

Questions de cosmologie

Comment décrire l'Univers « dans son ensemble » ?

La gravitation et les « modèles d'Univers »
à la lumière des observations récentes

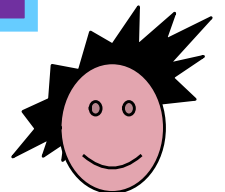
Bertrand Chauvineau

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

UMR Lagrange

chauvineau@oca.eu

... avec la participation de ...
... et ses copains ...



But(s) de cet exposé

1 – Certaines idées ont la vie dure ... (11 slides)

L'idée d'un Univers stationnaire et éternel ...

... qui résiste à ce que nous apprend la gravitation !

... et qui pourtant soulève un gros problème (paradoxe d'Olbers)

2 – La question cosmologique sous l'angle Newtonien (10 slides)

Solutions homogènes et isotropes ...

→ modèles d'univers

... mais voit-on une expansion isotrope ?

(← Le comportement « que devrait avoir » la lumière dans l'espace-temps Newtonien)

3 – La question cosmologique sous l'angle relativiste (5 slides)

Le comportement de la lumière en relativité

Expansion dynamiquement et observationnellement isotrope

Les modèles d'Univers

4 – L'Univers aujourd'hui (et les questions) (10 slides)

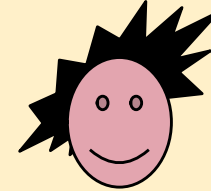
Un passé en plusieurs phases

Ce que nous apprennent les missions (récentes)

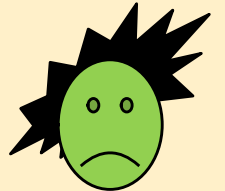
Questions ouvertes

Pour prévenir tout mouvement de panique ...

C'est (bien) un exposé (qui se veut ...) **grand public** !!!

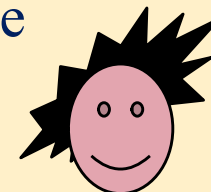


Or, le grand public **n'aime pas** (généralement) les mathématiques/formules ...



Il y aura cependant, ici et là, quelques (rares) formules ... Mais, **deux cas de figure** se produiront :

- formules qu'on peut tout simplement **ignorer** sans aucune conséquence sur la compréhension du discours
(elles sont là : (1) pour faire joli, (2) pour ceux qui aiment, (3) pour les deux ...)
- formules dont le sens sera **expliqué** (avec des mots « ordinaires ») lorsqu'il y aura quelque chose d'utile à comprendre/retenir pour la suite



I – Certaines idées ont la vie dure ...

L'idée persistante d'un **Univers** :

- **existant depuis toujours** (et pour toujours)
- aux **propriétés immuables** (dans l'ensemble)

a longtemps dominé, malgré la connaissance de **théories de la gravitation** (dont on suppose implicitement qu'elle détermine/domine le devenir de l'Univers) :

- théorie de la « **gravitation universelle** » (Newton, 1687)
- théorie de la **Relativité Générale** (Einstein, 1915)

→ **Univers immuable** (stationnaire) **non naturelle/générique, sinon impossible**

On ne renoncera à cette idée préconçue qu'avec ... la **mise en évidence (observationnelle) de l'expansion de l'Univers** (~ années 1920).

Nous allons ici :

- présenter/comparer ces deux théories de la gravitation (Newton, RG)
- discuter les « modèles d'univers » qui en résultent (section II)
- parler de (certains points de) la cosmologie aujourd'hui (section III)

(Mais d'abord ...) **Gravitation** : « ce qui fait » que quand on met 2 corps en présence :

- (s'ils sont au repos) ils se mettent spontanément en mouvement l'un vers l'autre
 - je lâche un objet sans vitesse depuis une certaine hauteur : il tombe sur le sol
- (s'ils sont déjà en mouvement) ils modifient spontanément leurs mouvements en direction l'un de l'autre
 - je lâche un objet avec une vitesse horizontale depuis une certaine hauteur : sa trajectoire s'infléchit en direction du sol (qu'il finit par atteindre)
 - au lieu de tomber sur le Soleil (sur la Terre), les planètes (la Lune) tournent autour de celui-ci (de celle-ci)



Ce sont des **constatations quotidiennes** ...
... Mais ... **Comment expliquer ceci ?**

- ➔ Faire une « **théorie de la gravitation** », c'est-à-dire imaginer un « discours mathématique » qui permette de prévoir et **quantifier ses effets** (mouvement des planètes, envoyer une sonde spatiale vers tel objet céleste, ...) avec une « **précision satisfaisante** »
- ➔ **2 théories ont dominé l'histoire des sciences** (physique, astronomie) :
- théorie de la « **gravitation universelle** » (Newton, 1687)
 - gravitation = **manifestation d'une force** particulière
 - théorie de la **Relativité Générale** (Einstein, 1915)
 - gravitation = **propriété de l'espace-temps**

**Deux descriptions
radicalement différentes
(du même phénomène)**

I.1 – La gravitation selon Newton (1687)

Newton postule que les propriétés de l'espace et du temps sont **immuables**, et **indépendantes** de ce qu'il contient/ce qui s'y passe. En particulier, cette théorie de l'espace-temps énonce :

- que le temps s'écoule « uniformément »
- que l'espace a les propriétés « Euclidienne » (celles qu'on apprend à l'école :
circonférence du cercle = $2\pi R$, somme des angles dans un triangle = 180° , ...)
 - propriétés de l'espace **identiques partout** (homogénéité)
 - propriétés de l'espace **identiques dans toutes les directions** (isotropie)

Pouvait-il
imaginer
autre
chose ?...

Or, dans ce contexte, si un corps ne subit l'action d'**aucune force** (corps « libre »), son **mouvement** est nécessairement :

- **rectiligne** (suivant une ligne droite)
- **uniforme** (à vitesse constante)

Principe d'inertie de Newton

➔ Donc, puisque (1) les objets **tombent sur le sol**, (2) les planètes **tournent autour du Soleil**, ... ils **subissent l'action d'une force spécifique**, qui les « écarte » du mouvement inertiel

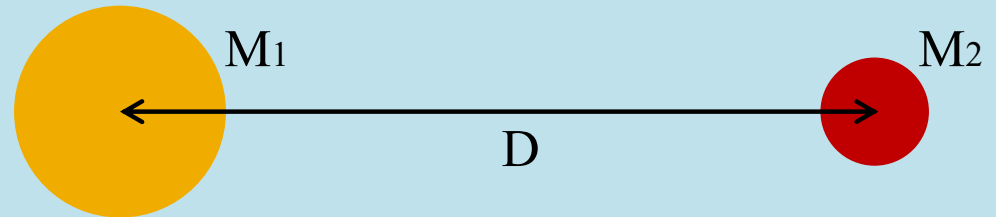
➔ théorie de la gravitation universelle (universelle car elle concerne tous les corps)

Cette force entre deux corps dépend :

- de la « masse » de chacun de ces corps
- de la distance D qui les sépare (loi en « inverse carré » de Newton)

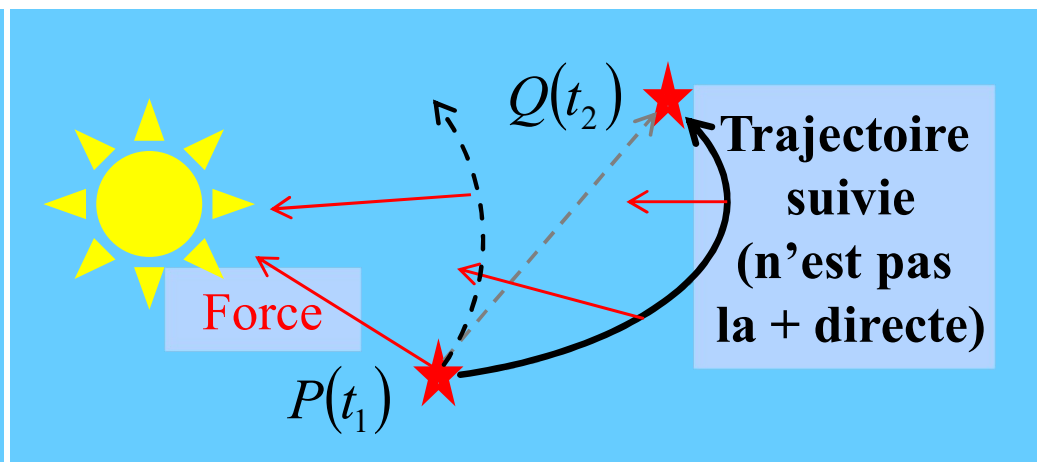
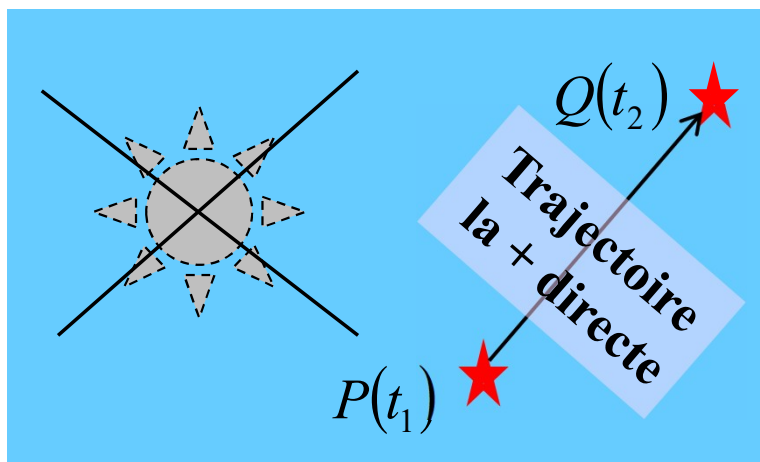
→ La fameuse « loi en $1/D^2$ »
(de Newton)

$$F = G \frac{M_1 M_2}{D^2}$$



Intensité de la force d'attraction qu'exerce
chacun des deux corps sur l'autre

Avec (en plus) une « théorie du mouvement », qui énonce comment le mouvement d'un corps est affecté par une force agissant sur lui, Newton parvient à élaborer une théorie précise des « mouvements gravitationnels »



Succès de la « triple théorie » Newtonienne (de l'espace-temps, du mouvement, de la gravitation)

Succès de la gravitation de Newton

- explique les mouvements planétaires & terrestres (théorie « unificatrice »)

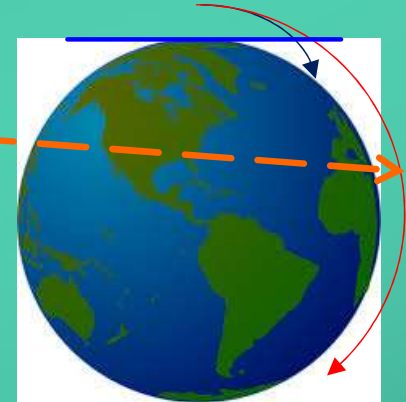
→ la Lune « tombe » sur la Terre, mais toujours « trop loin » !

→ permet de comprendre les lois de Kepler (orbites planétaires)

→ marées terrestres

→ mvt des satellites planétaires

→ ...



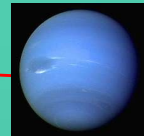
Théorie prédictive

- comète de Halley : 1531, 1607, 1682

→ (+76) → 1759



- découverte de Neptune (1846)



- compagnon de Sirius (1844/1862)



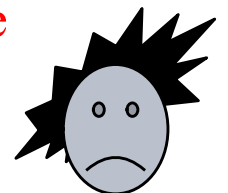
- ... etc ...

→ Naissance de
l'« astronomie gravitationnelle »

Mais la théorie rencontre un problème grave (car observationnel) : le mvt de Mercure

... et soulève aussi 2 questions : (1) universalité de la chute libre

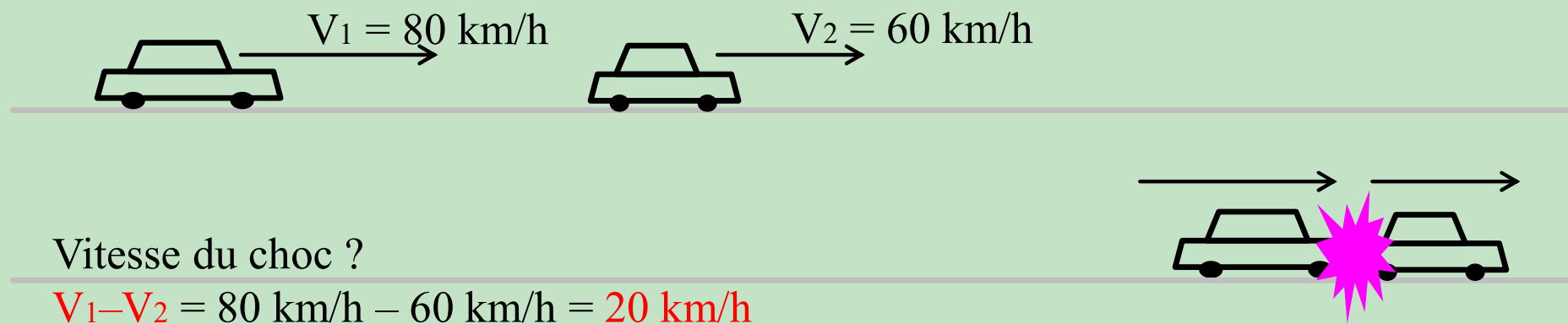
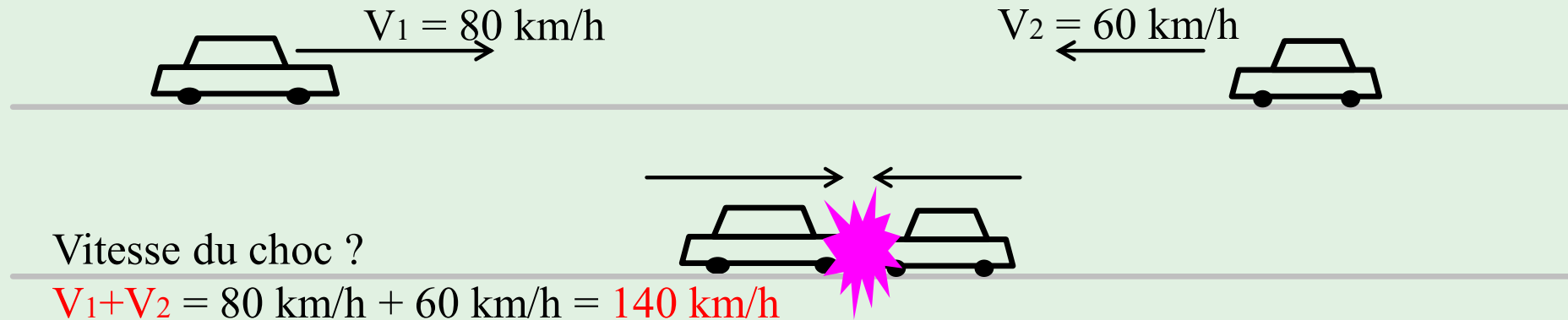
(2) interaction gravitationnelle : instantanée



I.2 – La gravitation relativiste (1915)

La **conception Newtonienne** de l'espace-temps s'est heurtée à un **problème expérimental**, relatif à la propagation de la **lumière** (Newton : la vitesse de *TOUT OBJET* est relative à l'observateur)

Additivité des vitesses (conséquence directe des propriétés de l'**espace-temps de Newton**) :



... et cette « loi de composition des vitesses » s'applique à « tout ce qui se déplace », **y compris la lumière !!!**

Or, en ce qui concerne la lumière, l'expérience de **Michelson-Morley (1881)** nous a appris qu'il se produit tout autre chose ... En bref :

- la propagation de la lumière est **isotrope** (la même dans toutes les directions) **pour tous les observateurs** (ce qui est **incompatible avec** les propriétés de l'**espace-temps de Newton**)
 - conception (1905/1908) d'une **nouvelle théorie de l'espace-temps** :
 - l'espace-temps de **Minkowski** (**aux propriétés indépendantes de son contenu matériel, comme l'espace-temps de Newton**)
- (**pour faire bref** ...) dans cet espace-temps, la **vitesse de la lumière (c)** est (1) la même pour tous les observateurs, (2) **indépendante de la direction** (isotropie)
 - Parler de **LA** **vitesse de la lumière a un sens !**
 - Aujourd'hui : possibilité techno GPS !!!
- ce qui (3) **permet de comprendre** le résultat de l'expérience de **Michelson-Morley** ...
- ... (4) tout en redonnant les **propriétés de l'espace-temps de Newton**, mais *seulement* à une très bonne **approximation**, tant que l'on ne considère que des **vitesses $\ll c$**

Important : dans l'espace-temps de Minkowski (cadre de la **relativité restreinte**) le principe d'inertie s'applique de la même façon que dans l'espace-temps de Newton :

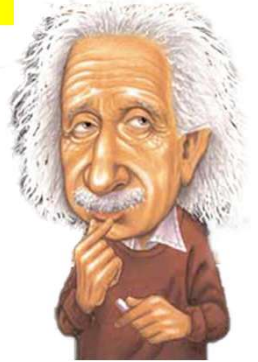
pas de force appliquée sur un corps => accélération nulle

Comment faire une théorie de la gravitation dans un tel « cadre relativiste » ?

(Rmq : transposer la théorie de Newton dans un tel contexte conduirait à des incohérences ...)

Point de départ = un **fait expérimental** : l'**universalité de la chute libre**

À partir de ce fait expérimental, Einstein conclut que **le phénomène de gravitation** n'est pas l'effet d'une force, mais est un **effet de la structure de l'espace-temps** lui-même



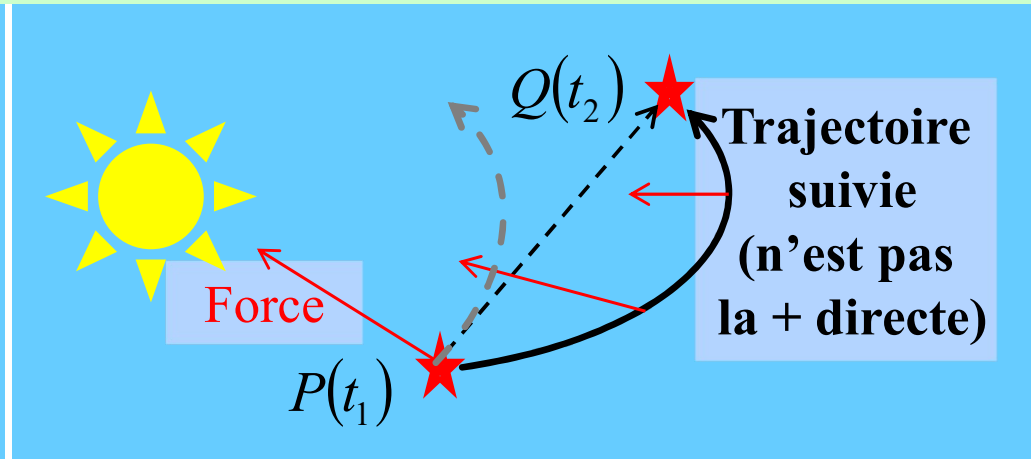
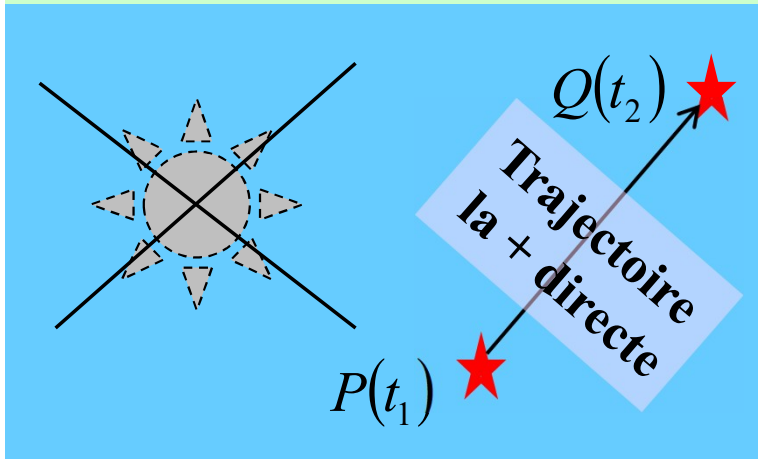
- contrairement à l'espace de Newton, ou à l'espace-temps de Minkowski, l'espace-temps possède, en tout point, une « **courbure** », **dépendant de son contenu matériel** (cette dépendance = **différence essentielle** avec Newton/Minkowski)
- cette courbure brise les symétries, qui étaient présentes dans l'espace-temps de Newton (et aussi dans l'espace-temps de Minkowski)
- cette « **perte de symétrie** » (notamment d'isotropie, c'est-à-dire que depuis un point donné, les directions ne sont pas équivalentes) **oriente le mouvement** « naturel » (inertiel) **des corps en direction des corps à l'origine de cette courbure locale** ...
- ... ce qui explique pourquoi les corps ont tendance à « tomber les uns sur les autres » (phénomène de gravitation)

La gravitation est donc un effet de la structure de l'espace-temps, cette structure étant fixée par le contenu matériel présent
→ Théorie de la Relativité Générale (RG)

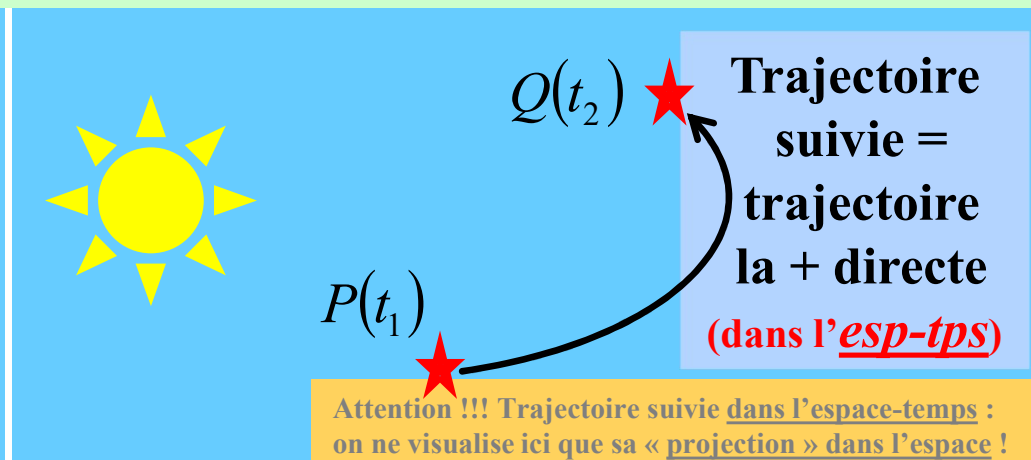
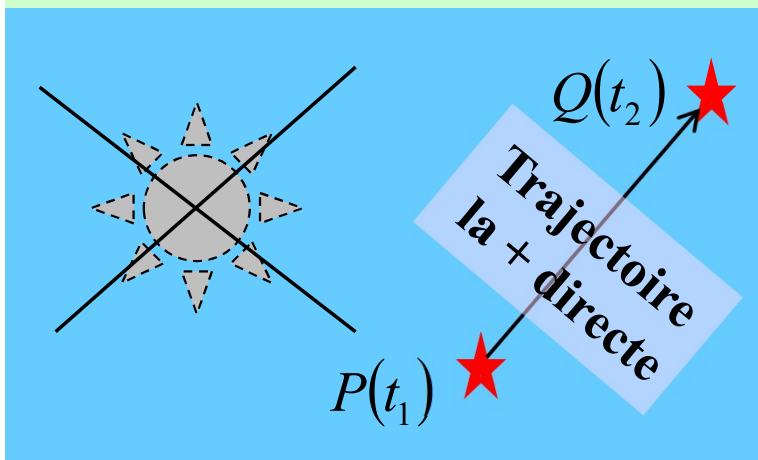
Résumé comparatif (avec des dessins ...):

gravitation newtonienne versus Relativité Générale

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



Einstein/RG : géométrie de l'espace-temps dépend du contenu matériel



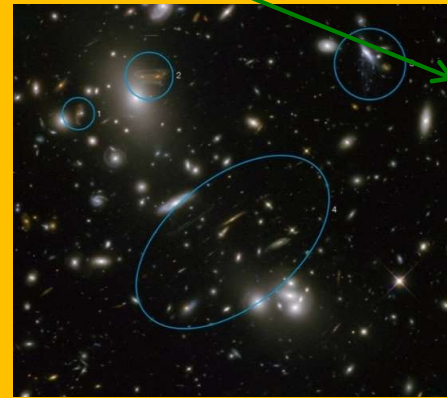
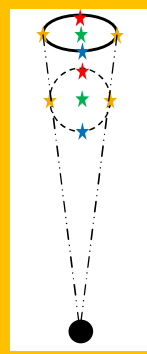
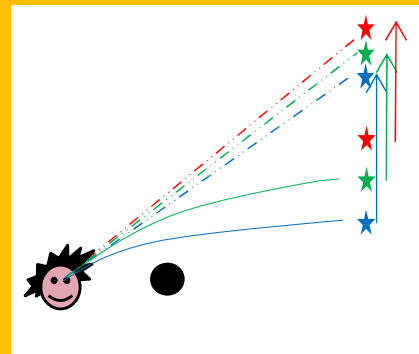
(quasi-)équivalence (sous certaines conditions) :
importance de la notion d'espace-temps !!!

Succès de la RG (théorie unique !) : innombrables !!!

Périkélie de Mercure (historique ! 18/11/1915 – une semaine avant la théorie complète ! –)

« déflexion » de la lumière

→ *Terminologie malheureuse !*

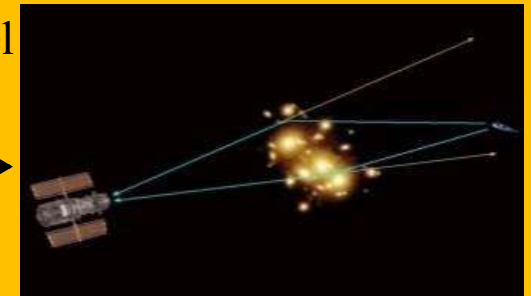


→ Eclipse de Soleil (historique ! 1919)

→ Effet Shapiro (versant temporel)

→ « meilleurs » tests actuels (en champ faible)

→ Lentillage gravitationnel



Expansion de l'Univers, théorie des fluctuations cosmologiques, fond diffus cosmologique (rayonnement thermique 3K), ...

Astres compacts & trous noirs

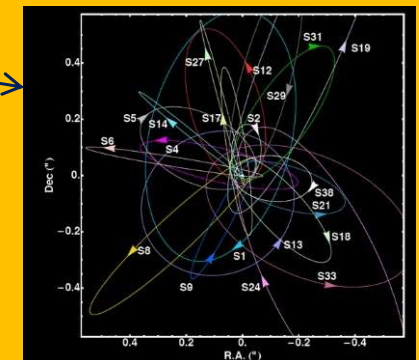
pulsars ...

... dont PSR 1913+16

Galaxies à noyaux actifs, quasars, ...

Trou noir Sgr A*

Fusions de trous noirs/systèmes binaires (GW150914, ...)



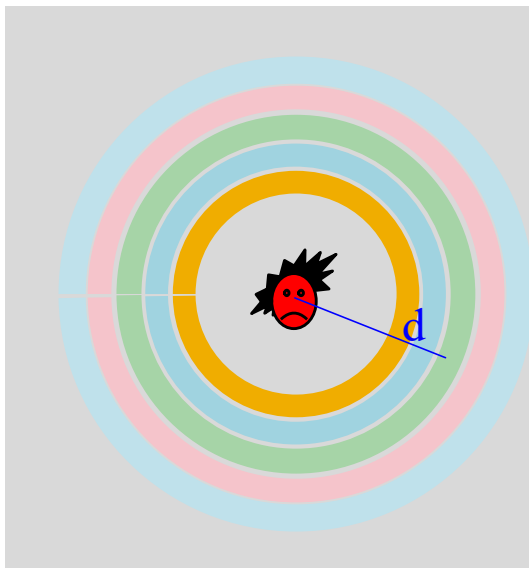
Ondes gravitationnelles !!! (auraient fait la joie de Newton !)

I.3 – Gravitation versus notre Univers ?

Ces deux théories de la **gravitation** (Newton, RG) appliquées à l'Univers dans son ensemble conduisent à des **modèles d'univers dynamiques** (en expansion ou en contraction)

Malgré cela :

- on restera accroché à l'idée que notre **Univers est globalement immuable** ...
- ... malgré certains **problèmes que cela pose** (essentiellement : le **paradoxe d'Olbers**) ...
- ... quitte à modifier les théories de la gravitation (Newton comme RG) afin de « **forcer** » l'existence de solutions non dynamiques ...
- ... et ce jusqu'à ce que les **observations** (années 1920) nous **contraignent à renoncer** à l'idée (préconçue) d'un **univers stationnaire**



Le paradoxe d'Olbers

Pour un observateur donné :

- la luminosité apparente d'une source $\sim 1/d^2$ (d = distance)
- nombre de sources à la distance d : $\sim d^2$ (Univers homogène)
- énergie reçue par les sources à distance d : indépendant de d
 - quand on ajoute les énergies reçues par toutes les sources, on obtient une énergie totale infinie ...

II – La question cosmologique sous l'angle Newtonien

Considérons le problème :

- d'un gaz (représente les galaxies de l'Univers, après « lissage »)
- **sans pression** (pas d'interaction significative entre elles)
- **homogène** (il y en a partout, avec la même densité)
- **sans mouvement** (idée d'un Univers globalement sans évolution/stationnaire)

... et appliquons lui les idées Newtoniennes :

- théorie du mouvement de Newton
- gravitation Newtonienne
- conservation de la matière

→ L'immobilité des galaxies (hypothèse d'un Univers globalement sans mouvement de matière/des galaxies) implique alors qu'un tel univers est **nécessairement vide**

Les équations (juste pour faire joli et/ou pour ceux qui aiment ...)

$$\rho(\partial_t + \vec{v}\vec{\partial})\vec{v} = \rho\vec{g} \quad (\text{car } \vec{\partial}P=0) \quad \xrightarrow{\vec{v}=0} \quad \vec{g}=0$$

$$\text{div}\vec{g} = -4\pi G\rho \quad \xrightarrow{\rho=0} \quad \rho=0 \quad (\text{pas de matière})$$

$$\partial_t\rho + \text{div}(\rho\vec{v}) = 0 \quad (\text{ok})$$



→ Comment se sortir d'une telle impasse ?

L'idée : modifier la théorie de la gravitation d'une façon « acceptable », c'est-à-dire :

- qui admette (au moins) une solution stationnaire au problème cosmologique ...
- ... mais sans rien changer au niveau du Système Solaire (qui soit mesurable)

→ (le + simple) introduire une constante cosmologique λ (positive) dans la théorie de la « force gravitationnelle »

Superpose à la loi en $1/d^2$ de Newton une force *indépendante* de la matière :

- répulsive
- augmentant avec la distance ...
- ... donc d'effet négligeable à l'échelle du SS

Nouvelles équations :

- théorie du mouvement de Newton
- gravitation Newtonienne « modifiée »
- conservation de la matière

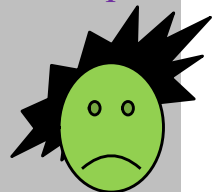
→ L'immobilité de la matière ne nécessite plus un univers vide

Les équations (juste pour faire joli et/ou pour ceux qui aiment ...)

$$\rho(\partial_t + \vec{v}\vec{\partial})\vec{v} = \rho\vec{g} \quad (\text{car } \vec{\partial}P=0) \quad \xrightarrow{\vec{v}=0} \quad \vec{g}=0$$

$$\text{div}\vec{g} = -4\pi G\rho + \lambda \quad \xrightarrow{\rho=0} \quad 4\pi G\rho = \lambda$$

$$\partial_t\rho + \text{div}(\rho\vec{v}) = 0 \quad (\text{ok})$$



II.1 – Des solutions dynamiques

Solutions sans λ

L'**expansion de l'Univers** montre qu'introduire (en restant dans une description Newtonienne, mais le même discours sera valable dans le contexte relativiste) **une constante cosmologique n'est pas (plus) nécessaire !!!**

- **retour à la théorie initiale** ... qui n'a plus « besoin » d'avoir une solution stationnaire
- l'expansion lève naturellement le paradoxe d'Olbers (via l'effet Doppler)

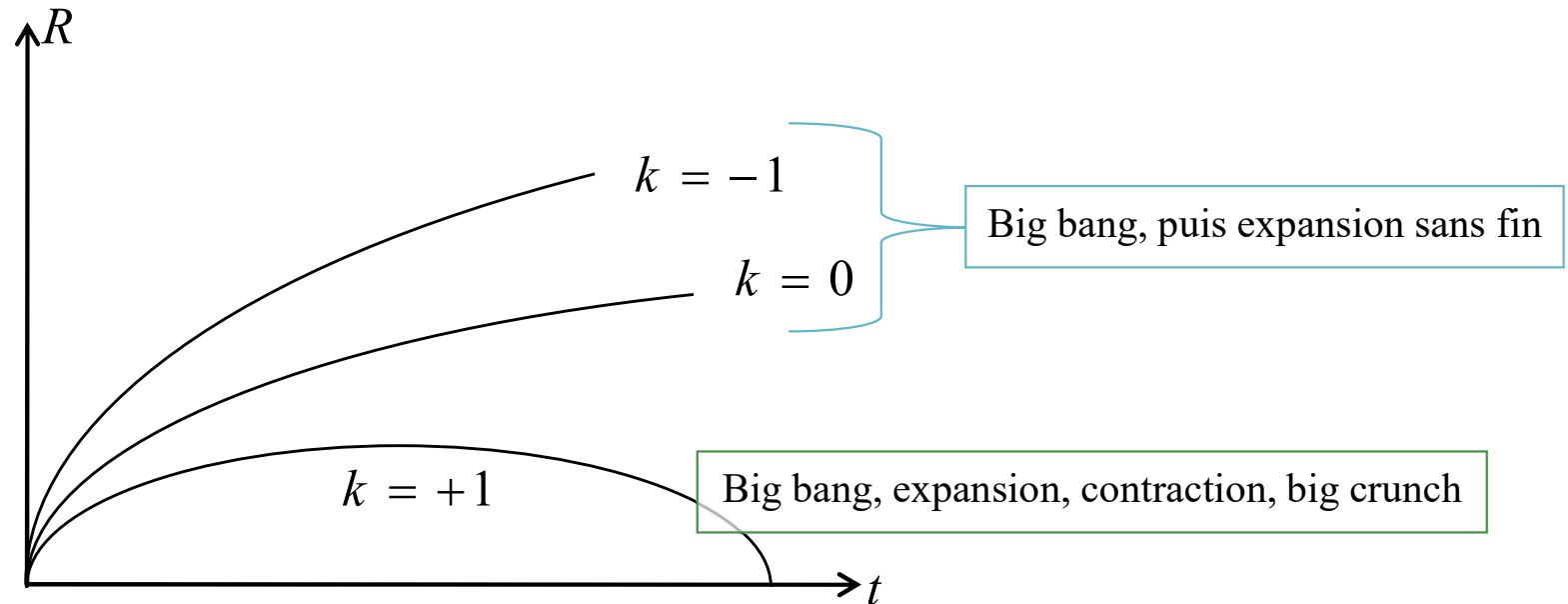
Il y a alors 2 (3) types de solution :

- expansion de l'Univers (de la matière dans l'espace) jusqu'à un état de dilution maximal, suivi d'une contraction
- expansion de l'Univers (... idem ...) pour toujours (la « vitesse d'expansion » tendant vers 0 ou pas)

Ceci peut être visualisé en considérant :

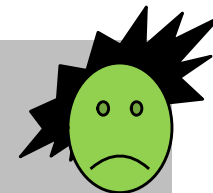
- la façon dont varie le rayon R d'une sphère contenant un grand nombre de galaxies bien identifiées ...
- ... ou (équivalent) la façon dont varie la distance (R) entre 2 galaxies (bien identifiées)

Solutions de « Newton-Friedman-Lemaitre » (nom pas du tout officiel ...)



Les équations (juste pour faire joli et/ou pour ceux qui aiment ...)

$$\begin{cases} \left(\frac{d \ln R}{dt} \right)^2 + \frac{k}{R^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho \\ \rho R^3 = \mu \text{ (constante)} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} k = +1 \rightarrow \begin{cases} R(\omega) = K(1 - \cos \omega) \\ t(\omega) = K(\omega - \sin \omega) \end{cases} \text{ avec } K = \frac{4\pi}{3} G\mu \\ k = 0 \rightarrow R(t) = Kt^{2/3} \text{ avec } K = (6\pi G\mu)^{1/3} \\ k = -1 \rightarrow \begin{cases} R(\omega) = K(\cosh \omega - 1) \\ t(\omega) = K(\sinh \omega - \omega) \end{cases} \text{ avec } K = \frac{4\pi}{3} G\mu \end{cases}$$



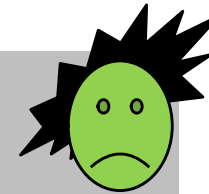
(En deux mots ...) Solutions avec λ

On *peut* aussi s'intéresser aux solutions avec constante cosmologique, même si la recherche de solutions stationnaires n'est plus à l'ordre du jour ...

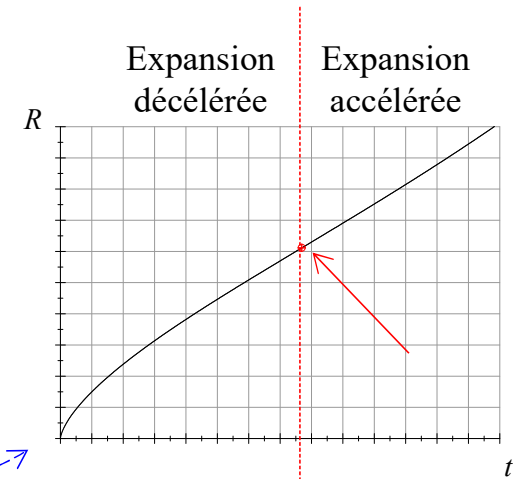
Pour faire bref : les solutions avec λ admettent toujours les 2 (3) types précédents de solutions (avec une différence qualitative toutefois) :

- expansion de l'Univers (de la matière dans l'espace) jusqu'à un état de dilution maximal, suivi d'une contraction
- expansion de l'Univers (... idem ...) pour toujours, mais **vient un moment** (quand la matière est suffisamment diluée) **où** l'effet de λ l'emporte sur la matière, **l'expansion est alors accélérée**

Les équations (juste pour faire joli et/ou pour ceux qui aiment ...)



$$\begin{cases} \left(\frac{d \ln R}{dt} \right)^2 - \frac{\lambda}{3} + \frac{k}{R^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho \\ \rho R^3 = \mu \text{ (constante)} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} k = +1 \rightarrow \dots \\ k = 0 \rightarrow R(t) = \left(\frac{8\pi G \mu}{\lambda} \right)^{1/3} \left[\sinh \left(\frac{\sqrt{3\lambda}}{2} t \right) \right]^{2/3} \\ k = -1 \rightarrow \dots \end{cases}$$



II.2 – Solutions dynamiques ... mais que voit-on ?

Les modèles cosmologiques précédents sont, *d'un point de vue dynamique* :

- homogènes (la distribution des vitesses relatives est indépendante du point d'observation)
- isotropes (la vitesse relative d'un objet situé à une distance donnée est indépendante de la direction)

Ces propriétés correspondent à ce que nous apprennent les *observations* (c'est-à-dire : les informations véhiculées par la *lumière*)

→ peut-on être satisfait ...? Il semblerait que oui ...

... et pourtant ... *dans ce contexte Newtonien*, la réponse est **NON** ...

... sauf à être dans une situation très particulière dans l'Univers.

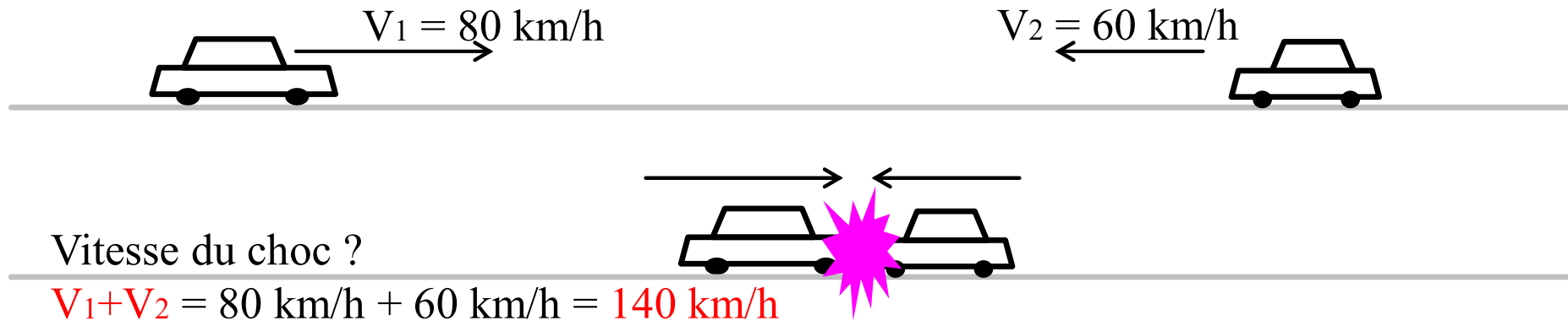


On n'aime pas du tout !!!
Sorte de retour à une forme de géo/hélio-centrisme ...)

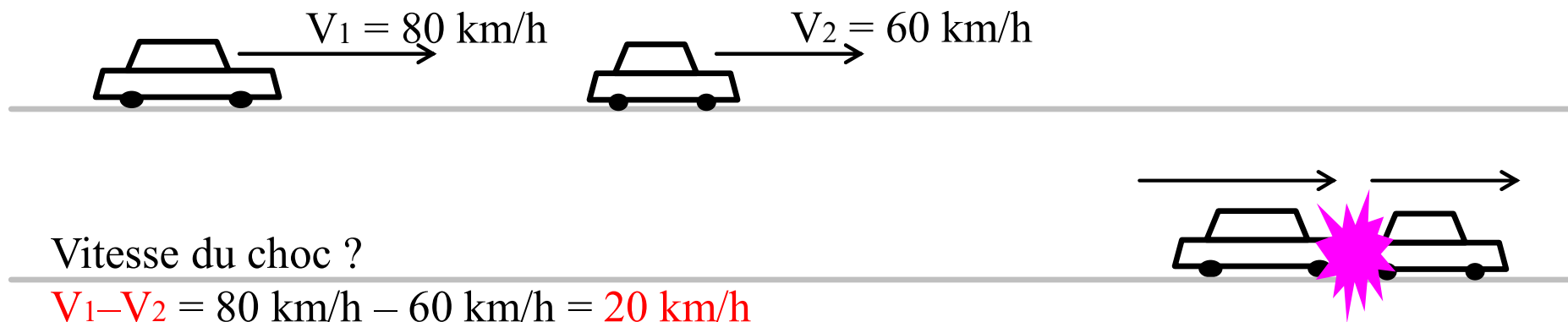
Explications ...

Rappel : l'espace-temps Newtonien est, cinématiquement parlant, *complètement* relativiste !!!

→ additivité des vitesses :



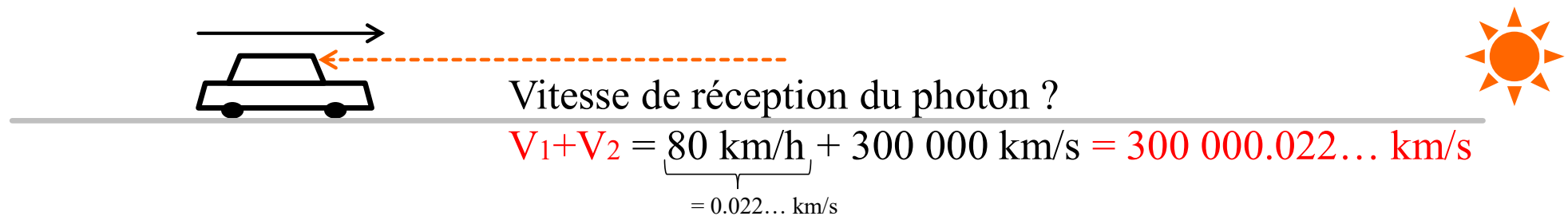
(additivité ... mais attention au signe/sens !!!)



Complètement relativiste (cinématiquement) signifie que cette loi de composition additive des vitesses est valable :

- quelque soient les objets concernés
- quelque soient leurs vitesses

concerne aussi les « photons » (« grains » de lumière)
(on sait que ce n'est pas le cas dans le monde dans lequel nous vivons, mais ce n'est pas le problème ici ...)



Remarquons (rappelons) ce que l'« expérience de pensée » précédente nous apprend :
dans l'**espace-temps Newtonien**,
si la « vitesse de la lumière » est la même dans toutes les directions (isotrope) pour un
observateur au repos sur la route,
ce n'est pas le cas pour tout **observateur en mouvement** par rapport à la route (le chauffeur de la voiture)

Comme dans un **Univers en expansion** (au sens Newtonien du terme) tous les observateurs sont en mvt relatif, si **la vitesse de la lumière** est isotrope pour un observateur particulier, elle **est anisotrope pour tous les autres observateurs !!!**

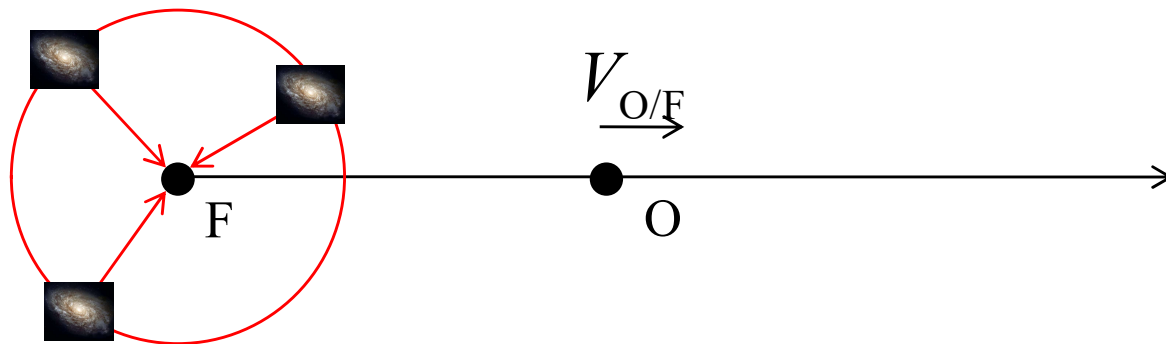
→ à moins d'être cet observateur très particulier (réminiscence des idées « centristes »), **la vitesse des photons nous venant des différentes galaxies n'est pas la même d'une galaxie à l'autre !!!**

→ **bien que la dynamique de l'expansion soit isotrope,**

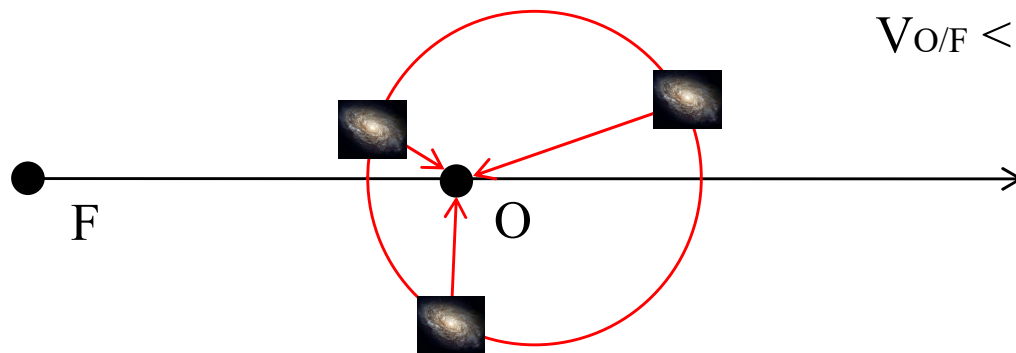
nous devrions Voilà un univers aux propriétés anisotropes !!!

Mettons cette anisotropie en évidence **avec des dessins ...**
... et en invoquant un **cas « extrême »**

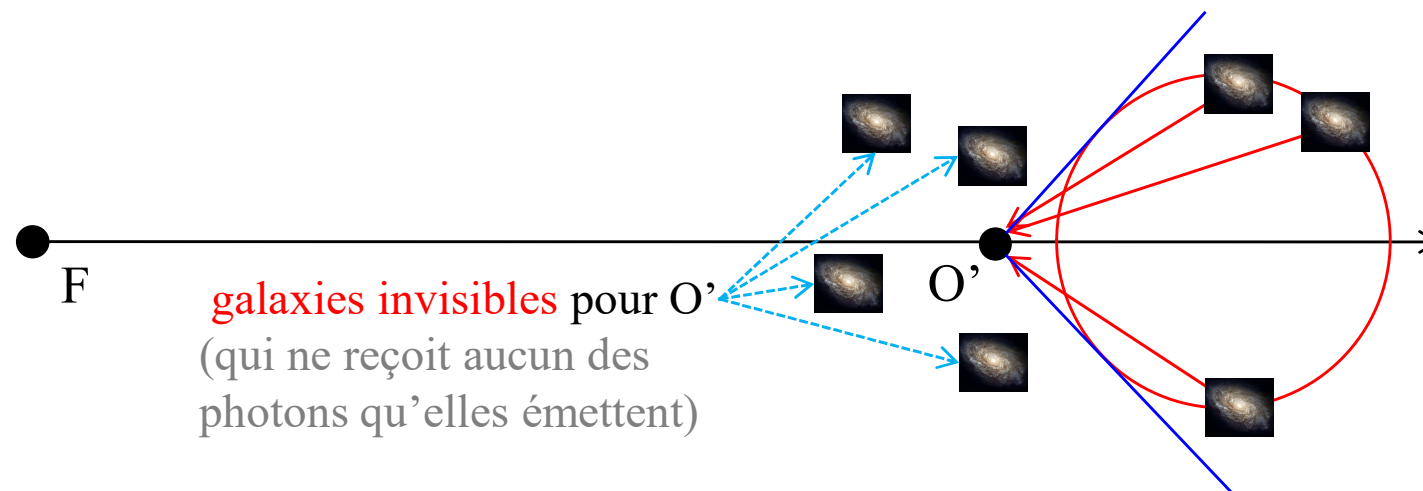
Cas extrême : celui d'un observateur situé « suffisamment loin » pour que sa vitesse de récession soit $> c$ (la très grande majorité des observateurs dans un univers homogène)



F est l'observateur (unique)
pour lequel la vitesse de la
lumière est isotrope



$V_{O/F} < c$ (distance $<$ à une certaine limite)



galaxies invisibles pour O'
(qui ne reçoit aucun des
photons qu'elles émettent)

$V_{O'/F} > c$ (distance $>$ à cette même limite)

→ plus de la moitié
du ciel
est noire pour O' !!!

III – La question cosmologique sous l'angle relativiste

On pense généralement que la Relativité Générale est « beaucoup plus compliquée » que la gravitation Newtonienne. Qu'en est-il ? Réponses :

- au niveau des **mathématiques sous-jacentes**, c'est certain !!!
- au niveau des **concepts**, tout dépend de quoi on parle ...
- au niveau des questions précédentes liées au **problème cosmologique**, le cadre relativiste **simplifierait plutôt les choses** ...

Le **point crucial** (pour nous ici) réside dans le fait que :

- quelque soit l'observateur
- quelque soit la direction dans laquelle il regarde

... **la lumière qu'il reçoit lui arrive toujours à la même vitesse c ($= 299\,792.458$ km/s).**

→ ceci est donc vrai pour tous les observateurs, même dans un Univers en expansion !

Expérience de
Michelson-Morley (1881)



Un **autre point essentiel** est que, en RG, **la géométrie de l'espace-temps** :

- n'est pas fixée une fois pour toute (elle dépend du contenu de l'Univers)
- et (le point le plus important ici) **dépend généralement du temps**

→ la géométrie de l'espace-temps n'est pas nécessairement stationnaire, contrairement à la géométrie de l'espace dans l'espace-temps de Newton

Néanmoins, nous allons dans un premier temps rechercher (comme en cosmologie Newtonienne) une solution stationnaire au problème cosmologique.

(Re)considérons donc le problème :

- d'un gaz (représente les galaxies de l'Univers, après « lissage »)
- **sans pression** (pas d'interaction significative entre elles)
- **homogène** (il y en a partout, avec la même densité)
- **sans mouvement** (idée d'un Univers globalement sans stationnaire)

... comme on l'a fait dans le cadre Newtonien

... et appliquons lui les idées & équations de la RG

Ça, par contre, ça change !!!

Il se trouve que **les équations obtenues sont exactement les mêmes que dans le cadre newtonien** ! (dans la mesure où l'Univers est rempli d'un gaz sans pression *uniquement* ...)
→ **pas de solution stationnaire**

Puis on peut tenter une modification minimale de la RG pour obtenir une solution stationnaire ...

On peut, comme dans le cadre Newtonien, **introduire une constante cosmologique** ...

- là aussi, **les équations obtenues sont exactement les mêmes que dans le cadre newtonien** ! (même restriction)
- ... et donc on trouve **une solution stationnaire**

Les **équations** des cosmologies Newtonienne & relativiste :

- **sont les mêmes ... !!!**
- ... mais **signifient-elles la même chose ?**

La cosmologie **Newtonienne** décrit :

- l'**évolution de la matière** au cours du temps
- dans un **espace existant depuis toujours, et pour toujours**
- et dont la géométrie est fixée une fois pour toute (et indépendamment de son contenu matériel)
 - **la fonction $R(t)$ décrit la façon dont change le rayon d'une « bulle de matière », dû au mouvement d'expansion de la matière dans cet espace**

La cosmologie **relativiste** décrit :

- l'**évolution de l'espace** (des « sections spatiales » de l'espace-temps) au cours du temps
- **cet espace ayant de ce fait une histoire, et une évolution**
- la matière étant, en un sens, « au repos » dans cet espace ...
- ... mais la distance entre deux éléments de matière (galaxies) augmentant au cours du temps (bien que chacune soit au repos) car la géométrie de l'espace change (expansion) au cours du temps
 - **la fonction $R(t)$ décrit la façon dont change le « facteur d'échelle » de l'espace**

Cosmologie Newtonienne

La solution dépend d'un **facteur k** , dont les 3 valeurs possibles (+1, 0 ou -1) donnent des **évolutions temporelles** finie ou infinies

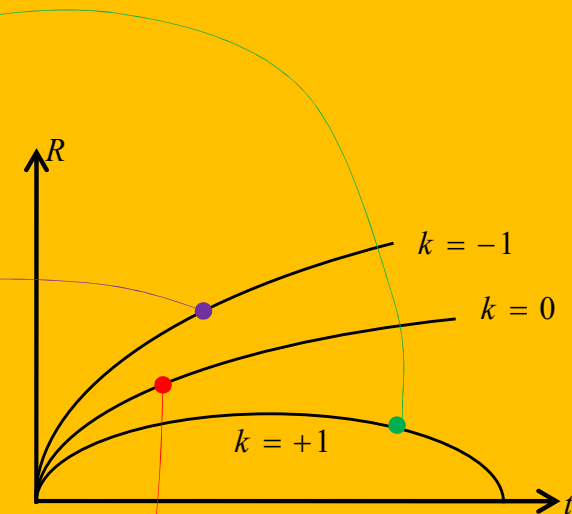
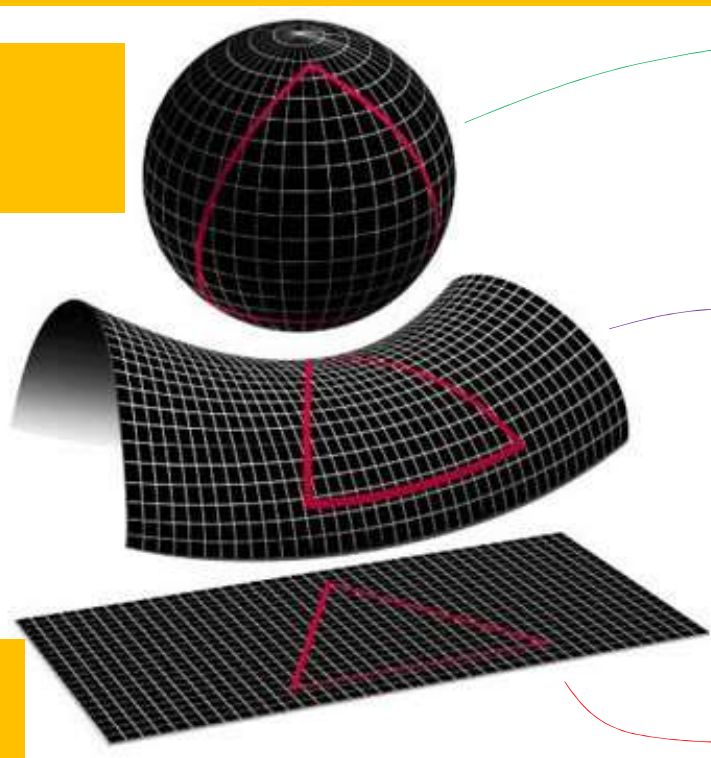
Cosmologie relativiste

La solution dépend d'un **facteur k** (= +1, 0 ou -1) décrit (également) des **évolutions temporelles** finie ou infinies, **mais également la « forme de l'espace »**, sa « dimension » étant fixée par R (qui dépend du temps)

$k = +1$: modèle
« elliptique »

$k = -1$: modèle
« hyperbolique »

$k = 0$: modèle
« euclidien »



On peut résumer ces deux approches en disant que :

la cosmologie Newtonienne décrit l'histoire de la matière dans l'espace au cours du temps ...

... alors que ...

... la cosmologie relativiste décrit l'histoire de la matière et de l'espace au cours du temps, ces deux histoires étant liées l'une à l'autre (couplées)

Notons aussi que, contrairement à ce qui se passe en cosmologie Newtonienne, non seulement la dynamique d'expansion de l'Univers est isotrope, mais tous les observateurs voient un univers isotrope

→ le fait que nous voyons un univers ayant les mêmes propriétés dans toutes les directions ne signifie pas que nous occupons une position privilégiée dans celui-ci

Ce qu'on va faire maintenant ? (pour finir ...)

- regarder un peu plus précisément les (certaines des) caractéristiques du modèle cosmologique relativiste ...
- ... à la lumière de ce que nous ont appris les observations (dont certaines très récentes)

IV – L'Univers aujourd'hui (et les questions ...)

Nous allons considérer ici plusieurs points relatifs à nos **connaissances cosmologiques actuelles**.

→ Ceci va (parfois) nous amener à reconsidérer les **similarités (et dissemblances)** entre les approches Newtonienne & relativiste du problème

IV.1 – Ères radiative & matière

Une **différence essentielle** entre gravitations Newtonienne & relativiste :

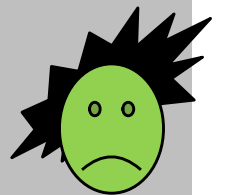
- Newton : seule la « masse » d'un corps est source de gravitation
- **RG : toute forme d'énergie associée à un corps (ou à un champ) est source de gravitation**

→ en particulier (1) : la **lumière** est source de gravitation

→ en particulier (2) : la **pression** à l'intérieur d'un corps est source de gravitation

→ **rôles multiples** (parfois s'opposant les uns les autres) **de la pression** dans un corps (dans une étoile : rôles hydrodynamique ET gravitationnel)

Une équation (juste pour faire joli et/ou pour ceux qui aiment ...)



$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3} (\rho + \underbrace{3P}_{\text{Partie « sans pression »}})$$

Partie
« sans pression »

Accélération de l'expansion

Ce rôle (gravitationnel) de la pression a un **impact très déterminant en cosmologie** !

Notre Univers est **essentiellement composé de** (pour sa partie « visible ») :

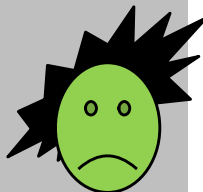
Poussière (représente la matière « ordinaire » : étoiles, planètes, galaxies, ...)

- la densité d'énergie varie comme l'inverse du **cube de R**
(volume)
 - ← conservation du « nombre de particules »

Photons (lumière) (représente la lumière emplissant le cosmos)

- la densité d'énergie varie comme l'inverse de la **puissance 4 de R** (donc **plus vite** que pour la poussière)
 - ← conservation du « nombre de photons » ET du fait que **l'énergie portée par chaque photon diminue avec l'expansion**

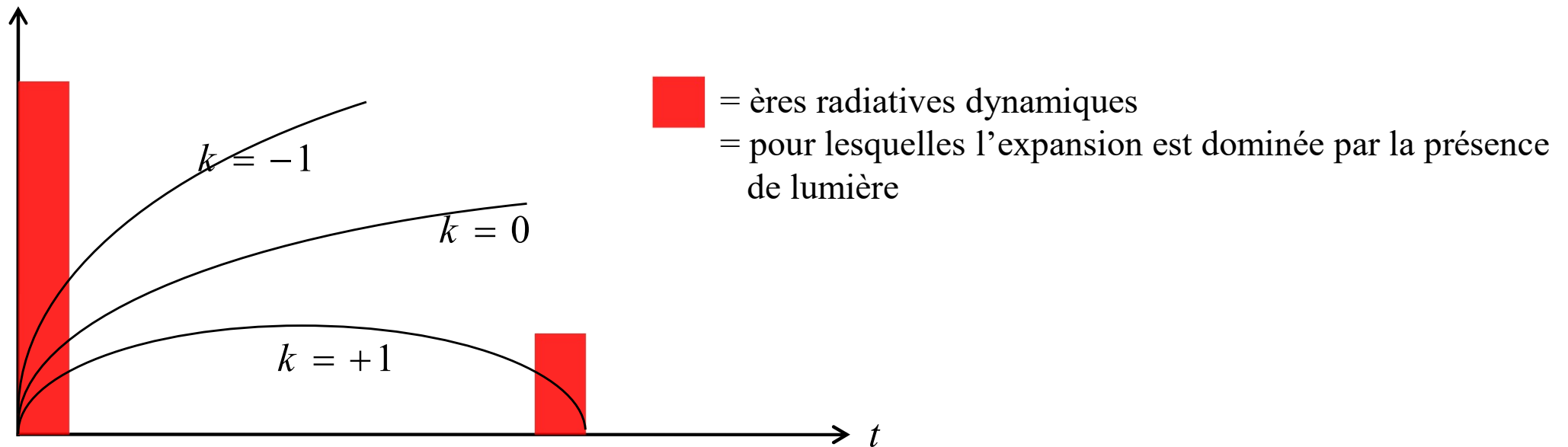
Avec des équations (juste pour faire joli et/ou pour ceux qui aiment ...)


$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P)$$

Poussière : $P = 0$
Gaz de photons : $P = \rho/3$

➔ Quand on « remonte le temps », jusqu'aux **phases très condensées de l'Univers** (R très petit), vient un moment où c'est **la lumière** (et pas la matière « ordinaire ») qui **détermine la dynamique (l'expansion) de l'Univers**

Modèles sans constante cosmologique (Friedman-Lemaitre, terminologie officielle !)



Attention à **ne pas confondre** :

ères radiative/matière **dynamiques**

ET

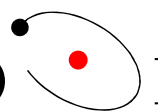
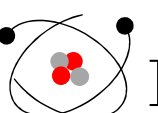
ères radiative/matière **physiques**

(souvent appelées « radiative/matière » sans précision !)

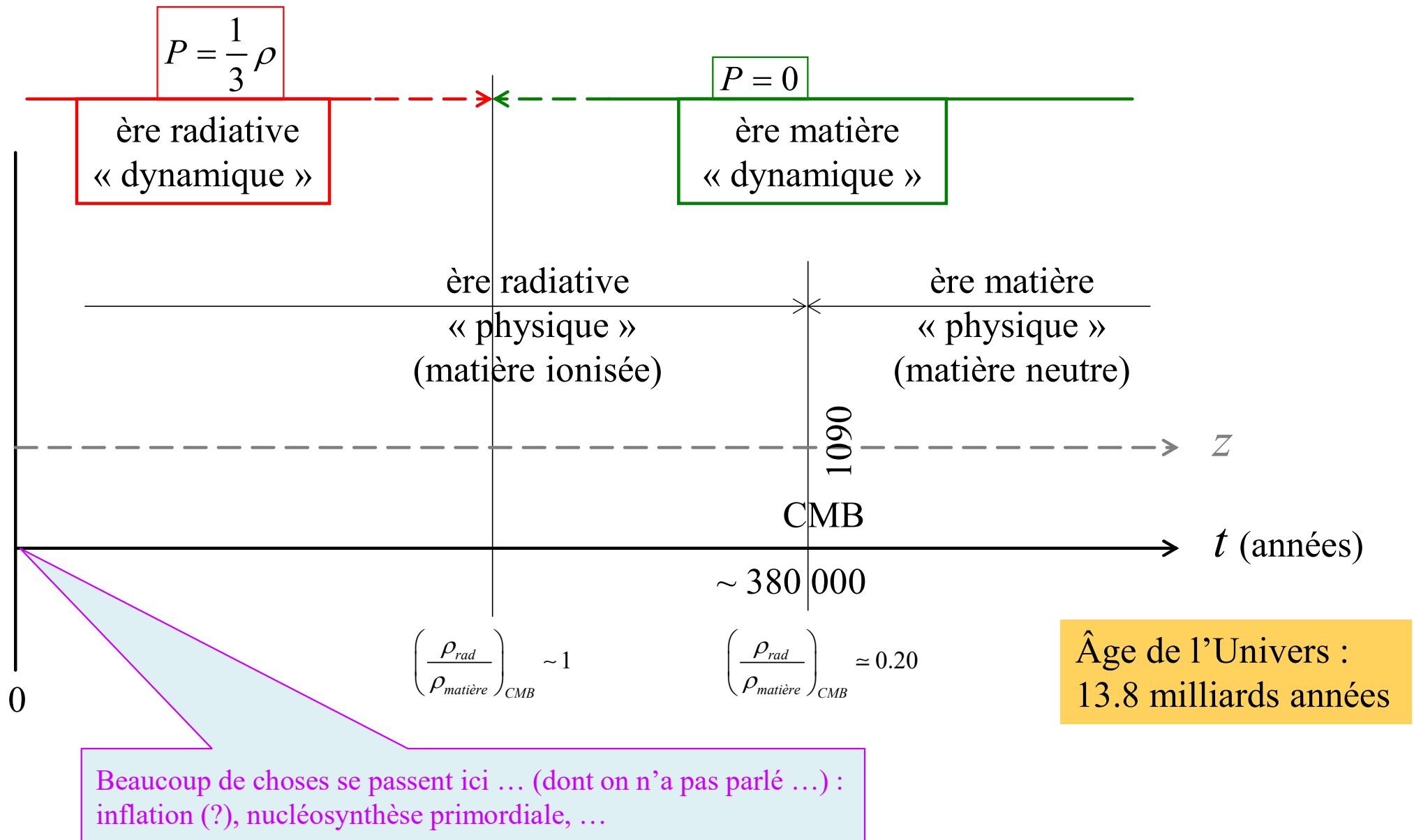
Expansion de l'Univers dominée par la lumière/matière

Univers **opaque/transparent** à la lumière

Univers opaque/transparent ... explications

- 1- L'énergie portée par un photon diminue avec l'expansion (sa longueur d'onde augmente, une sorte d' « effet Doppler »)
 - l'Univers se refroidit à cause de l'expansion
 - à l'inverse, quand on « remonte dans le temps », l'Univers était de plus en plus chaud
- 2- Pour exister telle qu'on la connaît (sous forme d'atomes électriquement neutres), la matière a besoin d'une température suffisamment basse
 - si la température est trop élevée, la matière est « ionisée », c'est-à-dire que des électrons sont séparés des noyaux atomiques, formant ainsi un milieu composé de particules chargées
 - les particules chargées interagissent avec la lumière, c'est-à-dire qu'elles « brisent » les trajectoires des photons (comme le font, mais différemment, les gouttelettes dans un brouillard)
- 3- L'Univers opaque (jeune) est formé essentiellement, sous forme « ionisée » :
 - d'hydrogène [forme neutre = un proton (chargé +) et un électron (chargé -) 
 - d'hélium [forme neutre = un noyau (chargé 2+) et deux électrons (chargé - chacun) 
 - autres éléments : quasi-inexistants (il faudra attendre la formation, plus l'explosion, des premières étoiles massives pour « enrichir » cet univers ...)

Ce que nous ont appris les observations (COBE, WMAP, Planck, ...)

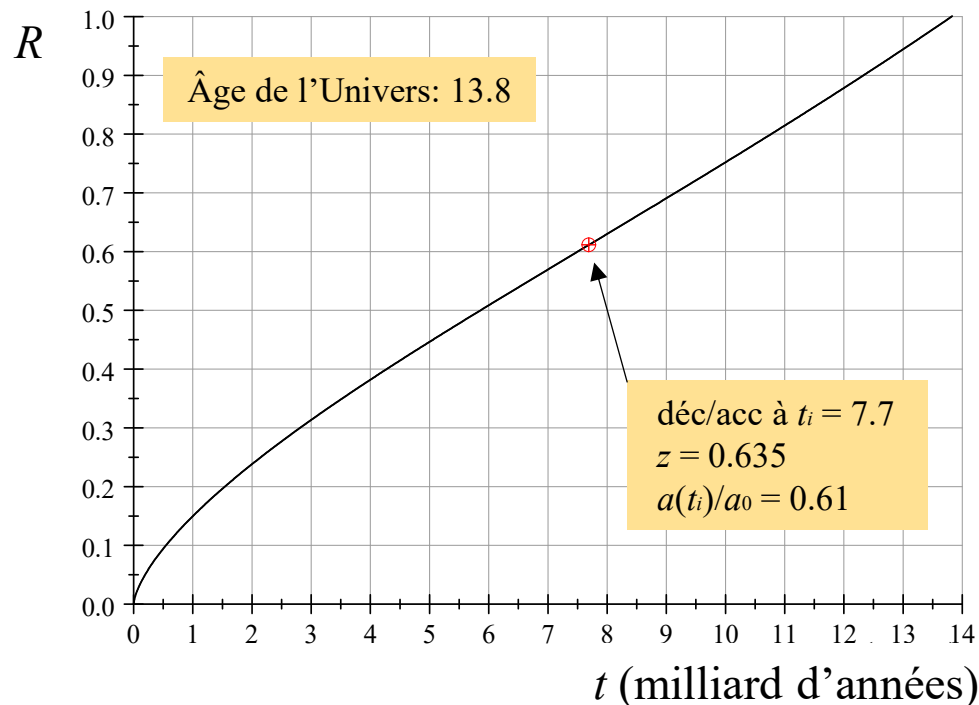


IV.2 – Une expansion « accélérée »

Nous avons appris (fin des années 90) que, contrairement à toute attente, **l'expansion récente de l'Univers est accélérée** (ça va de plus en plus vite !)

→ phase accélérée : **inexplicable par les modèles de Friedman-Lemaitre ($\Lambda = 0$) !!!**

L'histoire de l'Univers, telle que nous la connaissons aujourd'hui (expression de $R(t)$ identique au cas Newtonien avec CC, modulo (1) interprétation de R , (2) phase radiative) :



Explicable avec une constante cosmologique

→ le **modèle Λ CDM** :

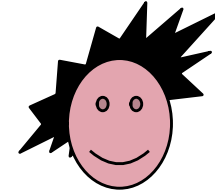
- $k = 0$ (sections spatiales Euclidiennes)

- $\Lambda = \dots$
- $\rho_0 = \dots$

Aujourd'hui :
effet (Λ) ~ 2 * effet (ρ)
(sur l'expansion ...)

Il peut être amusant de remarquer que la **constante cosmologique** :

- a été **initialement introduite** (Einstein) pour « annuler » la dynamique de l'Univers (pour qu'une solution stationnaire puisse exister) ...
- est **aujourd'hui réintroduite** pour **expliquer** que cette dynamique puisse être finalement si rapide (**accélérée**, les modèles $\Lambda = 0$ ne pouvant expliquer ce fait)



IV.3 – Nature/origine de la constante cosmologique ? Energie noire ? ... ?

Cette constante cosmologique (puisque'il semble qu'elle soit une réalité ...), **quelle est sa nature ?**
De quoi s'agit-il ?

Deux possibilités (principalement) :

- une **nouvelle constante de la physique** (comme G , c , h , ...)
- une **forme d'énergie** inconnue ... ou connue (mais qu'on n'aurait pas su reconnaître ?)

Einstein introduisit Λ comme une constante de la physique (c'était en 1916 ...)

Entretemps, de **nouvelles théories** (théorie quantique des champs, physique des particules) :

- nous ont appris que **le vide « n'est pas une absence de tout »** (sans même parler de la géométrie de l'espace-temps comme siège de la gravitation) ...
- ... mais peut (doit ?) être vu comme un **réservoir d'énergie** ...
- ... dont les « fluctuations » ont des **effets** physiques très concrets et **mesurés en laboratoire** (effet Casimir, ...)

En tant que « champ d'énergie », **le vide devrait donc contribuer à la gravitation**, au même titre **que la matière ordinaire** (poussière, photons, ... **car c'est bien l'idée force** de la RG : **tout** champ gravite !). Or, il apparaît que, **si l'on suit cette idée** :

- le **vide** doit être représenté comme un **fluide parfait** (comme le sont la poussière ou un gaz de photon) ...
- ... mais avec une « équation d'état » (qui relie la pression à la densité d'énergie) très particulière, du fait que **le vide se présente à tous les observateurs de la même façon**, quelque soient leurs mouvements (contrairement à la poussière ou à un gaz de photon)
→ **l'énergie du vide n'est pas diluée par l'expansion** (contrairement ...)

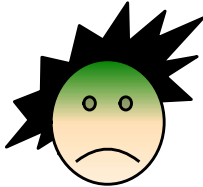
Ces considérations conduisent à une théorie qui est **formellement équivalente à** :

- **la RG** avec seulement la matière « ordinaire » comme source de gravitation ...
- ... mais dans sa version **AVEC CONSTANTE COSMOLOGIQUE !!!**

C'est merveilleux, car du coup, non seulement la théorie explique la présence d'un terme cosmologique, mais **permet aussi d'en calculer (estimer ...) la valeur !**

C'est merveilleux ... mais c'est aussi là **que les choses se gâtent ...**

Le calcul théorique n'est d'ailleurs pas simple dans son principe même ... mais on peut, moyennant quelques hypothèses justifiables, arriver à une valeur ... qu'on peut **comparer à la valeur mesurée par les astronomes**. Quand tout se passe bien, le rapport théorie/mesure est ~ 1 . Ici, la comparaison donne :

théorie	$\frac{\Lambda^{QFT}}{\Lambda^{astro}} \sim 10^{120} \quad !!!$	
observations		

C'est-à-dire que **la valeur émergeant des calculs est :**

mille milliards de milliards de milliards ... de milliards de fois plus grande que celle mesurée !!!

13 fois le mot « milliards »

On peut pinailler sur le nombre de « milliards » ... peut-être seulement 6 ou 7, suivant comment on mène le calcul ...

Bref, il semblerait que *quelque chose nous échappe quelque part ...*

Solutions ? Pistes ? Idées ? ... ? ... :

- une forme d' « énergie noire », non vue, dont les propriétés physiques seraient à déterminer, ainsi que les différents types d'effets mesurables/observables ...

... rappelle le « problème des anomalies orbitales d'Uranus » ...

- faut-il repenser la théorie de la gravitation ? La RG atteindrait-elle ses limites ?

... rappelle le « problème de l'orbite de Mercure » ...

- repenser le « principe cosmologique » :

 - inhomogénéités/anisotropies à grandes échelle ?

 - les inhomogénéités/anisotropies à petite échelle ont-elles des effets (jusque là insoupçonnés) à grande échelle ?

- ... ?

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab}$$

→

???

???

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\omega^2 \right]$$

→

$ds^2 =$

???

Solutions ? Pistes ? Idées ? ... ? ... :

- une forme d' « énergie noire », non vue, dont les propriétés physiques seraient à déterminer, ainsi que les différents types d'effets mesurables/observables ...

... rappelle le « problème des anomalies orbitales d'Uranus » ...

- faut-il repenser la théorie de la gravitation ? La RG atteindrait-elle ses limites ?

... rappelle le « problème de l'orbite de Mercure » ...

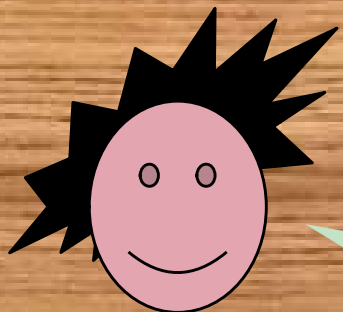
- repenser le « principe cosmologique » :

 - inhomogénéités/anisotropies à grandes échelle ?

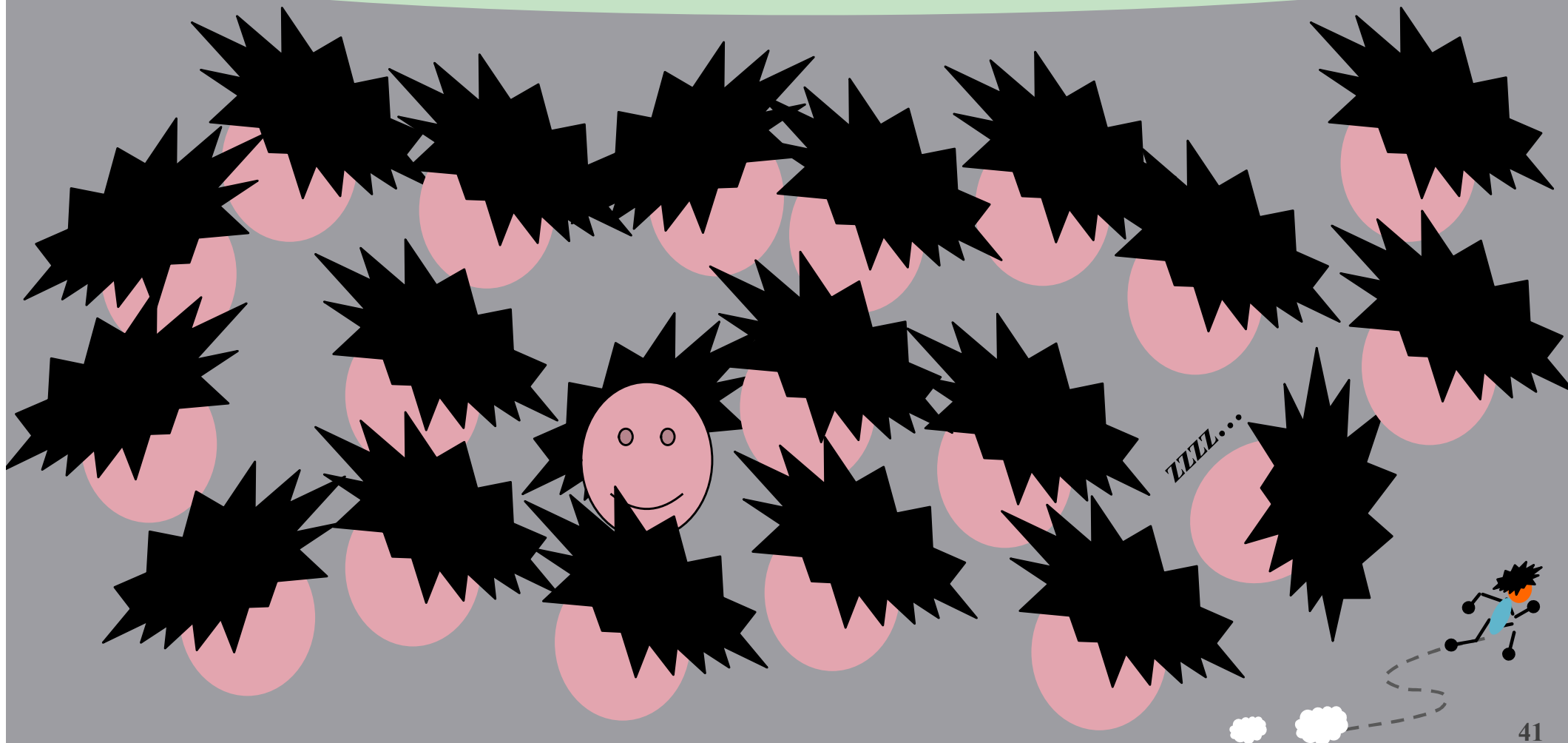
 - les inhomogénéités/anisotropies à petite échelle ont-elles des effets (jusque là insoupçonnés) à grande échelle ?

- ... ?





... et merci pour votre attention !!!



Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & stationnaire ...

Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & stationnaire ...

→ c'est cuit ! (Olbers)

Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & stationnaire ...

→ c'est cuit ! (Olbers)

→ **Expansion nécessaire** de l'Univers !!!

Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

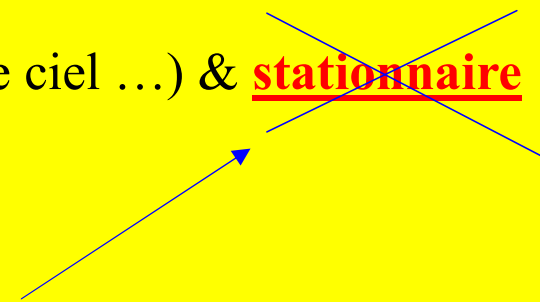
... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & **stationnaire** ...

→ c'est cuit ! (Olbers)

→ **Expansion nécessaire** de l'Univers !!!



Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & ~~**stationnaire**~~ ...

→ c'est cuit ! (Olbers)

→ **Expansion nécessaire de l'Univers !!!**

Mais concepts Newtoniens d'espace et de temps =>

On devrait voir un univers anisotrope !!!
(Refus Copernicien d'une place privilégiée dans l'Univers ...)

Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & ~~stationnaire~~ ...

→ c'est cuit ! (Olbers)

→ **Expansion nécessaire** de l'Univers !!!

Mais concepts Newtoniens d'espace et de temps =>

On devrait voir un
univers anisotrope !!!

(Refus Copernicien
d'une place privilégiée
dans l'Univers ...)

→ comportement **nécessaire** de la lumière : vitesse isotrope pour tout observateur

(Il faudra donc, tôt ou tard, repenser les concepts
d'espace-temps pour que cela soit possible ...)

Tentative de conclusion

(dans la série : si on avait été un peu plus malin ...)



C'est sûr, c'est plus facile avec ~ 150 ans de recul ...

... mais quand même ... essayons !!!

→ où nos préjugés sur notre Univers **auraient-ils pu/dû** nous conduire ?

Univers homogène & isotrope (quand on regarde le ciel ...) & ~~stationnaire~~ ...

→ c'est cuit ! (Olbers)

→ **Expansion nécessaire** de l'Univers !!!

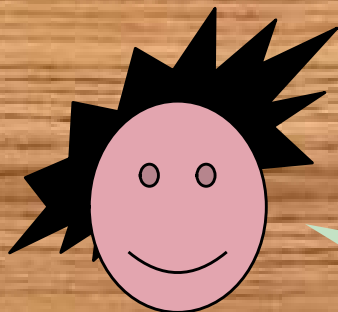
Mais concepts Newtoniens d'espace et de temps =>

On devrait voir un
univers anisotrope !!!

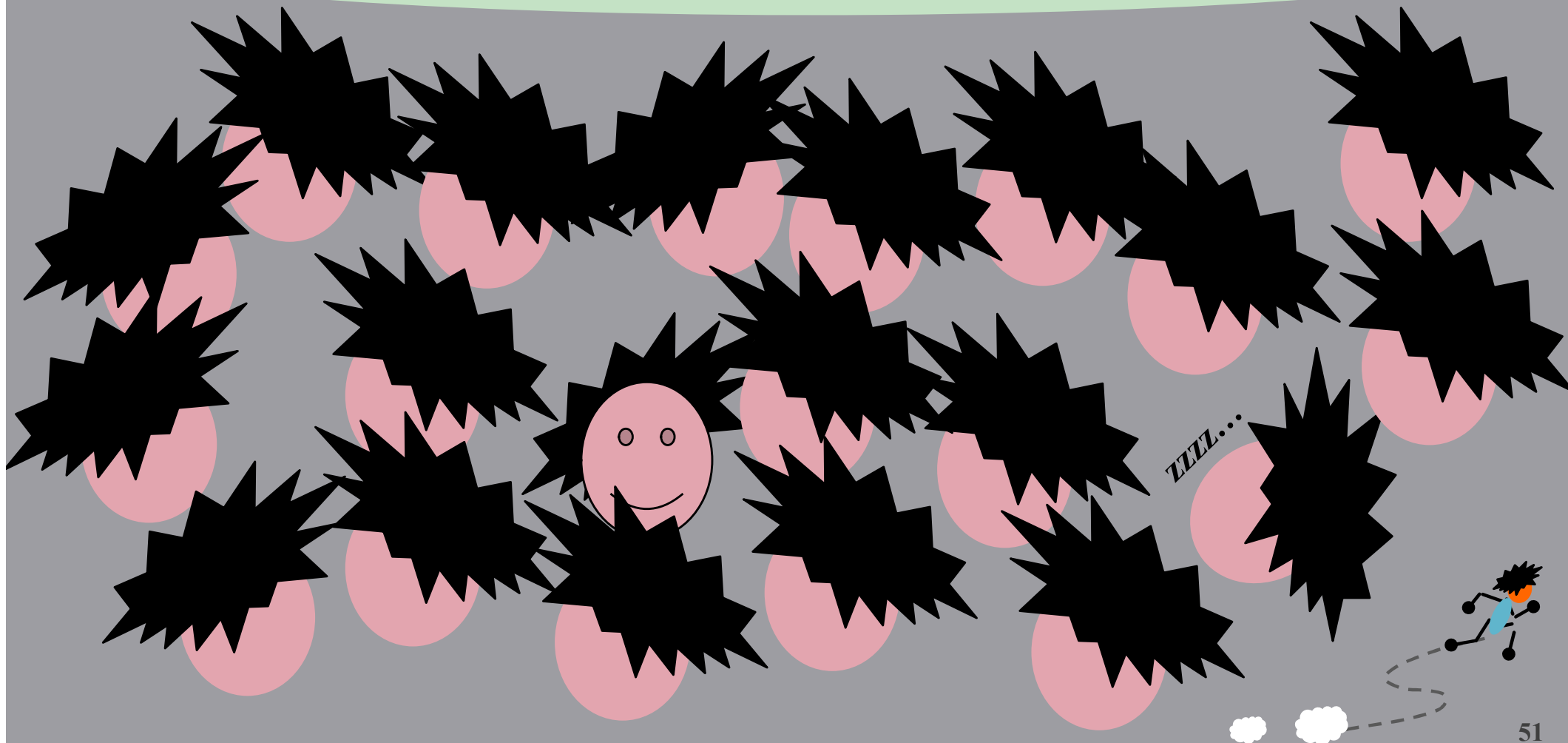
(Refus Copernicien
d'une place privilégiée
dans l'Univers ...)

→ comportement **nécessaire** de la lumière : vitesse **isotrope** pour tout observateur

→ on aurait pu (dû ???) **anticiper le résultat négatif**
de l'expérience de **Michelson-Morley** !!!!!



... et (encore) merci pour votre attention !!!



Comment introduire (faire une théorie de) la gravitation dans un tel cadre (relativiste) ?
(Rmq : transposer la théorie de Newton dans un tel contexte conduirait à des *incohérences* ...)

Point de départ = un **fait expérimental** : l'**universalité de la chute libre**

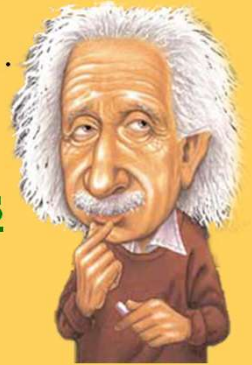
Einstein : l'universalité constatée de la chute libre nous apprend que le **mouvement d'un corps**

→ soumis à la (seule) 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** (→ mvt libre/inertiel)

→ **la gravitation est donc une conséquence des propriétés de l'espace-temps**



- Espace Euclidien + temps uniforme (esp-tps Newton) → mvt libre = rect unif

- *Espace-temps* Euclidien de la relativité restreinte (Minkowski) → **idem !!!**

- **Einstein/Relativité Générale** : étant donné que la **gravitation impose** mvts non rect unif ...

... **ET** qu'**on renonce à toute notion de « force » gravitationnelle**, alors, **nécessairement** :

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

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

(2) **... et donc possède une certaine « courbure » (pas Euclidien ...)**

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

Théorie de la Relativité Générale (RG)



C'ÉTAIT PROPRE, NET ET SANS BAVURES. EH BIEN NON ! IL A ENCORE FALLU QU'UNE SORTE DE DINGUE DISE UNE ÂNERIE :



SI C'EST PAS MALHEUREUX D'ENTENDRE ÇA ! UN GRAND GARÇON DE CET ÂGE-LÃ ! GALILÉE, QU'IL S'APPELAIT. MAIS OUF !... VOILÃ L'HOMME SENSÉ !

