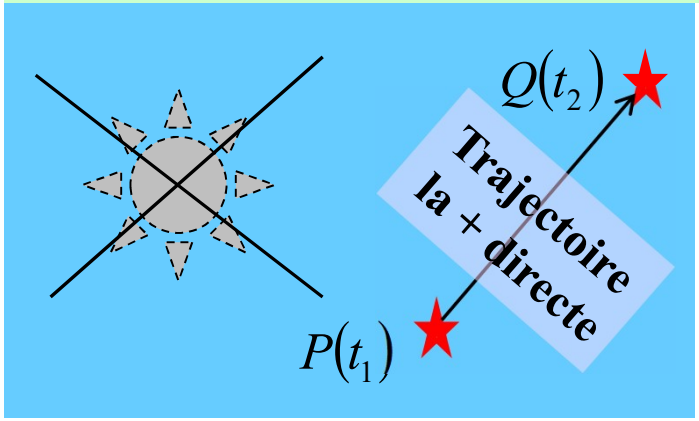


(quasi-)**équivalence** (sous certaines conditions) : **importance** de la notion d'**espace-temps** !!!

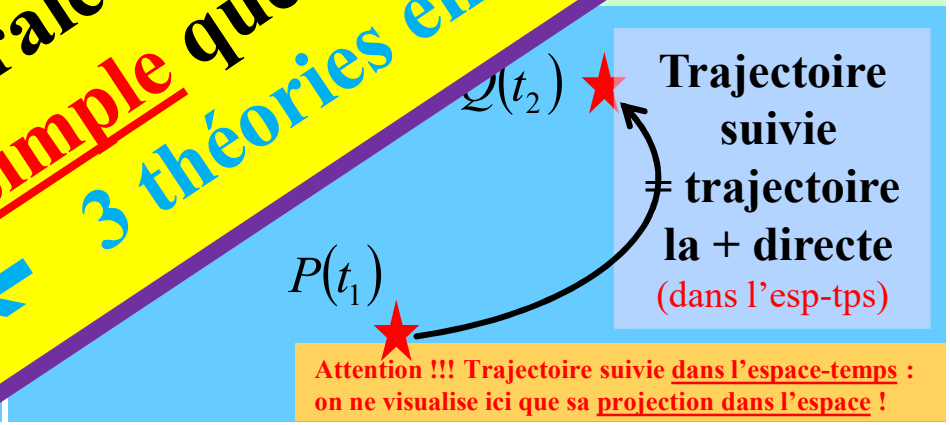
Nombreux succès de la relativité générale (mieux que Newton !!!) : OK mvt de Mercure, mouvement de la lumière (« déviation » par le Soleil, lentillage gravitationnel, …), cosmologie, astres denses (étoiles à neutrons, trous noirs, …), **GPS**, navigation spatiale, … **et …**

Résumé : relativité générale versus gravitation newtonienne:

Newton : propriétés de l'espace-temps indépendantes du contenu m



Einstein : geométrie de l'espa



équivalence (sous certaines conditions) : de la notion d'espace-temps !!!

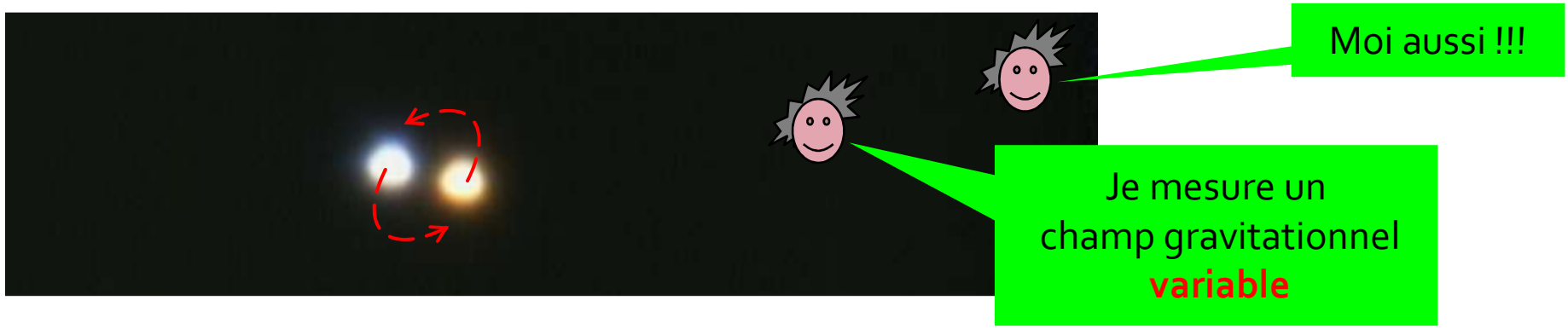
Relativité Générale : théorie conceptuellement beaucoup plus simple que la théorie de Newton !!!

3 théories en une !!!

Nomb ivité générale (mieux que Newton !!!) : mvt de Mercure, mouvem (« déviation » par le Soleil, lentillage gravitationnel, …), cosmologie, astres dens es à neutrons, trous noirs, …), GPS, navigation spatiale, … et …

… et les ondes gravitationnelles, dans l'histoire : de quoi s'agit-il ?

Système gravitationnel évolutif → champ de gravitation variable

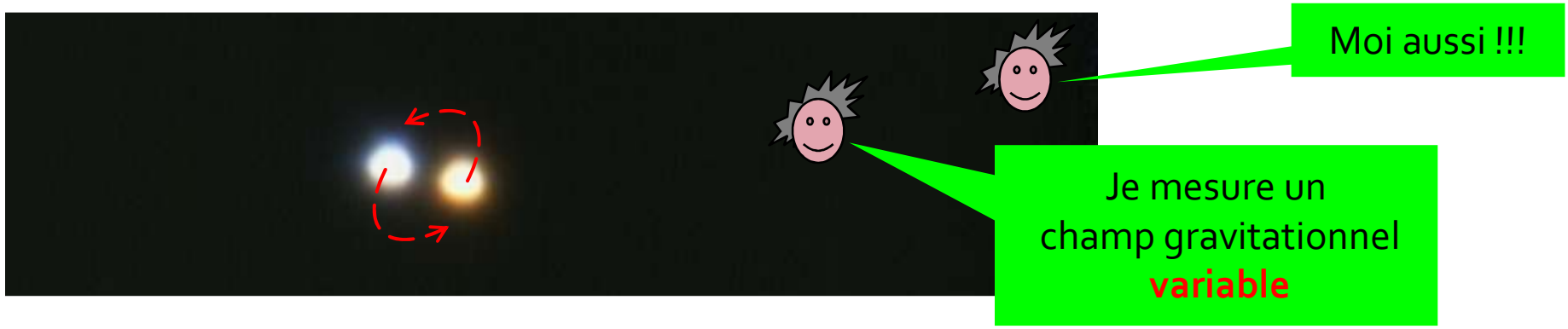


Approche **Newtonnienne** : la **force de gravitation** **change** au cours du temps …

Approche **relativiste** : la **géométrie de l'espace-temps** **change** au cours du temps …

… et les ondes gravitationnelles, dans l'histoire : de quoi s'agit-il ?

Système gravitationnel évolutif → champ de gravitation variable



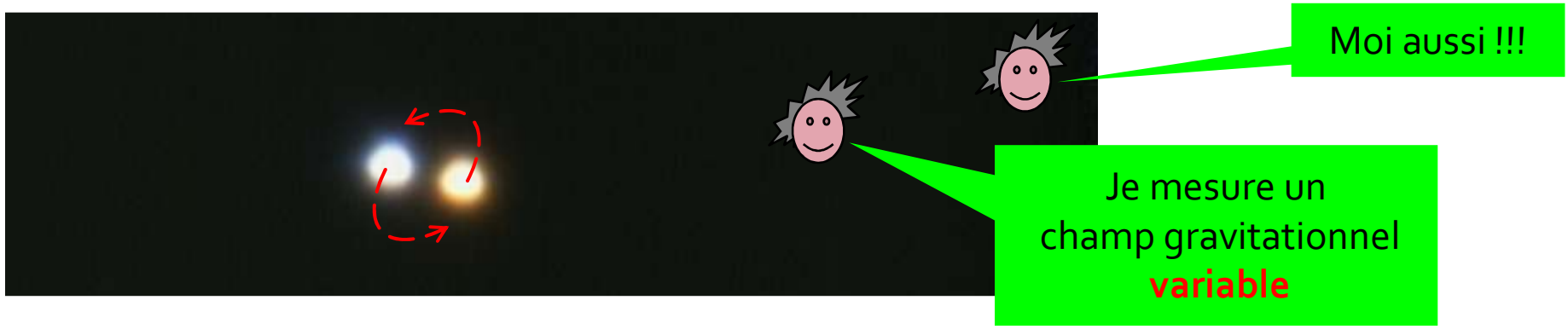
Approche **Newtonnienne** : la **force de gravitation** change au cours du temps …

… de façon instantanée

Approche **relativiste** : la **géométrie de l'espace-temps** change au cours du temps …

… et les ondes gravitationnelles, dans l'histoire : de quoi s'agit-il ?

Système gravitationnel évolutif → champ de gravitation variable



Approche **Newtonnienne** : la **force de gravitation** **change** au cours du temps …

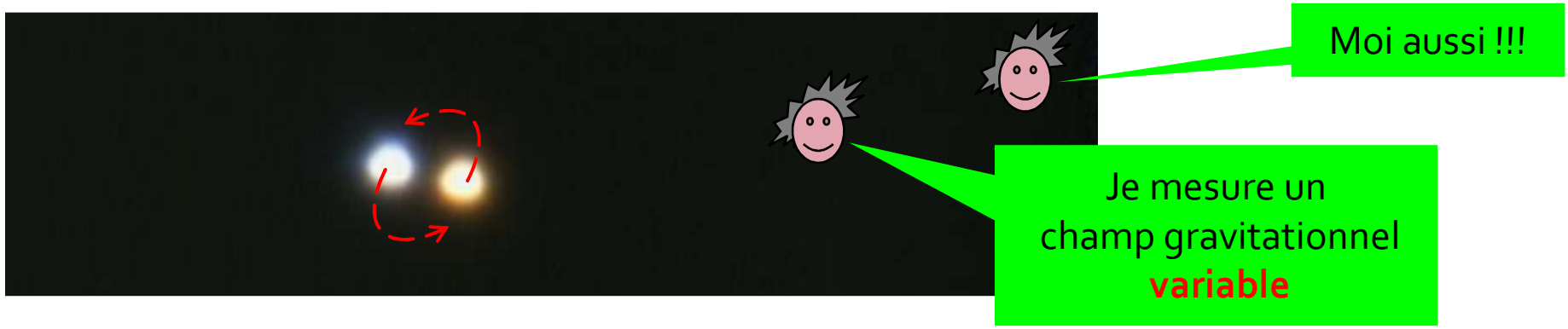
… de façon instantanée

Approche **relativiste** : la **géométrie de l'espace-temps** **change** au cours du temps …

… avec un **retard** **proportionnel à la distance**

… et les ondes gravitationnelles, dans l'histoire : de quoi s'agit-il ?

Système gravitationnel évolutif → champ de gravitation variable



Approche **Newtonnienne** : la **force de gravitation** **change** au cours du temps …

… de façon instantanée

Approche **relativiste** : la **géométrie de l'espace-temps** **change** au cours du temps …

… avec un **retard** **proportionnel à la distance**

La **gravitation se propage** (ondes de gravitation)

Relativité générale $\xrightarrow[\text{inévitable !}]{\text{induction}}$ **une, et une seule (!), théorie des ondes gravitationnelles**

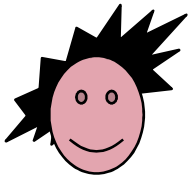
Les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de Minkowski !

… donc à la vitesse de la lumière … puisque la théorie de la lumière **choisie** (en accord avec l'expérience) impose *vitesse de la lumière = V* !!!

La relativité générale ➔ **interprétation physique naturelle** de la vitesse de Minkowki V (introduite pour définir l'esp-tps de Minkowski) : c'est la « vitesse de la gravitation » !!!

En ce sens, il est plus « naturel » de dire :

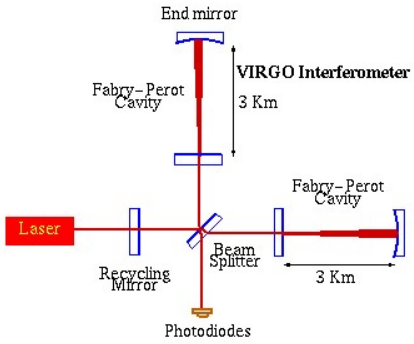
la lumière se déplace à la vitesse des ondes gravitationnelles



vitesse de référence naturelle en relativité générale !

Pour tout observateur, une onde gravitationnelle est perçue comme une distorsion de l'espace qui se propage au cours du temps

→ perturbe les distances mesurées entre différents objets (miroirs, …)



Digression astrophysique : astres denses

Quand une étoile arrive en « fin de vie », elle implose et une partie de sa matière atteint un état condensé :

si masse initiale pas trop importante (quelques masses solaires)

- naine blanche :
  - masse < 1.4 Msol (étoile génératrice < ~ 8 Msol)
  - volume ~ planète terrestre
  - densité ~ tonne/cm3
  - équilibre assuré par la « pression électronique »
  - destin du Soleil

- étoile à neutrons :
  - masse < 3 Msol
  - dimension ~ 10 à 20 km
  - densité ~ 1 milliard tonnes/cm3 (noyau atomique)
  - composition : neutrons « état superfluide »

Digression astrophysique : astres denses

Quand une étoile arrive en « fin de vie », elle implose et une partie de sa matière atteint un état condensé :

si masse initiale pas trop importante (quelques masses solaires)

- naine blanche :
  - masse < 1 [illegible] étoile génératrice < ~ 8 Msol)
  - volume ~ p[illegible]
  - densité ~ tonne/cm[illegible]
  - équilibre assuré par la « p[illegible]ronique »
  - destin du Soleil

peuvent être décrites dans le cadre newtonnien

- étoile à neutrons :
  - masse < 3 M[illegible]
  - dimension [illegible]
  - densité ~ 1 milli[illegible]mique)
  - composition : neutrons [illegible]

ne peuvent que grossièrement être décrites dans le cadre newtonnien

Digression astrophysique : astres denses

Quand une étoile arrive en « fin de vie », elle implose et une partie de sa matière atteint un état condensé :

si masse initiale pas trop importante (quelques masses solaires)

- naine blanche :
  - masse < 1 [illegible] toile génératrice < ~ 8 Msol)
  - volume ~ p[illegible]
  - densité ~ tonne/cm[illegible]
  - équilibre assuré par la « p[illegible] ronique »
  - destin du Soleil

peuvent être décrites dans le cadre newtonnien

- étoile à neutrons :
  - masse < 3 M[illegible]
  - dimension [illegible]
  - densité ~ 1 milli[illegible] mique)
  - composition : neutrons [illegible]

ne peuvent que grossièrement être décrites dans le cadre newtonnien

Et si on « comprime » encore ? (… ce qui se passe « naturellement » si le résidu condensé de l'étoile est trop massif …)

➔ **trou noir** : objet dont la « structure » est ***incompréhensible dans le cadre de la gravitation newtonienne*** : il faut la **relativité générale**, ou des théories de la même « famille », **pour comprendre** ce dont il s'agit et **ses propriétés**

Digression astrophysique : astres denses

Quand une étoile arrive en « fin de vie », elle implose et une partie de sa matière atteint un état condensé :

si masse initiale pas trop importante (quelques masses solaires)

- naine blanche :
  - masse < 1 [illegible] toile génératrice < ~ 8 Msol)
  - volume ~ p[illegible]
  - densité ~ tonne/cm[illegible]
  - équilibre assuré par la « p[illegible] ronique »
  - destin du Soleil

peuvent être décrites dans le cadre newtonnien

- étoile à neutrons :
  - masse < 3 M[illegible]
  - dimension [illegible]
  - densité ~ 1 milli[illegible] mique)
  - composition : neutrons [illegible]

ne peuvent que grossièrement être décrites dans le cadre newtonnien

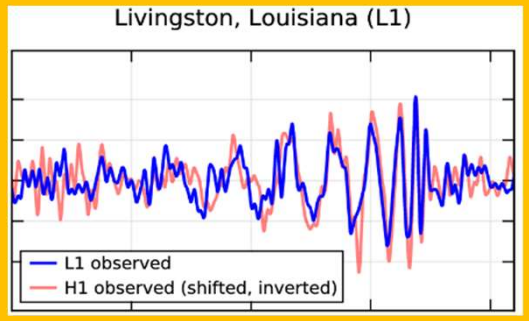
Et si on « comprime » encore ? (… ce qui se pa[illegible] si le résidu condensé de l'étoile est trop massif …)

➔ **trou noir** : objet dont la « st[illegible] *dans le cadre de la gravitation newtonie[illegible]* [illegible]e, ou des théories de la même « famille », pour co[illegible] et ses propriétés

pas même imaginable dans un cadre newtonnien

Que peut-on attendre de la détection (directe) des ondes gravitationnelles ?

Observer l'invisible & l'inaccessible … & accéder à diverses informations statistiques …



- **trous noirs (fusions, oscillations, …)**
- objets trop sombres pour être visibles : étoiles à neutrons, …
- binaires d'objets compacts
- …

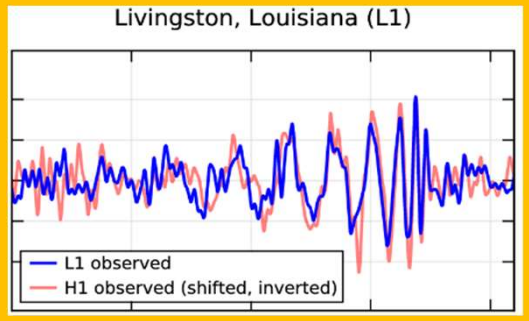
- Univers avant la recombinaison (une époque où la lumière était sans cesse diffusée …)
  → càd : âge de l'Univers < 380 000 ans
- phénomènes stellaires internes violents : séismes d'étoiles à neutrons
- …

- fond stochastique de binaires invisibles individuellement (gravitationnellement)
- fond cosmologique (lié à l'Univers très primordial ?)
- …

+ … **tout ce à quoi on ne s'attend pas !!!!!!**

Que peut-on attendre de la détection (directe) des ondes gravitationnelles ?

Observer l'invisible & l'inaccessible … & accéder à diverses informations statistiques …



- **trous noirs (fusions, oscillations, …)**
- objets trop sombres pour être visibles : étoiles à neutrons, …
- binaires d'objets compacts
- …

- Univers avant la recombinaison (une époque où la lumière était sans cesse diffusée …)
  → càd : âge de l'Univers < 380 000 ans
- phénomènes stellaires internes violents : séismes d'étoiles à neutrons
- …

- fond stochastique de binaires invisibles individuellement (gravitationnellement)
- fond cosmologique (lié à l'Univers très primordial ?)
- …

+ … tout ce à quoi on ne s'attend pas !!!!!!

Aussi : voir gravitationnellement des phénomènes que l'on voit AUSSI optiquement …

Détections conjointes (astronomie « multi-messagère »)

Petit bilan depuis la 1ère « observation (par ondes) gravitationnelle(s) » …

Code couleurs :
bilan fin 2017 (inluant un « candidat non confirmé » alors) …
… et nouvelles détections récemment annoncées après analyses plus complètes

Des fusions de **trous noirs binaires** … :

- 14/09/2015 (z = 0.09 ; 410 Mpc) : **36 + 29 → 62** (diff = 3) (en « masses solaires »)
- 12/10/2015 (z = *** ; *** Mpc) : 14 + 24 → 35 (diff ~ 3)
- 26/12/2015 (z = 0.09 ; 440 Mpc) : **14.2 + 7.5 → 20.8** (diff = 0.9)
- 04/01/2017 (z = 0.18 ; 880 Mpc) : **31.2 + 19.4 → 48.7** (diff = 1.9)
- 08/06/2017 (z = 0.07 ; 340 Mpc) : **12 + 7 → 18** (diff = 1)
- 29/07/2017 (z = *** ; 1.500 Mpc) : ** + ** → 80 (diff = 5) la + distance, la + massive
- 09/08/2017 (z = *** ; *** Mpc) : ** + ** → ** (diff = *)
- 14/08/2017 (z = 0.11 ; 540 Mpc) : **30.5 + 25. 3 → 53.2** (diff = 2.6)
- 18/08/2017 (z = *** ; 770 Mpc) : 36 + 27 → 60 (diff = 3)
- 23/08/2017 (z = *** ; *** Mpc) : ** + ** → ** (diff = *)

Petit bilan (suite)

Des fusions de **trous noirs binaires** …

… et d'une **binaire d'étoiles à neutrons** !

- 17/28/2017 (40 Mpc) : EN + EN → ???

On attend la suite avec impatience !!!

… fusion également vue dans toutes les longueurs d'ondes de la **lumière** !!! → **1er exemple d'astronomie multi-messagère**

Jusqu'à présent, que des objets de l'astronomie « traditionnelle », ou dont l'existence était fortement suspectée …
Mais **va-t-on trouver d'autres objets ???**

Fusion EN-EN : a permis d'observer la matière dans des conditions extrêmes → **formation d'éléments lourds** : or, platine, plutonium, …

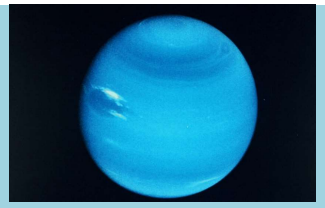
Astronomie « gravitationnelle » ? … ou « des ondes gravitationnelles » ?

6

« Astronomie gravitationnelle » : comment la définir ?
Un acte d'astronomie gravitationnelle est la découverte d'un corps, et la détermination de ses propriétés, à partir de l'observation des effets gravitationnels causés par ce corps dans son voisinage (sans observation « directe » par la lumière – électromagnétique, ... –).

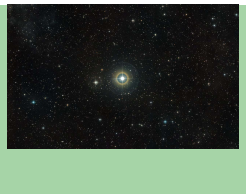
Les premiers actes d'astronomie gravitationnelle :

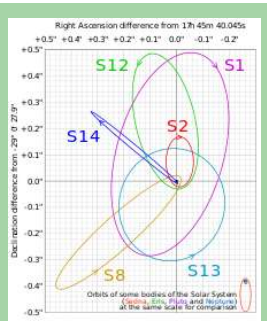
– 1845 (Adams, Le Verrier) : découverte de Neptune (position, masse) par son action gravitationnelle sur Uranus (observation : 1846, par Galle, si on néglige quelques observations « accidentelles » antérieures)
– 1844-51 (Bessel, Peters) : existence (et orbite) de Sirius b par son action gravitationnelle sur Sirius a (observation : 1862, par A. G. Clark)



Plus récemment :

– 1995 … : 1ères exoplanètes, par vélocimétrie Doppler (sur l'étoile)
– années 1990-2000 : le trou noir massif au centre de notre Galaxie, par son action gravitationnelle sur les étoiles de son voisinage
– …





Et plus récemment encore (2015) : observations par les détecteurs d'ondes gravitationnelles

Résumé : espace-temps/gravitation, lumière, astronomie

1 – Les théories de la relativité restreinte (RR) & générale (RG) sont des théories de l'espace-temps (complètement disjointes d'une quelconque théorie de la lumière !).

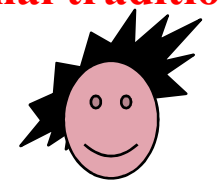
2 – Dans sa formulation, la RR contient une grandeur V homogène à une vitesse (une telle grandeur n'existe pas dans la définition de l'espace-temps de Newton), qui n'a aucune interprétation physique a priori. L'espace-temps de la RR (Minkowski) est sans courbure.

3 – La RG est une théorie qui interprète la gravitation comme un effet de la courbure de l'espace-temps. A petite échelle, les effets de la courbure peuvent être éliminés (chute libre), et l'espace-temps est donc quasiment celui de la RR (avec sa vitesse V …).

4 – La **RG** **IMPOSE** une **interprétation incontournable de V** : c'est la **vitesse** de propagation des **ondes gravitationnelles**.

5 – Les expériences montrent que la lumière se déplace précisément (incertitude expérimentale extrêmement faible) à la vitesse V, donc à la vitesse des ondes gravitationnelles …

6 – Les ondes gravitationnelles nous offrent un moyen nouveau, original, complémentaire et très prometteur d'observation de l'Univers. Notamment la **possibilité d'observer des objets et des phénomènes inobservables par le canal traditionnel de l'optique.**



....
....
....
… et merci pour votre attention !!!
zzzz…