Cosmologie: Deuxième partie

Adapté du cours de Cosmologie du Pr Edward Wright (avec son aimable autorisation)

Homogénéité et isotropie, diverses distances, facteur d'échelle

Le principe cosmologique

L'Univers est homogène et isotrope

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 excellente approximation 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 comobiles

Vous avez dit distance? Distance de Hubble

La loi de Hubble ($v = HD$) 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.

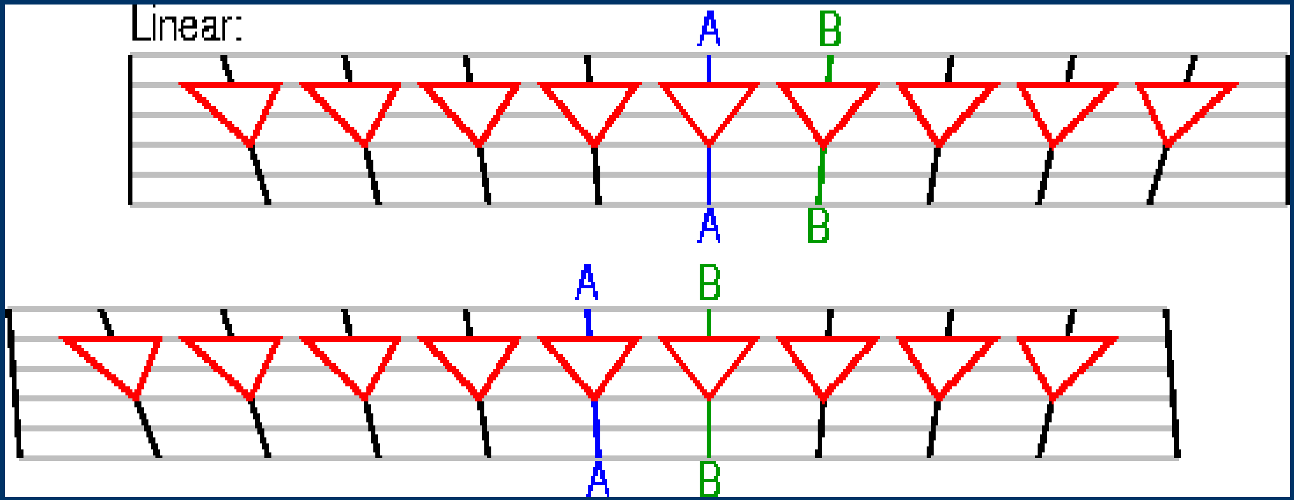
La distance de la loi de Hubble est définie telle que si A et B sont deux galaxies distantes que nous voyons dans la même direction et qu'elles ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre alors la différence des distances qui nous séparent D(B)-D(A), est la distance de A à B que A mesurerait.

Mais cette mesure doit être faite " maintenant", donc A doit faire cette mesure au même temps propre depuis que le big bang que celui que nous constatons en ce moment.

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.:

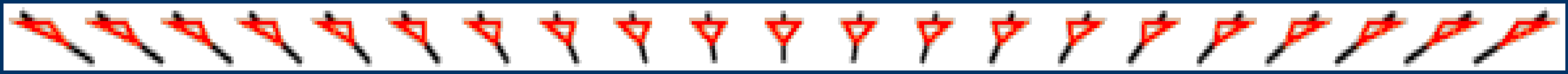
D(de nous à Z) = D(de nous à A) + D(A à B) + ... D(X à Y) + D(Y à Z)

Distance de Hubble



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 ci dessus reproduit l'exemple du premier chapitre 1 montrant 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

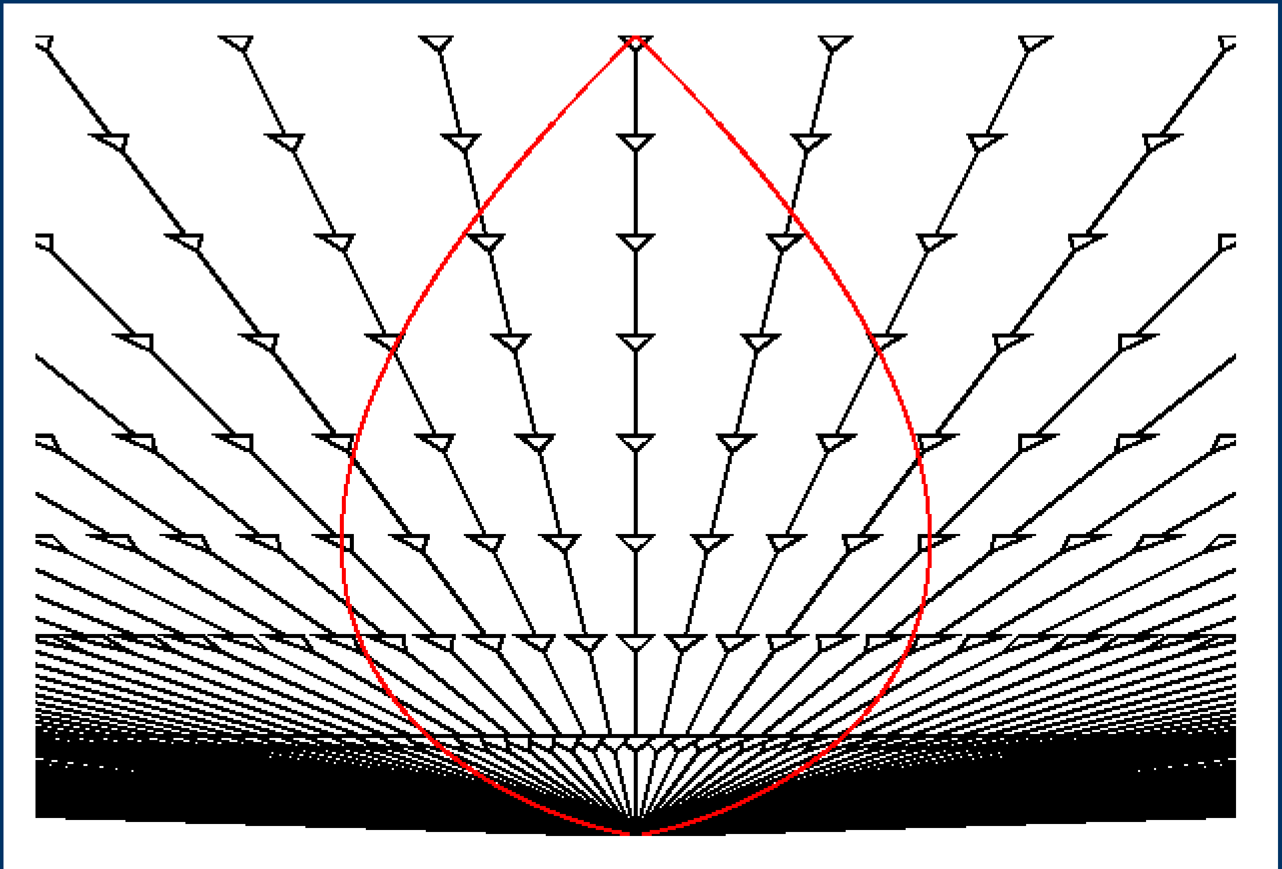


La loi de Hubble utilise des coordonnées de temps t'' et de distance x qui ne sont pas les mêmes qu'en Relativité Restreinte, ce qui est souvent source de confusion.

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 sont inclinés au delà de la verticale indiquant $v > c$.

Distance de Hubble

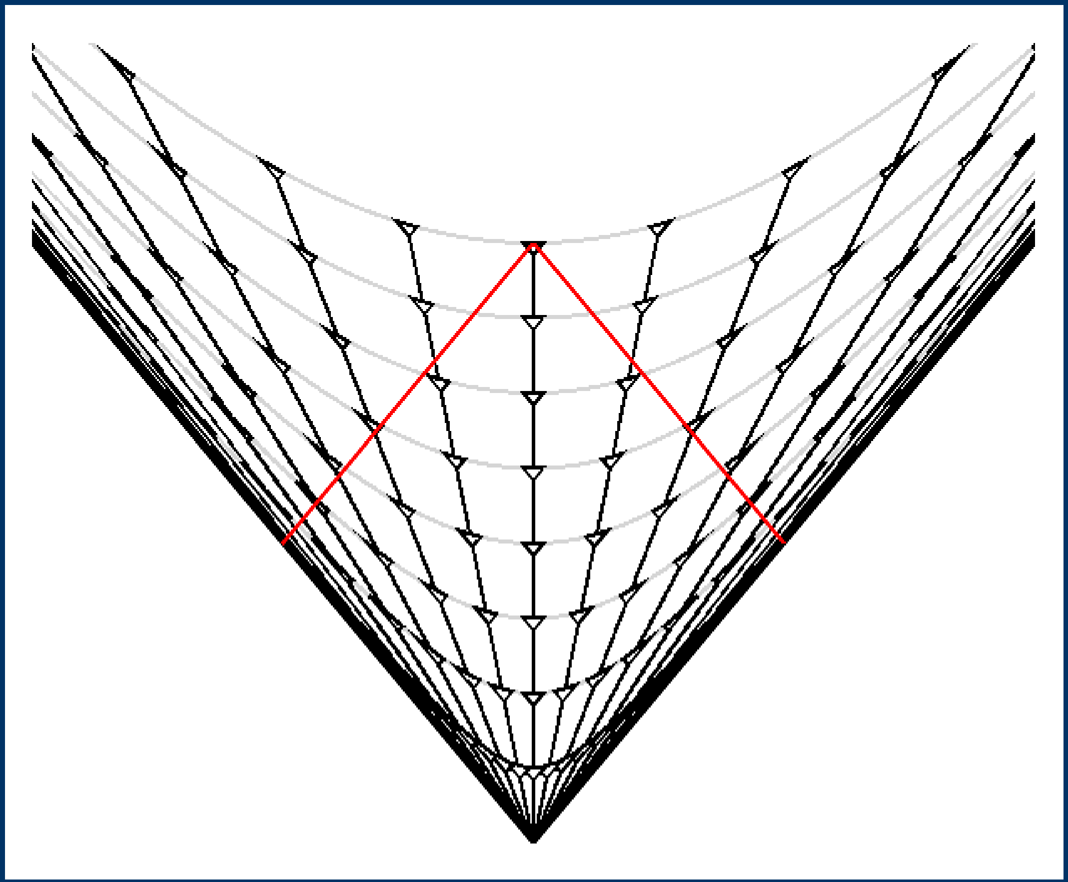


Le diagramme d'espace temps ci contre représente un modèle Cosmologique de densité " zéro" (en fait de densité très faible) qui utilise les coordonnées D_{actuel} et t de la loi de Hubble.

Les lignes d'Univers des observateurs co-mobiles sont assorties et "décorées" de petits cônes de lumières schématiques.

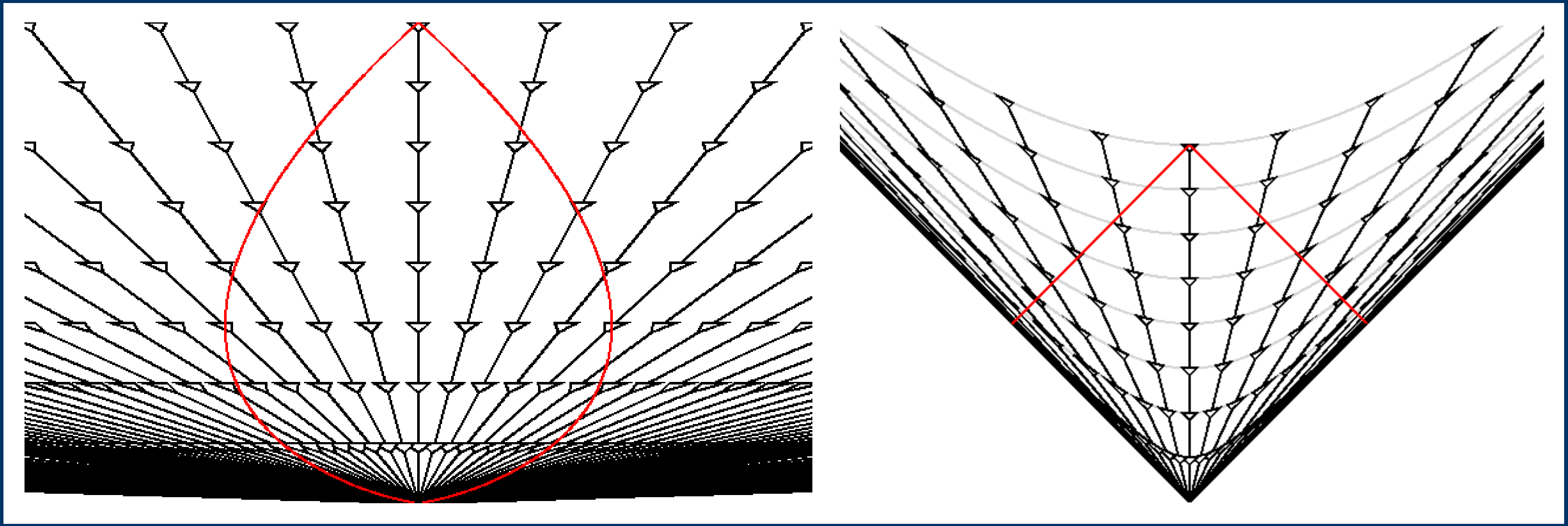
La courbe rouge en forme de poire est notre "cône " du passé [qui tient compte de l'expansion, d'où la forme]. Remarquons que cette courbe rouge a localement la même pente que les petits cônes de lumière. Dans cette représentation les vitesses supérieures à c sont possibles et comme les Univers ouverts sont spatialement infinis, elles sont en fait nécessaires.

Distance de Hubble



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. Si on représente le même diagramme d'espace temps dans les coordonnées *x* et *t* de la Relativité restreinte nous obtenons la figure ci contre. Les hyperboles grises matérialisent les surfaces à temps propre constant depuis le Big Bang.

Distance de Hubble



Si nous les redressons pour obtenir le diagramme d'espace temps précédent, les lignes d'Univers des galaxies s'écartent et donnent des vitesses $v = dD_{actuel}/dt$ éventuellement supérieures à c. Mais en coordonnées de la Relativité Restreinte les vitesses sont toujours inférieures à c. Nous voyons également 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 Relativité Restreinte. 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).

Distance de Hubble

De plus ces Galaxies, à une "distance de Hubble" infinie et 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 [cas d'un Univers à densité asymptotiquement nulle]: $v = H_o D_{actuel}$, $D_{actuel} = (c/H_o)\ln(1+z)$, $1+z = \exp(v/c)$

Remarquons que la loi décalage spectral / vitesse n'est pas celle de l'effet Doppler de la Relativité Restreinte : $1+z = [((1+v/c)/(1-v/c))]^{1/2}$

Qui s'applique seulement en coordonnées de la Relativité Restreinte, pas en coordonnées " Cosmologiques".

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, la rend quasi impraticable

Autres distances

Distance angulaire

D'autres distances peuvent être mesurées plus facilement.
L'une d'entre elles, est la "***distance de taille angulaire***" 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.
Pour le modèle à densité zéro, la coordonnée "x" de la Relativité Restreinte est égale à la distance de taille angulaire, $x = D_A$.

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:
$Flux = Luminosité/(4*\pi*D_L^2)$.

Autres distances

Temps de parcours de la lumière.

Une quatrième distance est définie à partir de son temps de parcours par la lumière: $\boldsymbol{c.(t_o-t_{em})}$. 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 utilisable, car il est difficile de déterminer t_{em}, l'âge de l'Univers auquel la lumière que nous recevons a été émise.

Décalage spectral

Finalement, le ***décalage spectral*** 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.

Le décalage spectral est l'indicateur de distance le plus précieux, injustement ignoré par les journalistes scientifiques.

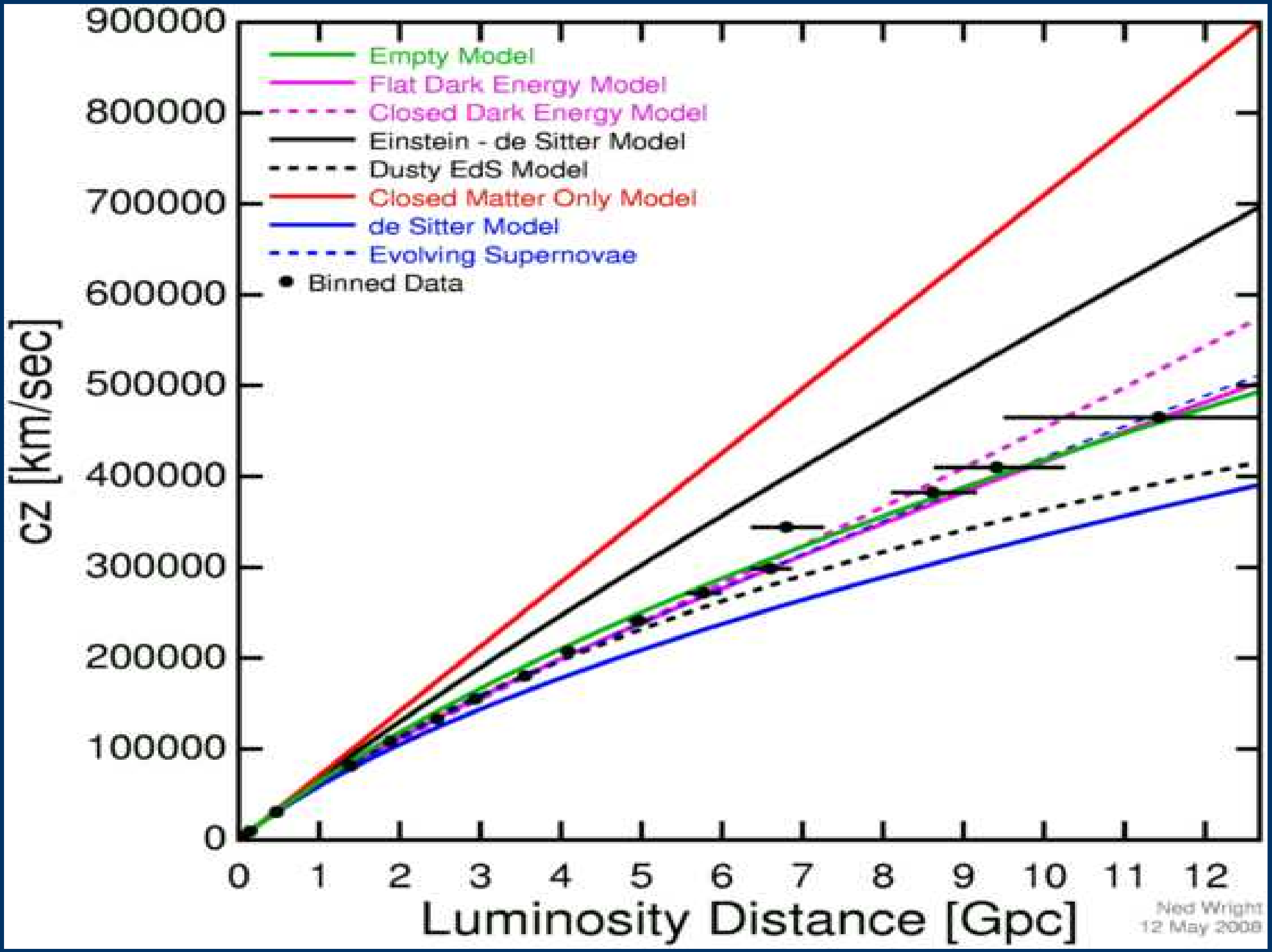
Décalage Spectral et distance

La courbe représentant les relations entre ces différentes distances dépend du modèle cosmologique. L'abaque "décalage spectral" (redshift) fonction de la distance pour les supernovae de Type Ia, donnée précédemment est en fait une abaque de cz fonction de D_L, du fait que le flux lumineux est utilisé pour déterminer la distance des supernovae.

Ces données éliminent les modèles qui ne donnent pas de relation linéaire entre cz et D_L pour cz petit .

Ces observations ont été étendues à des supernovae plus éloignées pour mesurer la non linéarité de la relation en entre cz 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, 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 :

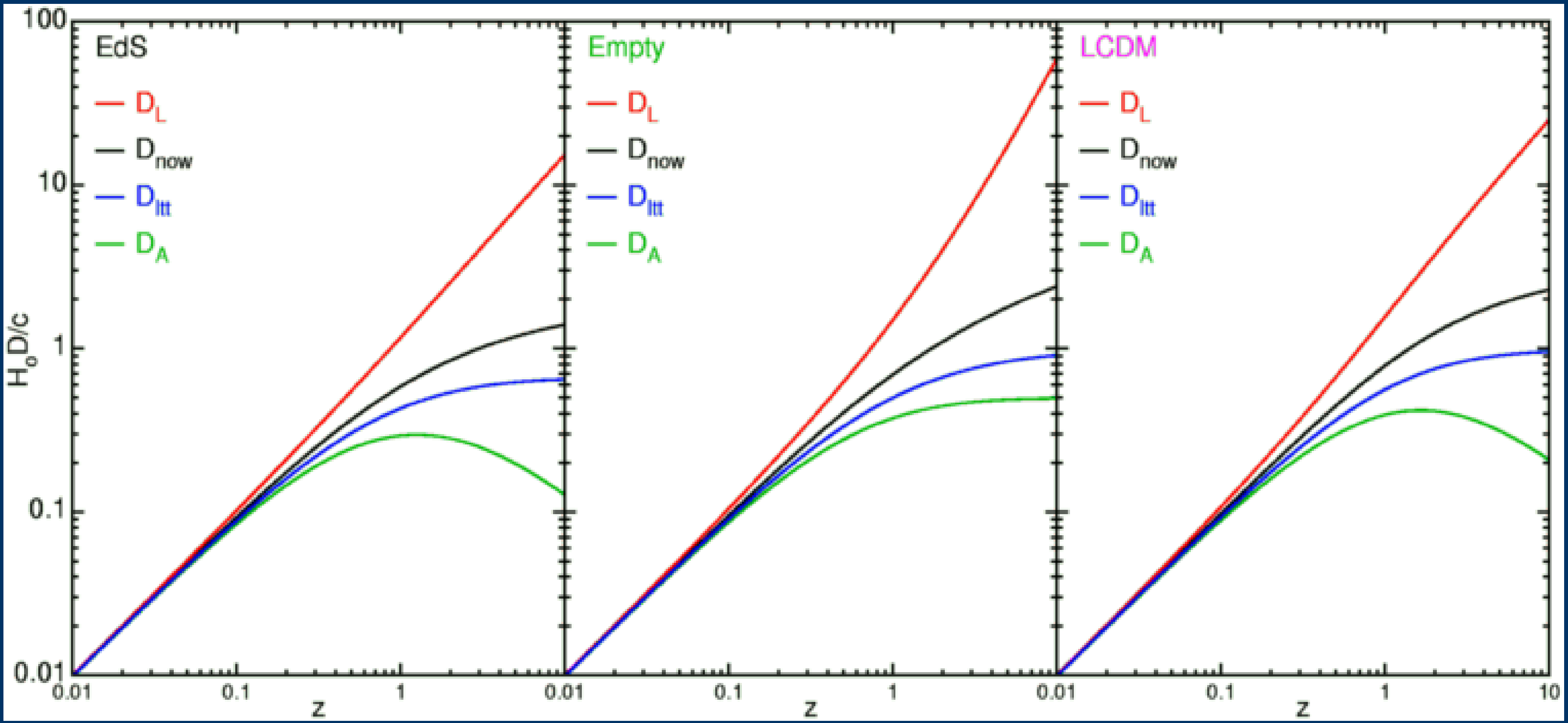
$T_{obs} = T_{em}/(1+z)$ Et le flux est :

$F = \theta^2 * \sigma * T_{obs}^{\ 4}$,où le rayon angulaire est lié au rayon physique par: $\theta = R/D_A$ En combinant ces équations on obtient:

$$D_L^{\ 2} = L/(4\pi F) = (4\pi R^2 \sigma T_{em}^{\ 4})/(4*\pi*\theta^2*\sigma*T_{obs}^{\ 4}) = D_A^{\ 2}*(1+z)^4 \quad \text{soit} \quad D_L = D_A*(1+z)^2$$

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.

Distances = f(z) pour 3 modèles



A gauche le modèle Einstein De Sitter dominé par la matière, au centre le modèle vide, à droite ΛCDM 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

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 $(1+H*dt)$ 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 $D(t) = a(t)\ D_o$. Cette distance et la vitesse correspondante dD/dt sont mesurées par rapport à nous, en nous considérant au centre du système de coordonnées.

Facteur d'échelle a(t)

L'accélération gravitationnelle due à la boule de matière de rayon $D(t)$ est $g = -G*M/D(t)^2$ où la masse est $M = 4*\pi*D(t)^3*\rho(t)/3$. La densité de matière est ρ(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 à une vitesse expansion inférieure et reste donc à l'intérieur et celle à l'extérieur 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.

Facteur d'échelle a(t)

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

$$v = H*D = v(lib) = (2*G*M/D)^{1/2}$$

$H^2*D^2 = 2*(4\pi/3)\rho D^2$ ou

$$\rho(crit) = 3*H^2/(8\pi G)$$

Pour ρ inférieur ou égal à la densité critique $\rho(crit)$, l'Univers s'étend à jamais, tandis que pour ρ supérieur à $\rho(crit)$, l'Univers arrête son expansion et se re-contracte

Facteur d'échelle a(t)

La valeur de *ρ(crit)* pour H_o = *71 km/sec/Mpc* est de $9*10^{-30}$ *gm/cc* soit 6 protons par mètre cube soit $1.4*10^{11}$ masses solaires par Mégaparsec cube.

Cette dernière valeur doit être comparée à la luminosité observée de $1.85*10^{8}$ luminosités solaires par Mpc^3, ce qui exige 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], 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]

Ci joint un calculateur Javascript (Javascript calculator) qui à partir de Ho, OmegaM, la constante cosmologique normalisée (cosmological constant lambda) et le décalage spectral z calcule toutes ces distances.