

Expansion de l'univers

**Ricardo Moreno, Susana Deustua,
Rosa M. Ros, Beatriz García**

*Union Astronomique Internationale,
Colegio Retamar de Madrid, Espagne*

Space Telescope Science Institute, États-Unis

Université Polytechnique de Catalogne, Espagne

ITeDA et Université Technologique Nationale, Argentine



Objectifs

- Comprendre ce qu'est l'expansion de l'Univers
- Comprendre qu'il n'y a pas de centre de l'Univers
- Comprendre la loi de Hubble
- Analyser comment détecter la matière noire



Présentation

Cet atelier porte sur:

- L'origine de l'univers: Big Bang.
- Galaxies: ne se déplacent pas dans l'espace, mais c'est l'espace qui se dilate.
- La constante de Hubble: $v = H \cdot d$
- Il n'y a pas de centre de l'univers, comme il n'y a pas de pays central.
- Le fond de micro-ondes.
- Lentille gravitationnelle.



Modèles, prédictions, vérifications: Expérience avec une nappe



Prédiction: si très rapidement vous tirez une nappe d'une table, rien sur la table ne tombera. Si nous sommes en mesure de vérifier cela, notre prédiction est remplie.

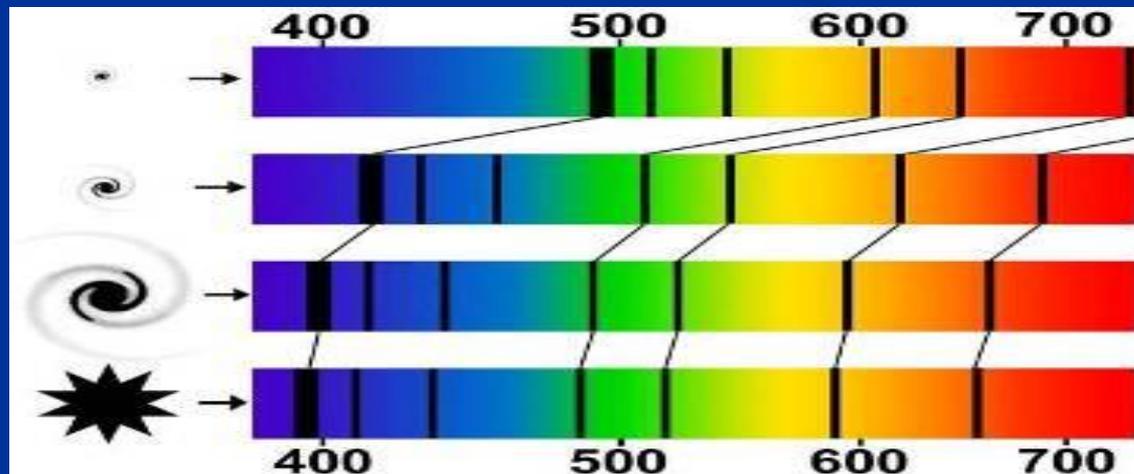
L'expérience fonctionne parce que la physique est une science qui permet de prédire ce qui va se passer: si on tire rapidement une nappe, les forces de frottement n'ont pas le temps d'agir sur les objets sur la table, ce qui explique pourquoi ils ne tombent pas.

La physique que nous avons développé sur la Terre est la même que celle que nous appliquons au reste de l'Univers.



Décalage vers le rouge

- La lumière diffusée par chaque élément montre des raies: c'est le spectre, caractéristique de chaque élément.
- Lorsque nous observons la lumière des galaxies, nous pouvons voir que les raies sont déplacées vers la partie rouge du spectre, et que plus la galaxie est éloignée, plus le décalage est important.
- Il est interprété comme un résultat de son mouvement d'éloignement de nous



Décalage vers le rouge

- Les galaxies proches ont des mouvements relativement petits et irréguliers: le Grand Nuage de Magellan + 13 km / s, le Petit Nuage Magellanique -30 km / s, la Galaxie Andromeda - 60 km / s, M 32 +21 km / s.
- Dans le groupe Virgo (à 50 millions de lyr), toutes les galaxies s'éloignent de nous à des vitesses comprises entre 1 000 et 2 000 km / s.
- Dans le superamas de Coma Berenice (300 millions de lyr), les vitesses sont comprises entre 7 000 et 8 500 km / s.



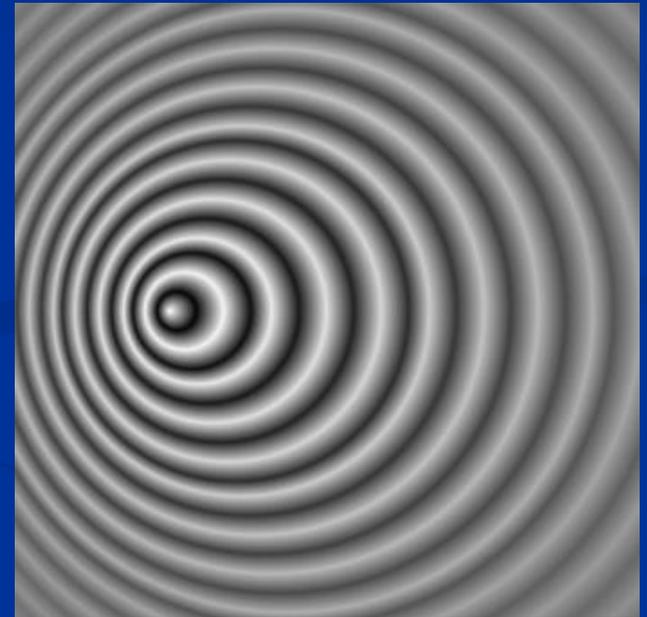
Décalage vers le rouge

- Dans la direction opposée, M 74 s'éloigne à 800 km / s et M 77 à 1130 km / s.
- Si nous observons des galaxies éloignées et faibles, la vitesse de récession est encore plus grande: la galaxie NGC 375 s'éloigne à 6200 km / s, NGC 562 à 10500 km / s et NGC 326 à 14500 km / s.
- Indépendamment de la direction dans laquelle nous observons, tous, sauf les galaxies très proches, s'éloignent de nous.



Effet Doppler

- S'il y a une ambulance, une motocyclette ou un train qui nous approche, nous entendrons un son plus élevé que quand ils s'éloigneront de nous
- Haut → L'onde est raccourcie
- Grave → L'onde est étirée



Activité 1: Effet Doppler



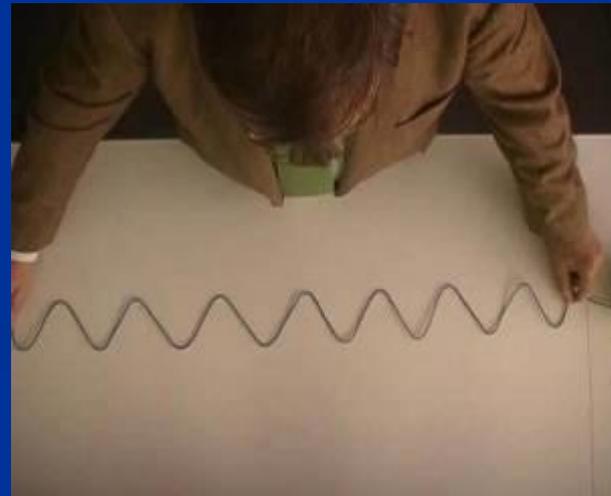
- L'effet Doppler peut être entendu en tournant dans un plan horizontal un réveil.
- Lorsqu'il s'approche du spectateur, λ est raccourci et le son est plus élevé.
- Quand il s'éloigne de nous, λ est étiré et le son est plus bas.
- Cela se passe de même avec le son de la moto, de l'ambulance, du train ...



• L'effet Doppler que nous détectons ici est dû au déplacement. Mais ce n'est pas le même pour les galaxies qui est dû à l'expansion.

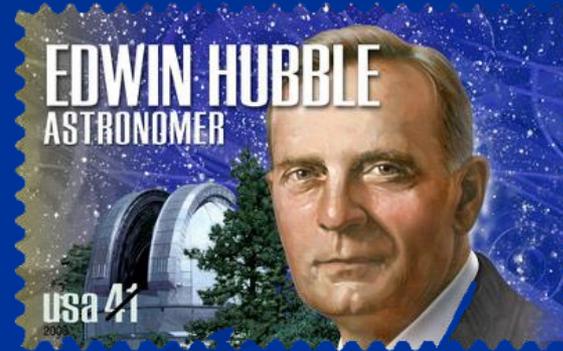
Activité 2. "Étirement" des photons

- L'Univers, quand il se dilate, "étire" les photons en lui.
- Vous pouvez faire un modèle de cette étirement à l'aide d'un câble semi-rigide, qui est utilisé dans l'électricité domestique.
- Plus le chemin du photon est long, plus les photons sont étirés.



Loi de Hubble-Lemaître

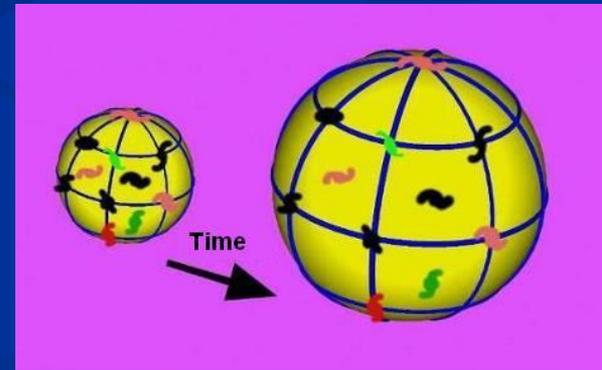
Entre 1920 et 1930, George Lemaître et Edwin Hubble ont compris que les galaxies les plus lointaines s'éloignaient plus rapidement.



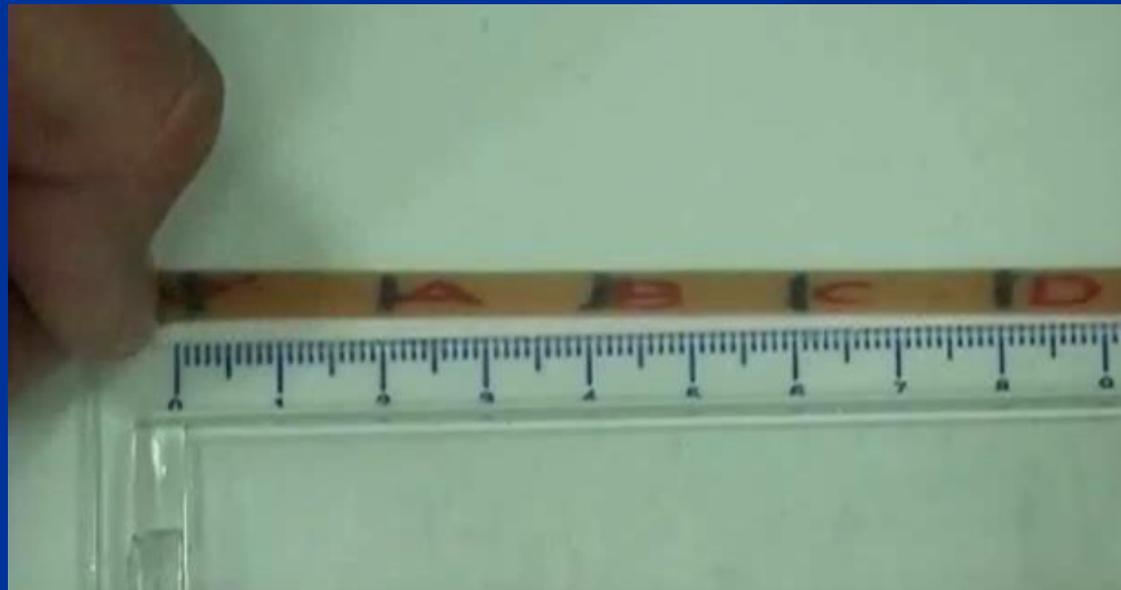
Loi de Hubble-Lemaître :

$$v = H \cdot d$$

Les galaxies ne se déplacent pas dans l'espace: c'est l'espace qui se dilate, traînant les galaxies



Activité 3: L'univers en caoutchouc



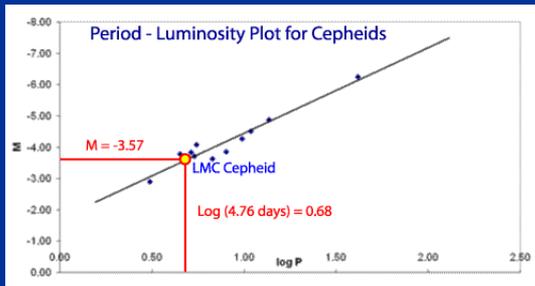
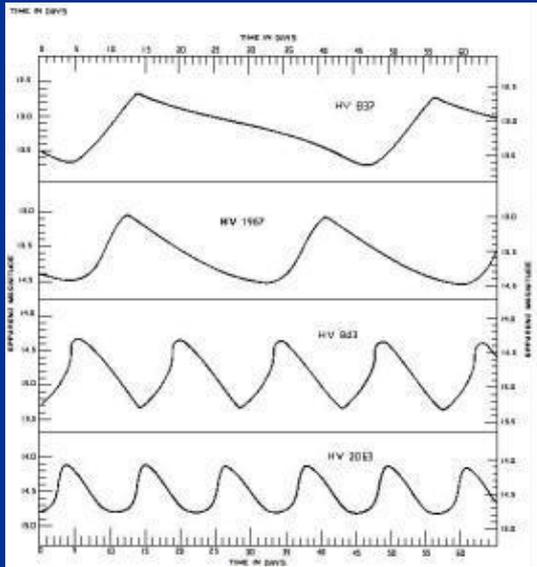
Activité 4: L'Univers dans un ballon



- La distance entre les galaxies augmente avec l'expansion.
- Les galaxies ne se déplacent pas à travers le ballon

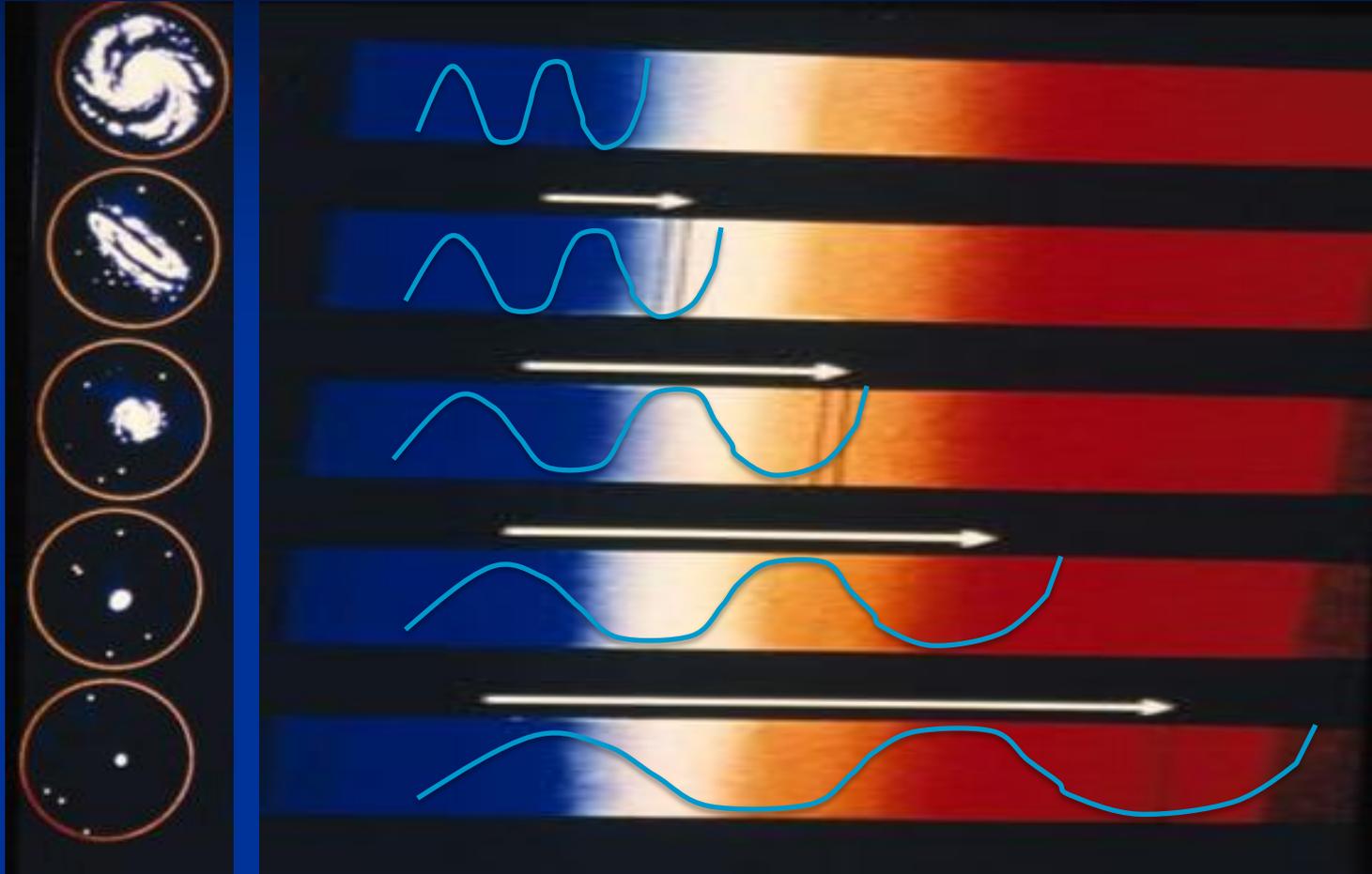
Expansion de l'univers

1) La distance aux galaxies les plus proches peut être obtenue à partir de la relation période-luminosité des étoiles variables Céphéides (découverte par Henrietta Leavitt, à Harvard, au début du 20e siècle)



- ❖ A partir de la courbe de lumière, il est possible d'obtenir la période P
- ❖ De la relation période-luminosité on peut obtenir la magnitude absolue M
- ❖ Avec M et m il est possible de mesurer la distance à la galaxie $d=10^{(m-M+5)/5}$ pc
- ❖ Pour déterminer les distances des galaxies les plus éloignées, les astronomes peuvent utiliser un type de supernova (type Ia) avec des luminosités similaires..

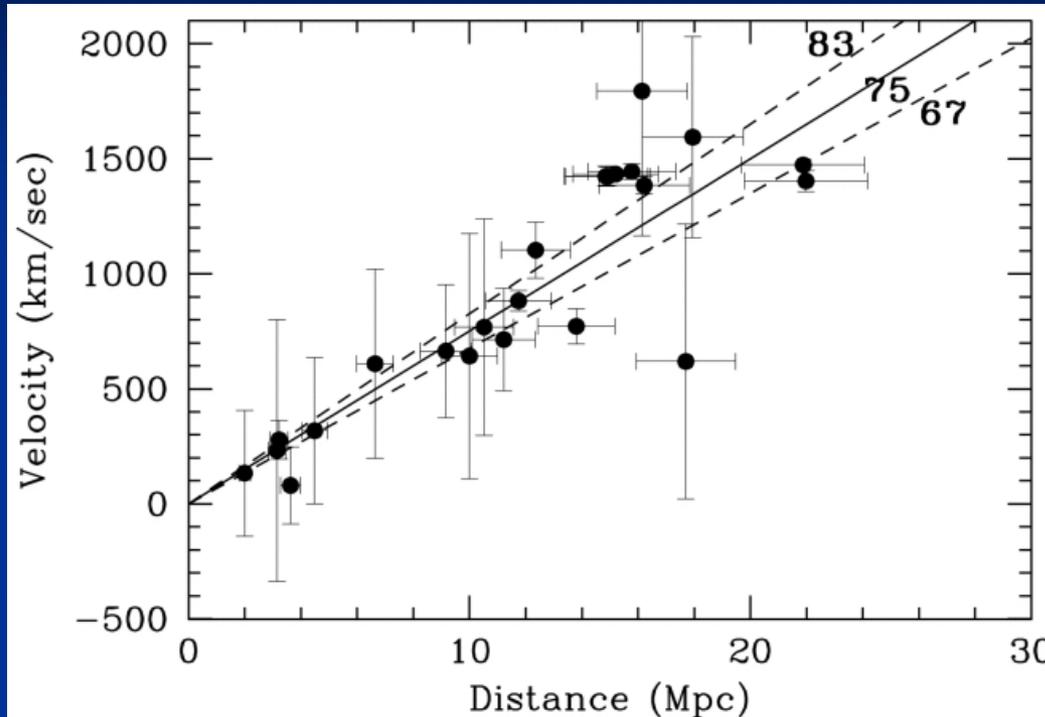
Expansion de l'univers



2) La vitesse de récession est mesurée dans le spectre:

$$v = (\Delta \lambda / \lambda) * c$$

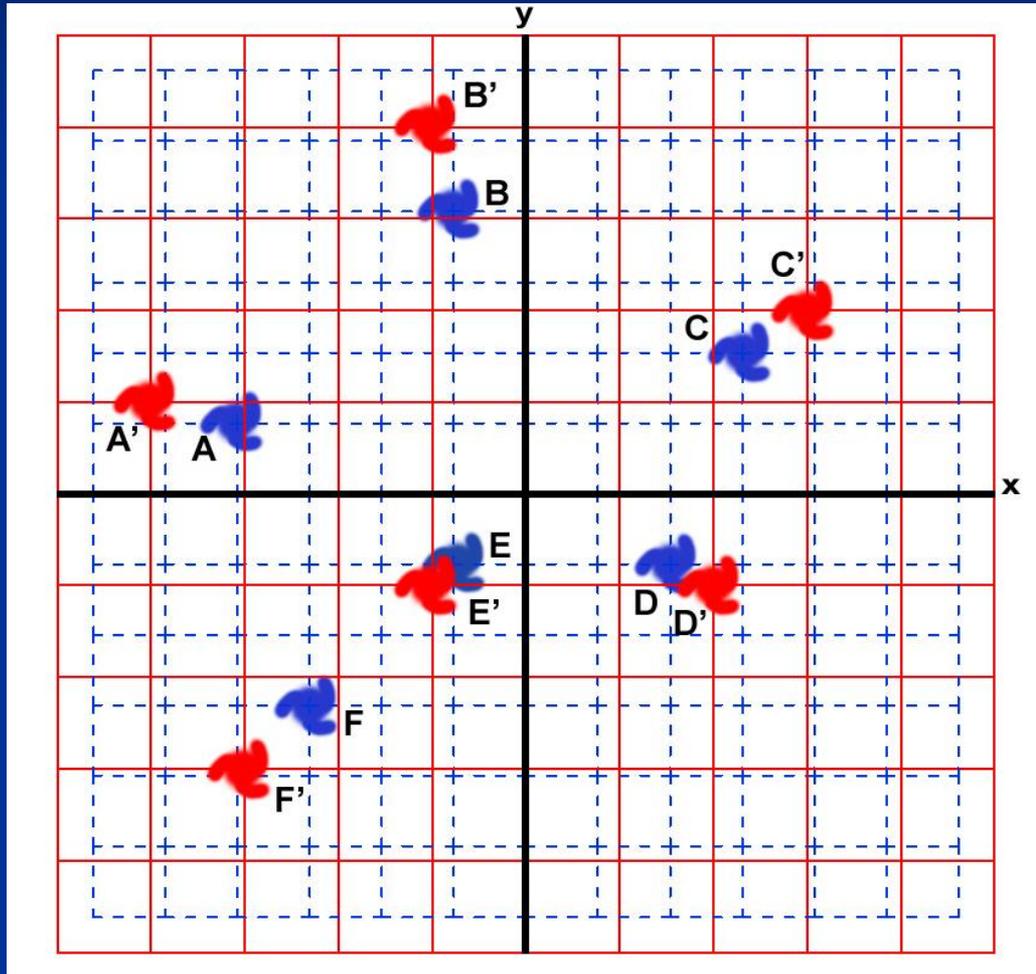
Expansion de l'univers



(from Freedman et al, 2001).

3) La constante de Hubble est la pente de la relation: $v = H \cdot D$ d'où H_0 est la vitesse d'expansion de l'Univers: $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$

Activité 5: Calcul de la constante de Hubble-Lemaître

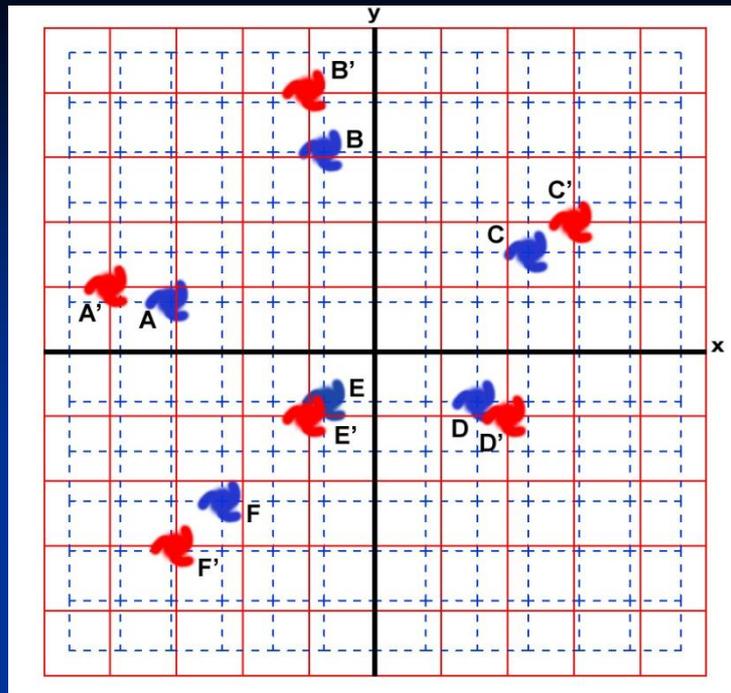


**Bleu = Univers
avant l'expansion**

**Red = Univers
après expansion**

Activité 5: Calcul de la constante de Hubble-Lemaître

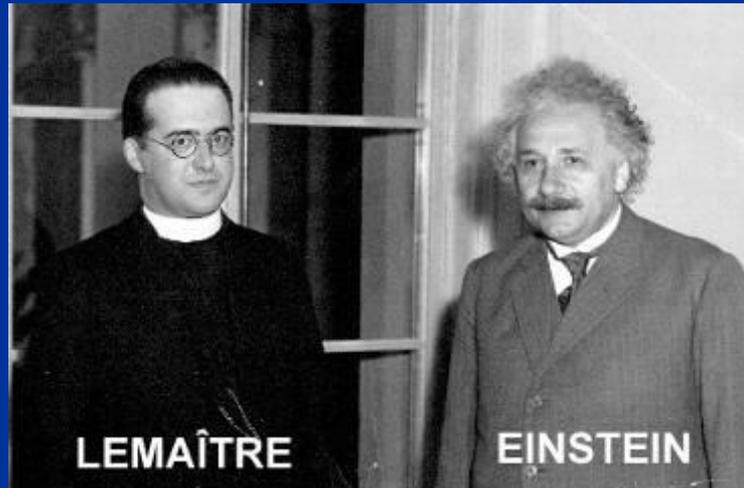
<i>Galaxy</i>	<i>Coordinates x,y</i>	<i>d=distance to origin</i>	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
<i>A</i>					
<i>A'</i>					
<i>B</i>					
<i>B'</i>					
<i>C</i>					
<i>C'</i>					
<i>D</i>					
<i>D'</i>					
<i>E</i>					
<i>E'</i>					
<i>F</i>					
<i>F'</i>					



Galaxy	Coordinates x, y	d =distance to origin	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Big Bang

- Si nous revenons, il y a eu un temps où tout était uni: Univers en expansion.
- Georges Lemaître, en résolvant les équations de la relativité, est venu à l'idée d'un univers en expansion qui a commencé comme un "oeuf cosmique".



Big Bang

- Nom du Big Bang: grande explosion.
- Fred Hoyle, avec certains préjugés anti-religieux, pensait qu'il semblait trop cohérent avec l'idée d'un Créateur
- S & T a fait un concours pour le renommer. 12 000 propositions. Aucune n'était meilleure



Big Bang

- Avant le Big Bang? Nous ne savons rien.
- Quelle était la cause? Pourquoi il a eu lieu? Et pourquoi il y a les lois physiques observées?
- La physique, c'est la façon dont les choses existantes fonctionnent, et non pas pourquoi elles existent.
- La physique étudie la matière à partir de son origine (depuis le Big Bang), pas avant, ni la raison ou le but de la raison pour laquelle il existe. Ceux ci sont des questions philosophiques, religieuses, mais non scientifiques.

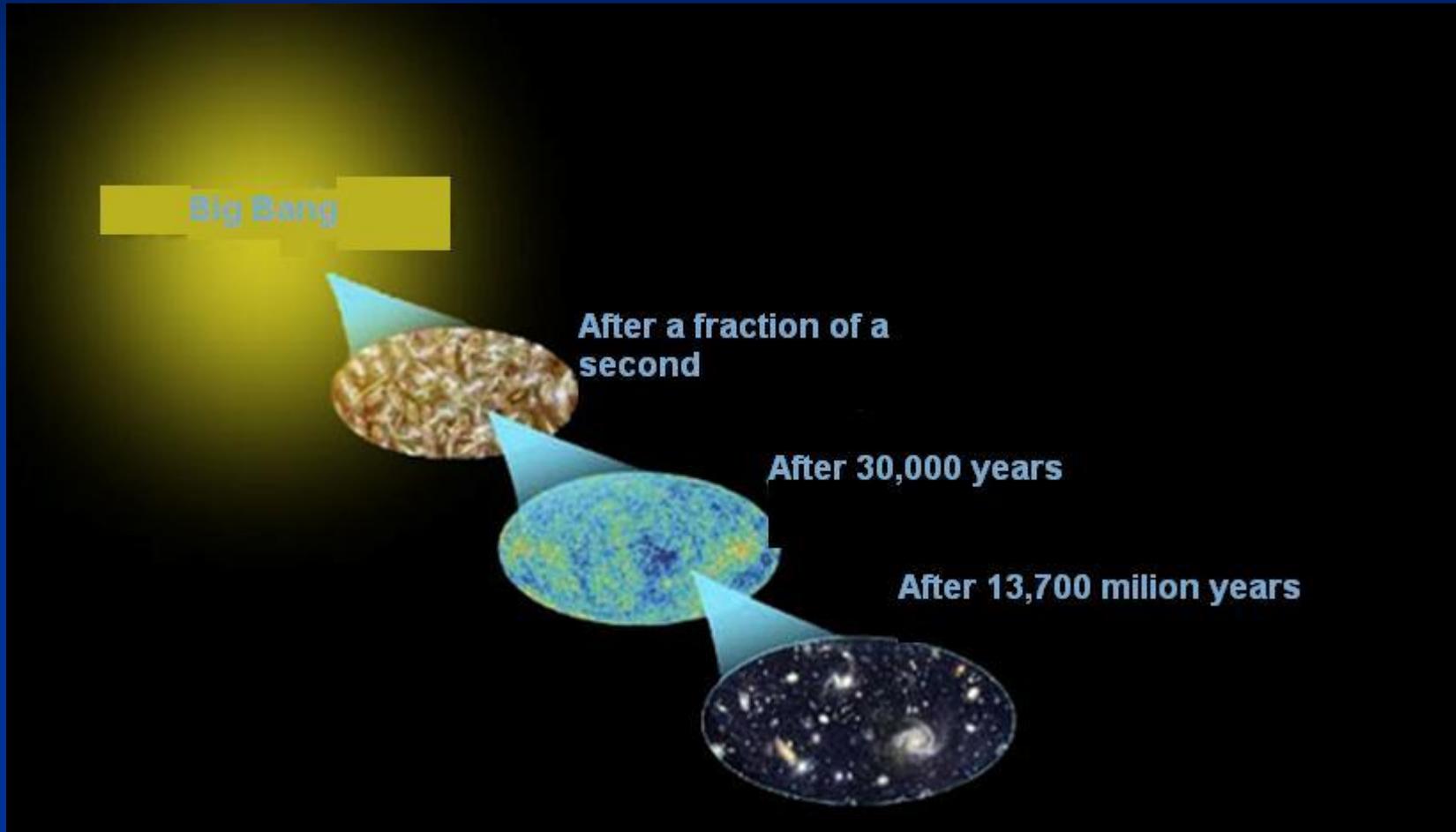


Big Bang

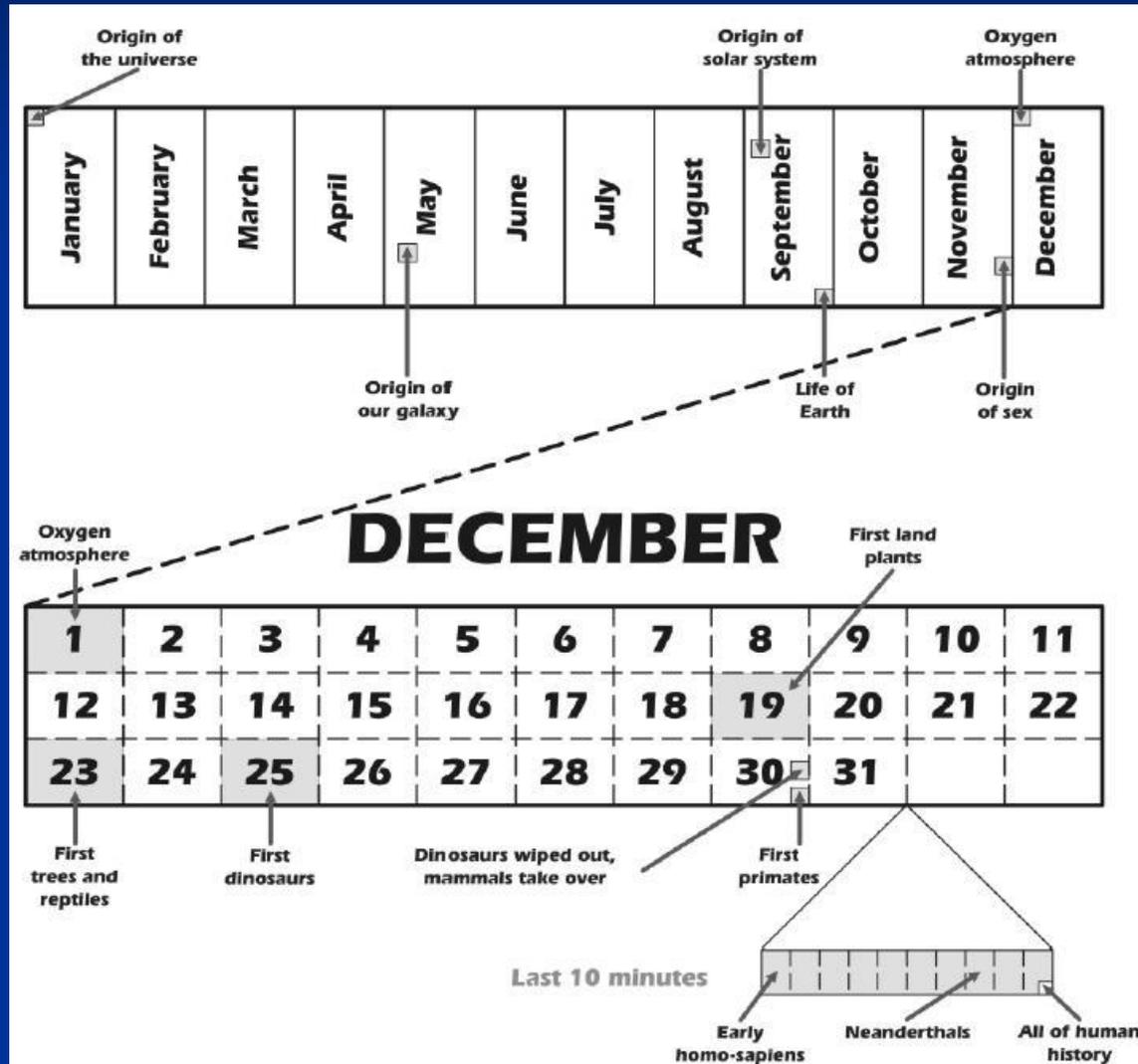
- Fluctuation du vide quantique?
- Le vide n'est pas rien, il existe.
- Univers multiple? Indémontrable par définition. Théorie non scientifique.



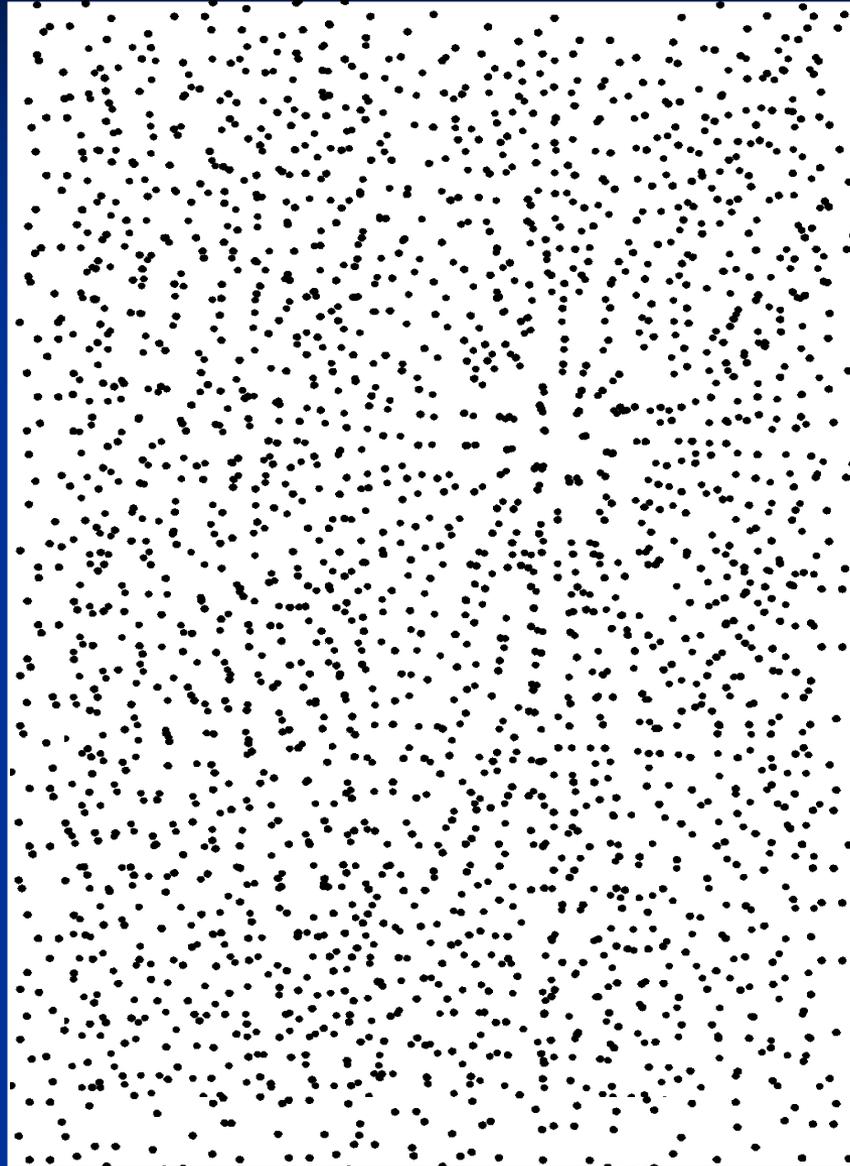
Evolution de l'univers



Développement de l'Univers



Activité 6: Il n'y a pas de centre d'expansion

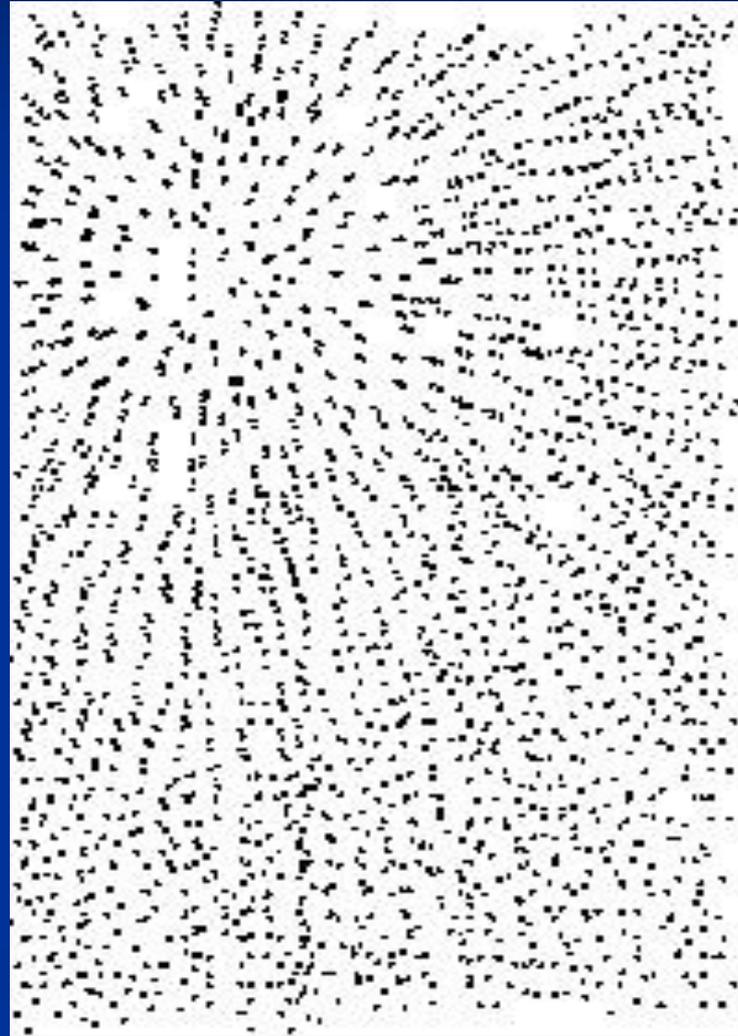
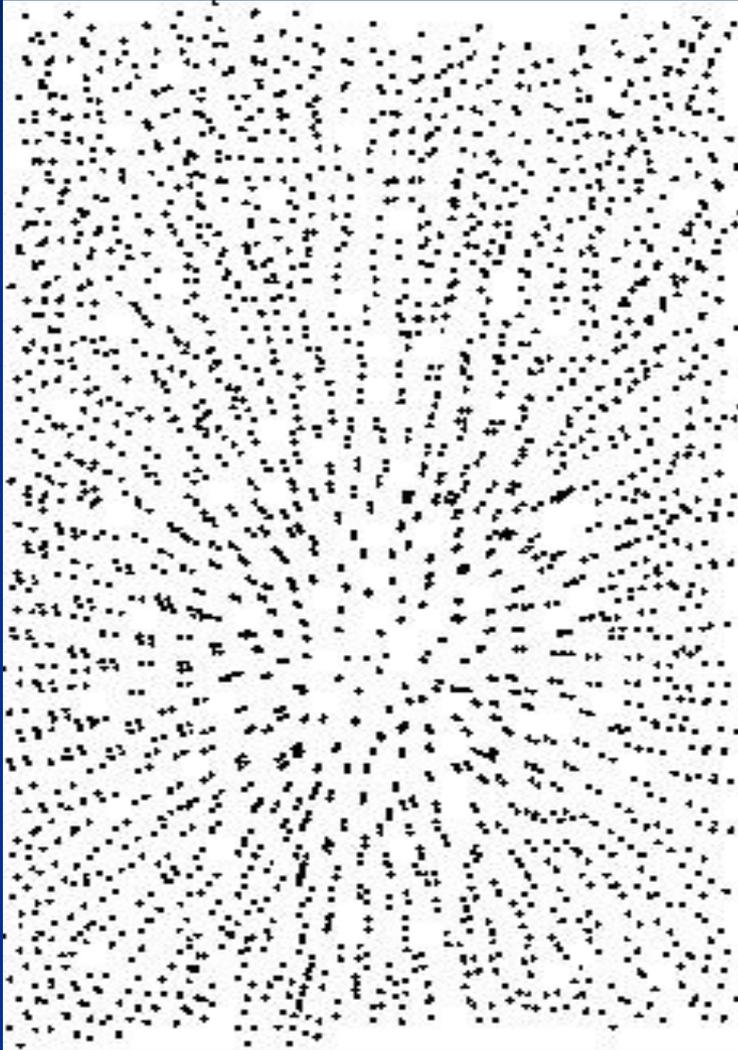


100%

105%



Activité 6: Il n'y a pas de centre d'expansion



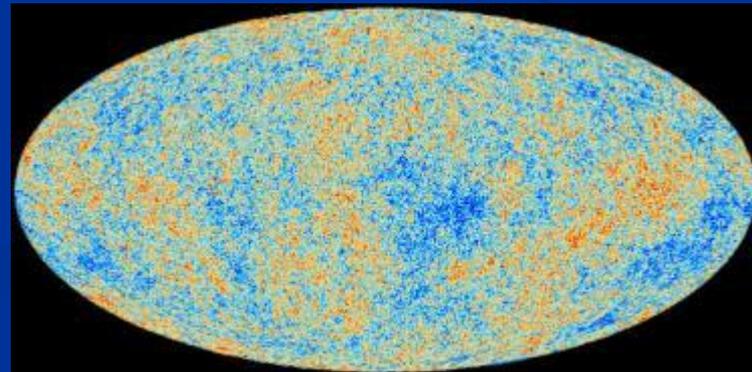
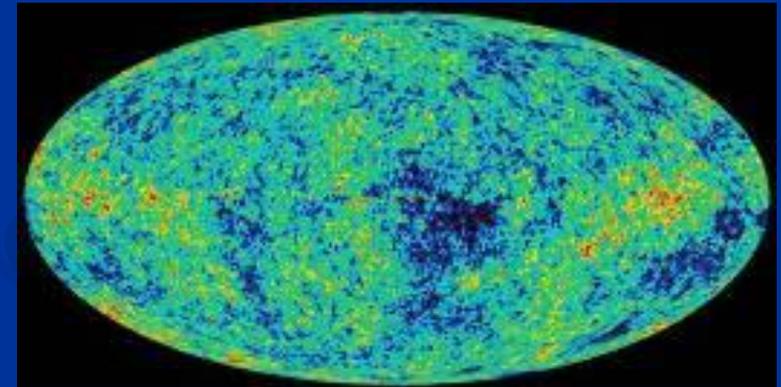
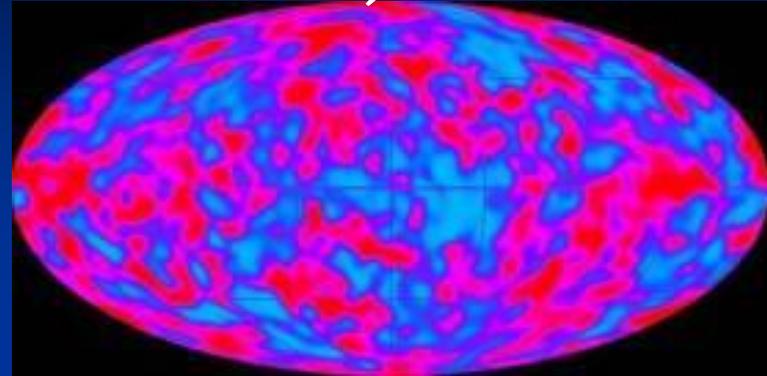
Radiation de fond cosmique micro-ondes (CMB radiation)

- Radiation qui est devenue libre à 380 000 ans après le Big Bang.
- Au fil du temps, à mesure que l'espace se dilate, les photons CMB se dilatent dans leur longueur d'onde.
- Ils sont maintenant dans la région des micro-ondes



Radiation de fond cosmique micro-ondes (CMB radiation)

- Les missions COBE, WMAP et PLANCK ont fait une carte du ciel de rayonnement CMB, à chaque fois avec plus de détails, en détectant de petites fluctuations: empreintes de morceaux de matière à partir desquelles les galaxies ont commencé à se former



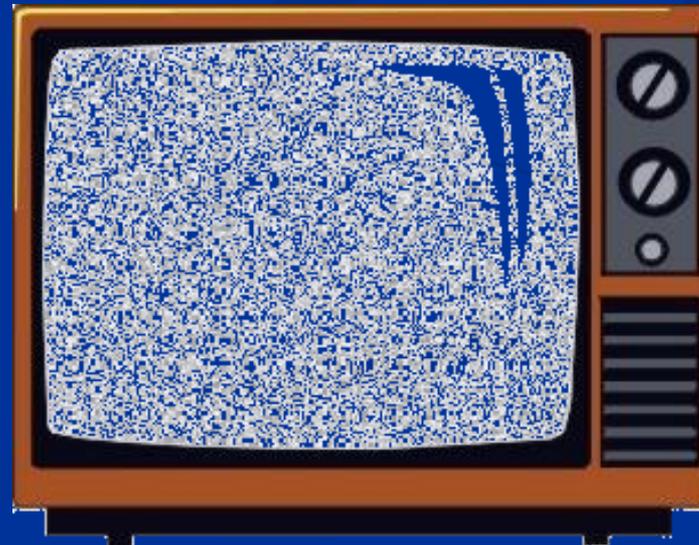
Activité 7: Radiation de fond cosmique micro-ondes

- > 300 000 ans après le Big Bang, les photons ont été séparés de la matière et ont commencé à voyager librement à travers l'univers.
- En élargissant l'espace, les photons étendent leur longueur d'onde, actuellement $\lambda = 2 \text{ mm}$, équivalent à $T = 2,7 \text{ K} = -270 \text{ }^\circ \text{C}$.



Activité 7: Radiation de fond cosmique micro-ondes

- Nous pouvons le détecter avec un téléviseur analogique. Dans un canal vide, un sur dix points vient du rayonnement de fond de micro-ondes.



Matière noire: Table tournante qui compense l'attraction gravitationnelle terrestre

Les trous noirs sont invisibles, mais nous savons qu'ils existent parce que leur force gravitationnelle fait que les systèmes stellaires se déplacent autour d'eux.



Bien que la matière noire soit invisible, une façon de la détecter est d'observer et d'étudier le comportement des objets proches.



Une autre façon de détecter la matière noire: lentille gravitationnelle



La masse d'une lentille gravitationnelle agit comme une lentille optique déformant l'espace environnant et déviant la lumière d'un objet éloigné.

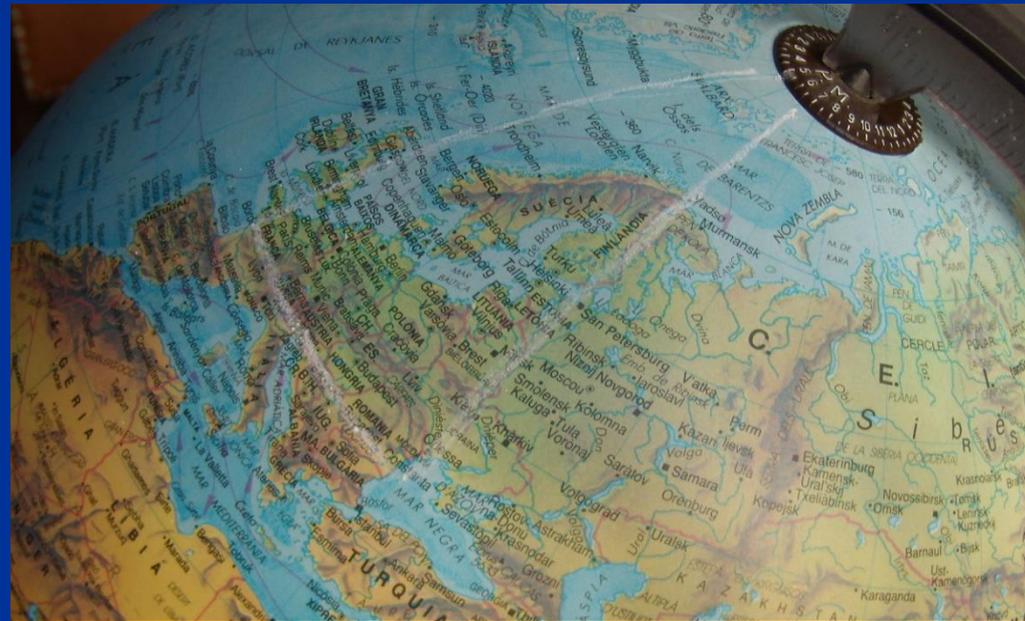
Lentilles gravitationnelles

- La lumière suit toujours le chemin le plus court possible
- Si la surface est courbe, la ligne est courbe

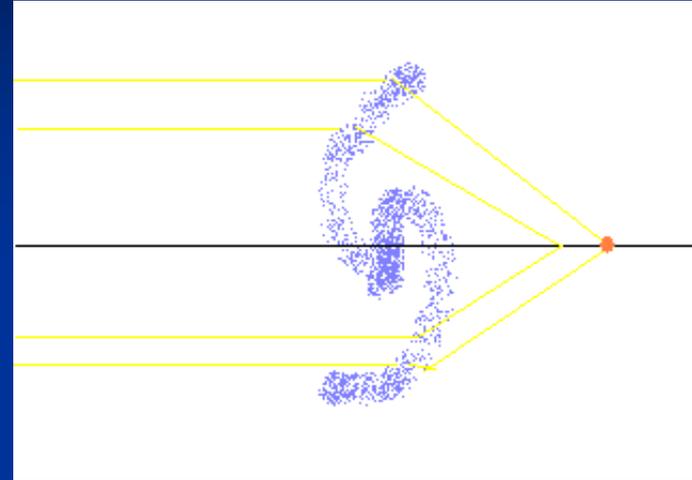
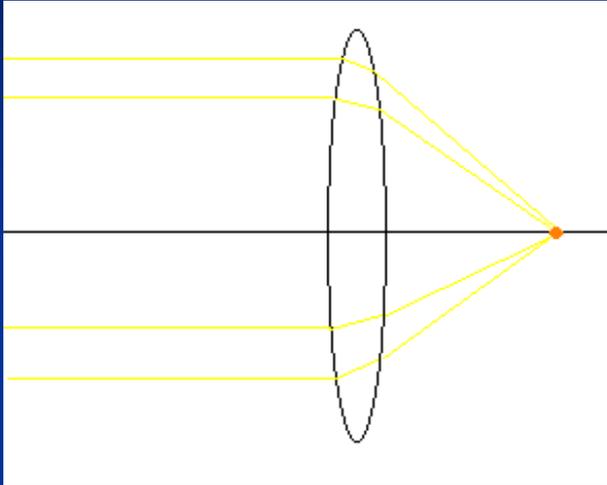


Pourquoi la lumière dévie en passant près d'un corps?

- S'il y a une masse, l'espace est courbé et le chemin le plus court entre deux points est une courbe.
- Une situation similaire peut être observée à l'aide du globe terrestre.

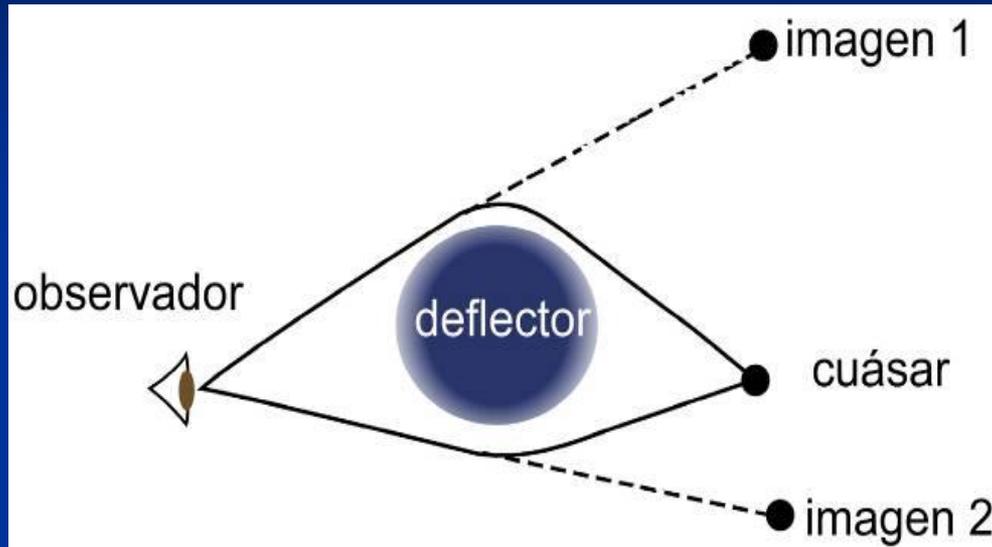


Comment fonctionnent les lentilles gravitationnelles?



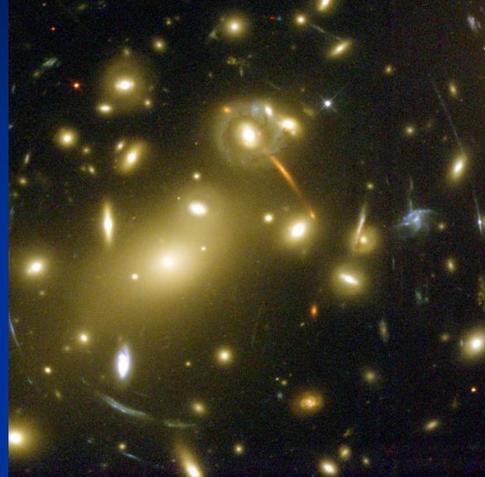
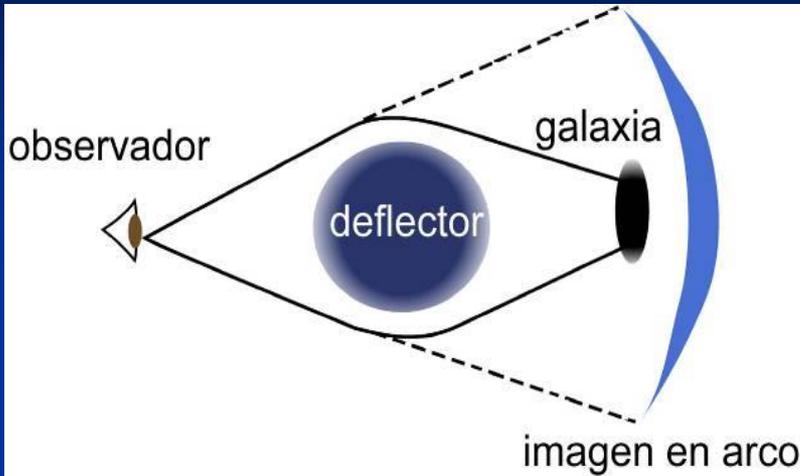
- Pour une lentille optique convexe, la lentille focalise les rayons parallèles de lumière en un point: le foyer.
- Pour une lentille gravitationnelle, la lentille (par exemple galaxie ou groupe / groupe de galaxies) focalise les rayons lumineux en une ligne au lieu d'un point; Cela peut introduire plusieurs distorsions dans l'image.

Changements de position et de multiplication



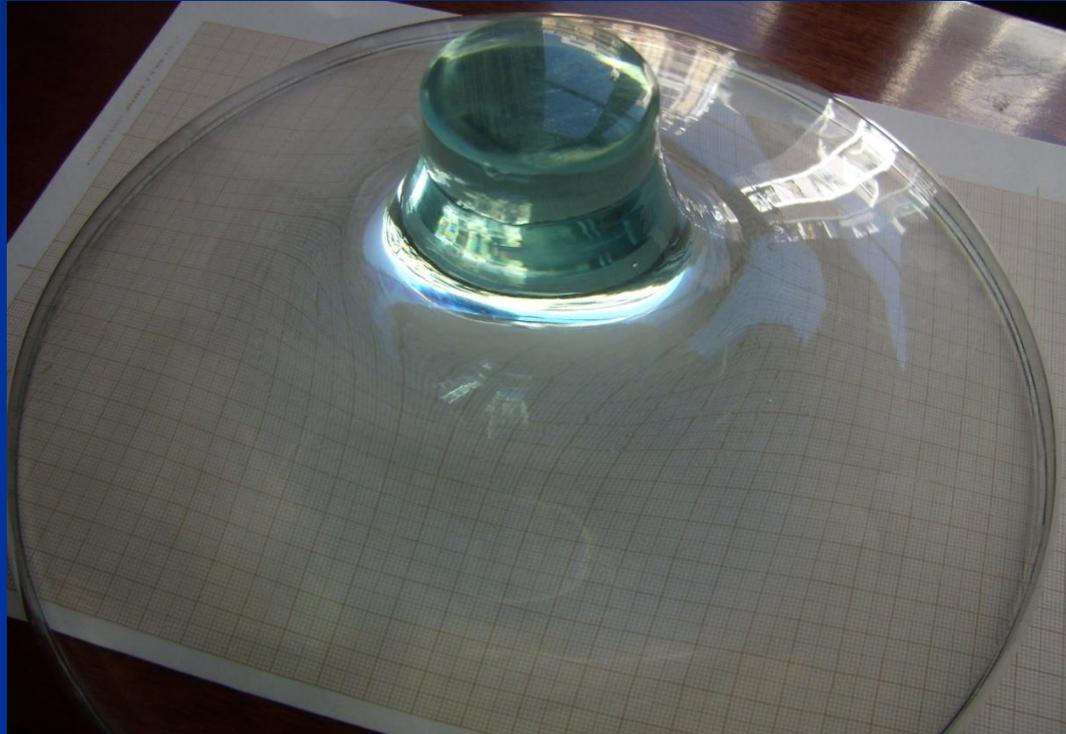
- La déviation produit la position apparente de l'étoile, de la galaxie ou du quasar
- Les lentilles gravitationnelles ne sont pas parfaites, les plus grosses peuvent produire des images multiples.

Déformation



- Si le corps dévié est une source astronomique étendue, les images résultantes produisent un ensemble d'arcs lumineux.
- *“Si le système de lentille est parfaitement symétrique, les rayons convergent et le résultat est un anneau”.*
- Si le corps dévié est une étoile ou un quasar, l'image est un point.

Activité 8: Simulation de la déformation spatiale au fond d'un verre



■ Si nous plaçons la base d'un verre de vigne sur un papier quadrillé, nous pouvons voir la déformation.

Activité 8: Regarder à travers le "fond d'un verre"



- Coupez simplement le fond du verre.



+



=



Fragment d'Arc

Croix d'Einstein Anneau d'Einstein



Activité 9: Simulation de la déformation spatiale avec un verre d'eau colorée



- Si vous mettez un verre d'eau colorée sur du papier graphique et de regarder à travers l'eau colorée, vous pouvez voir cette déformation.

Activité 9: Fixer une lampe de poche et se déplacer lentement tout en regardant à travers le verre d'eau colorée



■ Ce modèle simple montre que la «matière» peut reproduire des distorsions dans les images observées «à travers».

(Le vin peut être remplacé par un autre liquide translucide)

Activité 9: Fixer une lampe de poche et se déplacer lentement tout en regardant à travers le verre d'eau colorée



Fragment d'arc



Figure amorphe



Croix d'Einstein.



Anneau d'Einstein

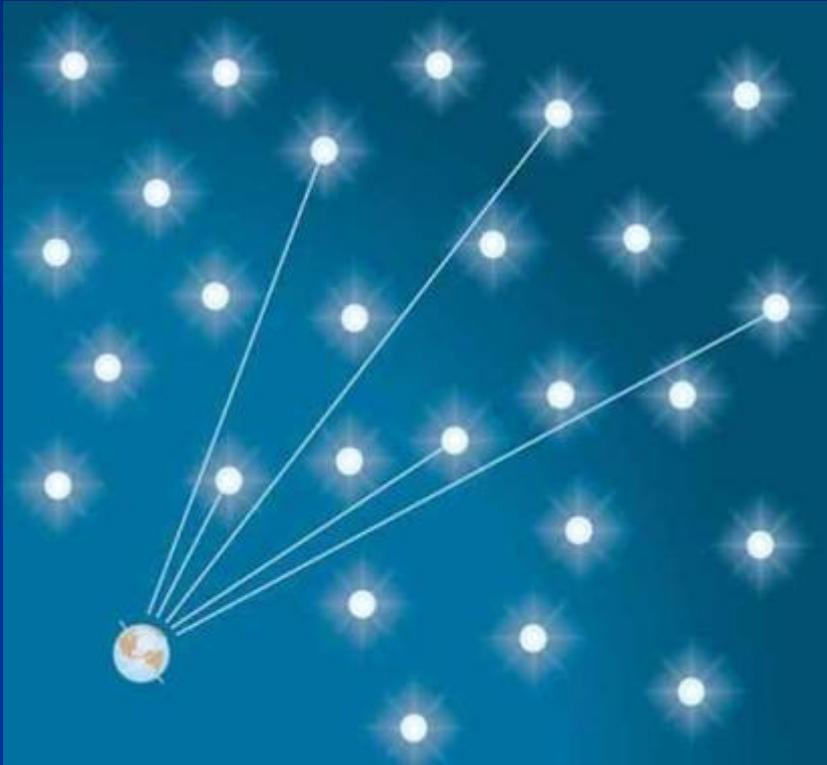


Un thème de l'atelier: Pourquoi fait-il nuit la nuit?

En Olbers a suggéré que si:

- L'univers est infiniment étendu.
- Les étoiles sont uniformément réparties dans l'univers.
- Toutes les étoiles ont une luminosité similaire dans tout l'univers ...

Un thème de l'atelier: Pourquoi fait-il sombre la nuit?



... un univers infini aura un nombre infini d'objets et devrait être lumineux pendant la nuit

Pourquoi il fait sombre la nuit?

Alors :

- Tout point sur le ciel serait lumineux, pas noir, puisqu'il y aurait toujours une étoile éloignée brillante.
- Le nombre d'étoiles dans chaque "couche d'oignon" du ciel est proportionnel à r^2 , et leur lumière est inversement proportionnelle à r^2 , où chaque couche fournit la même quantité de lumière à la Terre. S'il y a des couches infinies, le ciel devrait apparaître clair la nuit.



Pourquoi il fait sombre la nuit?

Mais, il y a des erreurs dans ce raisonnement :

- Mais, il y a des erreurs dans ce raisonnement En raison de l'expansion, les étoiles plus lointaines semblent plus rougeâtres (moins lumineuses).
- Mais surtout, le ciel n'a pas un âge infini. Il n'y a pas de couches infinies d'étoiles.

Edgar Allan Poe était celui qui explique correctement le phénomène dans son essai "Eureka", publié en 1848.



**Merci pour votre
attention!**

