

# Un regard sur l'univers: la cosmologie

École d'été « l'univers à la portée de tous »

23-26 août 2017







# Comprendre l'univers

- Qu'est-ce que la cosmologie?
  - Cosmos = beauté, ordre, harmonie, univers organisé (à l'opposé du chaos)
  - Essayer de comprendre où nous sommes
  - Univers: un objet unique peut-il être un objet scientifique?
- Exemples:
  - L'univers a-t-il une limite, un bord, un âge?
  - Ou bien est-il infini et éternel?
  - À quelle distance sont les étoiles du ciel?
  - Combien y en a-t-il?
  - Pourquoi la nuit est-elle noire?







# Anaximandre de Milet (-610 - -546)

Premiers essais d'explications  
*rationnelles* sans faire appel à des  
*causes supra-naturelles.*

## L'approche métaphysique de la cosmologie

1731	C. Wolff	<i>Cosmologia generalis</i>
1740	E. du Châtelet	<i>Institutions physiques</i>
1740	Voltaire	<i>Métaphysique de Newton</i>
1745	Voltaire	<i>Elemens de la philosophie de Newton</i>
1750	Maupertuis	<i>Essai de Cosmologie</i>
1751	D'Alembert	<i>Cosmologie</i>
1750	T. Wright	<i>An original theory or new hypothesis of the universe</i>
1755	E. Kant	<i>Theorie des Himmels</i>
1761	J.H. Lambert (**)	<i>Kosmologische Briefe</i>
1781	E. Kant	<i>Kritic der reinen Vernunft</i>

(\*\*) J.B. Merian (1770) *Système du Monde par M. Lambert*



# Herschel 1784

- (1) les étoiles sont distribuées de façon homogène jusqu'au bord de la Voie Lactée;
- (2) le télescope permet de résoudre (compter) toutes les étoiles.

# Premier but: mesurer les distances aux objets célestes

Ceux qui bougent vite, sont proches (les planètes ou astres errants)

Ceux qui ne bougent pas sont loin... et tous à la même distance?

Ceux qui sont plus brillants sont plus proches?

# La cosmologie antique (... - 1610)

- L'univers est considéré dans son ensemble
- On cherche à en connaître les limites



Quelle est la distance de la Terre au Soleil ?



# La mesure de l'univers

- La triangulation ou effet de parallaxe
- La distance Terre-Lune
- La distance Terre-Soleil et la mesure du système solaire
- La distance aux étoiles
- La taille de la Galaxie
- Les distances aux galaxies
- L'horizon cosmologique

# La cosmologie classique (1610 – 1920)

- L'univers se réduit à notre monde
- L'univers est statique régi par des lois locales qui nous permettent de prédire les événements astronomiques
- Les lois mise en lumière ne permettent pas de savoir ce qu'est l'univers



# Le retour de la cosmologie

- Distinction entre *Cosmologie* et *Cosmogonie* (Laplace)
- Observations de W. et J. Herschel : structure non symétrique de l'Univers
- Observations des nébuleuses : univers-îles (Kant) ou simples nuages de gaz (Huggins)
- Le Grand Débat : Shapley vs Curtis (26 avril 1920)
- Premières observations détaillées: Slipher, Wirtz, Leavitt, Humason, Hubble

# La cosmologie classique

- Le règne de la mesure: l'univers est euclidien
- Mais comment concilier un univers euclidien infini et un monde de planètes et d'étoiles fini?

Mais alors, s'il y a des étoiles à toutes distances, jusqu'où y en a-t-il?

Ne devraient-elles pas recouvrir tout le ciel?

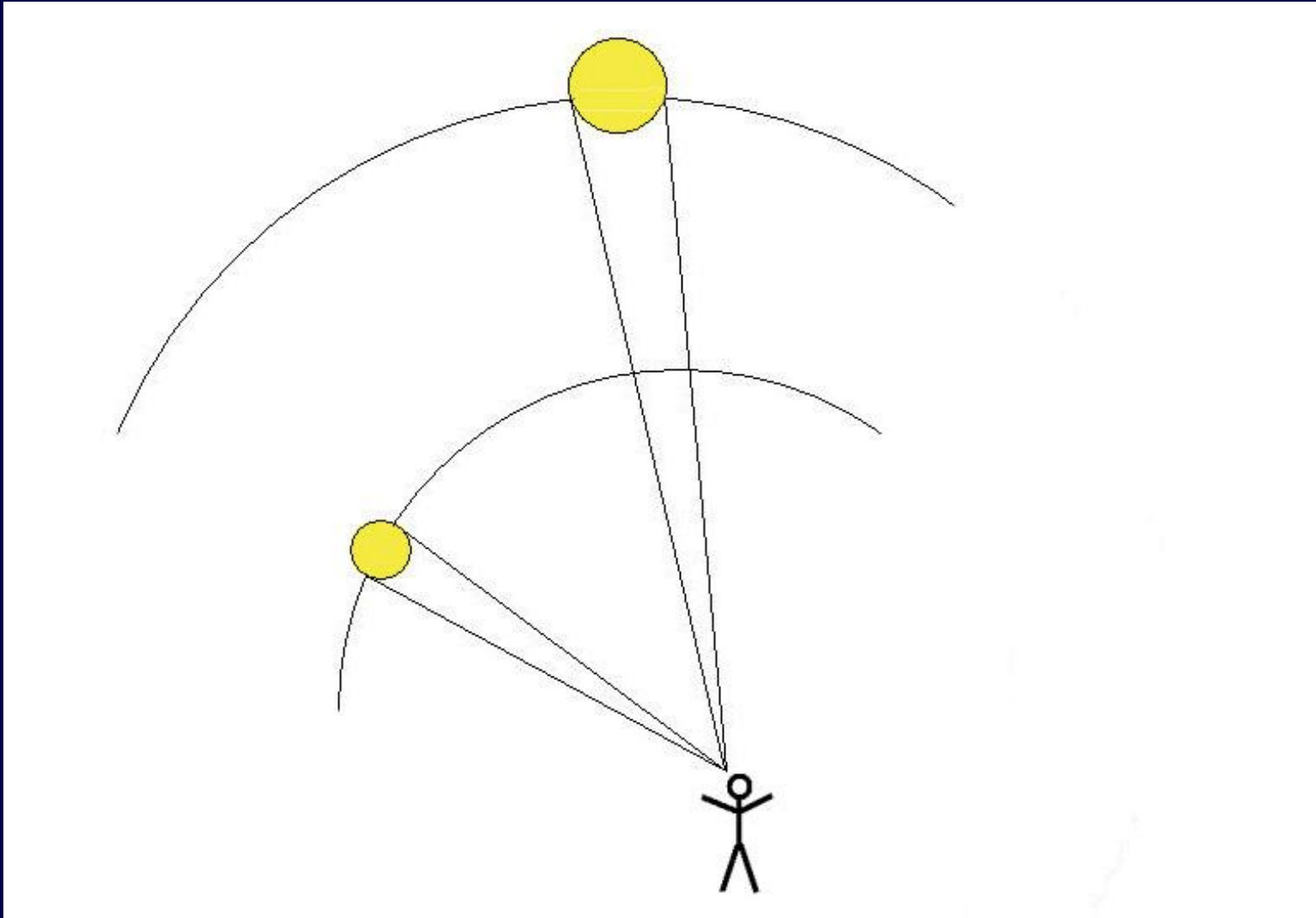
*(le paradoxe de Chézeaux-Olbers)*

S'il y a une infinité d'étoiles, le ciel ne devrait-il pas avoir une brillance infinie?

Combien y a-t-il d'étoiles? Et jusqu'où? Pourquoi la nuit est noire?

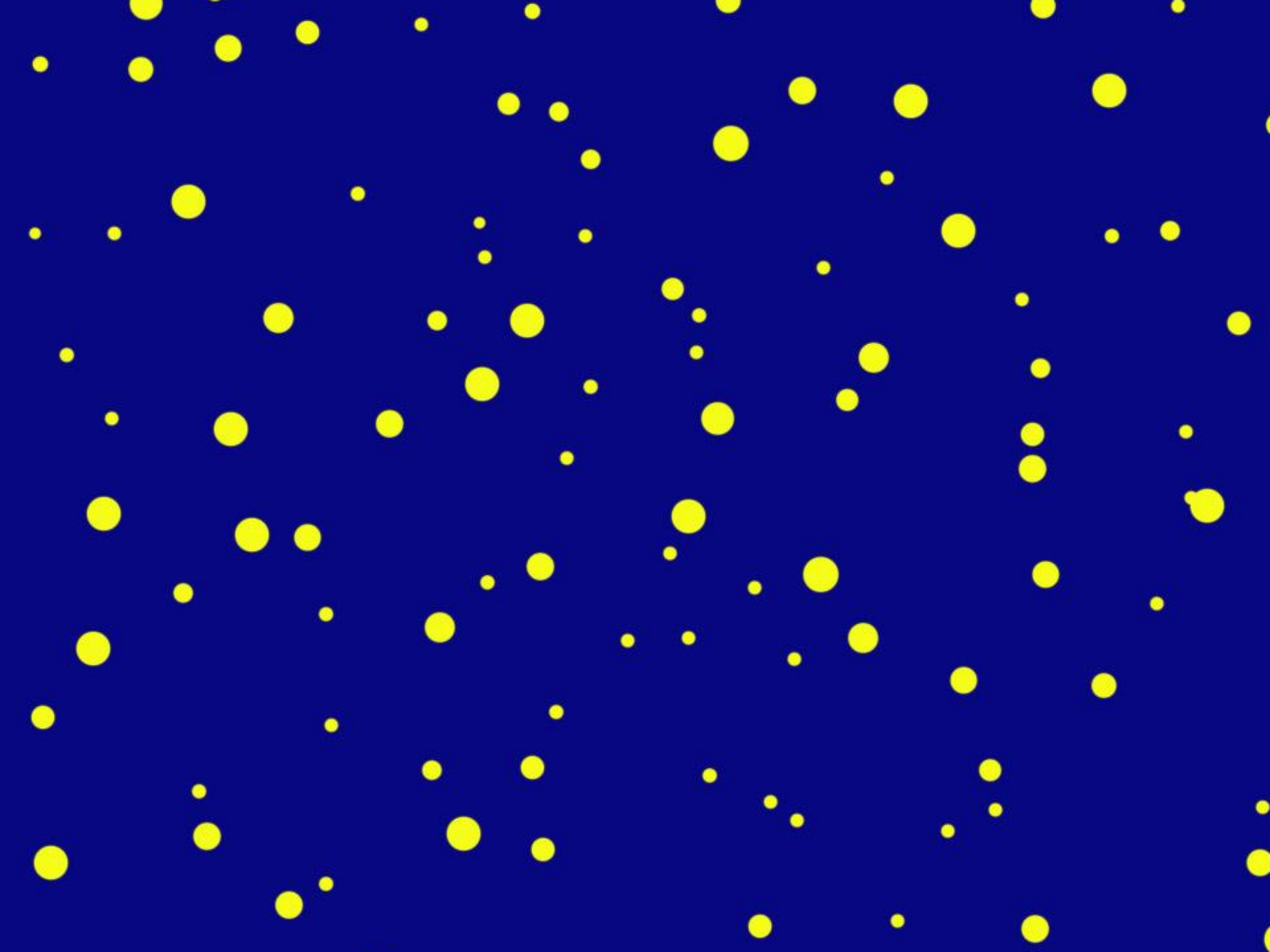


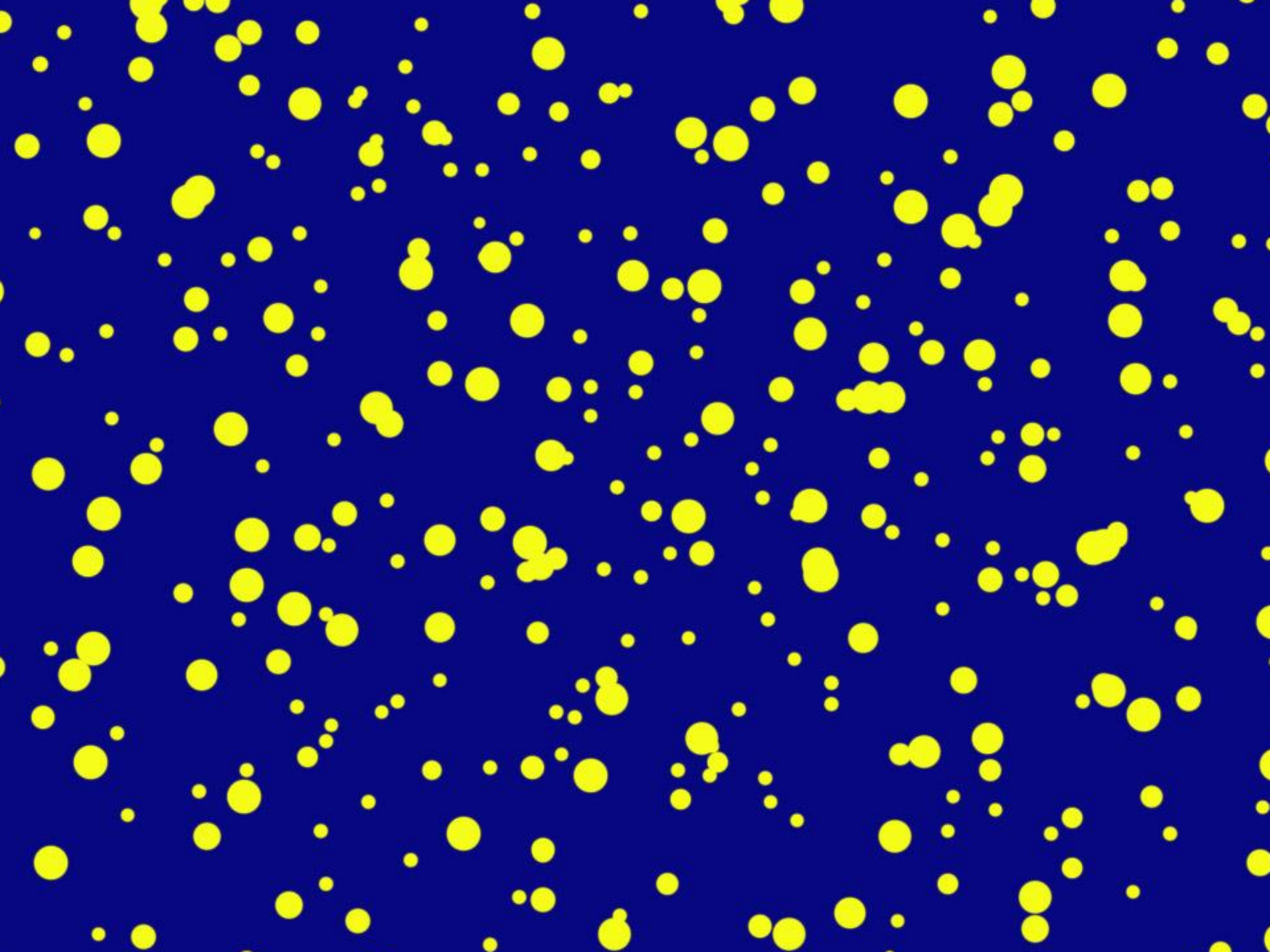
# La brillance des étoiles



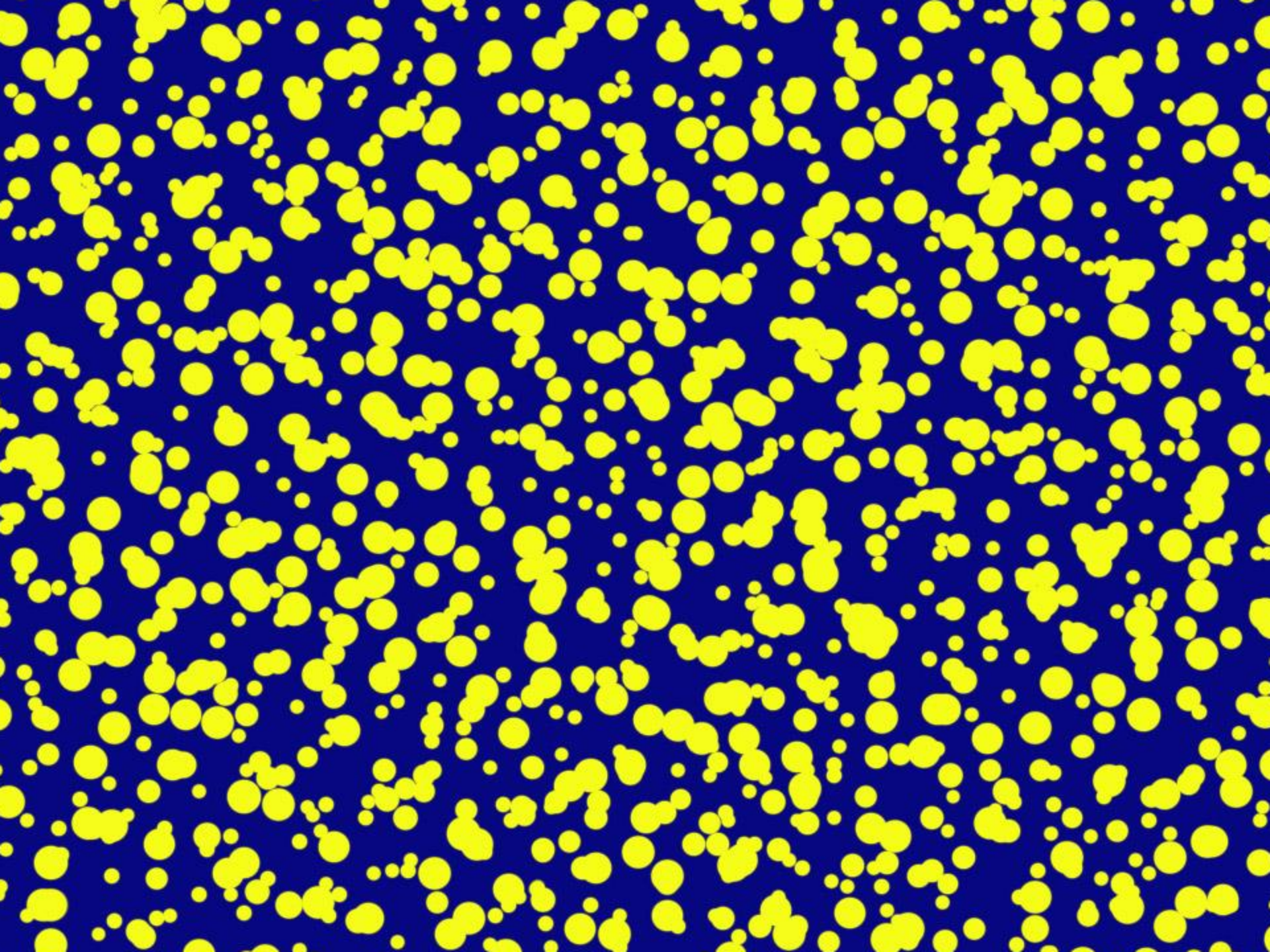
La quantité d'énergie reçue ne dépend que du diamètre apparent de l'étoile  
19 mais pas du tout de sa distance car l'espace est vide et n'arrête pas la lumière.



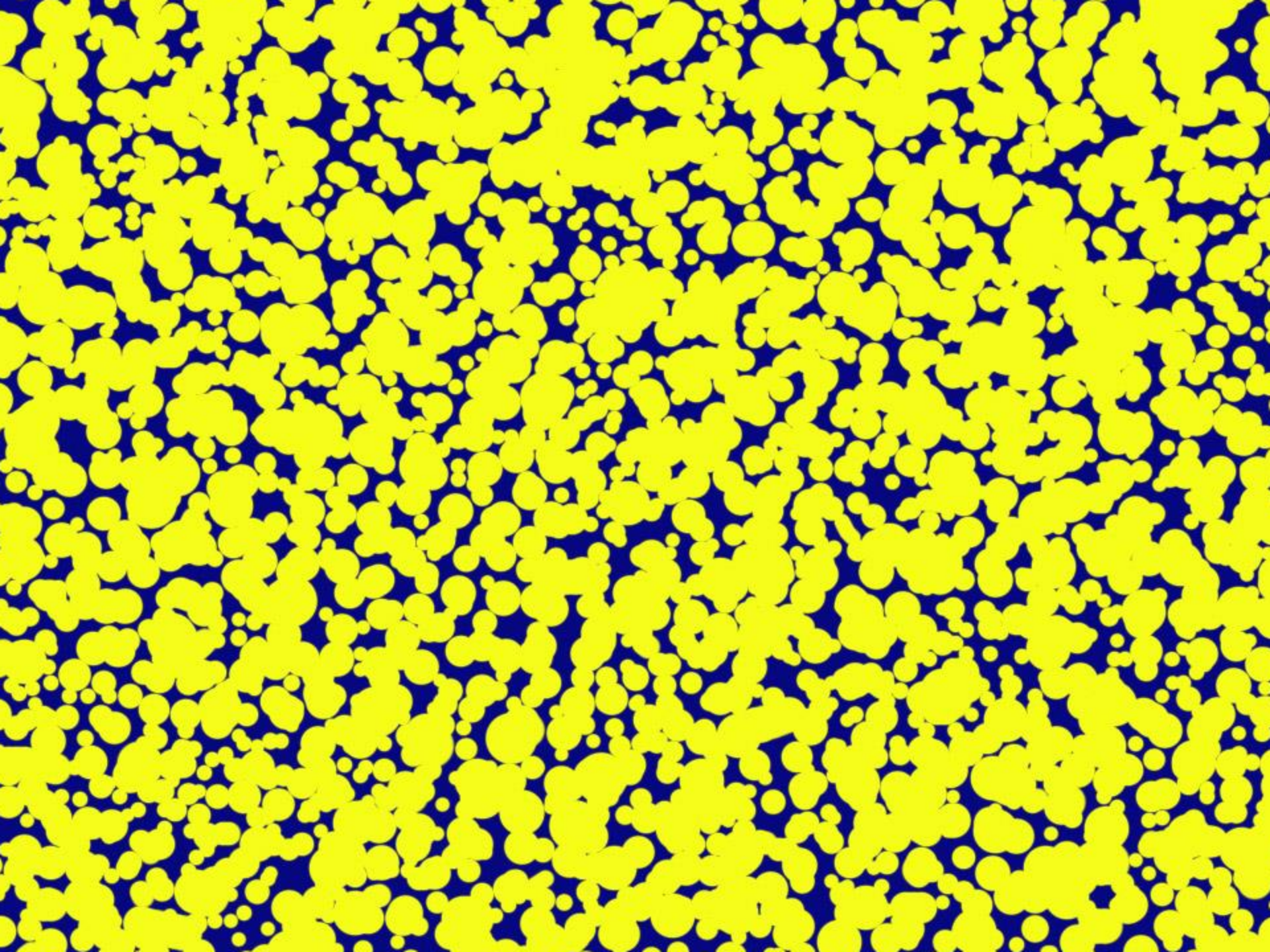




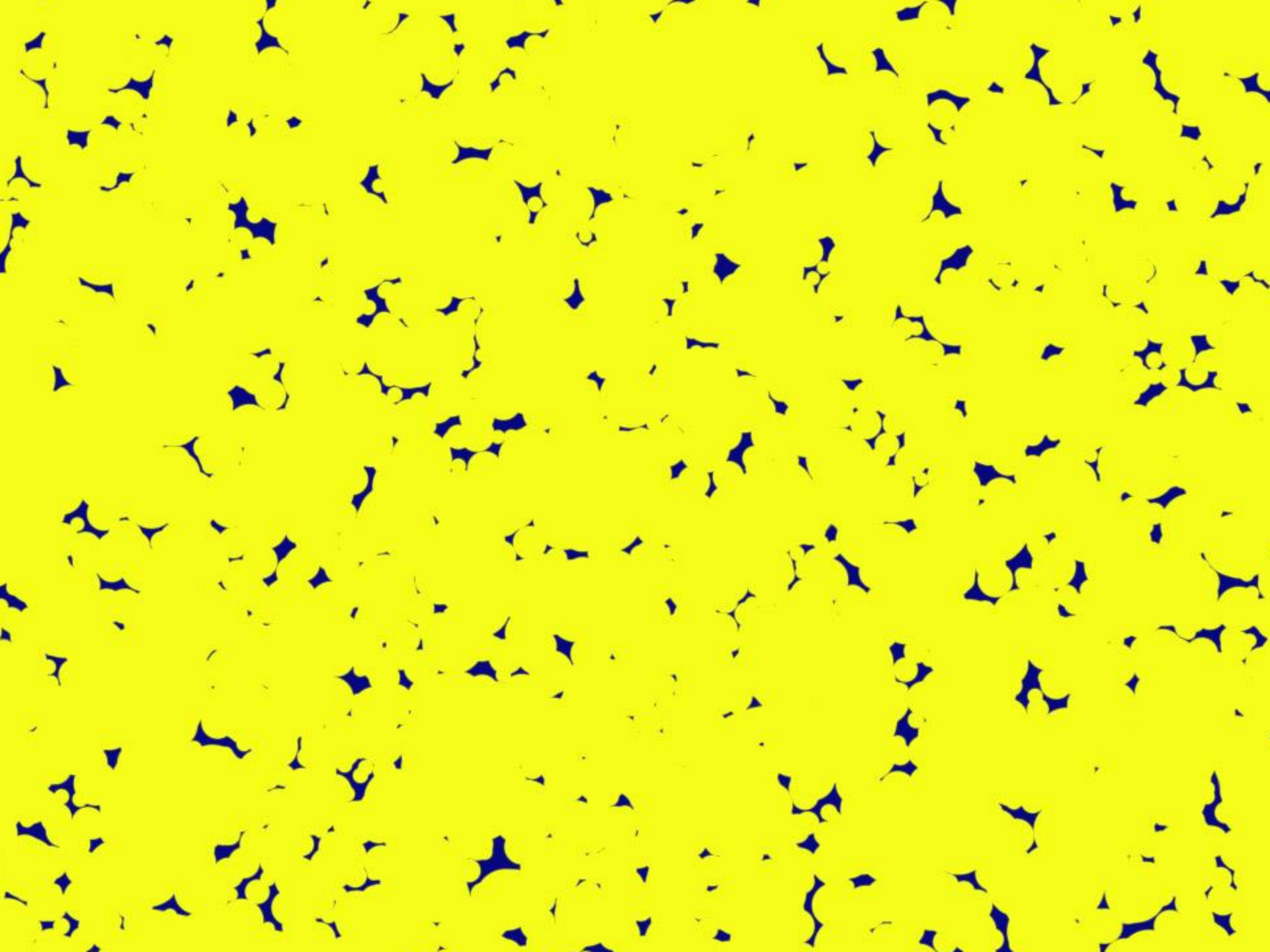












Le ciel a la luminosité du Soleil!

- Il faudra attendre le XIXème siècle et... Edgar Poe pour comprendre pourquoi ce raisonnement est faux...!
  - Les étoiles ne sont pas éternelles
  - Il faut du temps à la lumière pour arriver jusqu'à nous
- Mais ce qui paraît naturel (la nuit noire) n'est pas si naturel que cela!



Les étoiles sont regroupées dans des galaxies (comme la Voie Lactée):  
ce n'est qu'en 1920 que l'on comprend l'existence des galaxies...



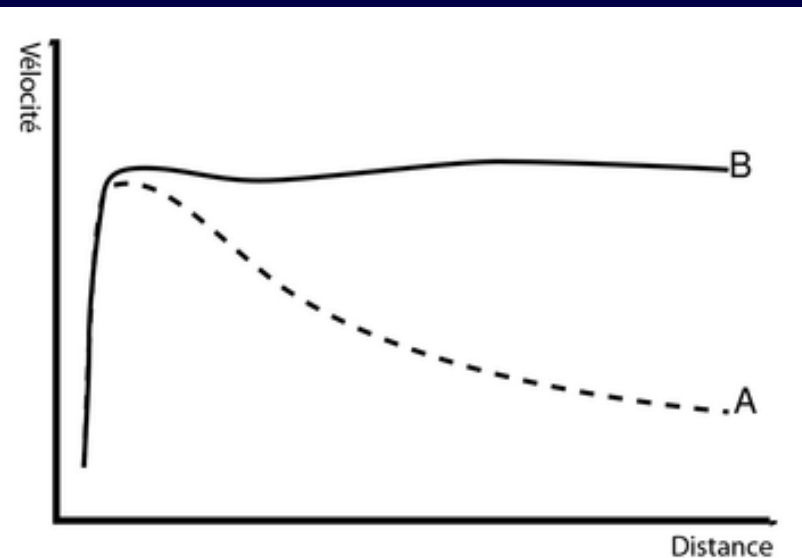
Encore un mystère: le mouvement de rotation des galaxies ne s'explique pas: il est trop rapide!

Il manque de la matière!

On ne la voit pas!

Où est-elle?

Ce sera la « matière noire »...



← Vitesse de rotation des étoiles dans une galaxie

A: ce que la gravitation implique

B: ce que l'on observe

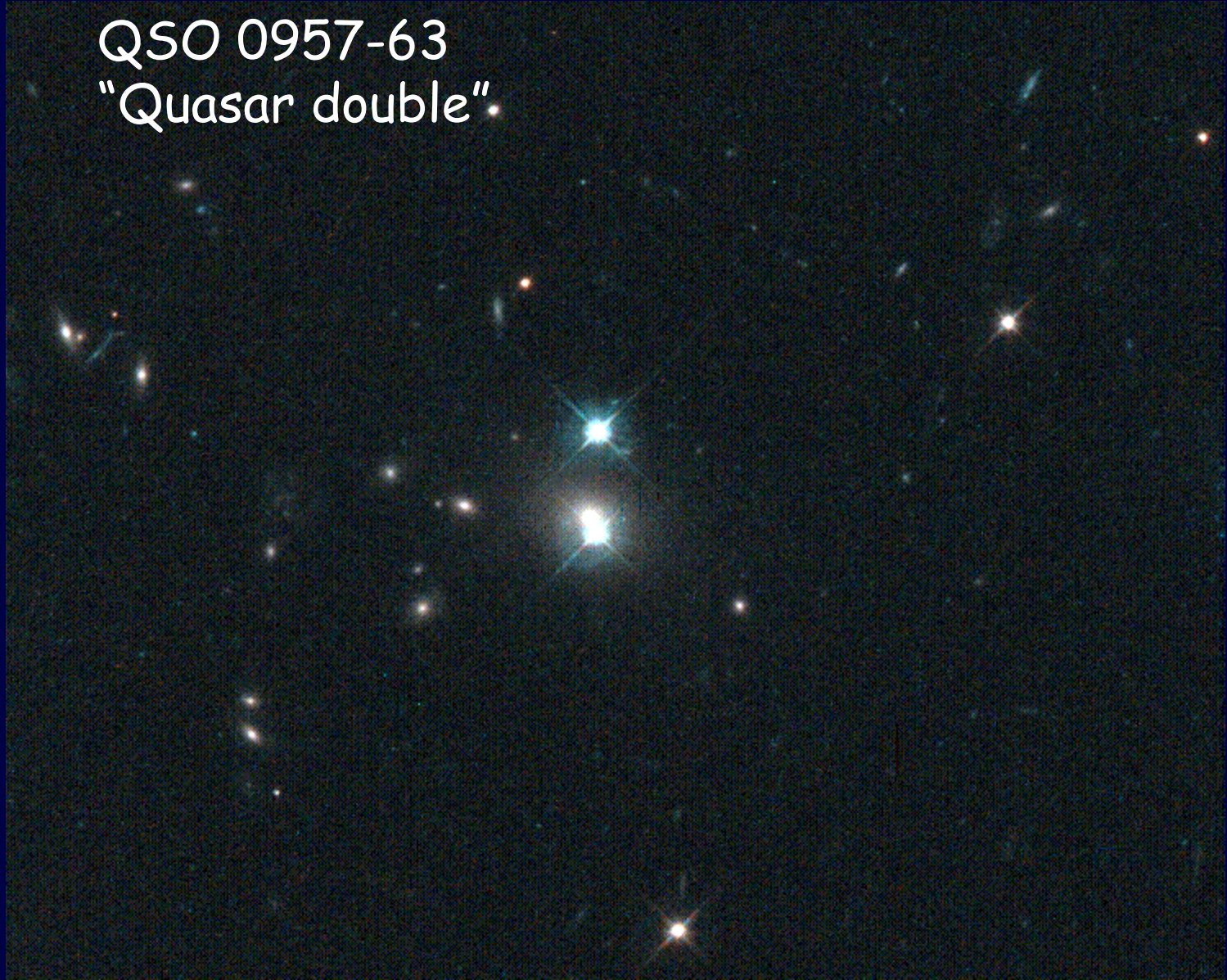
# Un univers bien vide...

- Si le Soleil était représenté par une bille d'un centimètre de diamètre, la plus proche étoile se trouverait à 300 km et la plus proche galaxie (comme notre Voie Lactée) se trouverait à 100 millions de kilomètres...



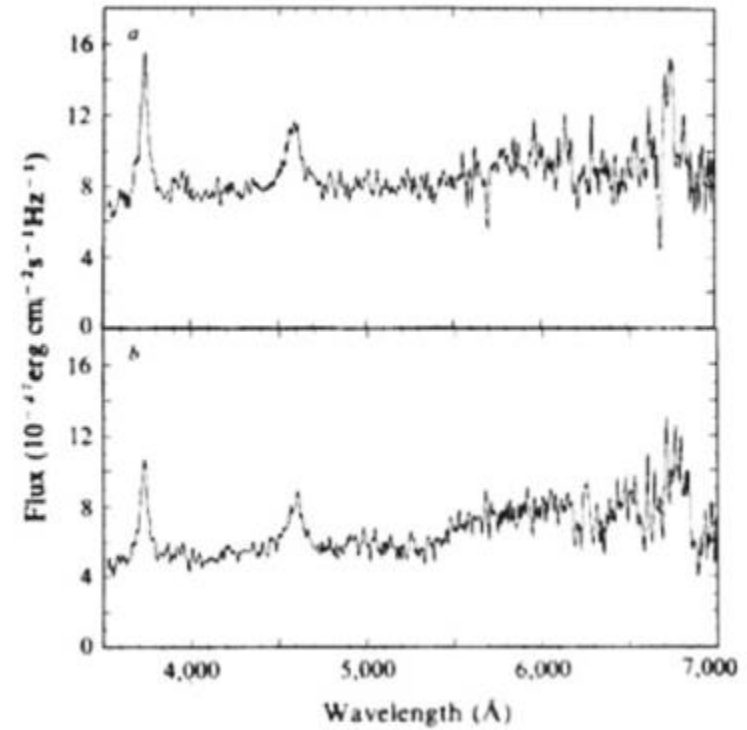
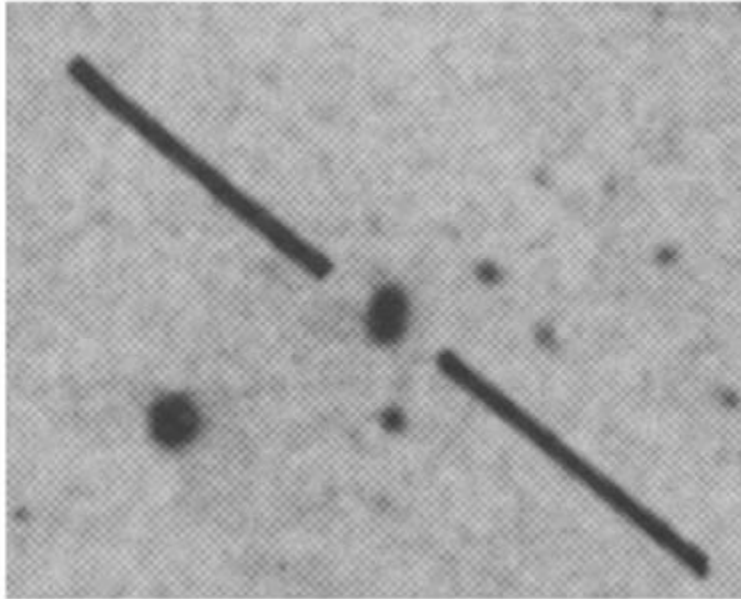
# Lentilles gravitationnelles

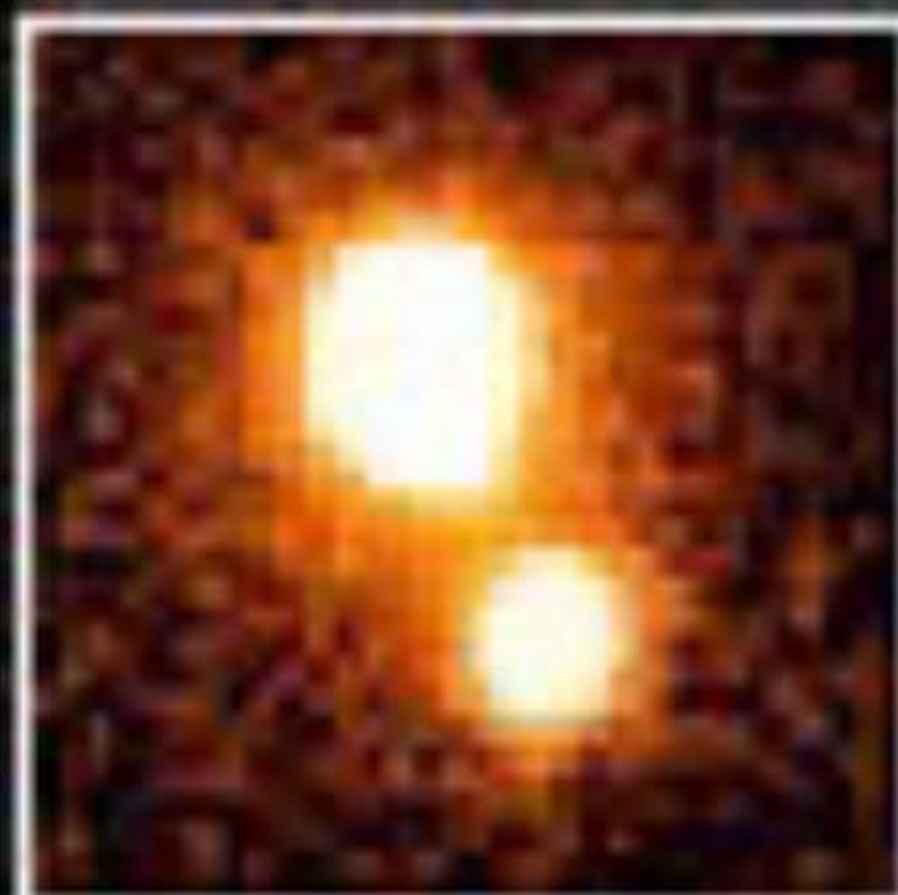
QSO 0957-63  
"Quasar double"





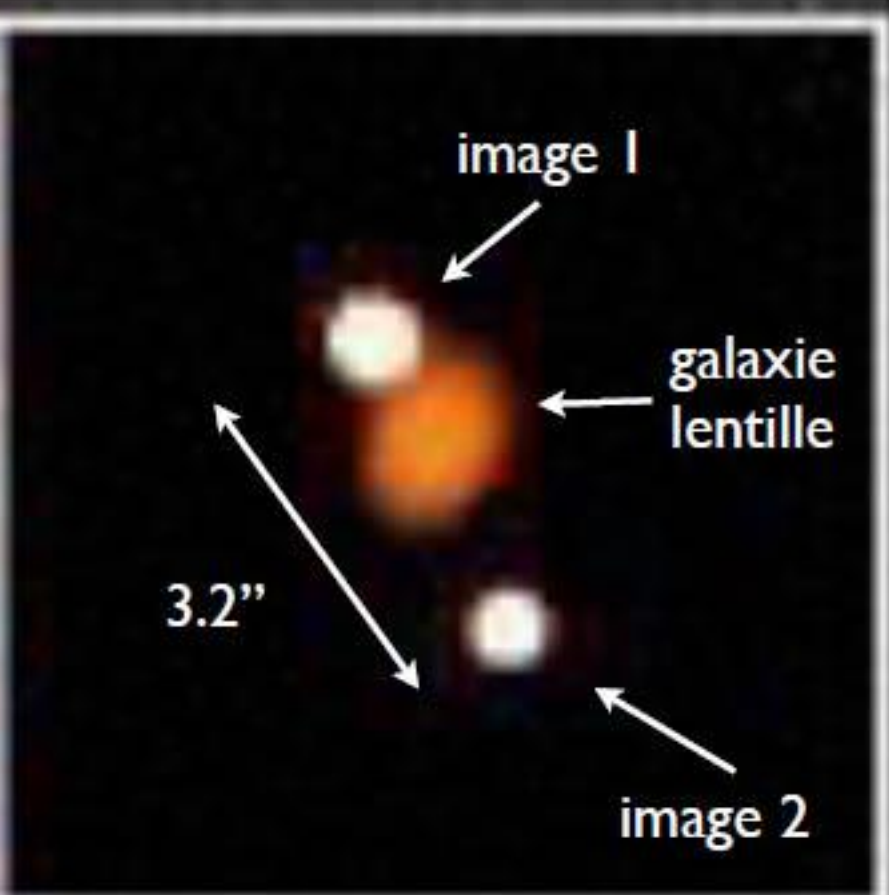
# Les deux quasars ont un spectre identique!





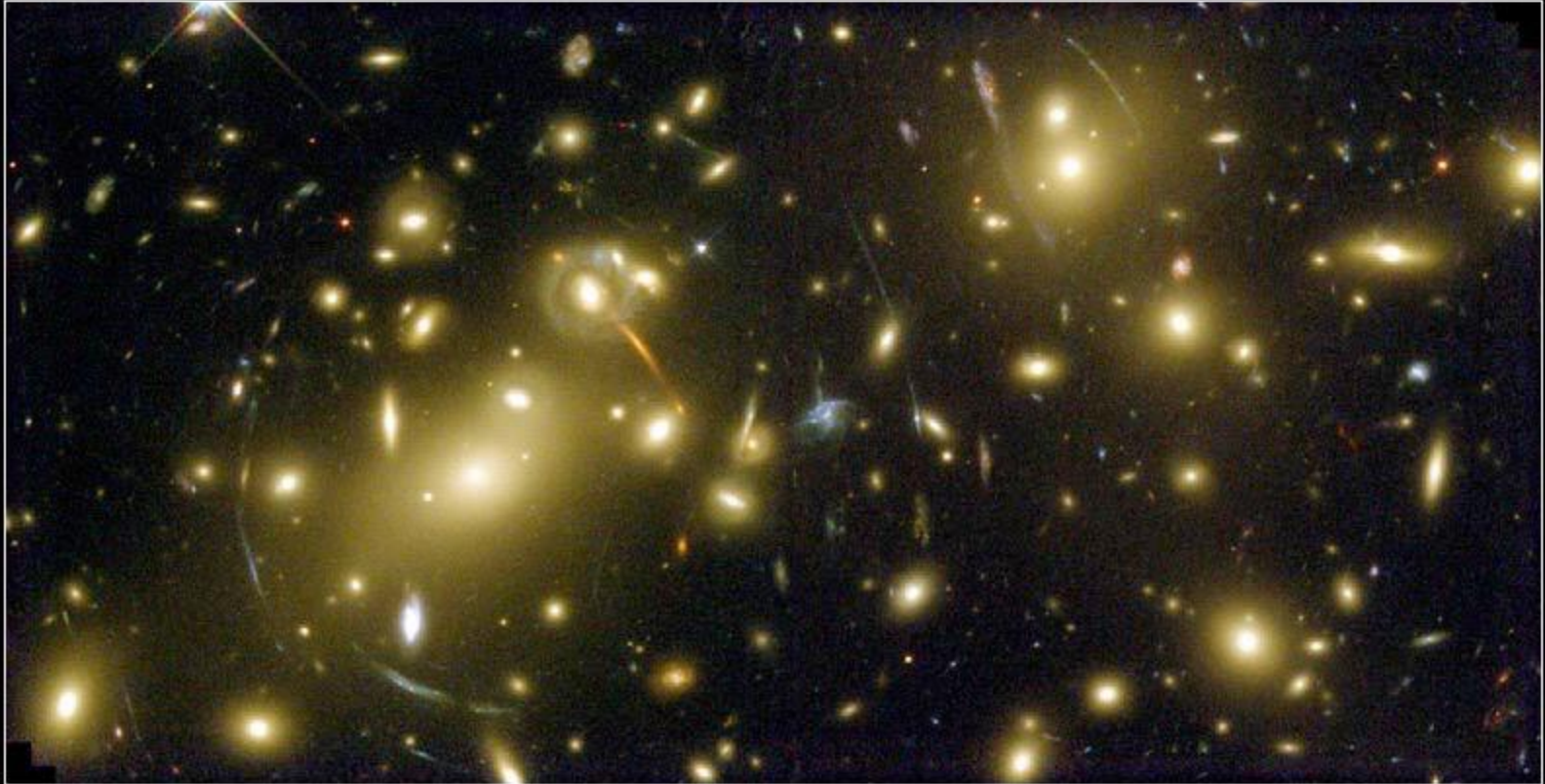
HE 1104-1805

$z=2.32$



3.2 secondes d'arc

# Lentilles gravitationnelles



**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

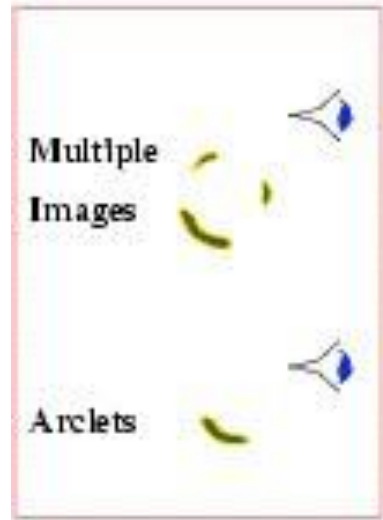
# Lentilles gravitationnelles

Observer

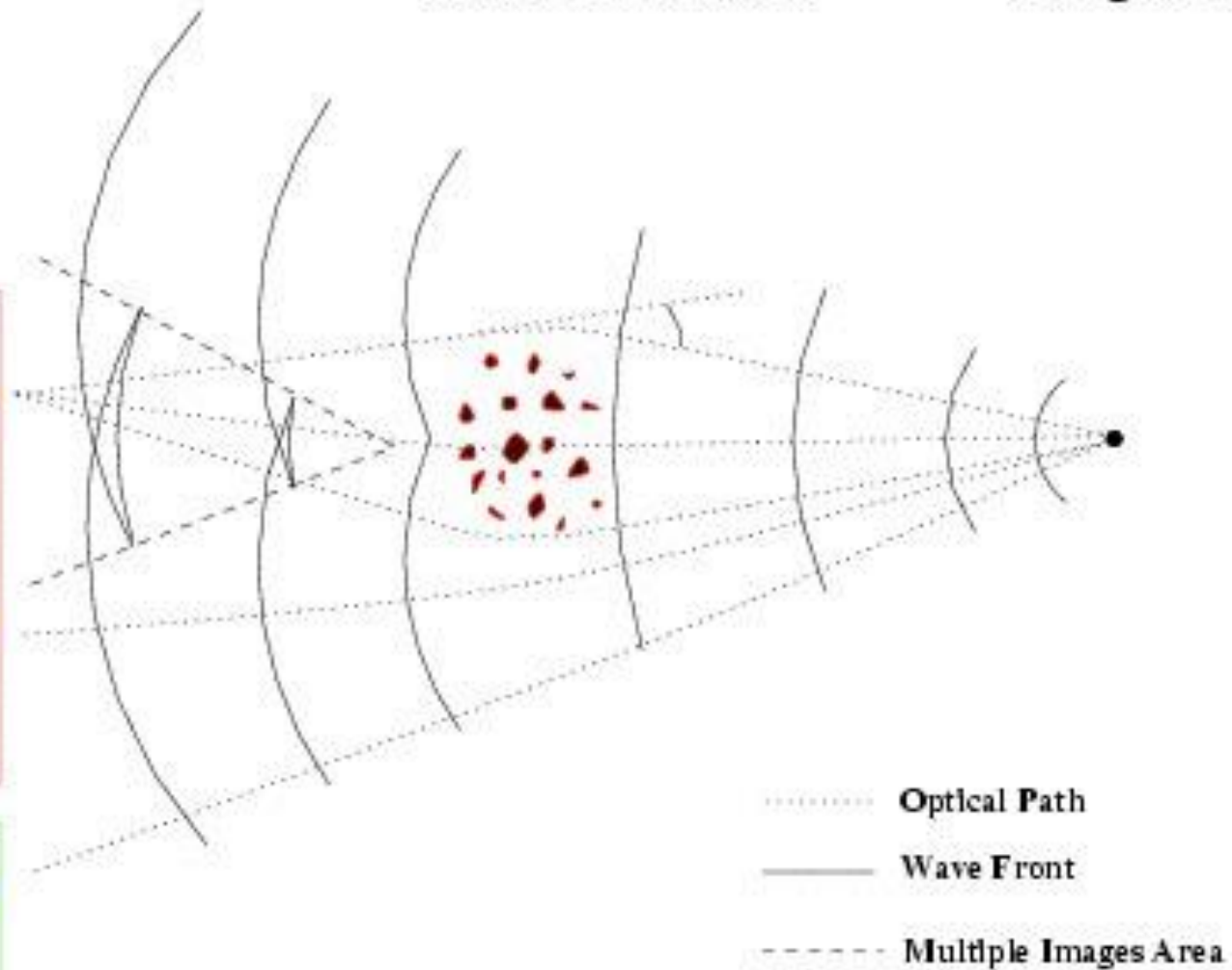
Cluster of Galaxies

Background Galaxy

**Non-Linear**



**Linear**





## Encore la « matière noire »!

- On a déjà vu qu'il fallait de la « matière noire », une masse supplémentaire pour faire tourner les galaxies.
- Les lentilles gravitationnelles ne s'expliquent que si la masse en cause est beaucoup plus importante qu'une masse de galaxies: là encore la « matière noire » ou « masse noire » est nécessaire pour expliquer ce que l'on observe.

# La couleur des galaxies

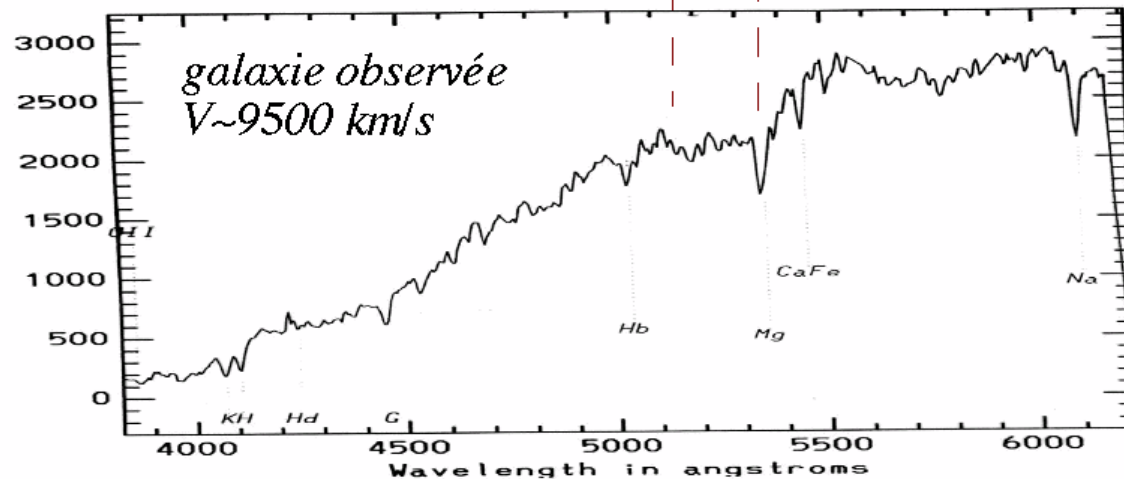
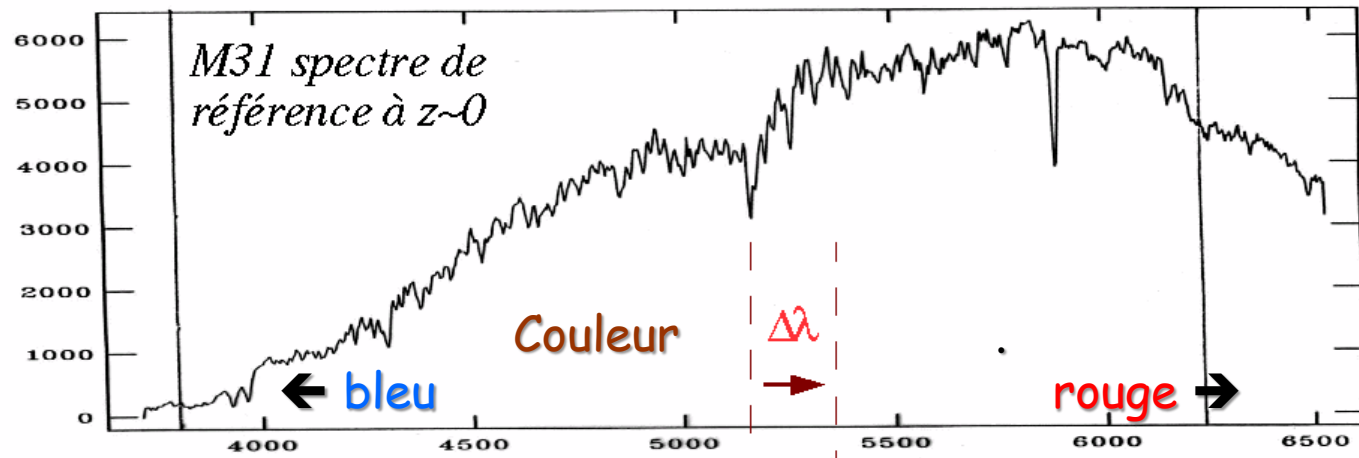
Les galaxies nous fuient d'autant plus vite qu'elles sont loin de nous; elles « rougissent », nous indiquant ainsi leur distance

Cela nous donne une nouvelle représentation de l'univers:  
il est en expansion!

# La fuite des galaxies et l'expansion de l'univers

La mesure du redshift

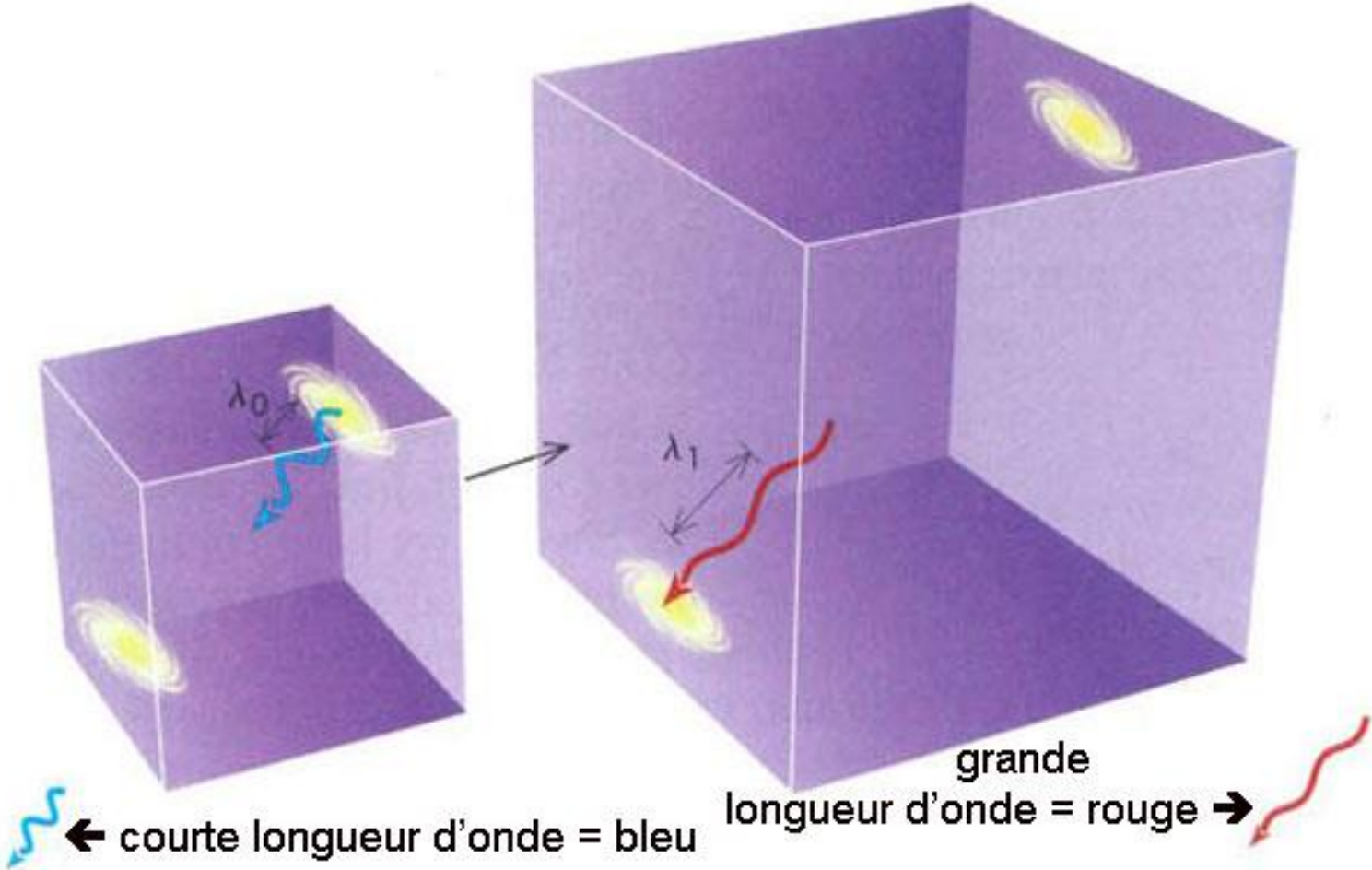
$$z = V/c = \Delta\lambda/\lambda$$





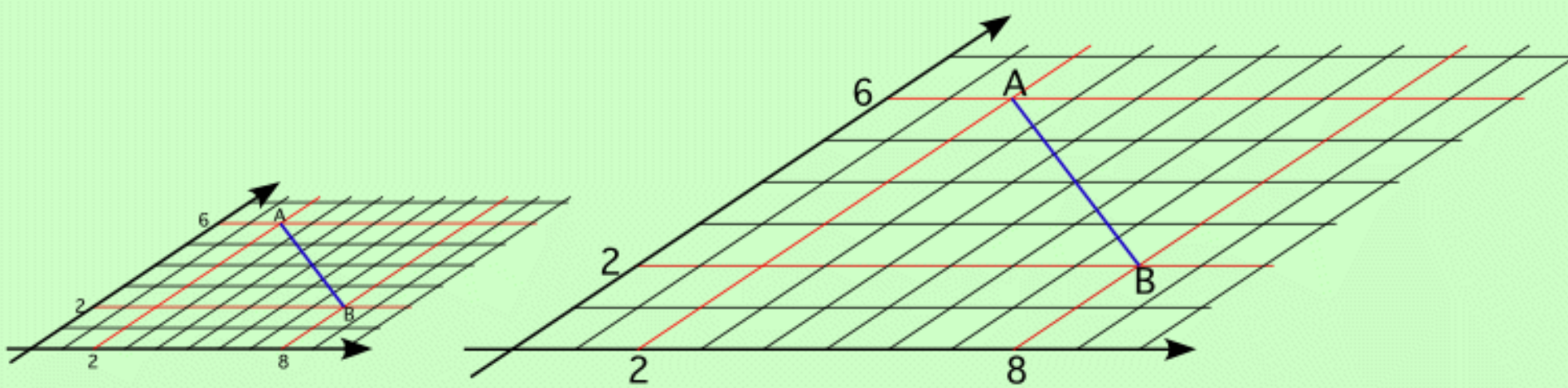
# Pourquoi ce décalage vers le rouge?

- Parce que l'univers est en expansion
- Tout s'étire, les longueurs d'onde et le temps se dilatent
- Ce n'est pas un effet « Doppler »
  
- On l'observe grâce aux phénomènes limités dans le temps:
  - Les supernovae ont toutes la même durée de vie
  - Les supernovae lointaines durent plus longtemps!



← courte longueur d'onde = bleu

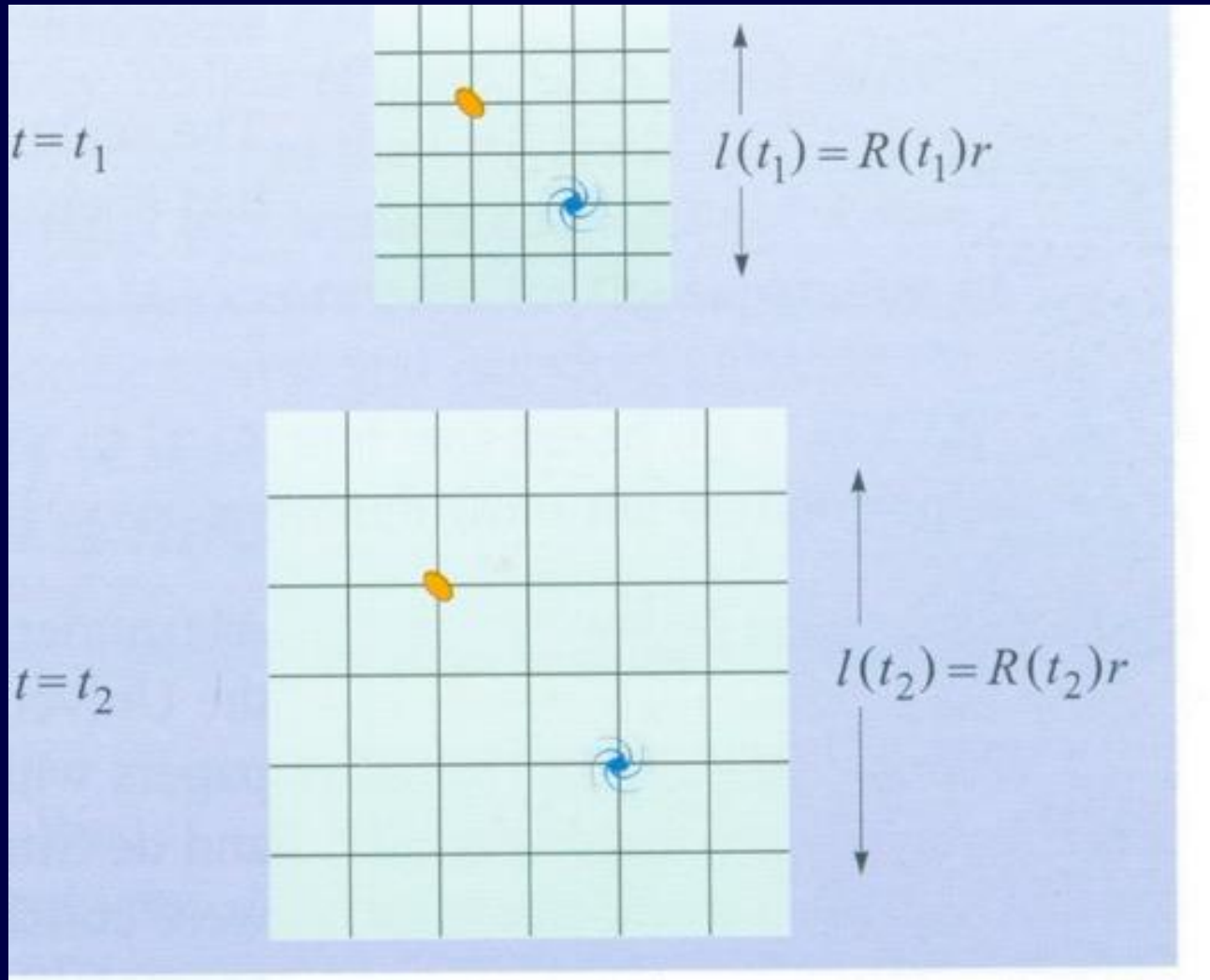
grande longueur d'onde = rouge →



- Supposons que l'espace entre les galaxies soit quadrillé, et que le quadrillage s'écarte avec l'expansion. Le schéma montre les coordonnées comobiles d'une partie de l'Univers à deux instants différents.
- A gauche, l'Univers est encore contracté ; les points A et B, qui représentent deux galaxies, ont les coordonnées (2, 6) et (8, 2). La distance entre A et B est de 7,2 unités (théorème de Pythagore).
- Plus tard, à droite, les distances dans l'Univers ont doublé. Mais la grille de coordonnées a aussi doublé, et les points A et B sont toujours en (2, 6) et (8, 2). Le calcul de la distance entre A et B donne toujours 7,2 en unités comobiles.
- Ainsi, la distance comobile entre les deux galaxies, **mesurée sur ce quadrillage**, ne change pas ! Les deux galaxies sont au repos dans leur système de coordonnées, c'est l'espace-temps qui s'agrandit entre elles.



# Coordonnées co-mobiles



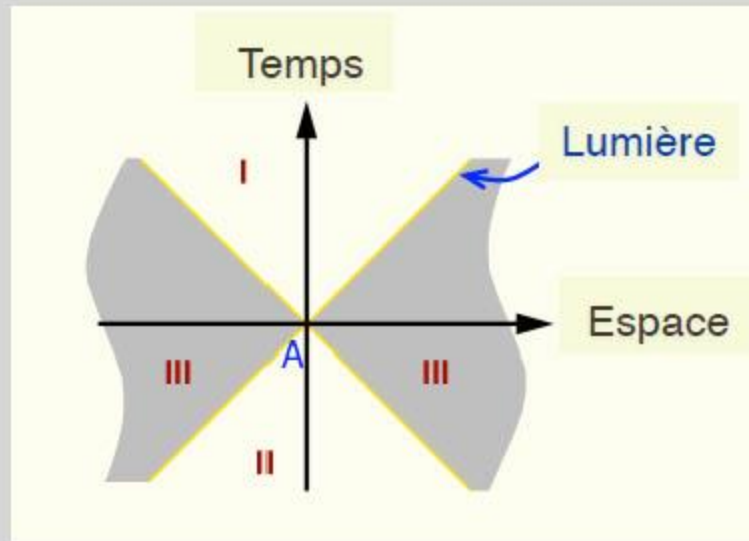
Expansion décrite par le facteur  $R(t)$

# L'espace-temps

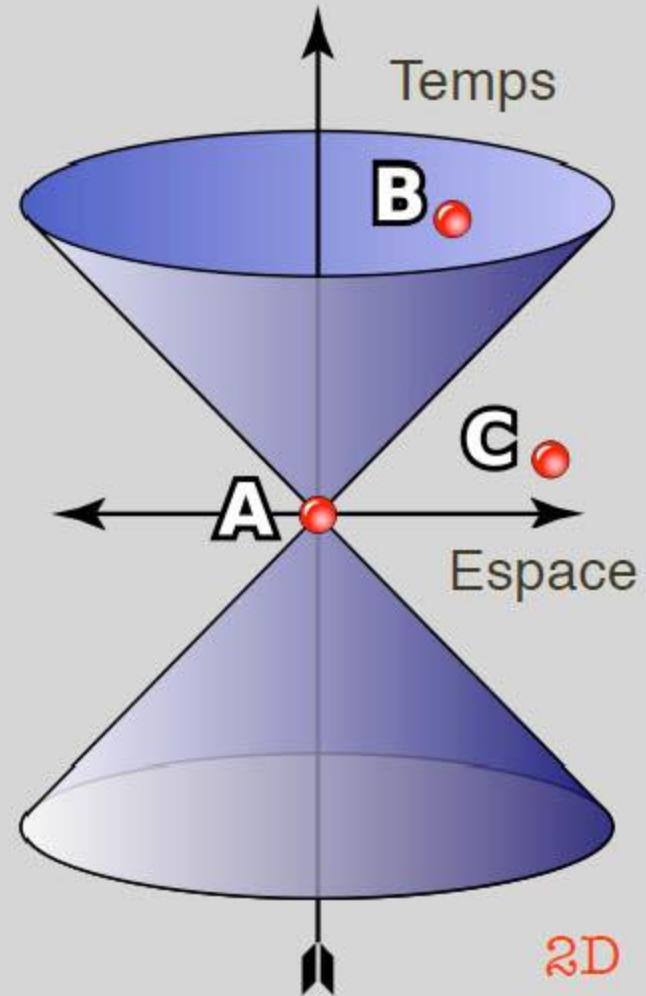
intervalle  
invariant

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$$

1D

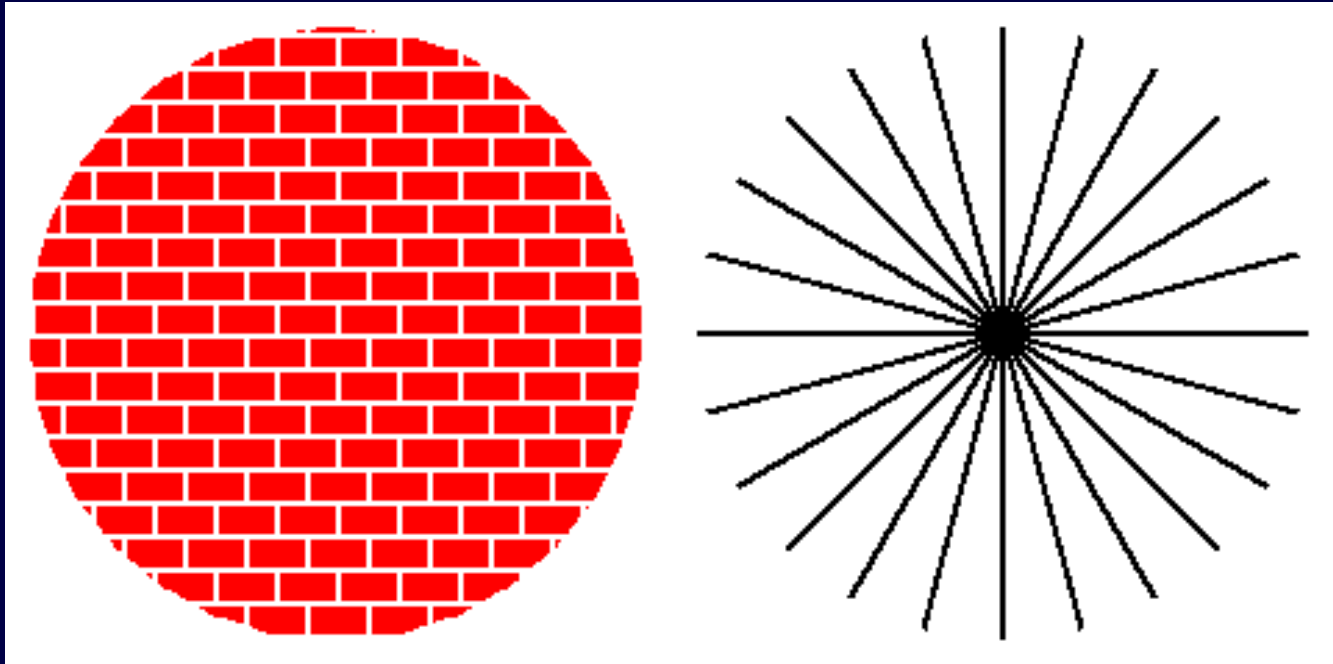


Minkowski (1908)



2D

# Isotropie et homogénéité



Isotropie = invariance par rotation (identique dans toutes les directions)

Homogénéité = invariance par translation (espace)

L'univers est isotrope et homogène aux grandes échelles (pas aux petites i.e. voie lactée)



# L'expansion de l'univers

Les galaxies ne s'éloignent pas les unes des autres, c'est l'univers qui gonfle mais remplit toujours TOUT l'espace!

Ainsi leur vitesse de fuite pourra atteindre 3,3 fois la vitesse de la lumière! Mais alors on ne les verra plus! Et le ciel sera encore plus noir...



Si l'univers gonfle, comment était-il il y a très très longtemps (plus de 14 milliards d'années dans le passé)?

# Un univers très vaste...

	km	temps de lumière
Lune	400 000	1 seconde
Soleil	150 millions	8 minutes
Jupiter	700 millions	40 minutes
Pluton	6 milliards	4 heures
Alpha du Centaure	40 000 milliards	4 années
Centre galactique	400 millions de milliards	35 000 années
Galaxie d'Andromède	12 milliards de milliards	1 million d'années
Galaxie très éloignée	120 000 milliards de milliards	10 milliards d'années
Horizon cosmologique	168 000 milliards de milliards	14 milliards d'années

Pourquoi ne voit-on plus rien au-delà de l'horizon cosmologique?

# La cosmologie moderne (1920 - ...)

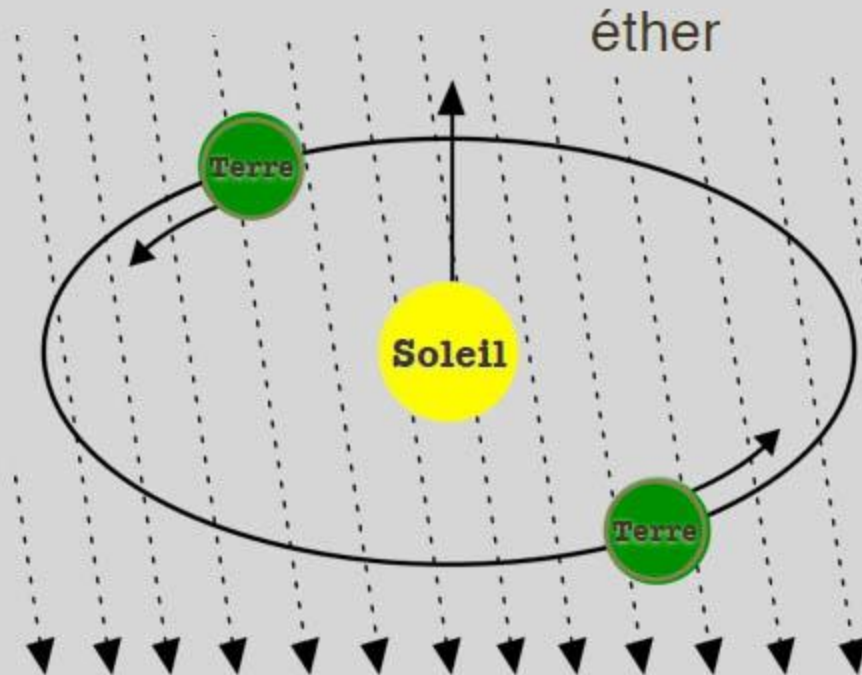
- L'univers est observé dans son ensemble
- Le contenant et le contenu sont liés
- Tout débute avec Einstein
  - Le principe d'équivalence (masse gravifique=masse inertielle)
  - La courbure de l'univers (masse=courbure locale de l'espace)



# Qu'est-ce que le vide?

- *Les particules sont les sources du champ et les champs agissent sur les particules :*
- *les champs sont les médiateurs des interactions entre particules*
- Maxwell: électricité et magnétisme sont les manifestations de l'interaction EM
- Vitesse des ondes EM : vitesse de la lumière ! La lumière est donc une onde EM
- Oui, mais vitesse par rapport à quoi?
- Support mécanique (ondes sonores: air/eau) : éther?

# Qu'est-ce que le vide?

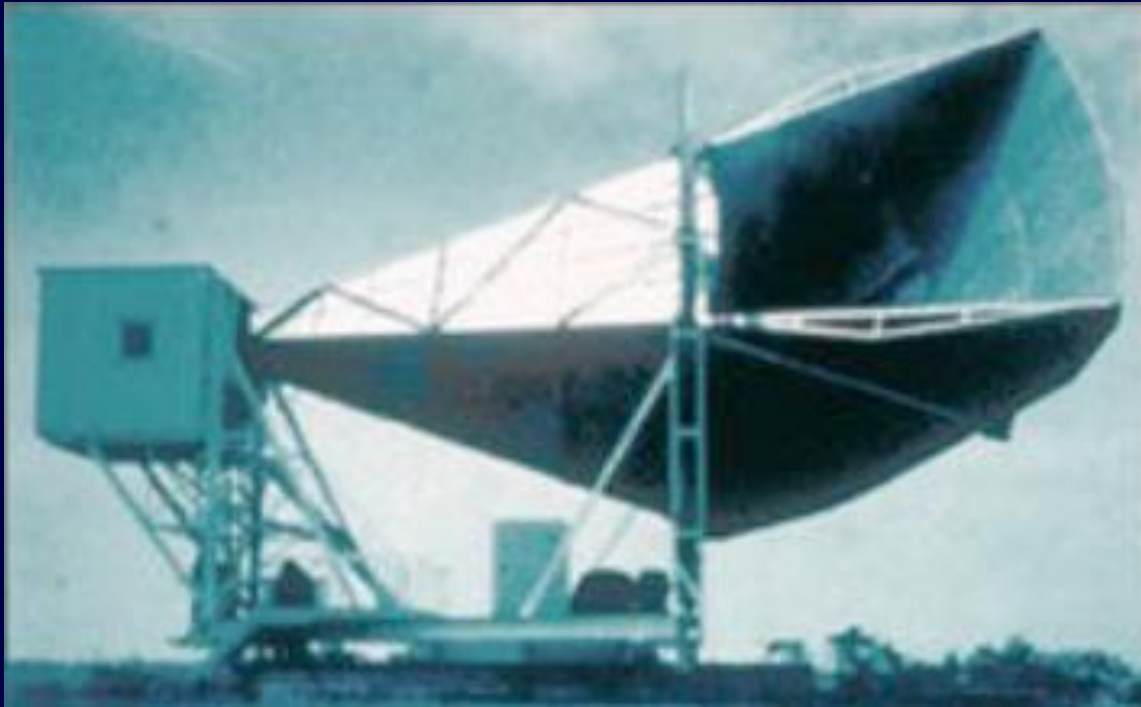


Michelson & Morley (1881-1887) :  
Il est impossible de mesurer la vitesse de la Terre  
par rapport à l'éther !!

*Explication: le laboratoire en chute libre (qui suit sa géodésique de l'espace-temps) d'Einstein*

# Remontons l'expansion de l'univers à l'envers!

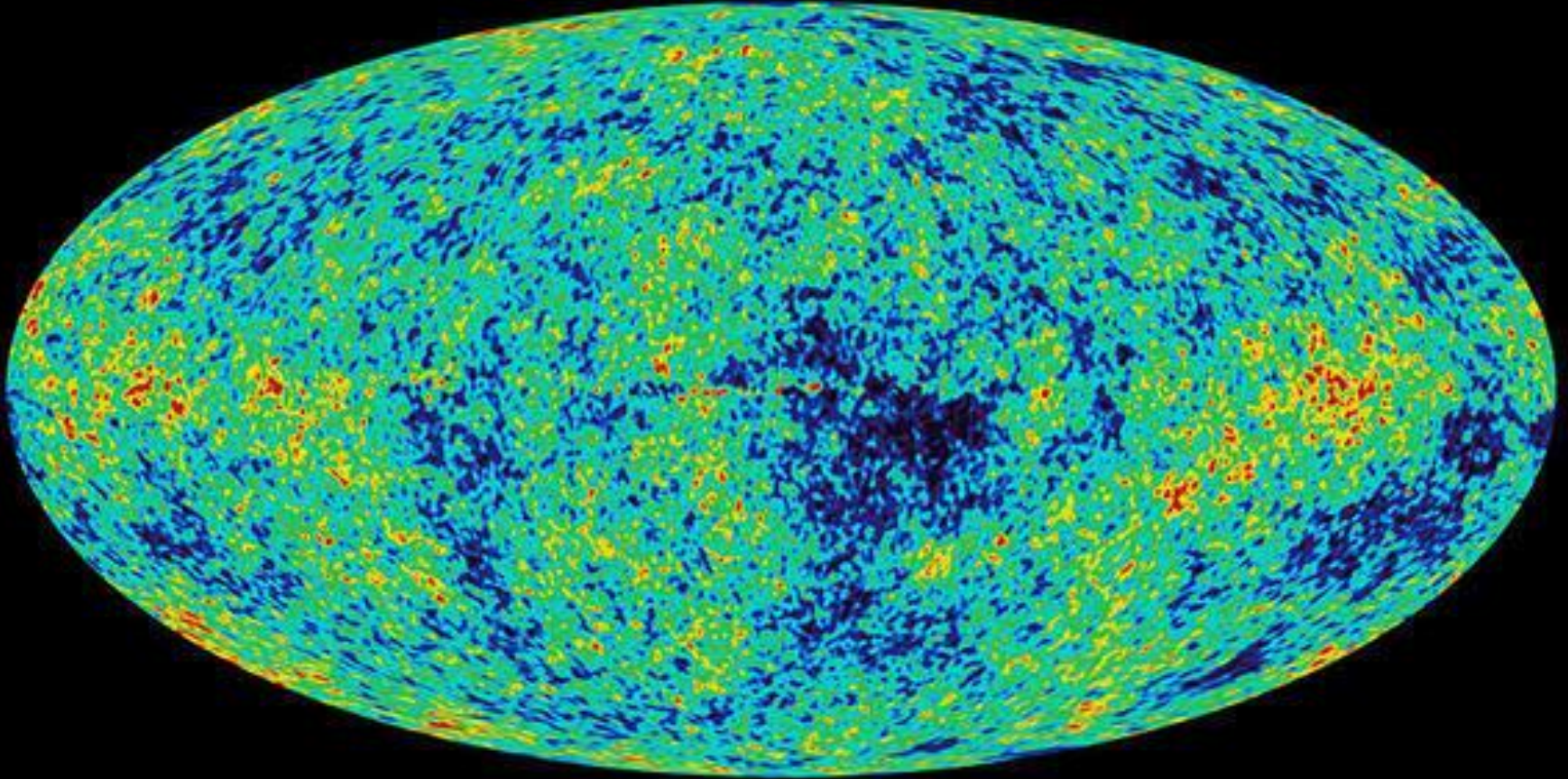
- Toutes les galaxies et les étoiles se retrouvent en un point
- La température est très élevée et donc l'univers est très brillant
- Pourquoi ne voit-on pas ce point brillant à l'horizon? Puisque la vitesse finie de la lumière nous oblige à voir dans le passé?
- En fait, on le voit, mais pas comme on croyait... il a « rougi » et on le voit de tous côtés!



- En 1965, Penzias et Wilson découvre le rayonnement radio diffus du fond cosmologique en réglant des antennes de télécommunication
- C'est le reste de la naissance de l'univers!



# L'extrémité et le début de l'univers?



- Au plus loin observable, l'univers devient opaque: c'est le fond diffus cosmologique. Comment l'expliquer?
- Nous voyons le passé: la jeunesse de l'univers, sa naissance? Mais comment?

# Le fond cosmologique

- Dans le cadre de la théorie du big-bang, l'Univers est en expansion et se refroidit. Il est passé dans le passé par des phases plus chaudes, et a connu diverses étapes, correspondant à des ruptures d'équilibre.
- Pour des température de plus 3000 K, la matière et le rayonnement était à l'équilibre, suite à l'interaction entre les électrons, libres, et les photons. Aux températures plus faibles, la recombinaison des électrons avec les protons pour former l'hydrogène atomique a occasionné le découplage de la matière et du rayonnement.
- Ce dernier garde une distribution énergétique de corps noir, mais s'est refroidi suite à l'expansion de l'univers. Il présente aujourd'hui une température, très homogène, de 2.728 K.



# Big Bang



transparence

opacité

15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

1 second

$10^{-10}$  seconds

$10^{-34}$  seconds

$10^{-43}$  seconds

$10^{32}$  degrees

$10^{27}$  degrees

$10^{15}$  degrees

$10^{10}$  degrees

$10^9$  degrees

6000 degrees

18 degrees

3 degrees K

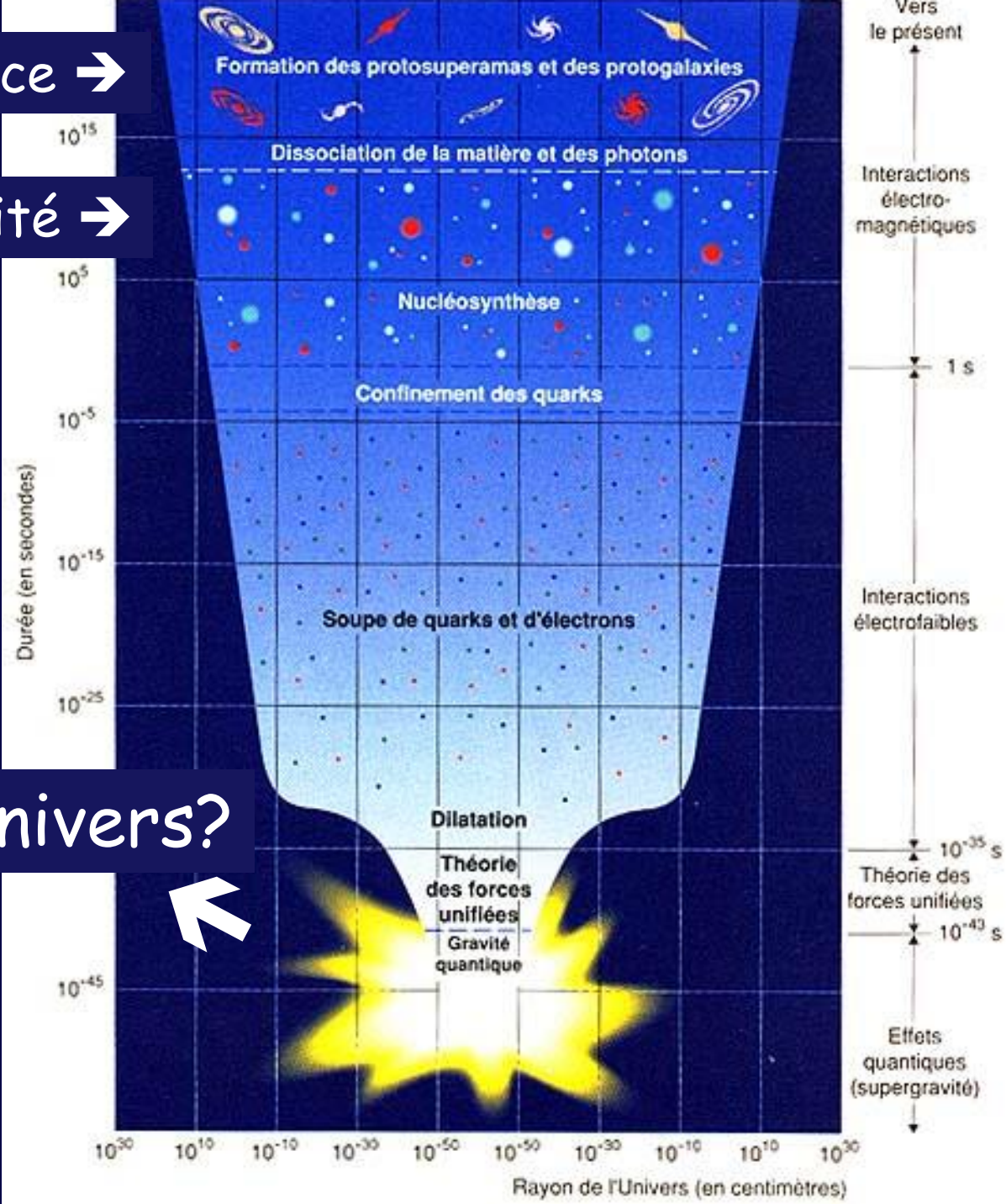
En remontant l'expansion de l'univers...



Transparence →

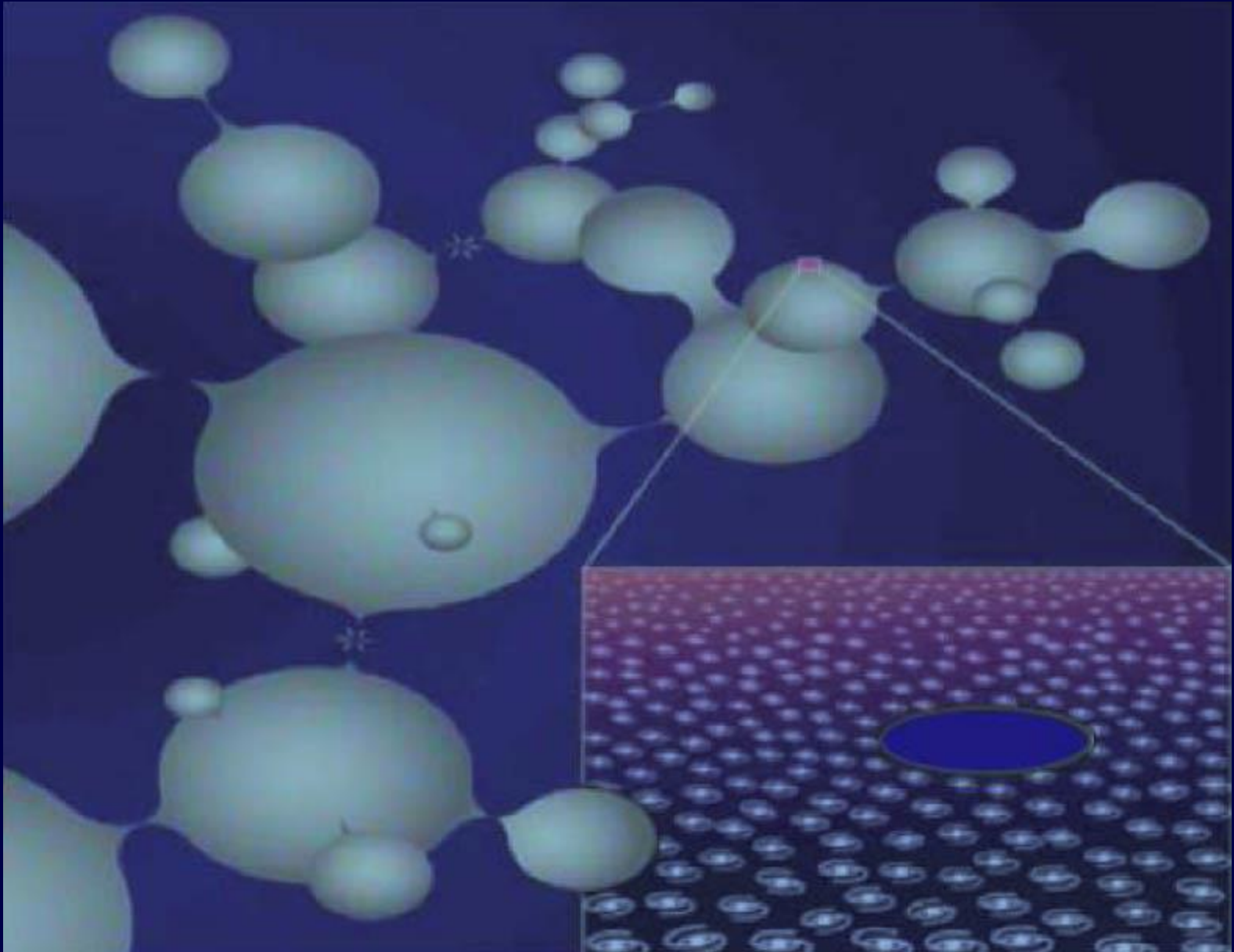
Opacité →

Autres univers? ←





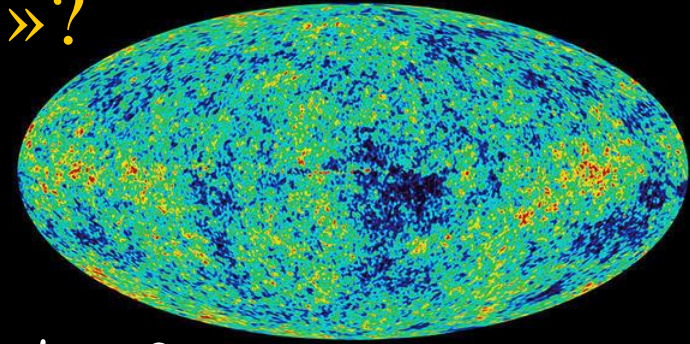
# Après l'univers, le multivers?



# Que peut-on déduire sur l'univers?

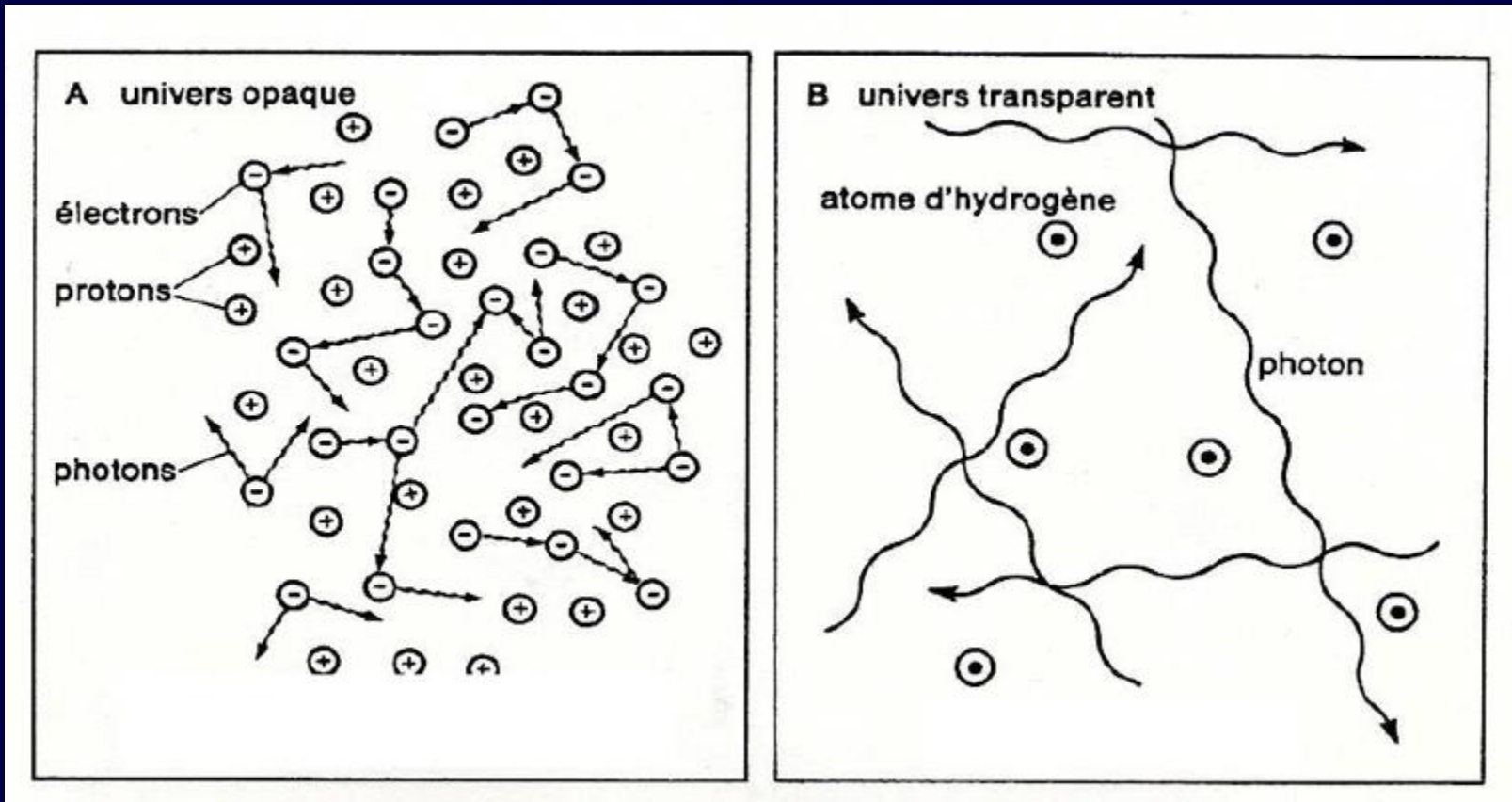
- L'univers est « courbe ». Comme une sphère, il est fini mais illimité.
- Tout ce qu'on observe est situé dans le passé. Si on ne voit pas plus loin qu'à 15 milliards d'années lumière, l'univers est bien plus grand.
- Si l'univers ne semble exister que depuis 14 milliards d'années, y a-t-il eu un instant « zéro » de « création » de l'univers? Et comment?

# Qu'y a-t-il et que s'est-il passé derrière le « fond diffus cosmologique »?



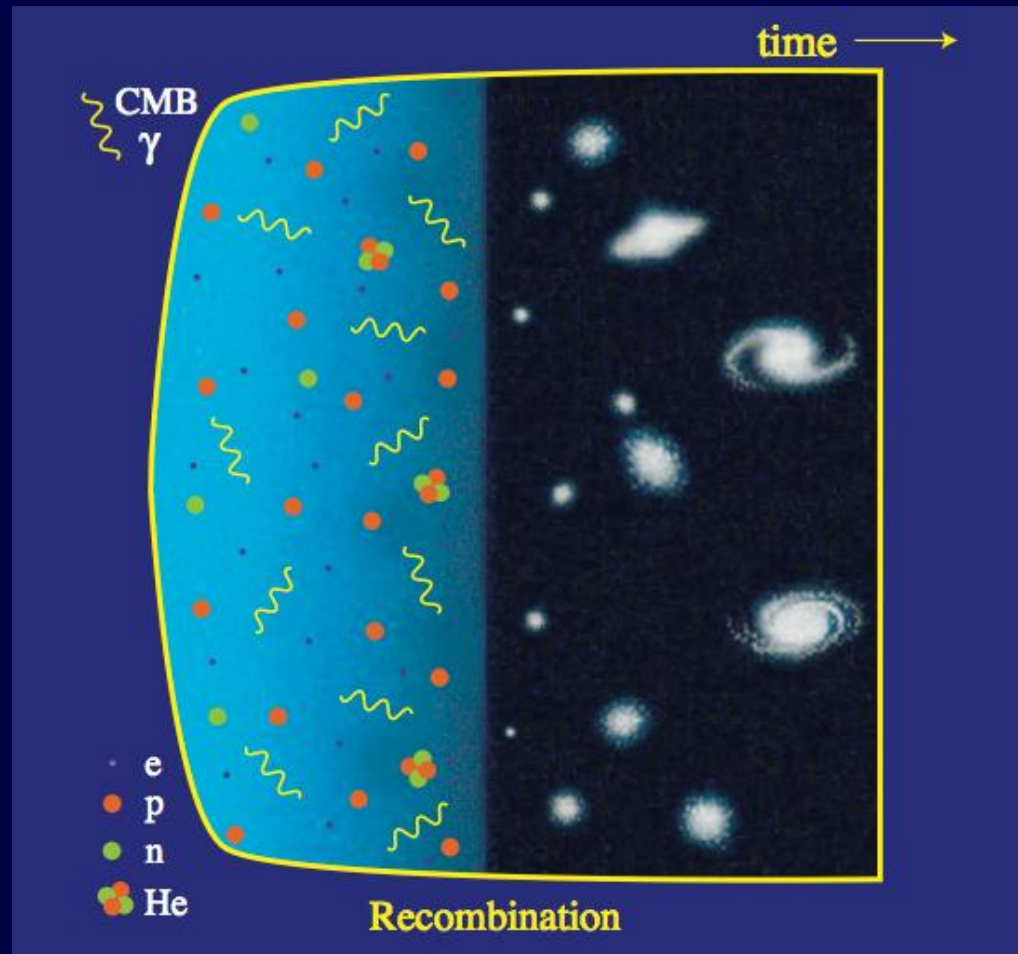
- Remonter dans le passé
- L'horizon cosmologique: qu'est-ce que c'est?
- Il nous faut trouver une histoire de la jeunesse de l'univers compatible avec ce que nous observons aujourd'hui
- Pourquoi l'univers est-il opaque au-delà d'une distance de 15 milliards d'années lumière? C'est parce que la matière n'a pas encore la forme qu'on lui connaît aujourd'hui. Elle est semblable au cœur du Soleil et la lumière ne peut la traverser.

# Univers opaque puis transparent





# Univers opaque puis transparent

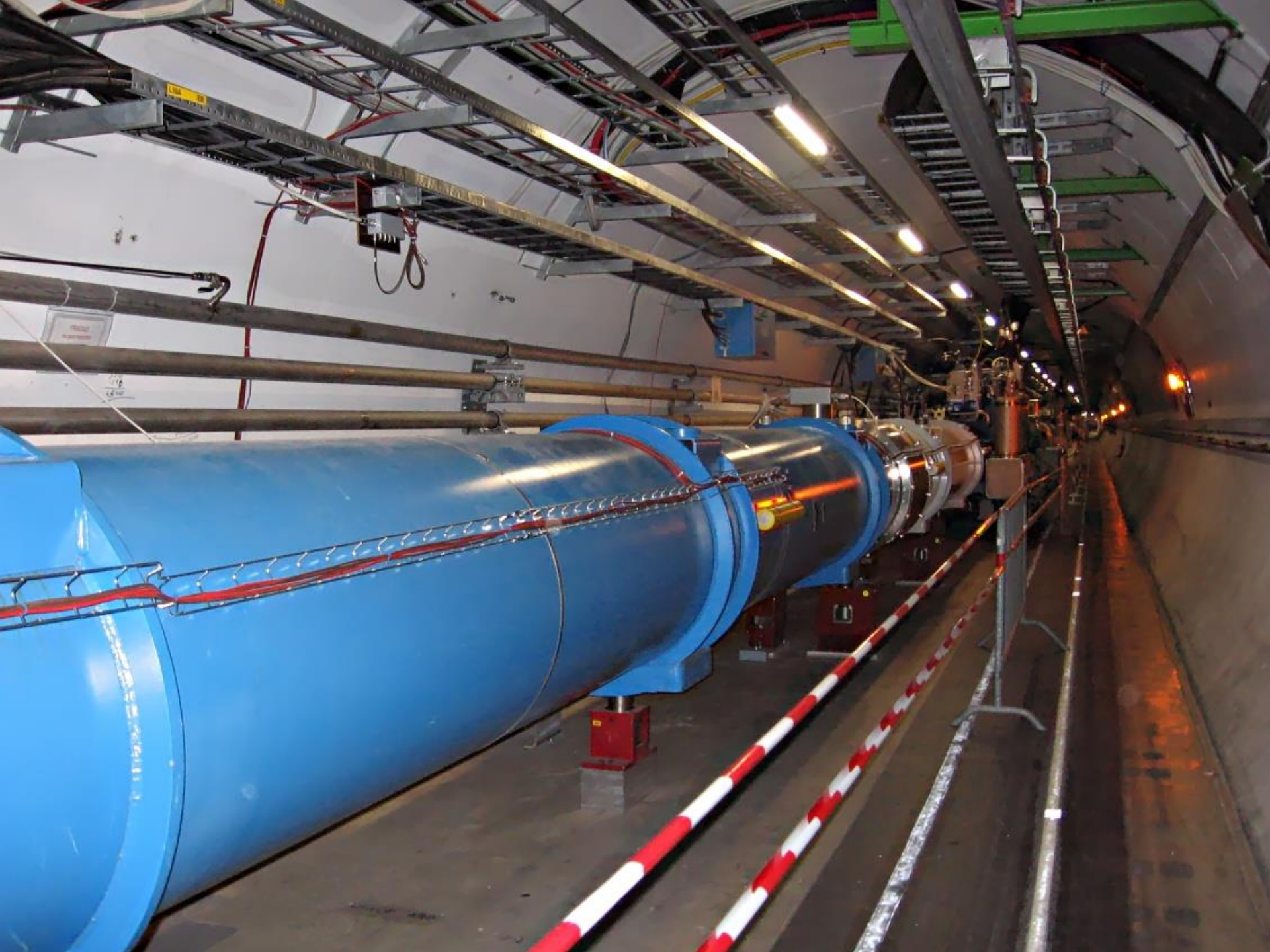


# Reconstituons la naissance de l'univers

- On utilise pour cela les accélérateurs de particules qui vont casser la matière pour fabriquer ce que l'on voit dans notre lointain passé









# Vérifions le principe d'Einstein: masse=énergie ( $E=mc^2$ )

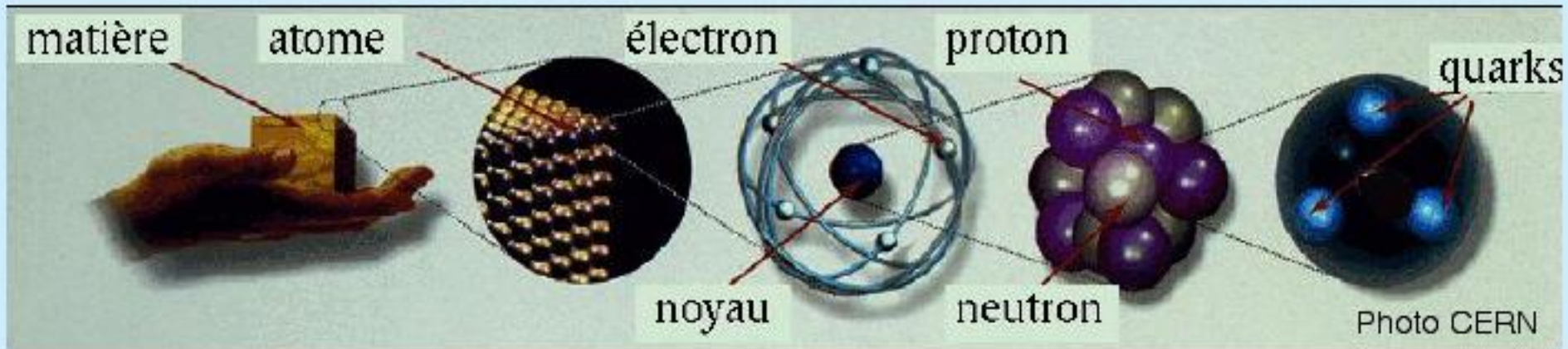




- Si les réacteurs nucléaires transforment la masse en énergie, comment transformer l'énergie en masse, comme cela semble s'être produit à la naissance de l'univers?



# Qu'est-ce que la matière ?



nombre de protons du noyau = nombre d'électrons de l'atome  
caractérise l'élément chimique

un élément peut avoir plusieurs isotopes qui diffèrent  
par le nombre de neutrons de leur noyau

Et qu'est-ce que l'énergie?

Réaction nucléaire: masse  $\rightarrow$  énergie

Spontanément, dans les accélérateurs de particules:

énergie  $\rightarrow$  masse

Est-ce cela le « big bang »? Une transformation d'énergie en masse?









Oui, mais ce n'est pas si simple car  
énergie  $\rightarrow$  matière + anti-matière

Et

matière + anti-matière  $\rightarrow$  énergie

Qu'est-ce que l'anti-matière?

# L'antimatière

électron	$e^-$				$e^+$ positron
proton	$p^+$				$\bar{p}$ antiproton
neutron	$n$				$\bar{n}$ antineutron
photon	$\gamma$				$\gamma$ photon

même masse  
même durée de vie  
charge opposée  
etc.



# Comment fabriquer de l'antimatière ?

À partir de l'« énergie », en même temps que la matière

## Matérialisation

$$\left[ \begin{array}{l} E = M c^2 \\ \text{Collision} \rightarrow \text{énergie} \rightarrow \text{matière} + \text{antimatière} \end{array} \right.$$

La masse du proton = 2000 fois la masse de l'électron

→ → énergie 2000 fois plus grande pour créer  $p + \bar{p}$   
que pour créer  $e^- + e^+$

# L'énergie peut donc se transformer en masse!

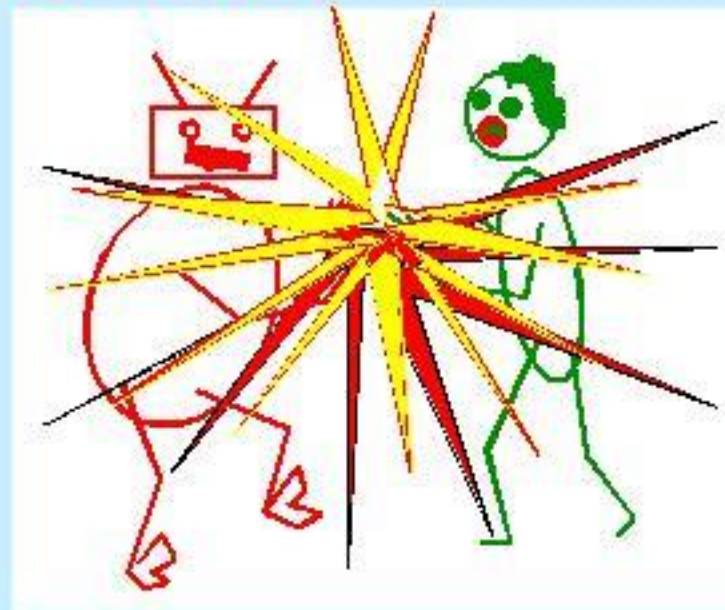
- L'univers a-t-il été créé par la transformation brutale d'énergie en matière?
- Cela correspondrait à ce que l'on voit dans notre passé: les restes de ce « big bang »
- Mais alors, où est passée l'anti matière?

# Et si un extra-terrestre venait...

Il veut atterrir, nous serrer la main, boire du champagne...  
Que répondre ?

Malgré sa gentillesse apparente, ne pas l'inviter sans  
vérifier qu'il ne vient pas d'un monde d'antimatière !

Car sinon :



# Où est passée l'anti matière?

- Chaque rencontre de matière et d'anti matière doit se terminer par l'annihilation des deux qui se retrouve.
- L'univers aurait dû disparaître juste après son apparition!

MAIS:

Pendant leur vie chacune de leur côté, matière et anti matière ne subissent pas les mêmes lois physiques et le photon n'a pas d' « anti photon ».

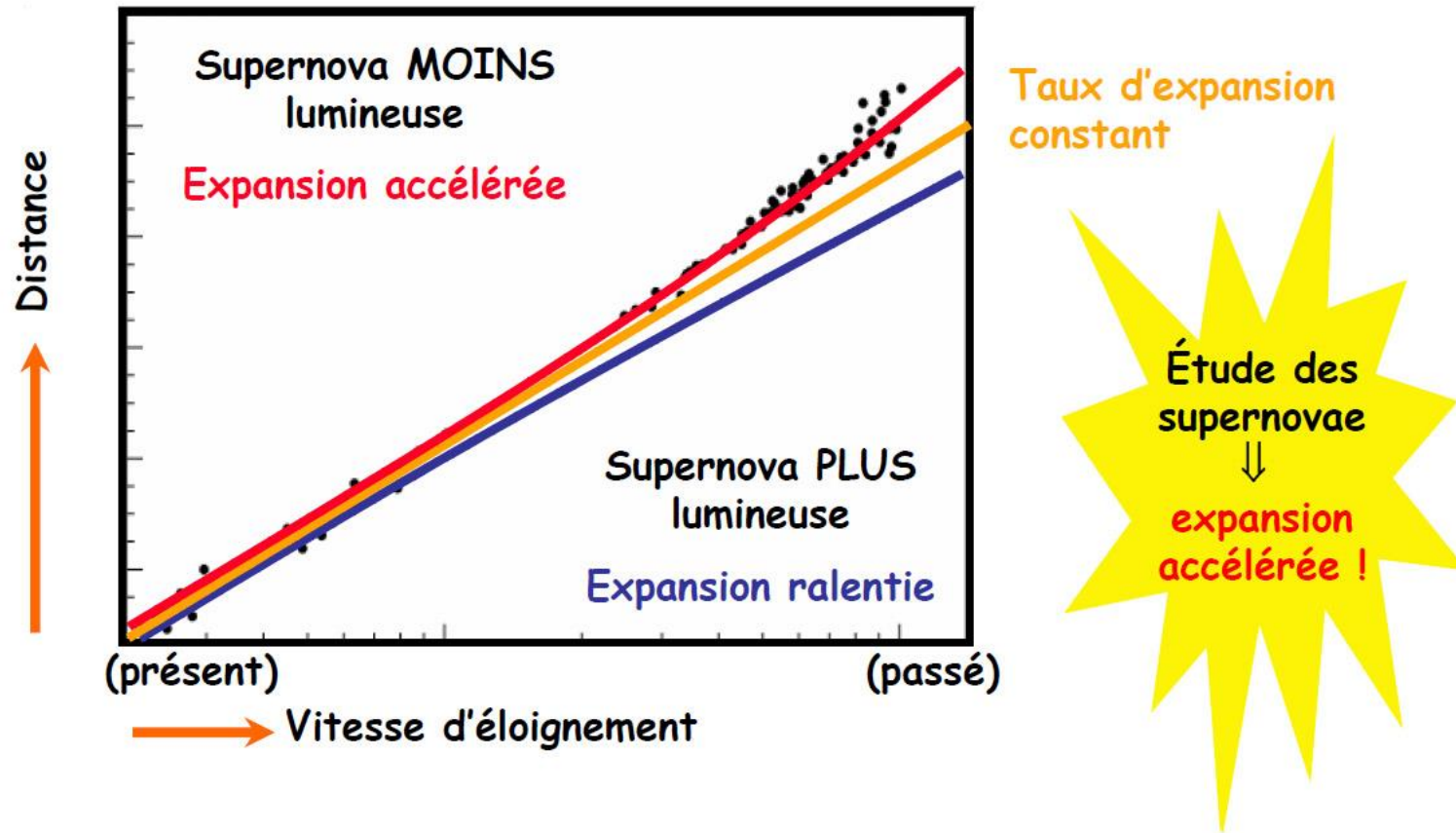
Si bien qu'en fin de compte, il reste un tout petit peu plus de matière que d'anti matière.



# Ya t il eu un instant « zéro »?

- Non, parce que le temps n'existait pas à l'époque!
- *Le temps est une des 4 dimensions de notre univers*
- Donc pas de début bien que l'univers n'existe pas depuis toujours... Il n'a que 14 milliards d'années!
- *(qu'y-a-t-il au-delà du pôle nord???)*

# Revenons à l'expansion de l'univers



- Non seulement l'espace est en expansion (notre univers grandit... ) mais en plus, cette expansion s'accélère!

# Des règles intangibles

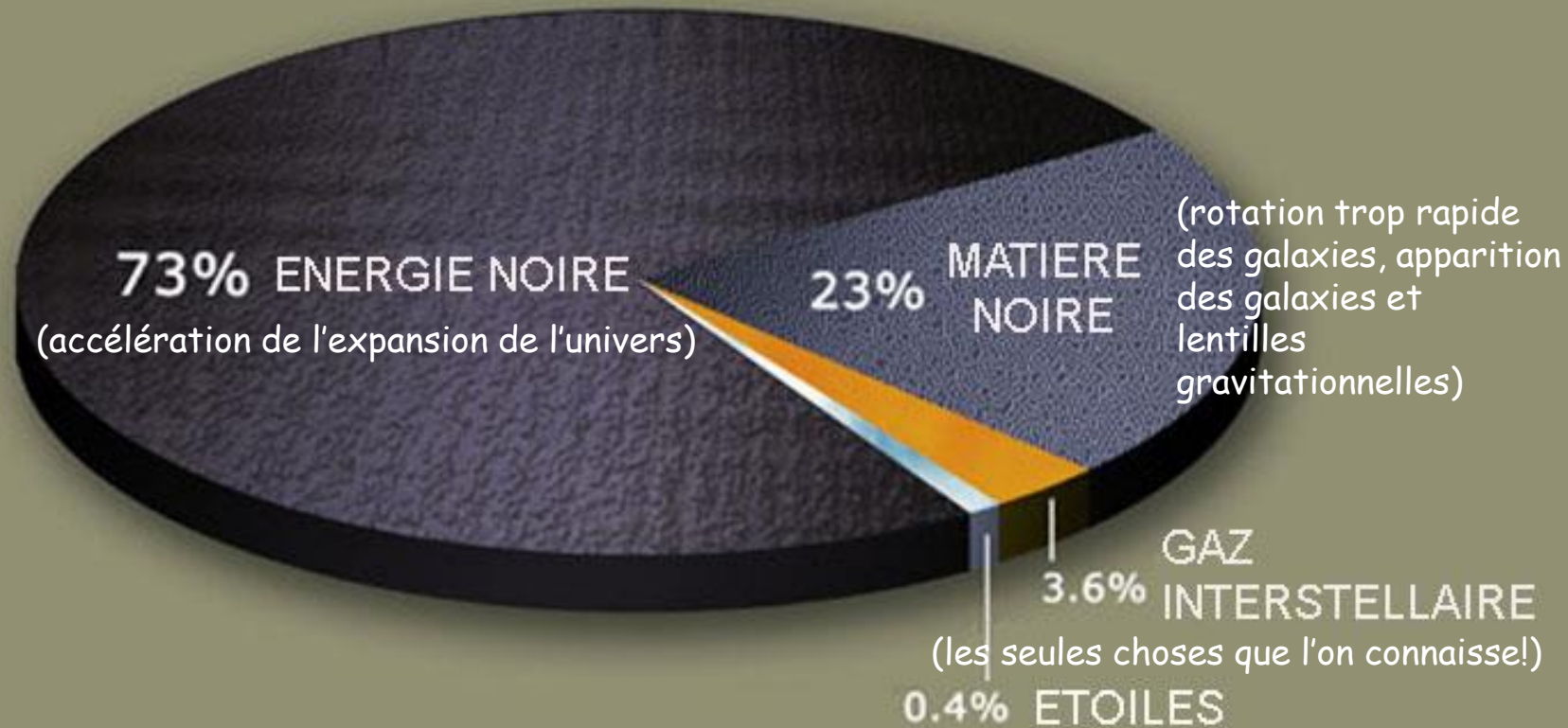
Qu'est-ce qui cause l'accélération de l'expansion ?

→ une énergie inconnue que l'on appellera l'énergie noire, sombre ou fantôme ... ???

- Que va-t-il se passer si l'expansion accélère?
  - Vitesse apparente des galaxies  $> c$  → univers inobservable!
  - L'expansion du système solaire ?
  - La fin de la gravité ?
  - L'éclatement de l'univers (big rip) ?

# Alors, de quoi est fait l'univers?

- L'univers est fait, à 96%, de choses dont on n'a même pas idée!





## Au final:

- L'univers est en expansion **ENTRE LES GALAXIES** où il faut inventer une « énergie noire » inconnue et jamais observée si ce n'est par son effet pour expliquer cette expansion.
- Les galaxies doivent avoir une masse bien plus grande **AU SEIN D'ELLES-MEMES** pour expliquer leur existence, et il faut inventer une « matière noire » inconnue et jamais observée si ce n'est par son effet sur la vie des galaxies.

# Et la taille de l'univers?

- On ne mesure les distances que pour les objets que l'on voit...
- L'horizon est à 14 milliards d'années lumière
- Et pendant que la lumière voyageait jusqu'à nous, l'univers a évolué, il s'est agrandi... Rappelons-nous les zones qui nous sont interdites dans l'univers...
- La taille de l'univers? De 50 milliards d'année lumière à...?
- Mais si l'univers a « une taille », il n'a pas de frontière! Il remplit tout l'espace...

# Conclusion

- La quête n'est pas finie: la taille de l'univers est encore incertaine, comme son évolution,... et son apparition!
- Un modèle théorique d'univers est nécessaire et doit être vérifié par les observations:
  - Aristote
  - Ptolémée
  - Newton et l'héliocentrisme
  - La relativité générale
  - L'expansion de l'univers et le « big bang »
- L'augmentation de la précision des mesures remet en cause les modèles admis qui ne sont que des représentations pour notre compréhension.

→ l'univers n'est pas éternel mais n'a ni début, ni fin...

→ l'univers n'est pas infini mais n'a pas de limites

→ l'univers enfle mais remplit toujours tout l'espace

→ nous n'aurons jamais que des représentations imparfaites de l'univers