MESURE DE LA CONSTANTE DE HUBBLE

TENSIONS DANS LE COSMOS

PREMIÈRE PARTIE

INTRODUCTION

- Actuellement ce problème d’incompatibilité entre les valeurs de H_0 déduites des mesures par des méthodes s’appuyant sur des observations à z >>1, celle du rayonnement de fond cosmologique RFC, ou CMB pour Cosmological Microwave Backgroung, en anglais, donnent une valeur de H_0 d’environ 67,27 ±0,6 km/s/Mpc .
- Celles de nombreuses méthodes s’appuyant sur des observations à z < 1 (SN1A, Céphéïdes, etc..) donnent une valeur de H_0 d’environ 73,52 ±1,62 km/s/Mpc, ce qui semble ébranler le modèle cosmologique standard.

INTRODUCTION

- On a mis en doute la précision des observations, mais comme ces valeurs s'écartent de plus de 4 σ de leur diagramme probabiliste, cette hypothèse est de moins en moins crédible.
- Pour l'instant, on est dans l'expectative, redoutant pour certains et espérant pour d'autres, une remise en cause du modèle standard, allant au-delà des rustines habituelles, voire de la théorie de la relativité générale, elle-même. Ce que prédit physiquement une théorie dépend des paramètres qu'on lui associe et des hypothèses que l'on fait.

INTRODUCTION

- Rappelons que les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie de l'univers sont des approximations drastiques qui même à grande échelle (la matière est regroupée dans des structures filamenteuse avec de gigantesques vides) sont loin d'être vraiment satisfaites.
- Des modèles d'univers inhomogènes et anisotropes sont étudiés, sans grand résultat pour l'instant. On sait aussi que 95% de ce qui génère la dynamique de l'univers (matière noire et énergie noire) sont de nature inconnue, malgré des recherches importantes.

INTRODUCTION

- Par ailleurs le paradigme de l'inflation, s'il résout avantageusement quelques problèmes, fait tout de même figure de théorie ad hoc. Certains physiciens pensent qu'on pourra en fournir une preuve expérimentale, ce qui consoliderait l'hypothèse, mais pour l'instant une telle preuve fait défaut.
- Avec ce problème sur la constante de Hubble, cela commence à faire beaucoup pour ce modèle standard de la cosmologie. Cependant, avant de proclamer sa mise à mort, il convient d'étudier si ce ne sont pas les paramètres qui sont en défaut.

HOMOGÉNÉITÉ ET ISOTROPIE: CONSÉQUENCES

- Le principe cosmologique est une hypothèse forte qui déterminer la métrique de l’espace-temps, par exemple la métrique, de Robertson et à Walker, Si l’univers est isotrope autour d’un point, tous les observateurs équidistants de ce point doivent observer les mêmes paramètres de l’univers. Si l’univers est isotrope en tout point, tous les observateurs observent ces mêmes valeurs partout (homogénéité).
- Il existe alors dans l’espace-temps des hypersurfaces à 3 dimensions où ces propriétés locales ont la même valeur, La normale à ces hypersurfaces, du genre temps, définit le "temps cosmique" ***t***.

HOMOGÉNÉITÉ ET ISOTROPIE,

- Dire que l'Univers est homogène signifie que toutes les caractéristiques mesurables de l'univers sont les mêmes partout.
- Ceci n'est approximativement vrai, mais cela se révèle être une approximation pragmatique sur des domaines très étendus.
- Comme l'âge de l'Univers est une caractéristique observable, l'homogénéité de l'univers doit se retrouver sur une surface de temps propre constant depuis le Big bang.
- La dilatation temporelle fait que le temps propre mesuré par un observateur dépend de la vitesse de cet observateur, donc nous précisons que la variable de temps *t* de la loi de Hubble est le temps propre écoulé depuis le Big Bang pour des observateurs co-mobiles.

DISTANCE DE HUBBLE

- La loi de Hubble (**$v = H.D$**) est vraie pour toutes les valeurs de D, même très grandes qui donnent $v > c$, sous réserve d'interpréter correctement la distance D et la vitesse v.
- La distance de la loi de Hubble est définie de telle sorte que si *A* et *B* sont deux galaxies que nous voyons dans la même direction, pas trop éloignées l'une de l'autre, respectivement à une distance $D(A)$ et $D(B)$, alors la différence des distances $D(B)- D(A)$, est la distance de *A* à *B* que *A* mesurerait.

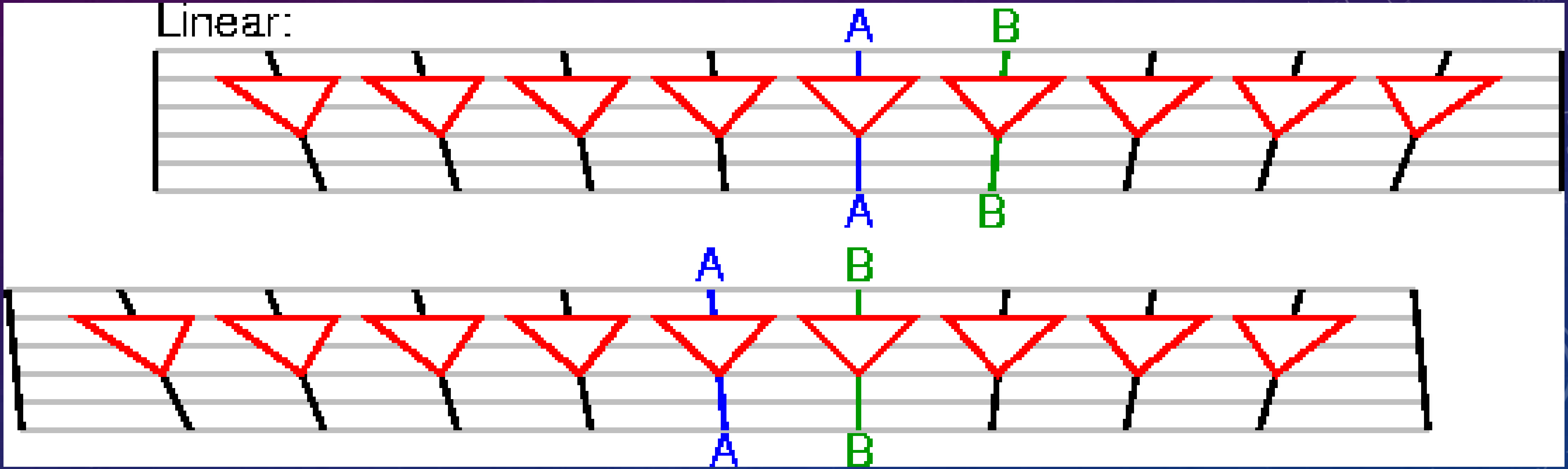
- Mais cette mesure doit être faite " maintenant", donc *A* doit faire cette mesure au même temps propre depuis le big bang que celui que nous constatons en ce moment.
- Cette distance est la distance géométrique qu'on peut calculer à partir de la métrique de Robertson Walker à temps constant : section spatiale (dt =0).
- Ceci correspondant à une géodésique de type espace, elle nécessiterait un balisage et une synchronisation, ce qui est hautement problématique (suppose une infinité d'observateurs le long de cette géodésique).

- Donc pour déterminer la distance *D* d'une galaxie *Z*, nous devons trouver une " chaîne " de galaxies *ABC...XYZ* le long du chemin vers *Z* dont chacun des éléments est proche de ses voisins et faire que chaque galaxie mesure la distance vers sa galaxie qui lui succède au même temps t_o depuis le Big Bang.
- La distance de *Z*, *D* (de nous à *Z*), est la somme de tous ces petits intervalles.: D (de nous à Z) = D (de nous à A) + D(A à B) + ... D(X à Y) + D(Y à Z).
- C'est la limite de cette somme lorsque l'intervalle entre galaxies → 0.

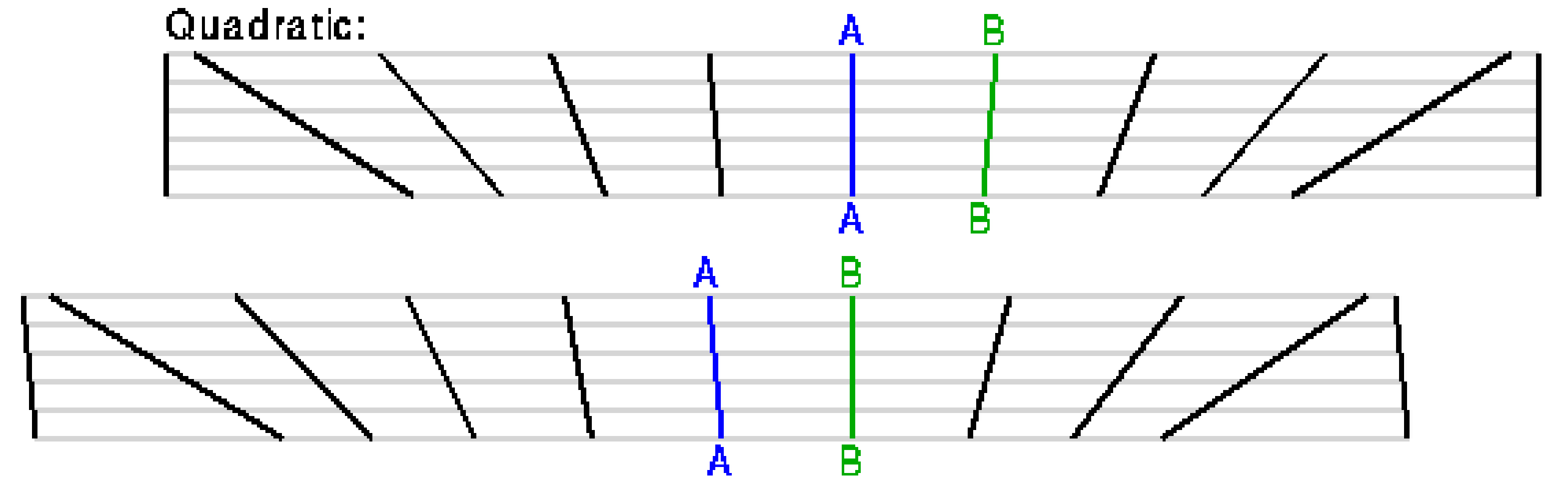
DISTANCE DE HUBBLE (LOI LINÉAIRE)

- La vitesse dans la loi de Hubble est alors la variation de *D*-$_{actuel}$ par unité de temps. C'est environ *c.z* pour les petits décalages vers le rouge (redshifts) mais s'en écarte pour les grands.
- Le diagramme d'espace-temps (diapo suivante) montre comment le changement de point vue, lié au passage d'un observateur *A* à un observateur *B*, conserve la vitesse linéaire par rapport à la distance de la loi de Hubble, mais nous avons ajouté cette fois les cônes de lumière.
- Remarquons que les cônes de lumière doivent s'incliner avec les lignes d'univers, montrant qu'avec ces variables cosmologiques la vitesse de la lumière est *c* par rapport aux observateurs locaux co-mobiles.

DISTANCE DE HUBBLE (LOI LINÉAIRE)



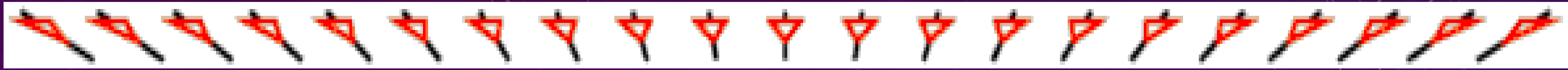
LOI QUADRATIQUE



Une loi quadratique $v= H_0.D^2$ se transforme en une loi anisotropique quand on change de point de vue. Donc si c'est une loi quadratique, B verra des vitesses radiales plus élevées dans une direction que dans l'autre, voir figure ci dessus. Ceci conduit à un point privilégié dans l'Univers, un "centre" , seul point d'où on voit une loi de récession isotrope dans toutes les directions. Comme nous constatons une loi de Hubble isotrope, soit nous sommes au centre de l'univers, ce qui est anti- copernicien soit la loi est linéaire, seule possibilité pour être compatible avec l'homogénéité et l'isotropie de l'Univers.

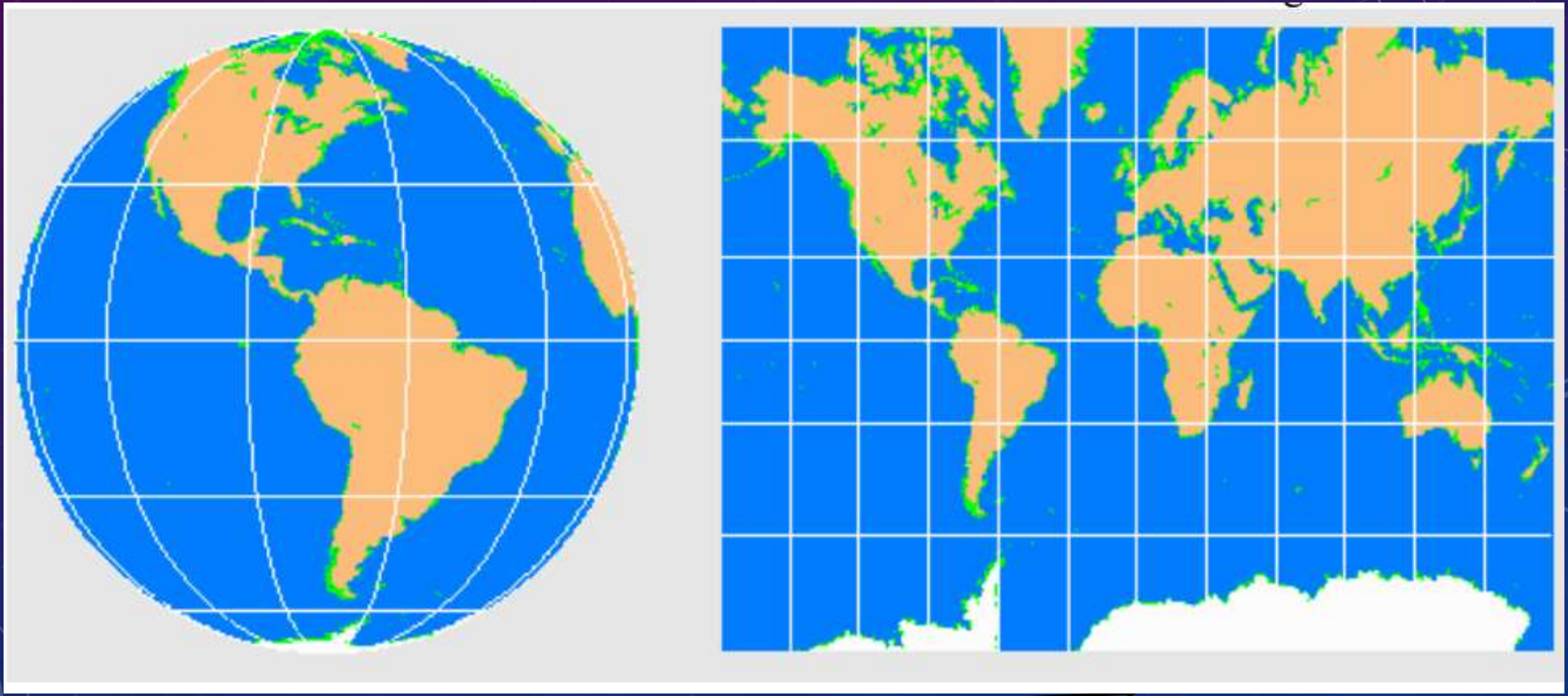
La loi de Hubble génère une expansion homologue qui ne change pas la forme des objets alors que les autres lois possibles liant vitesse et distance conduisent à des distorsions pendant l'expansion.

La figure ci dessous montre le résultat de l'expansion d'un objet d'un facteur *2* en utisant la loi de Hubble $v = H*D$ au milieu, une loi à vitesse constante $v= G*D^0$ à gauche et une loi quadratique $v = I*D^2$ à droite.

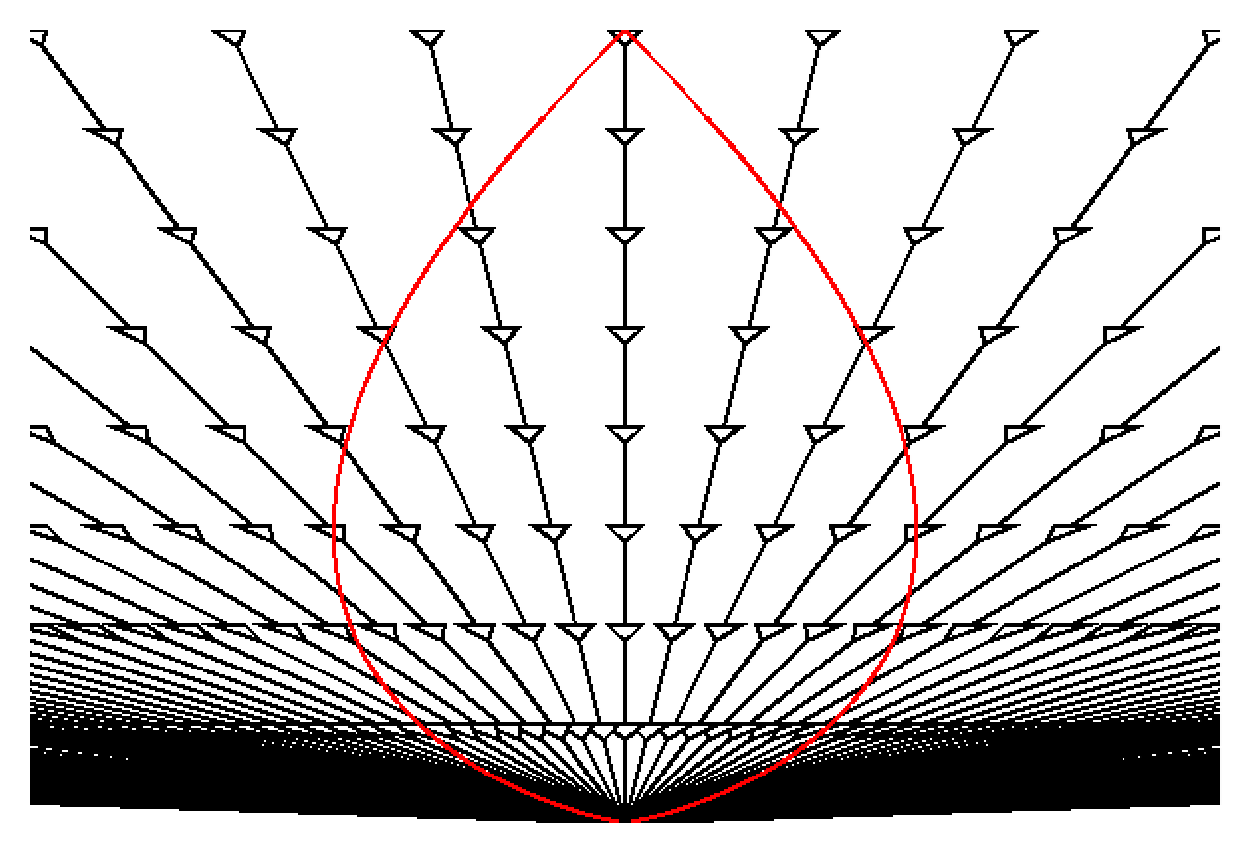


- La loi de Hubble utilise des coordonnées de temps t et de distance x qui ne sont pas les mêmes qu'en Relativité Restreinte, ce qui est souvent source de confusion.
- En particulier des Galaxies suffisamment éloignées de nous ont des « vitesses » d'éloignement supérieures à celle de la lumière.
- Les cônes de lumière des galaxies distantes représentées dans le diagramme ci-dessus, les plus à droite, sont inclinés au-delà de la verticale, ce qui indique que $v > c$.

Dans la suite, nous allons tracer des diagrammes (plans) pour représenter une géométrie non euclidienne. Ceci ne peut se faire sans distorsion (exemple : Cartes planes de la Terre !)



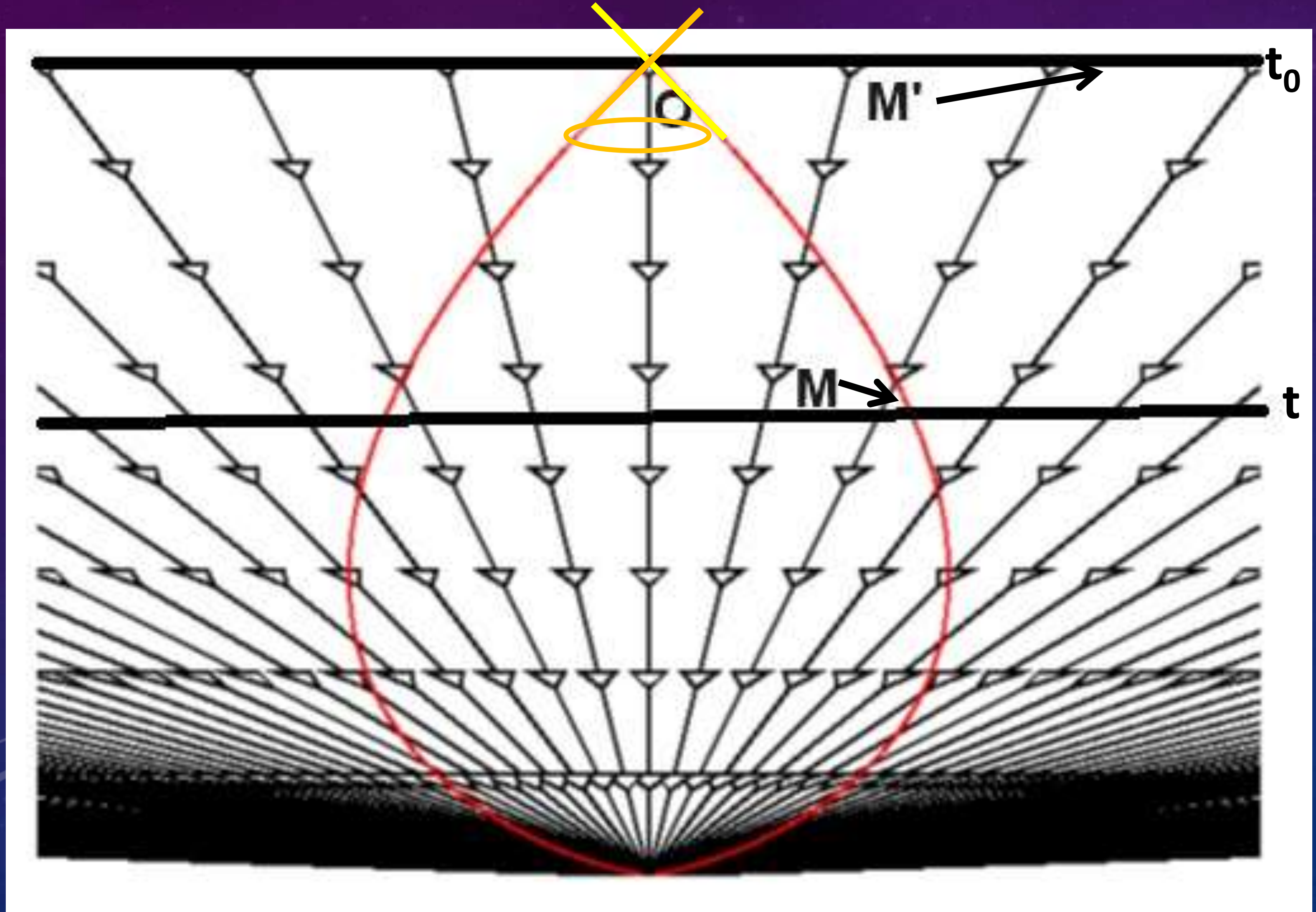
Dans cette représentation, les cônes de lumière locaux (l'espace tangent est celui de la RR en RG) vont nous permettre de tracer cette distorsion pour tirer des conclusions correctes sur des figures manifestement fausses



Le diagramme d'espace-temps ci-contre représente un modèle Cosmologique de densité zéro, qui utilise les coordonnées D_{actuel} et t de la loi de Hubble. Les lignes d'univers des observateurs co-mobiles sont assorties de quelques-uns de leurs cônes de lumière locaux, permettant de visualiser la distorsion de la représentation.

- Rappel: $z = [a(t_r)/a(t_e)] - 1 = (a_0/a) - 1$
- La courbe rouge en forme de poire est notre "cône " du passé [qui tient compte de sa distorsion liée à l'expansion,]. Cette courbe rouge a **localement** la même pente que les petits cônes de lumière, dont on voit l'utilité.

Dans ce modèle il y a des vitesses supérieures à c, car les univers ouverts étant spatialement infinis, elles sont nécessaires.

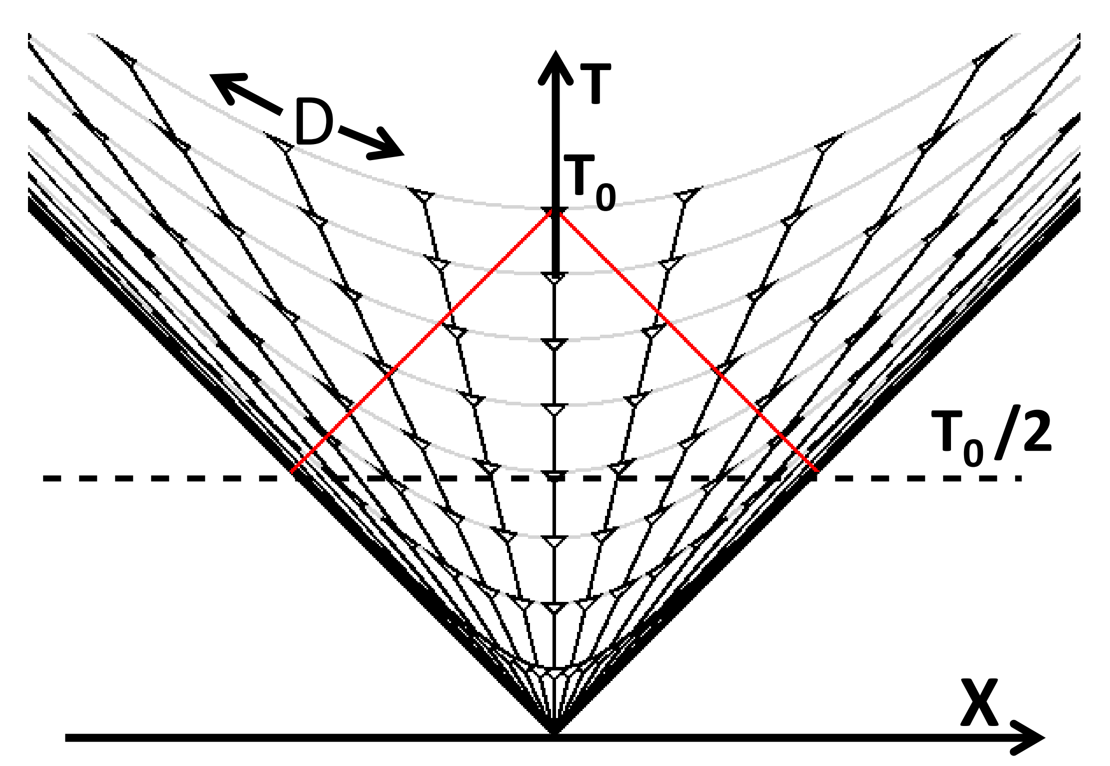


- Notons que nous recevons maintenant à t_0 la lumière qui a été émise par la galaxie M au temps t. L'univers s'est étendu pendant que la lumière cheminait le long de la courbe rouge de M en O (t_0). Mais nous voyons la galaxie telle qu'elle était quand sa lumière a été émise.

- Les isochrones (t = *constante*) sont horizontales : Maintenant (ligne horizontale en haut) est noté t_0. Notre ligne d'univers (verticale) est au centre. La ligne d'univers de la galaxie M est la deuxième à droite. Nous voyons que sa distance de Hubble « maintenant » à t_0 où le facteur d'échelle vaut $a_0 = 1$ est représentée par le segment $O(t_0)M'$.
- Au temps t où le facteur d'échelle valait $a = 0{,}6$ sa distance de Hubble était représentée par le segment $O(t)M$.
- Si elle valait $10\ Mpc$ au temps t, elle vaudra $10Mpc(a_0/a) = 10(1/0{,}6) = 16{,}6\ Mpc$ à t_0.

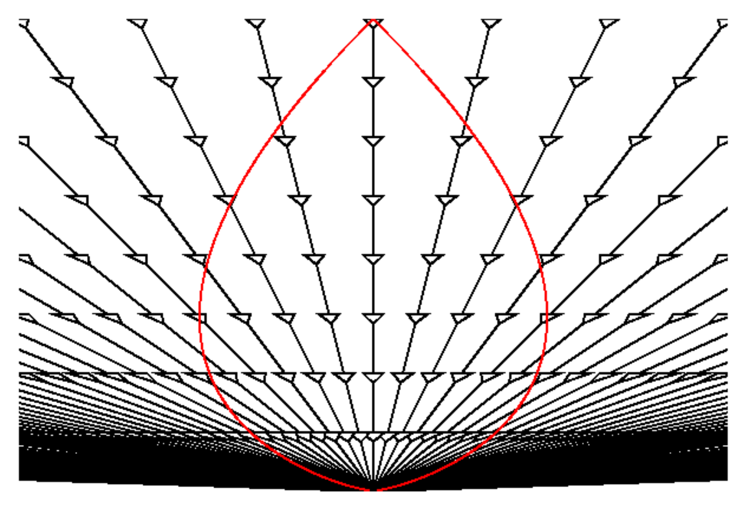
- Dans ce modèle d'univers vide, l'équation des lignes d'univers est : $d = a.t.d_c$, où d_c est la distance comobile et $a = constante$. L'expansion est linéaire par rapport au temps cosmique.
- Il n'y a pas de contradiction avec la Relativité Restreinte qui stipule que rien ne peut aller plus vite que la lumière, du fait que dans ce diagramme les " vitesses" sont définies à partir d'autres coordonnées t et x que celles de la RR.

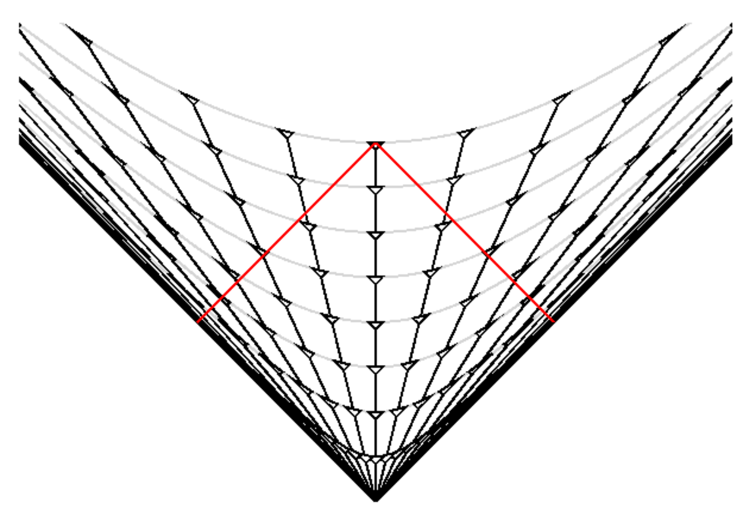
DIAGRAMME COSMOLOGIQUE EN COORDONNÉES LOCALES



Si on représente le **même** diagramme d'espace-temps dans les coordonnées *X* et *T* de la **Relativité restreinte** nous obtenons la figure ci-dessus Les hyperboles grises matérialisent les surfaces à temps propre constant depuis le Big Bang. Aucune vitesse > c

MODÈLE COSMOLOGIQUE DANS 2 COORDONNÉES

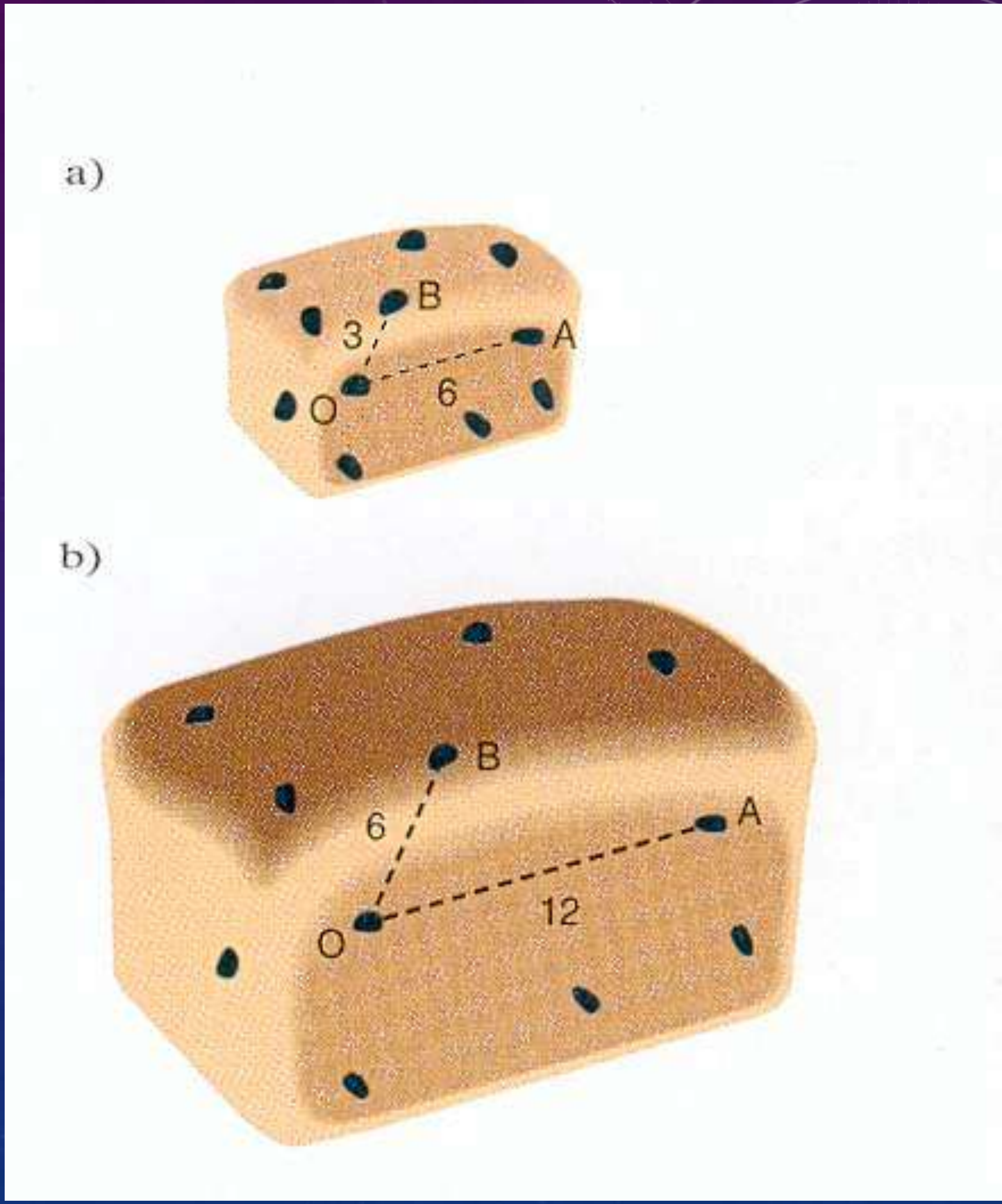




Si nous les **redressons** pour obtenir le diagramme d'espace-temps précédent, les lignes d'Univers des galaxies s'écartent et donnent des vitesses $v = d(D_{actuel})/dt$ éventuellement supérieures à *c*. Mais en coordonnées de la Relativité Restreinte les vitesses sont toujours inférieures à *c*. Nous voyons aussi sur ce diagramme que notre cône du passé [un vrai cône cette fois] coupe les lignes d'univers des Galaxies les plus lointaines à la distance $x = c*T_o/2$, en coordonnées de RR.

- Mais la distance de la loi de Hubble qui est mesurée maintenant [sur l'hyperbole grise "du haut" qui correspond au "présent"], de ces Galaxies les plus éloignées est infinie (dans ce modèle).
- De plus ces Galaxies, à une "distance de Hubble" infinie et qui ont donc une vitesse liée à la loi de Hubble infinie, sont visibles pour nous, car dans cette représentation, l'univers observable est l'Univers entier.
- Les relations entre la distance de la loi de Hubble, sa vitesse (D_{actuel} & v) et le décalage vers le rouge z sont données ci-dessous dans le cas d'un Univers à densité asymptotiquement nulle → cosmologie de Milne où a(t) = t
- $ds^2 = -dt^2 + t^2(dr^2 + r^2 d\Omega^2) \rightarrow v = H_o D_{now}$, $\boldsymbol{D_{now} = (c/H_o) ln(1+z)}$,
- $1+z = exp(v/c)$, car $dv = k.t\ .dt = k.dz(1+z)^{-1} \rightarrow v = c.\ ln(1+z)$ pour $v/c << 1$, $exp(v/c) \approx 1+v/c \rightarrow z \approx v/c$, c'est effet Doppler classique!

- Même si, en principe la "***distance de la loi de Hubble***" est mesurable, la nécessité de disposer d'observateurs auxiliaires tout le long de la "chaîne " de galaxies menant à une Galaxie lointaine, (synchronisation du référentiel) la rend quasi impraticable.
- D'autres distances peuvent être mesurées plus facilement.
- Ci-contre illustration culinaire (cuisson du pudding aux raisins) de l'expansion modélisant la fuite des galaxies.



DISTANCE DE LUMINOSITÉ

- Un autre indicateur important de distance est le flux lumineux reçu d'un objet, [dont la luminosité absolue est supposée connue (chandelle standard)], ceci permettant de définir la ***distance de luminosité*** D_L par :
- $D^2_L = L / 4\pi F$
- où L est la luminosité absolue de la source et F le flux mesuré par l'observateur (énergie par unité de temps et unité de surface d'un détecteur donné).
- La définition vient du fait que dans un espace plat, pour une source à une distance d, le rapport du flux sur la luminosité vaut 1 divisé par l'aire A de la sphère centrée sur la source: $F/L = 1/A(d\,) = 1/4\pi\, d_L{}^2$

- Dans un Univers FLRW, cependant, le flux va être dilué. La conservation des photons nous dit que le nombre total de photons émis par la source va traverser la sphère à la distance co-mobile *r* de l'émetteur. Une telle sphère est à une distance physique, $d = a_0 r$, ou a_0 est le facteur d'échelle quand les photons sont observés.
- Mais le flux est dilué par deux effets additionnels :
- Le Décalage vers le rouge individuel des photons par un facteur (1 + z) et le fait que les photons traversent la sphère moins fréquemment du fait que deux photons émis à *dt* d'intervalle vont être mesurés à $(1 + z)\, dt$ d'intervalle.
- Donc, $F/L = 1/4\pi d_L^2$ devient: $F/L = [4\pi . a_0^2\, r^2 (1+ z)^2]^{-1}$
- Avec $d^2_L = L / 4\pi F$ La distance de luminosité vaut alors : $d_L = a_0 r\, (1 + z)$

DISTANCE ANGULAIRE

- L'une d'entre elles, est la "*distance de taille angulaire*" (pour de petits angles) définie par :
- $\theta = taille/D_A$ d'où $D_A = taille/\theta$
- où la taille est la taille transversale,[supposée connue de façon absolue], d'un objet et θ est l'angle (en radians) qu'il sous-tend dans le ciel.
- La distance angulaire passe par un maximum quand l'expansion suit une loi de type : $a(t)= t^{\alpha}$! Pour le modèle à densité zéro, la coordonnée x de la Relativité Restreinte est égale à la distance de taille angulaire, $x = D_A$.

TEMPS DE PARCOURS DE LA LUMIÈRE, HORIZON, DILATATION TEMPORELLE

Une quatrième distance est définie à partir de son temps de parcours par la lumière : $c.(t_o - t_{em})$. Ceux qui disent que la plus grande distance, à laquelle nous pouvons voir, est $c.t_o$ utilisent cette notion de distance. Mais $c.(t_o - t_{em})$ n'est pas une distance très mesurable, car il est difficile de déterminer t_{em} , l'âge de l'Univers auquel la lumière que nous recevons a été émise. On la déduit d'autres observations quand on dit par exemple qu'on observe une galaxie alors que l'univers n'était âgé que de 1 milliard d'année (il y donc 12,7 milliards d'année), ce qui est assez parlant ! Avec la métrique de Robertson Walker.

La métrique RW: $ds^2 = -dt^2 + a^2(t)[dr^2/(1-kr^2) + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)]$, pour un photon radial (θ,φ = cste), $ds^2 = 0$, avec $c = 1$, donne :

$$dt/a(t) = dr.(1-kr^2)^{-1/2} \quad , \quad \text{en intégrant:}$$

$$a_{0(t)} \int_{re}^{r=0} \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} = a_{0(t)} \int_{te}^{t_0} \frac{dt}{a(t)}$$

Le membre de droite donne le temps de parcours de la lumière (en coordonnées co-mobiles) entre le temps d'émission *te* et aujourd'hui t_0, celui de gauche donne la distance parcourue en coordonnées co-mobiles (nous sommes à $r = 0$ dans ces coordonnées).

La distance de Hubble d_H (aujourd'hui) s'obtient en multipliant par le facteur d'échelle aujourd'hui $a_0(t)$.

L'âge de l’univers s'obtient en faisant tendre le temps d'émission vers 0.

$$d_H = a_{0(t)} \int_0^{r_0} \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} = a_{0(t)} \int_0^{t_0} \frac{dt}{a(t)}$$

En prenant $a(t) = t^{2/3}$, $a_0(t) = t_0^{2/3}$, et la primitive de $t^{-2/3}$ valant $3.t^{1/3}$ on voit que cela donne : $d_H = a_{0(t)} \int_0^{r_0} \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} = a_{0(t)} \int_0^{t_0} \frac{dt}{t^{\frac{2}{3}}} = (t_0^{2/3})(3.t_0^{1/3}) = 3t_0$.

On pourrait vérifier que pendant la phase radiative $a(t) = (t/t_0)^{1/2}$ on obtiendrait $2t_0$.

DILATATION TEMPORELLE

- L' observateur A co-mobile (sur une géodésique radiale), supposé être en r = 0 (par exemple), émet 2 signaux lumineux brefs, le premier à t = t_e et le second à t = $t_e + \delta t_e$, séparés d'un intervalle de temps δt_e infiniment petit.
- Un observateur B co-mobile (sur la même géodésique radiale) situé à r = r_0 va recevoir ces signaux à t_0 et $t_0+\delta t_0$. Les 2 observateurs étant co-mobiles leur distance « co-mobile » est constante (en coordonnées de Robertson-Walker. On veut comparer les intervalles de temps entre les deux impulsions lumineuses (qu'on va assimiler à des photons) entre le point d'émission A et le point de réception B.
- $\int_0^{r_0} \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} = \int_{t_e}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_{t_{e+\delta t_e}}^{t_{0+\delta to}} \frac{dt}{a(t)}$

- En posant $A(t) = \int_{t_e}^{t_0} \frac{dt}{a(t)}$, on a : $A(t_0)- A(t_e) = A(t_0+\delta t_0) - A(t_e+\delta t_e)$ $= \int_0^{r_0} \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} \rightarrow A(t_e+\delta t_e)- A(t_e) = A(t_0+\delta t_0) -A(t_0)$. Avec $A(t_0+\delta t_0)= A(t_0)+\delta t_0/a(t_0)$.

- $A(t_e+\delta t_e)= A(t_e)+ \delta t_e/a(t_e)$. On obtient :
- $A(t_e)+ \delta t_e/a(t_e)-A(t_e)=A(t_0)+\delta t_0/a(t_0)-A(t_0)=\delta t_e/a(t_e)=\delta t_0/a(t_0)$
- Ce qui donne : $\boldsymbol{\delta t_0/\delta t_e = a(t_0)/a(t_e)= z +1}$
- Cela correspond à une dilatation temporelle de (z+1) entre l'intervalle de temps à l'émission au point A d'émission (ici r = 0), et sa valeur mesurée en B (ici en $r = r_0$).

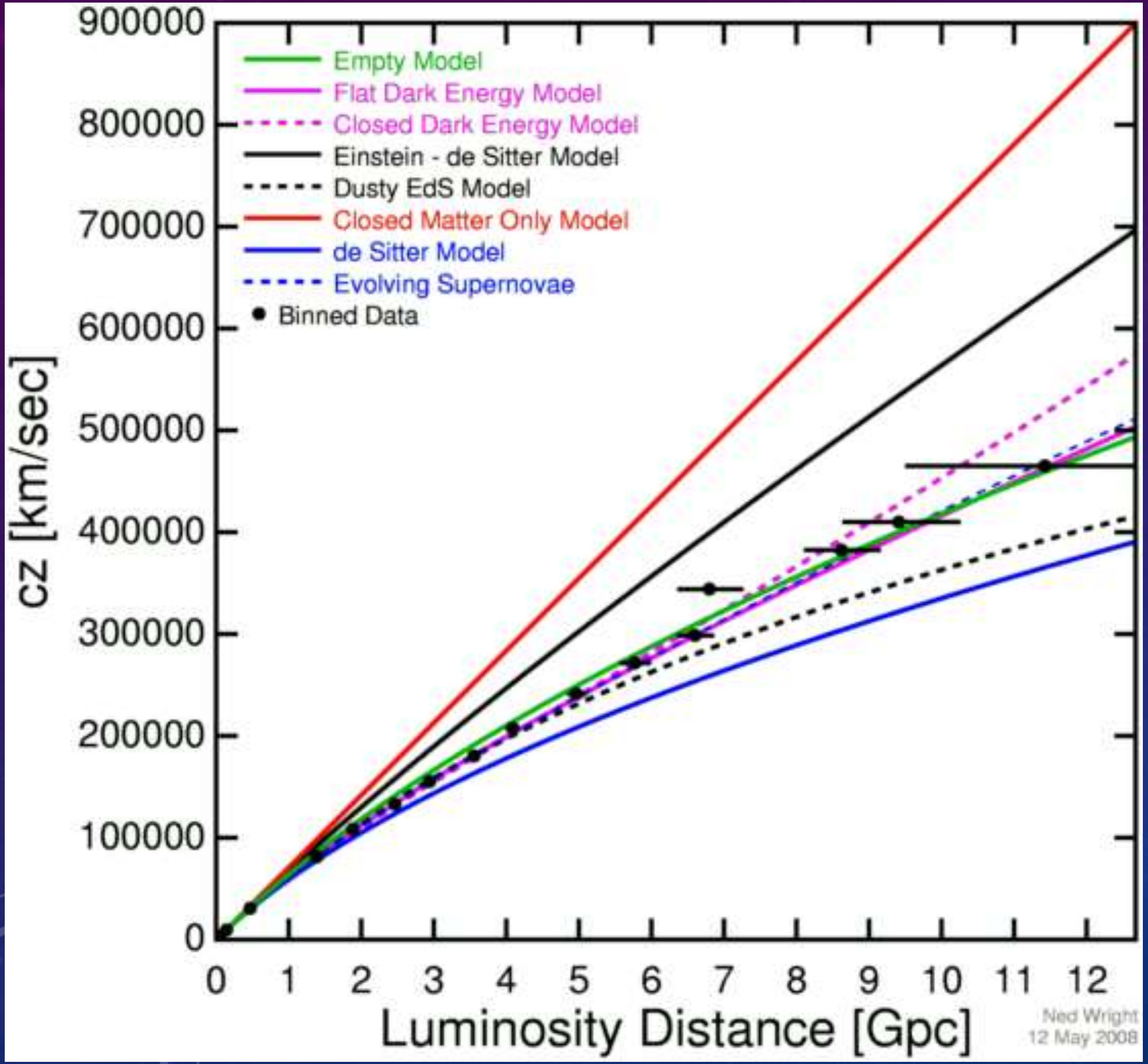
DÉCALAGE SPECTRAL

- Finalement, le ***décalage spectral*** noté ***z*** est un indicateur très important de distance, car les astronomes savent le mesurer facilement, alors que la taille ou la luminosité nécessaires pour calculer D_A ou D_L sont toujours très difficiles à déterminer.
- Par contre *z* n'indique que le rapport des facteurs d'échelle, $z = (a_0/a) - 1$, de l'univers entre l'émission du photon et sa réception : Il n'indique pas comment on passe de l'un à l'autre.
- Mais il est l'indicateur de distance le plus précieux et sert de variable de référence pour comparer les autres distances !

- Les courbes représentant les relations entre ces différentes distances dépendent du modèle cosmologique. A partir de leur définition, chaque modèle permet de calculer la relation entre les différentes distances en particulier entre z et les autres « distances ».
- Ce point est fondamental. Le décalage spectral z va souvent être pris comme variable du fait de son caractère général commun, $z=(a_0 /a)-1$. Il ne caractérise que le rapport des facteurs d'échelle entre la réception et l'émission des photons observés.
- Ces distances ont un caractère physique spécifique mais on peut s'en abstraire car pour un même objet observé, elles sont différentes ce qui ne leur confère pas de statut de distance objective qui serait unique :

- Le meilleur candidat serait la distance de Hubble, (définition géométrique claire). Elles vont permettre de discriminer par ajustement aux observations les différents modèles qui sont compatibles avec les observations
- L'abaque "décalage spectral" (redshift) fonction de la distance pour les supernovae de type Ia, ci-après, est en fait un abaque de $c.z$ fonction de D_L, du fait que le flux lumineux est utilisé pour déterminer la distance des supernovae.
- Ces données excluent les modèles qui ne donnent pas de relation linéaire entre $c.z$ et D_L pour $c.z$ petit. Ces observations ont été étendues à des supernovae plus éloignées pour mesurer la non linéarité de la relation en entre $c.z$ et D_L lorsque cz n'est plus petit, et ont apporté une information plus significative sur la nature de l'Univers.

RÉSULTATS DU SUPERNOVAE PROJECT

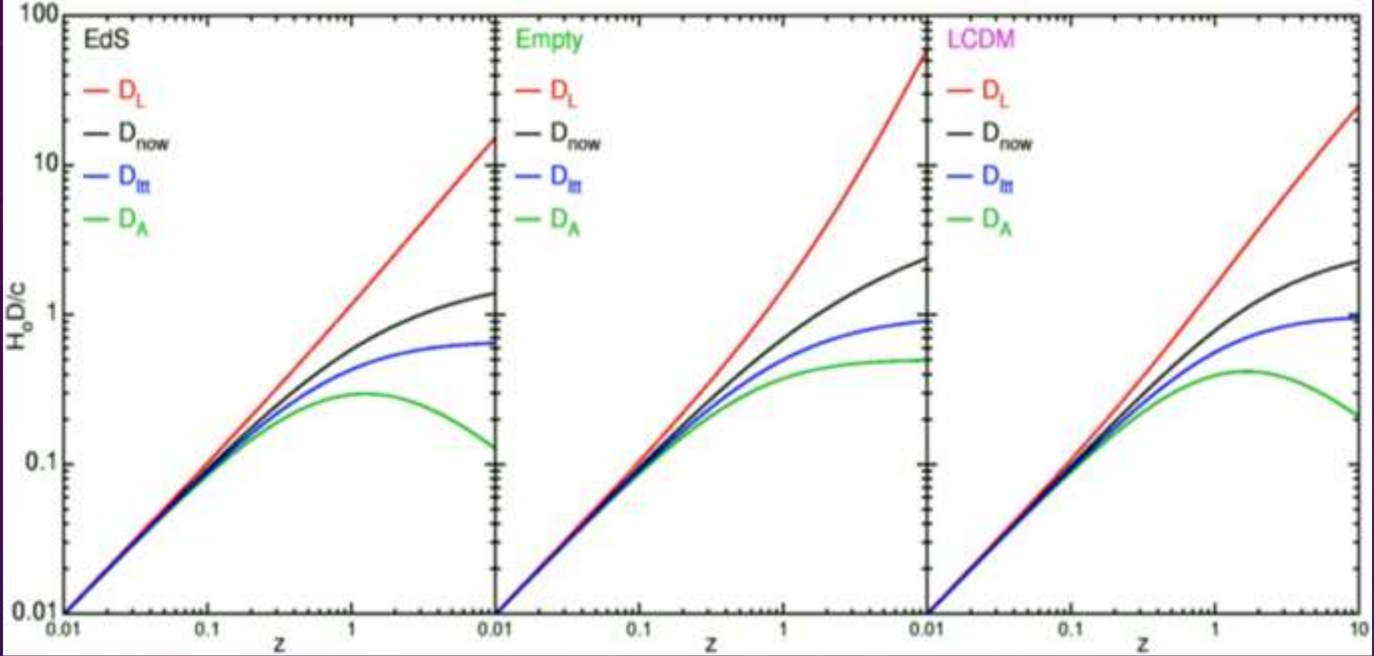


Vitesse de récession calculée à partir du décalage spectral en fonction de la distance de luminosité : Dernières données disponibles : Kowalski et al. (2008).

RAYONNEMENT DE FOND COSMOLOGIQUE

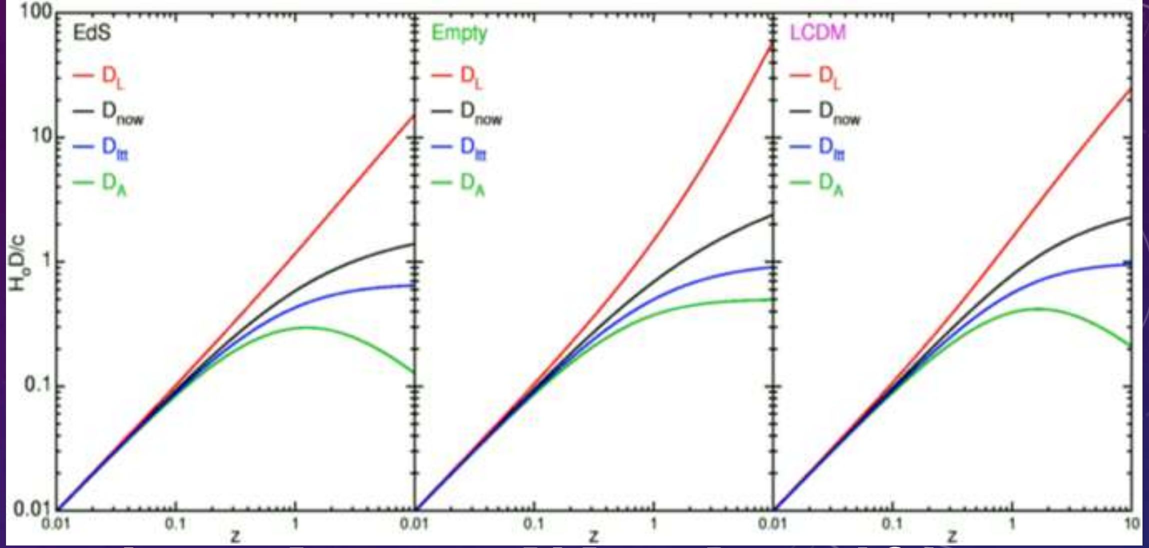
- Le RFC (Rayonnement de Fond Cosmologique) ayant la caractéristique d'un corps noir parfait nous permet de déterminer la relation entre D_A et D_L. Comme le RFC que nous observons aujourd'hui, vient de loin, mais a toujours une nature de corps noir, un corps noir lointain doit ressembler à un corps noir (même si sa température peut être modifiée par le décalage spectral).
- La luminosité d'un corps est : $L = 4\pi R^2 \sigma T_{em}{}^4$ où R est le rayon du corps, T_{em} est la température d'émission du corps noir et σ est la constante de Stephan-Boltzmann. Observé à un décalage spectral z la température est :
- $T_{obs} = T_{em}/(1+z)$, et le flux est : $F = \theta^2 \sigma T_{obs}{}^4$,

- θ^2 caractérise l'angle solide sous lequel on voit (effectivement) le corps noir de rayon R avec :
- $\theta = R/D_A$ et $F = L/(4\pi D_L^2)$.
- En combinant ces équations on obtient :
- $D_L^2 = L/(4\pi F) = (4\pi R^2 \sigma T_{em}^4)/(4\pi\theta^2 * \sigma T_{obs}^4) = D_A^2(1+z)^4$ soit $D_L = D_A(1+z)^2$
- Les modèles qui ne prédisent pas cette relation entre D_A et D_L, tels que le modèle chronométrique ou le modèle de la lumière fatiguée sont invalidées par les propriétés du RFC. Nous verrons sur les diagrammes qui suivent que ce critère est satisfait par les modèles EdS, Vide et LCDM.

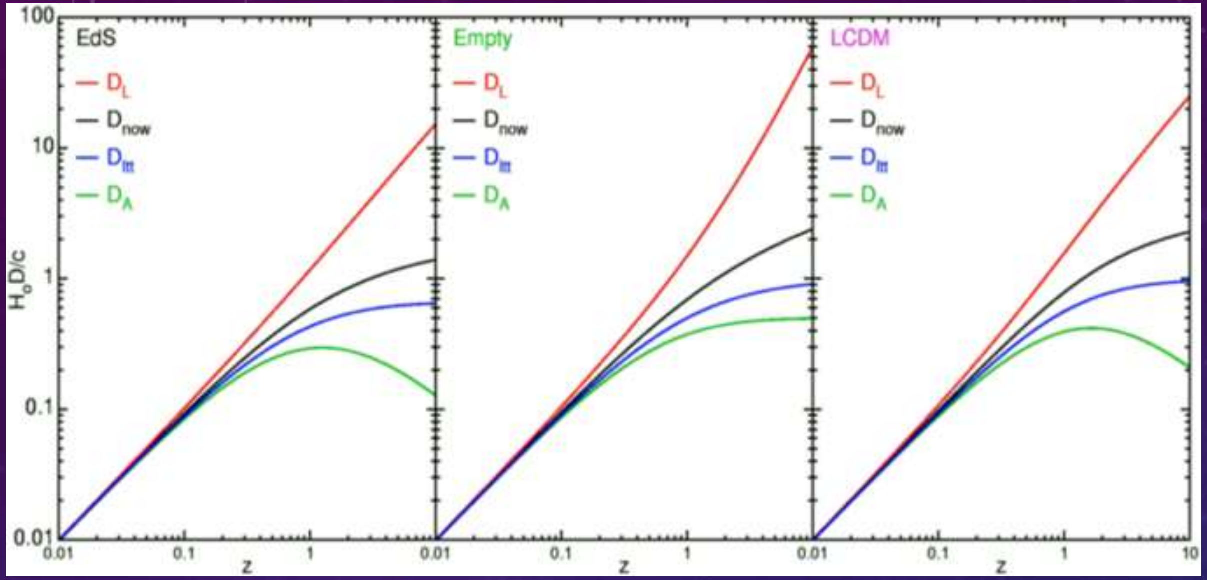


A gauche le modèle Einstein De Sitter dominé par la matière, au centre le modèle vide, à droite Lambda CDM en accélération qui est celui privilégié aujourd'hui. Notons que les distances sont similaires à faibles distances mais divergent et de façon dépendant du modèle à grandes distances (H_0 D/c =1→ D = 4,1Gpc= 13Gal). L'ordonnée sur le diagramme est en unités $H_0\, D/c$ pour avoir la valeur *1* pour l'horizon des évènements ce qui est visualisé par la distance D_{ltt}, (Temps de trajet de la lumière). Dans $H_0\, D/c$, *D* est la valeur de la distance calculée, quel que soit son type.L'échelle verticale associée est logarithmique ce qui écrase les différences

INTERPRÉTATION D =F(Z)



- Commençons par le modèle EdS qui était le modèle de référence jusqu'à 1995. Pour une supernova SN1A, par exemple, observée à $z = 1$ on obtient des valeurs très différentes pour les différentes « distances » calculées : La distance de luminosité $H_0 D/c \approx 1{,}2$ vaut 4 fois la distance angulaire $H_0 D/c \approx 0.3$ (cohérent avec le critère lié au RFC) et pratiquement le double de la distance de Hubble $H_0 D/c \approx 0{,}6$. On voit que sur tous les diagrammes, c'est la distance de luminosité qui est de loin la plus grande !



- Pour le même *z = 1* le modèle LCDM prédit une distance de luminosité plus grande (sur le diagramme c'est peu lisible, mais les échelles sont logarithmiques). Autrement dit, il prédit qu'on reçoit moins de lumière de la SN1A que ce que prédit le modèle EdS pour un même *z*. Comme les observations ont confirmé ce point, <u>les supernovae étaient « plus loin » que ne le prédisait le modèle EdS, ceci a conduit à son abandon au profit du modèle LCDM qui lui prédit la bonne valeur.</u>

FACTEUR D'ÉCHELLE A(T)

- Comme la vitesse (dD_{actuel}/dt) est strictement proportionnelle à D_{actuel}, la distance entre deux objets co-mobiles s'accroît d'un facteur $(1+Hdt)$ pendant l'intervalle de temps dt. Ceci signifie que nous pouvons écrire la distance entre deux observateurs co-mobiles comme suit :
  - $D_G(t) = a(t)D_G(t_o)$
- où $D_G(t_o)$ est la distance ***actuelle*** à la galaxie G tandis que ***a(t)*** est un facteur d'échelle universel qui s'applique à tous les objets co-mobiles.
- De cette définition nous voyons que $a(t_o) = 1$.
- Nous pouvons calculer la dynamique de l'Univers en considérant un objet à une distance $D(t) = a(t)\ D_o$.

- L'accélération gravitationnelle due à la boule de matière de rayon $D(t)$ est $g = -GM/D(t)^2$ où la masse est $M = 4\pi D(t)^3 \rho(t)/3$. La densité de matière est $\rho(t)$ qui ne dépend que du temps du fait de l'homogénéité de l'Univers.
- La masse contenue jusqu'à une distance $D(t)$ est indépendante du temps car la matière à l'intérieur a une vitesse d'expansion inférieure et reste donc à l'intérieur et celle à l'extérieur a une vitesse supérieure et reste donc à l'extérieur.
- L'effet gravitationnel de la matière extérieure est nul : la gravitation à l'intérieur d'une coquille sphérique de matière est nulle, et toute la matière à l'extérieur [plus loin que $D(t)$] peut être représentée par un emboîtement de coquilles sphériques.

- Avec une masse intérieure à *D(t)* constante générant une accélération du bord, le problème se ramène à celui d'un corps à déplacement radial dans le champ de gravitation d'une masse ponctuelle.
- Si la vitesse est inférieure à la vitesse de libération, l'expansion va s'arrêter et l'univers se re-contracter.

- Si la vitesse est égale à la vitesse de libération, c'est le cas critique. Ceci donne
- $v = H.D = v(lib) = (2GM/D)^{1/2}$
- $H^2D^2 = 2G[(4/3)\pi D^3]\rho/D$ où $\rho_{cri} = 3H^2/(8\pi G)$
- Pour ρ inférieur ou égal à la densité critique ρ_{crit}, l'Univers s'étend à jamais, tandis que pour ρ supérieur à $\rho(crit)$, l'Univers arrête son expansion et se re-contracte
- Le calcul de la valeur de ρ_{crit} pour $H_o = 71\ km/sec/Mpc$ donnerait de $9.10^{-30}\ g/cm^3$ soit 6 protons par mètre cube soit $1.4.10^{11}$ masses solaires (une belle galaxie) par Mégaparsec cube.
- Mais ce n'est pas ce qu'on observe !

- En effet si on compare cette valeur à la luminosité observée de *1.85*10^8* luminosités solaires par Mpc^3, ceci exigerait un rapport masse/luminosité de *760* en unités solaires pour fermer l'Univers. Si la densité est proche de la densité critique, cela signifie que la majorité de la matière est trop sombre pour être observée.
- Les dernières estimations suggèrent que la densité est proche de *1* [WMAP : confirmée par Planck], ce qui veut dire que la majorité de l'univers n'est pas visible [Matière et énergie "sombre" : voir résultats récents de WMAP: 70% énergie sombre, 26 % matière sombre, 4% matière visible.

COMMENT PEUT-ON VOIR LES PHOTONS DU RFC

Pour un univers de densité critique, les photons du RFC que nous captons maintenant ont été émis à *T0 +300 000 ans*, lorsque le facteur d'échelle "*a*" de l'univers était de 1/1100.

La constante de Hubble valait environ ***3,2 millions de km/s par méga parsec (46 000 fois*** sa valeur actuelle) ce qui veut dire que deux objets distants d'environ *300 000 a.l* avaient une vitesse de récession égale à *c*.

Comme le point (alors dans le RFC) qui dans le futur (après expansion) allait abriter la terre était distant d'environ *36* Millions d'années-lumière (distance de Hubble) à cette époque, la vitesse de récession était supérieure à ***100 c***.

FIN PREMIÈRE PARTIE