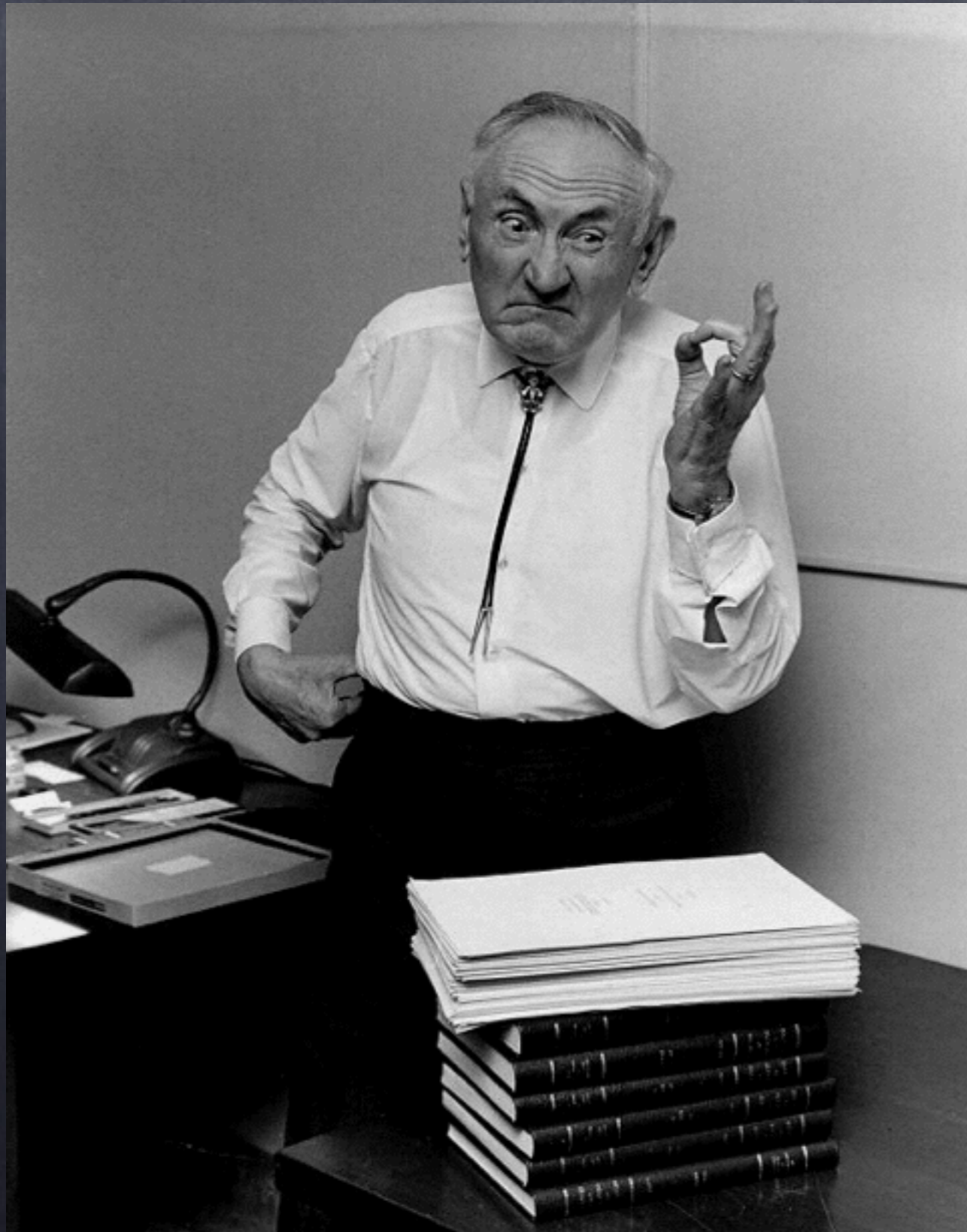


La matière noire

Zwicky 1935, amas Coma

la gravité des étoiles ne suffit pas à contenir les amas (galaxies = 10% de la masse totale de l'amas)

à cette époque : la cosmologie est récente, les amas sont tout juste découverts, la communauté n'est pas prête à accepter cette notion de matière noire



La matière noire

À différentes échelles

dans notre galaxie
dans les autres galaxies
dans les amas de galaxies
et à des échelles cosmologiques

La matière noire

à partir du rapport M/L

quantifier la matière noire dans une zone limitée d'une galaxie : on utilise le rapport masse sur luminosité qui vaut, par définition 1 pour le Soleil

la présence de matière noire (non lumineuse) se traduit donc par un rapport M/L qui augmente avec la taille de la région considérée

pour une population d'étoiles dans notre voisinage : $M/L = 3$
(peu d'étoiles massives et L est en $M^{3.6}$)

La matière noire

à partir du rapport M/L

la partie lumineuse des galaxies donne $M/L=4$

dans leur ensemble M/L est de 30 à 50

les amas ont un M/L entre 100 et 200

pour l'univers on trouve M/L proche de 500

La matière noire

champs de vitesse

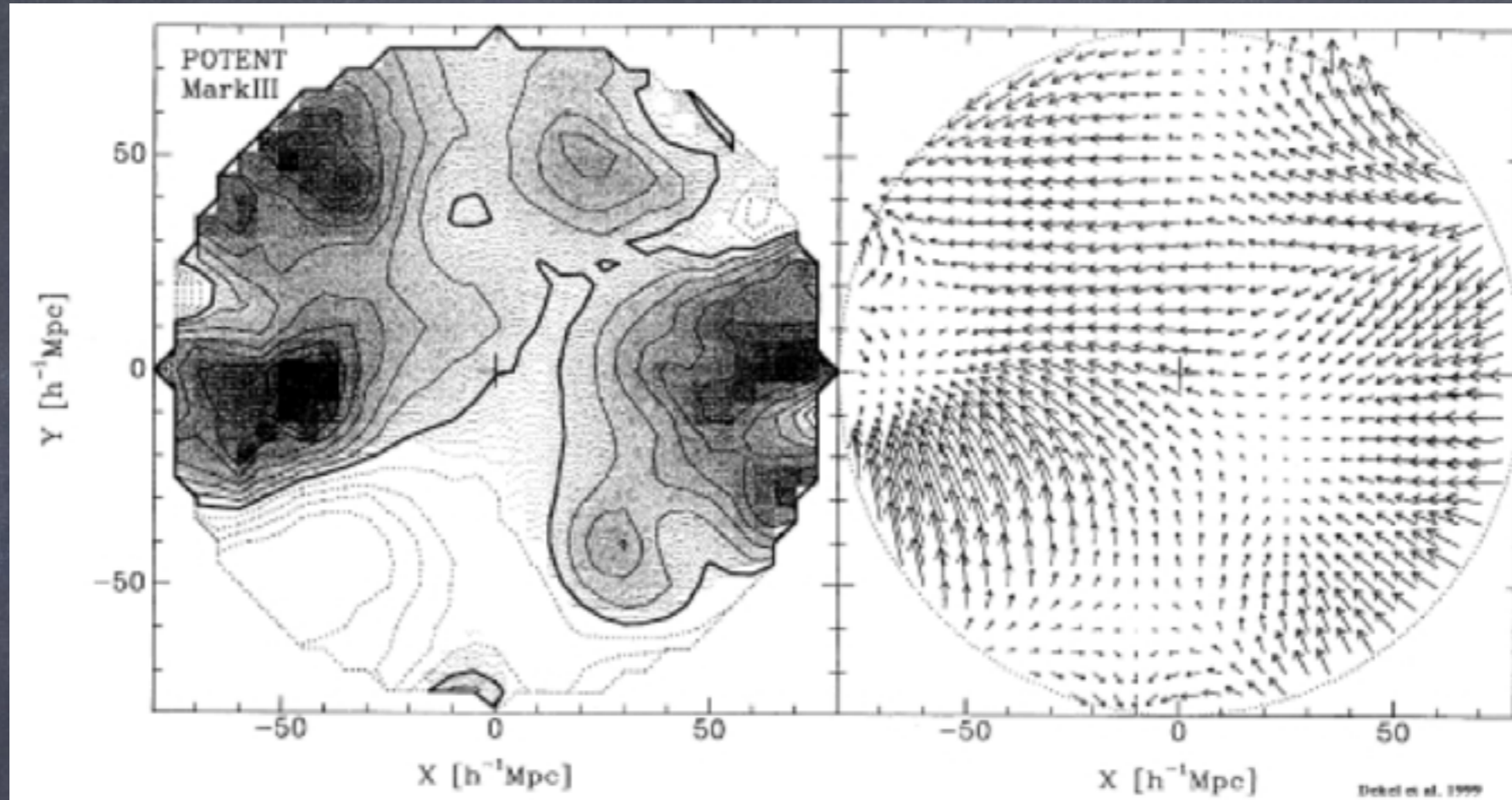
la mesure des vitesses individuelles des galaxies ou des amas sur de grandes échelles (100 Mpc) permet de remonter au potentiel gravitationnel

mais il faut connaître leur distance indépendamment de la mesure de leur redshift (on peut y arriver avec des relations de type Tully-Fisher ou avec les supernovae)

notre Groupe Local tombe à 600 km/s vers l'amas Virgo (à 20 Mpc) qui tombe lui vers Le Grand Attracteur (Abell3627) à 50 Mpc ; d'ailleurs la matière située en arrière-plan d'Abell3627 tombe aussi vers le Grand Attracteur

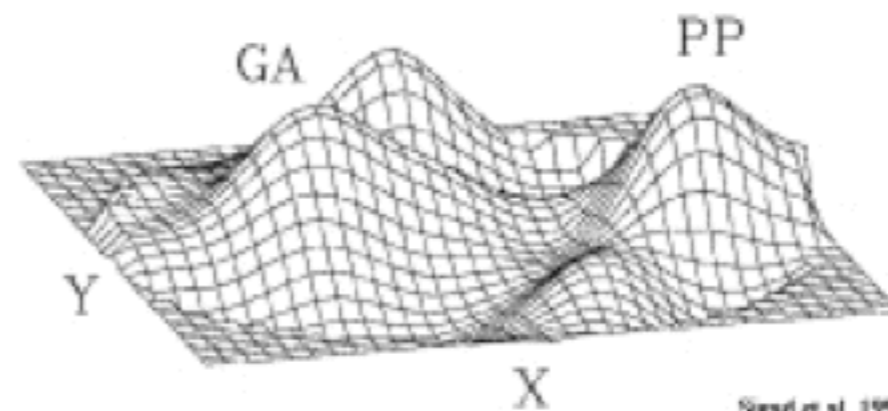
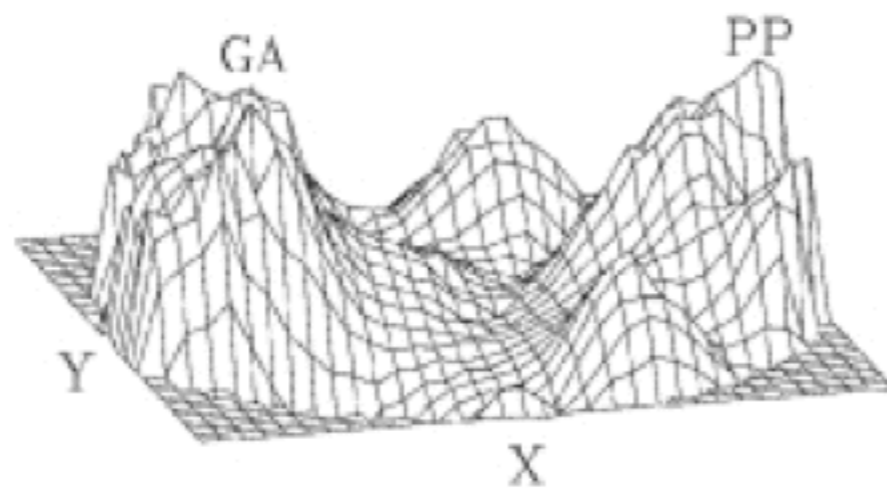
La matière noire

champs de vitesse



POTENT

IRAS



Sigal et al. 1998

La matière noire

courbes de rotation

les étoiles d'une galaxie tournent autour du
centre galactique

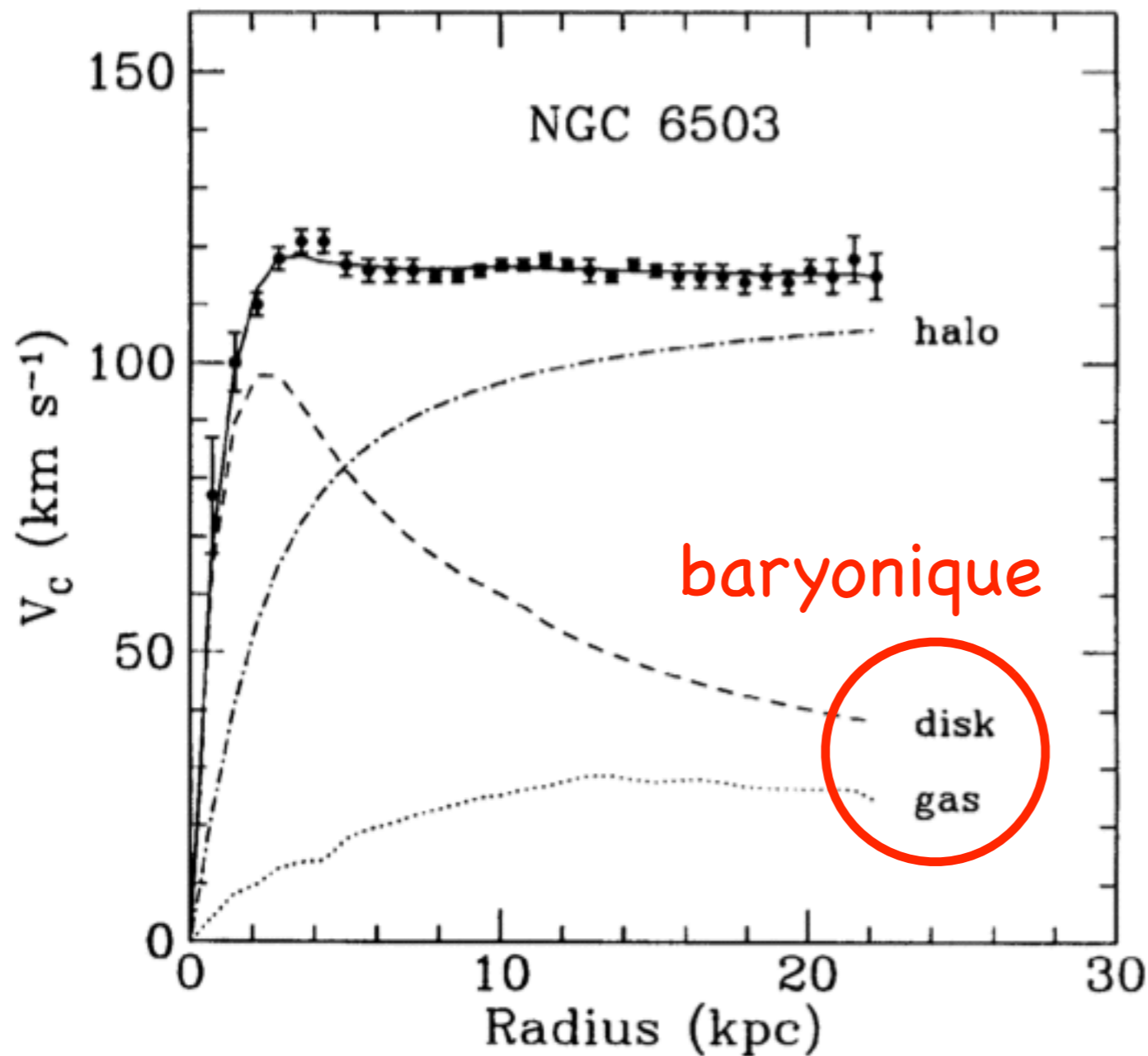
typiquement : 10^9 étoiles dans un disque d'une dizaine de
kpc de rayon, quelques centaines de pc d'épaisseur, et
composée d'un bulbe central.

équilibre dynamique assuré par la rotation du disque

la luminosité décroît exponentiellement à partir du
centre et à partir du plan du disque

La matière noire

amas de galaxies : masse viriel / masse visible = 100 !
(vitesse des galaxies entre elles)

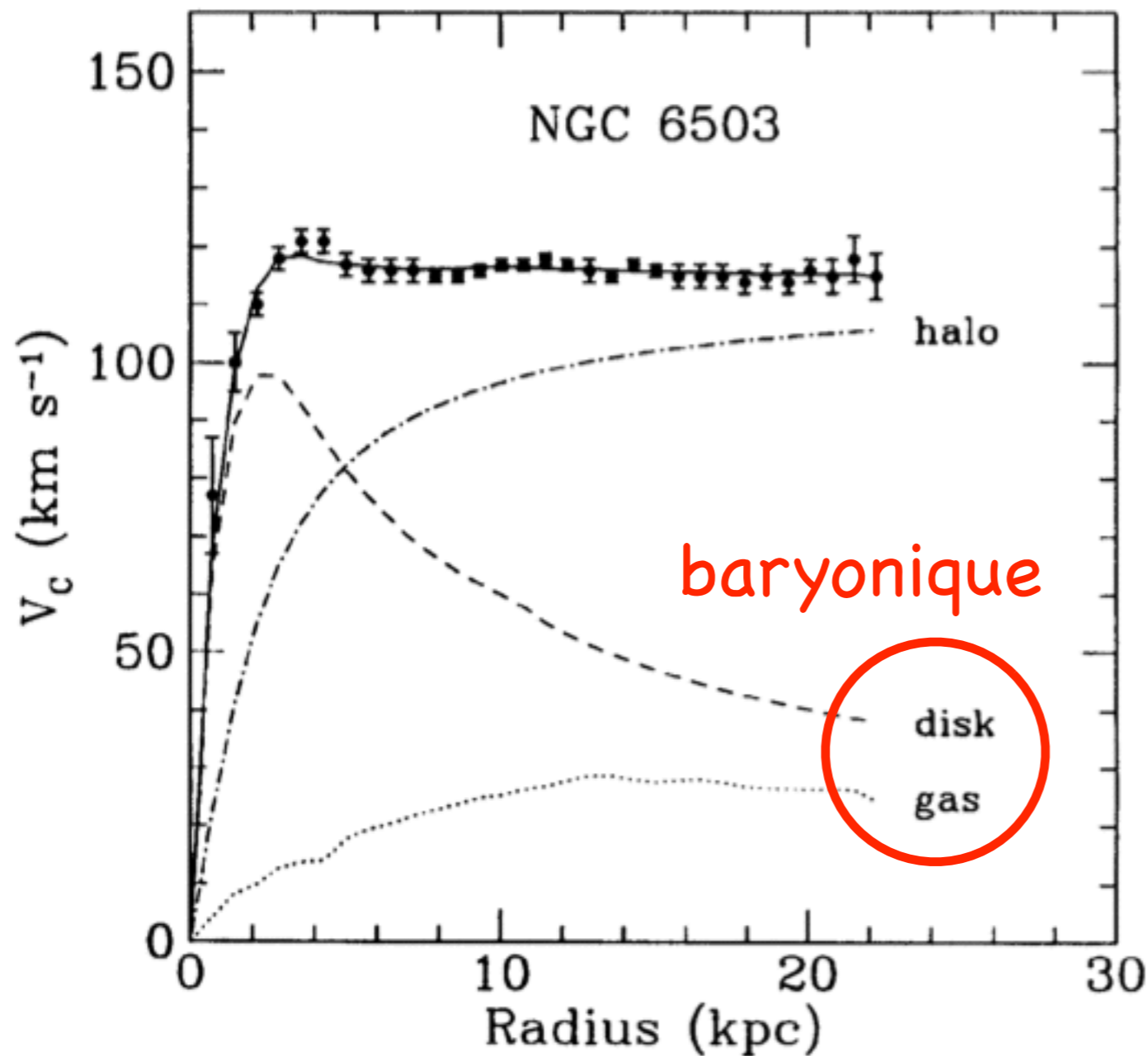


courbe de rotation des galaxies : la vitesse reste grande bien au-delà de la masse visible (non-Képlérien)

la partie lumineuse n'est pas un bon traceur de la masse

La matière noire

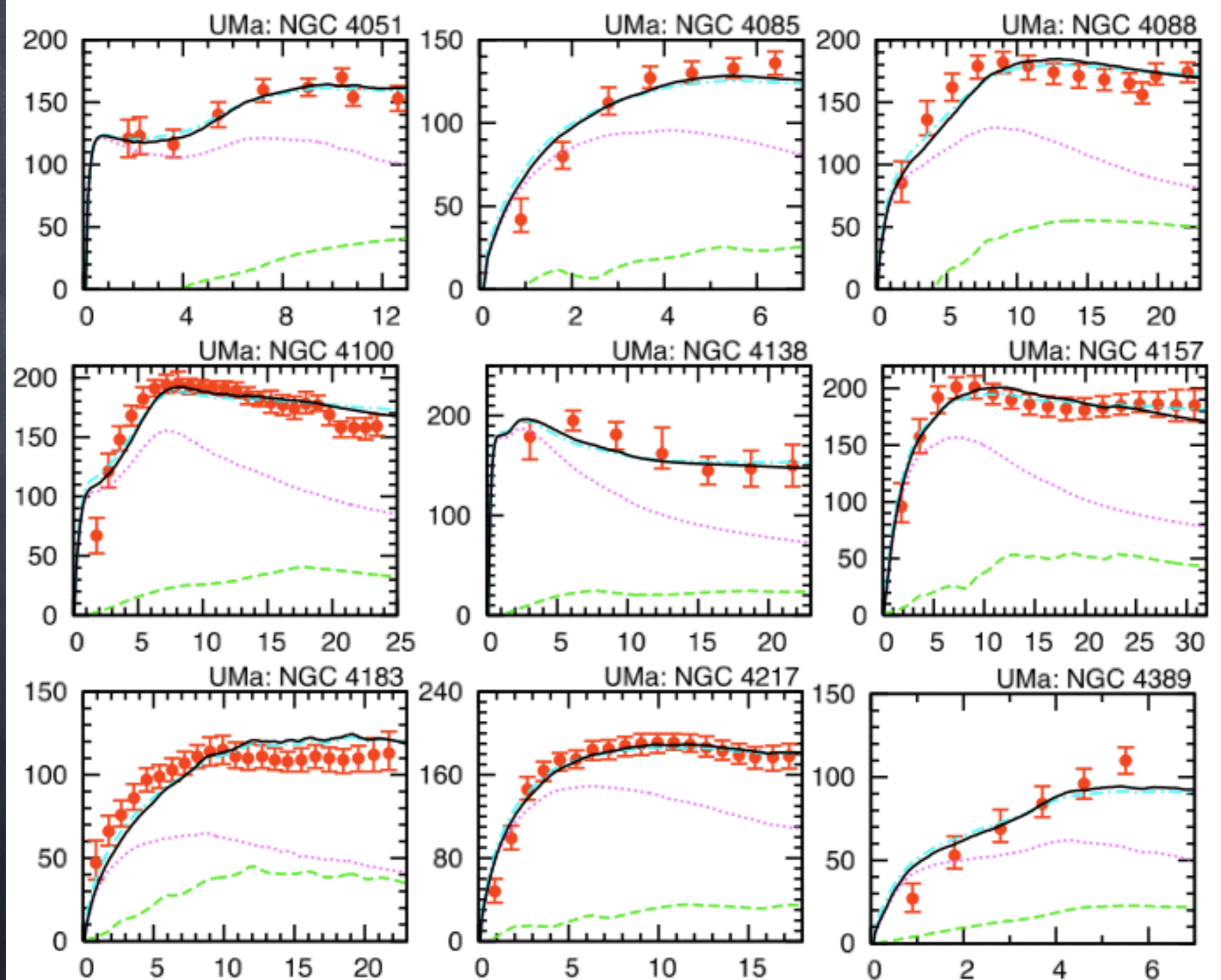
95% de la masse des galaxies serait de la matière noire (non-lumineuse)



mesures : limitées à quelques dizaines de kpc, tant qu'il existe de l'H (raie à 21 cm) : on ne peut pas sonder la DM sur des échelles plus grandes (pas cet inconvénient avec le lensing qui peut sonder jusqu'à 200 kpc)

La matière noire

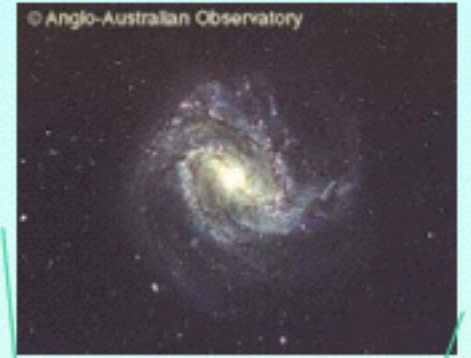
Brownstein & Moffat, *astro-ph/0506370v4*



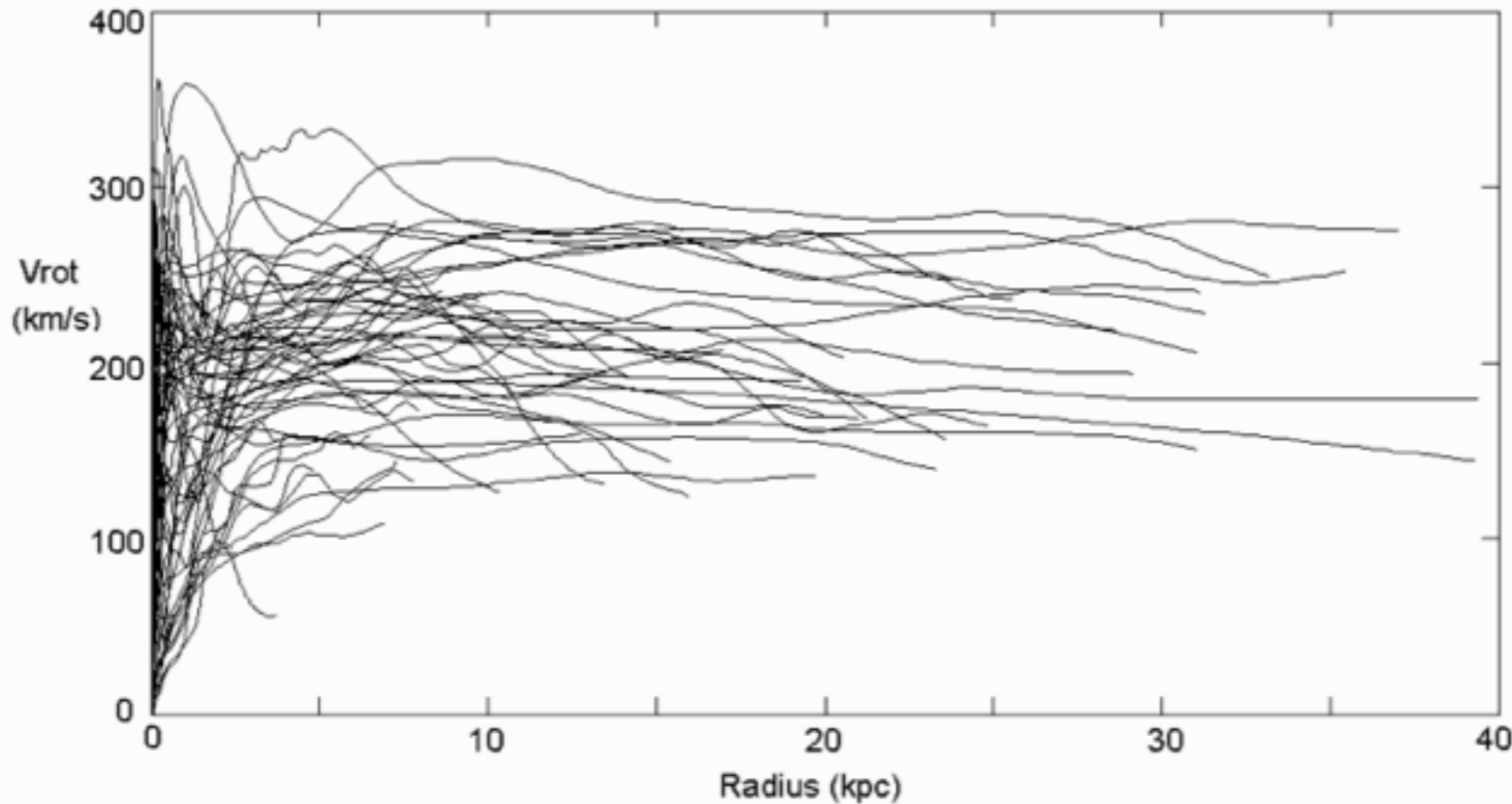
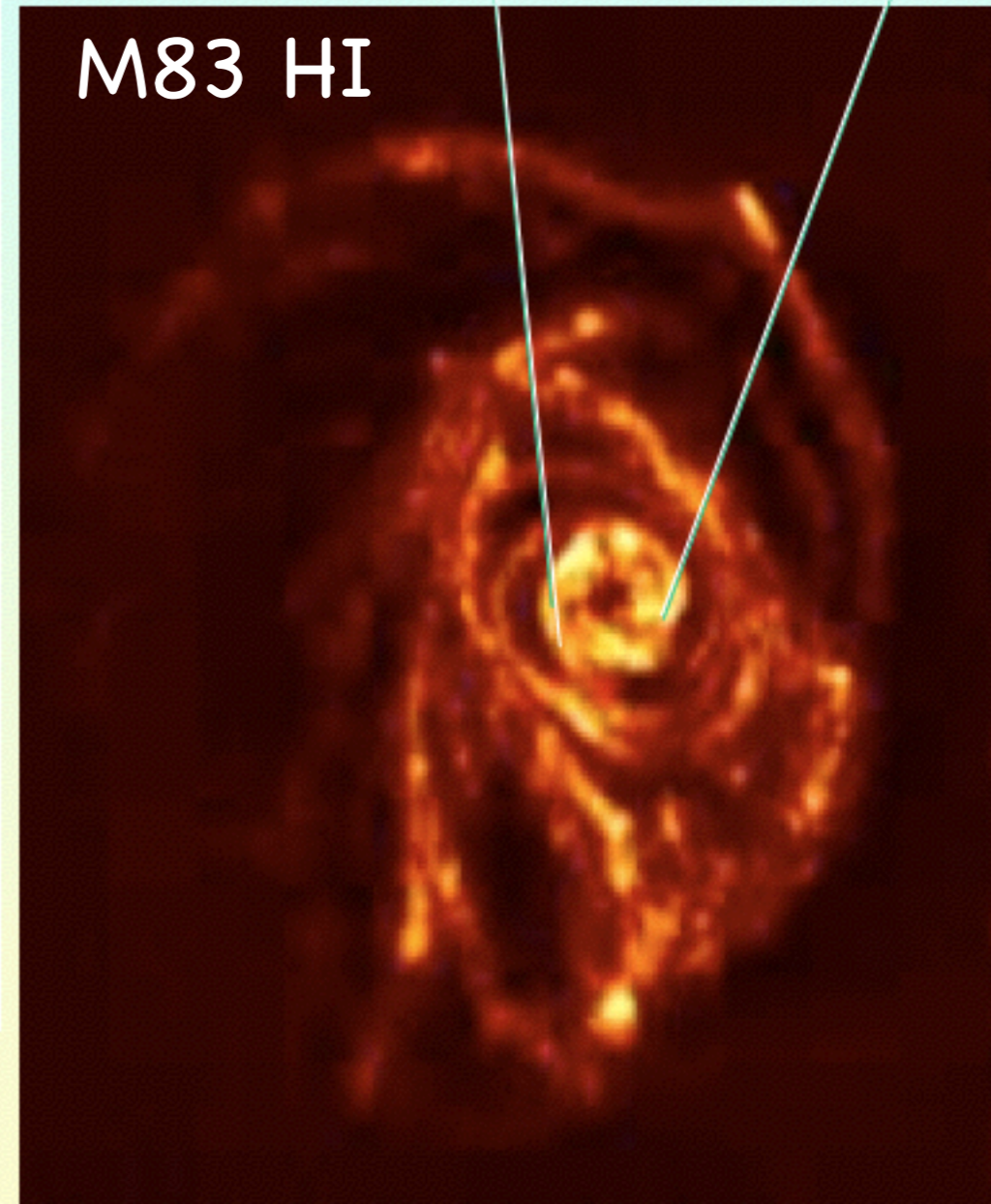
La matière noire

Raie à 21 cm de l'hydrogène

M83 visible



M83 HI

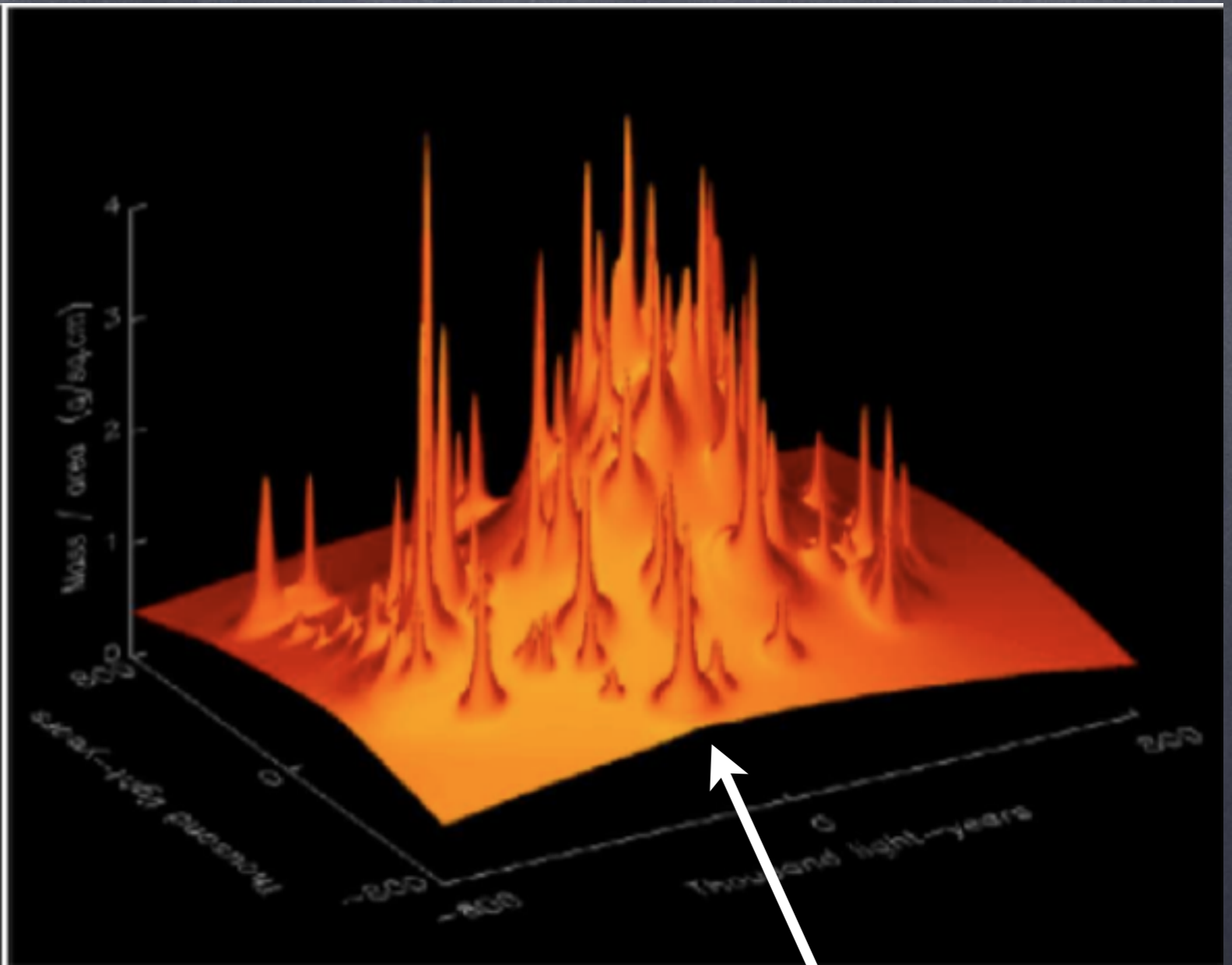


HI est distribué sur des distances bien plus grandes que la partie visible seule

(figures : F. Combes)

La matière noire

le lensing



galaxie unique en
arrière-plan (z plus
grand que l'amas)

amas de galaxies en
avant-plan

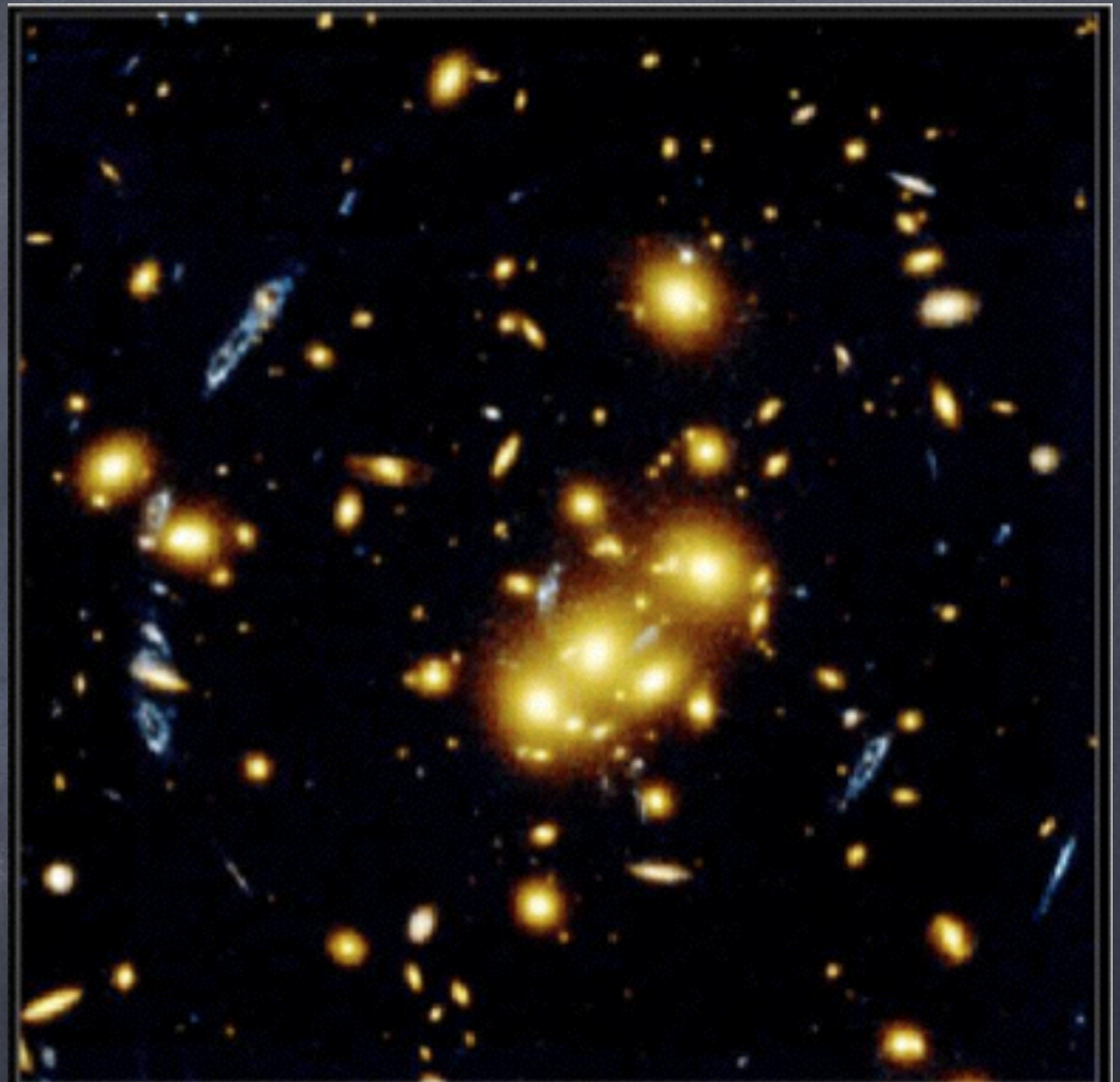
reconstruction du profil
de masse de l'amas (il
y a un fond uniforme)

La matière noire

le lensing

l'étude de la répartition, de l'orientation et l'intensité des distorsions permet de reconstituer précisément la distribution de masse dans l'amas et donc la masse totale (bien plus élevée que la partie lumineuse de l'amas)

en accord avec les estimations basées sur l'émission X des amas !



Gravitational Lens
Galaxy Cluster 0024+1654
Hubble Space Telescope - WFPC2



La matière noire

le lensing

Massey et al 2007



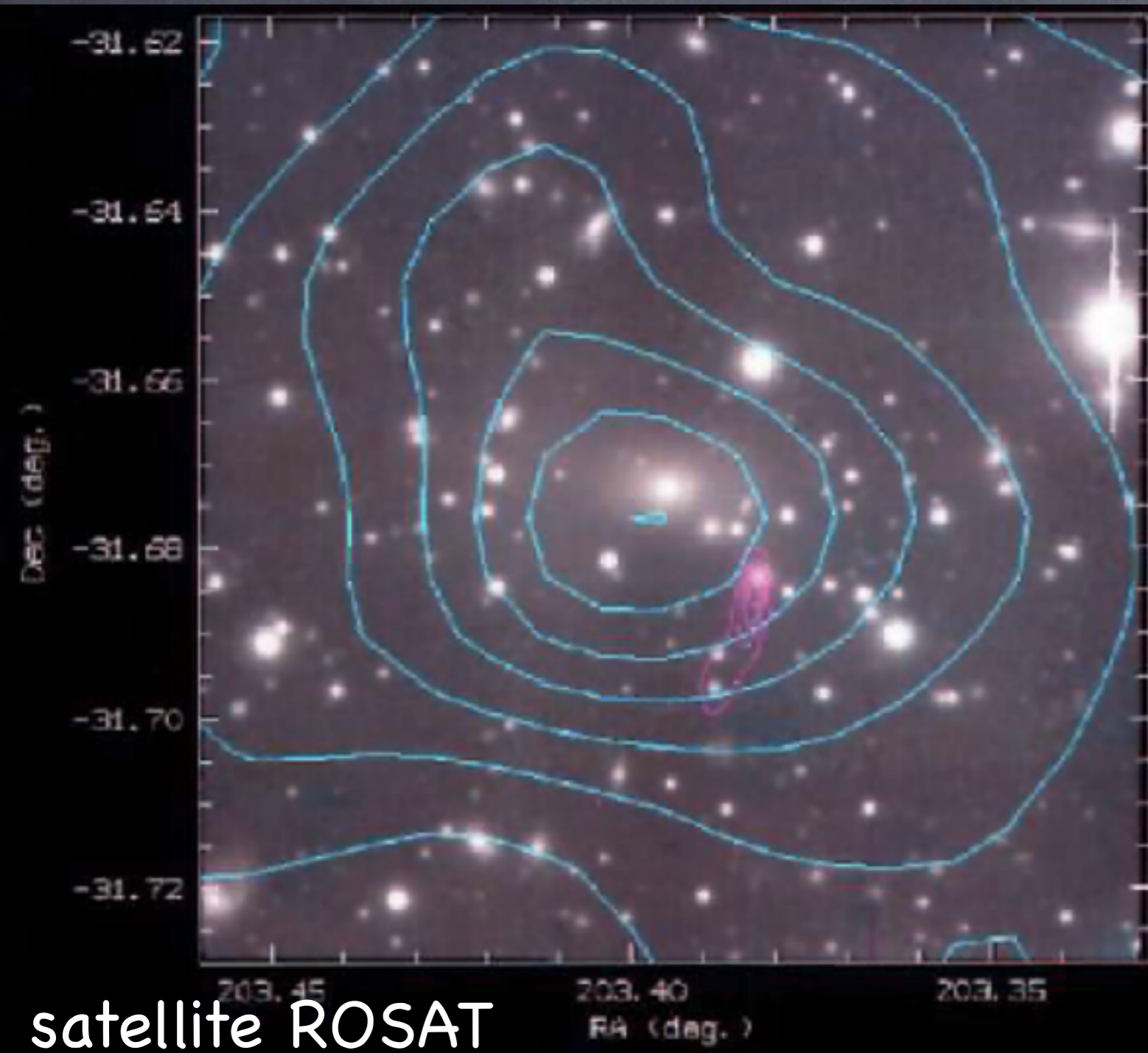
distorsions de 500 000 galaxies

La matière noire

gaz chaud dans les amas (ici amas Abell 3562)

$$T_{\text{gaz}} = 10^6 \text{ K} : \text{RX}$$

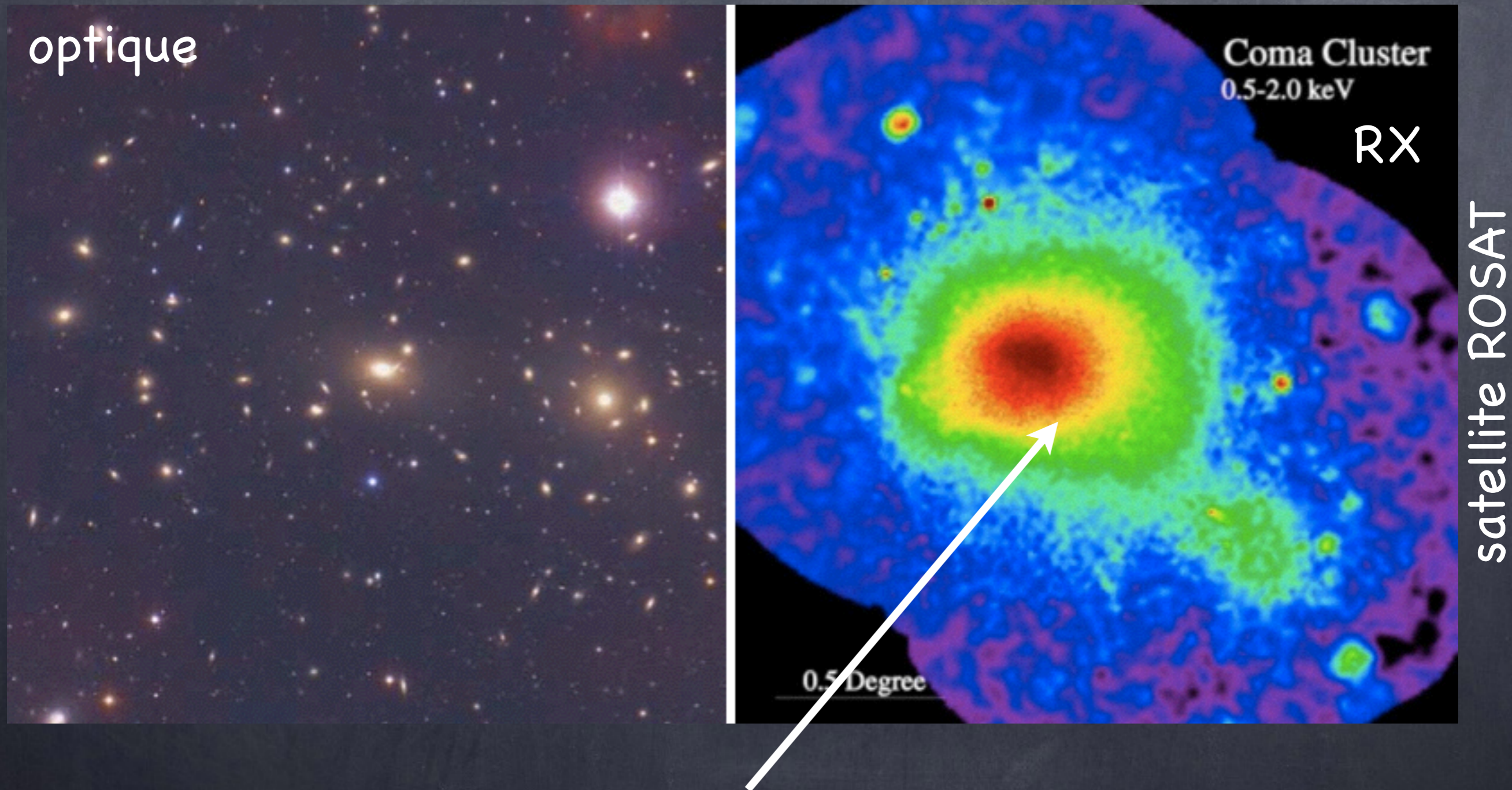
I_X : dépend du profil de température (mesuré par le spectre en X) et du profil de densité du gaz
estimation du profil de densité de l'amas et de celui du gaz et donc estimation de la masse totale et de la quantité de gaz intergalactique
mêmes profils pour densité totale, densité de gaz et densité de matière lumineuse : tout est en équilibre dans le même potentiel



$M/L(1 \text{ Mpc})=400-500h$, étoiles et H1=3% M_{tot} , gaz chaud=14% M_{tot}

La matière noire

gaz chaud dans les amas (ici amas Coma)



existence d'un gaz chaud dans l'amas, possible seulement avec de la DM qui lui fournit un puit de potentiel important empêchant son évaporation

La matière noire

indication directe de son existence dans l'amas bullet

amas bullet = fusion de 2 amas

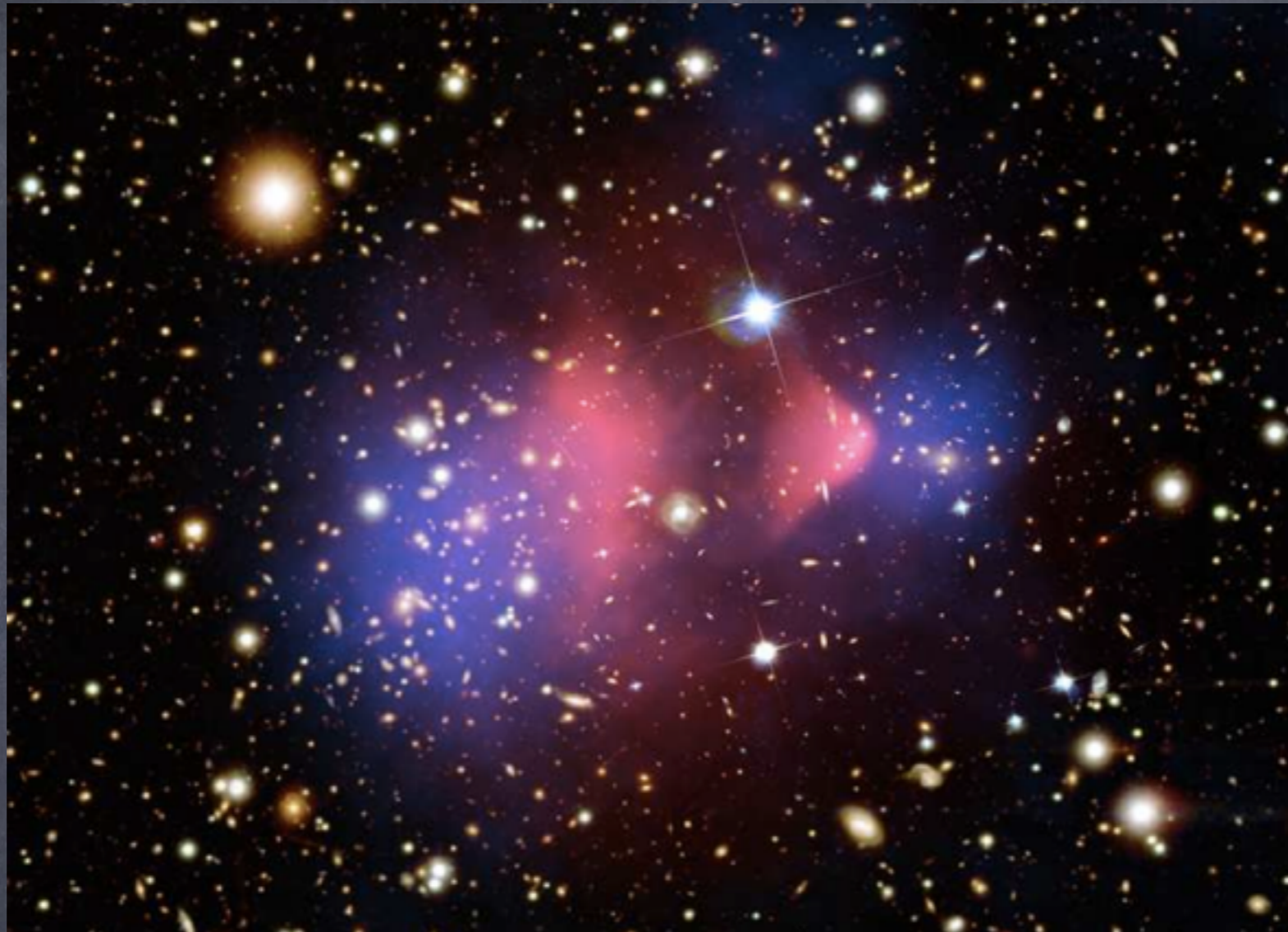
la matière se comporte différemment lors de la collision selon sa nature

les étoiles se croisent sans grande perturbation

le gaz chaud (qui représente la plus grande partie de la matière ordinaire, baryonique) interagit fortement (plasma, électromagnétisme) et va se trouver très fortement ralenti

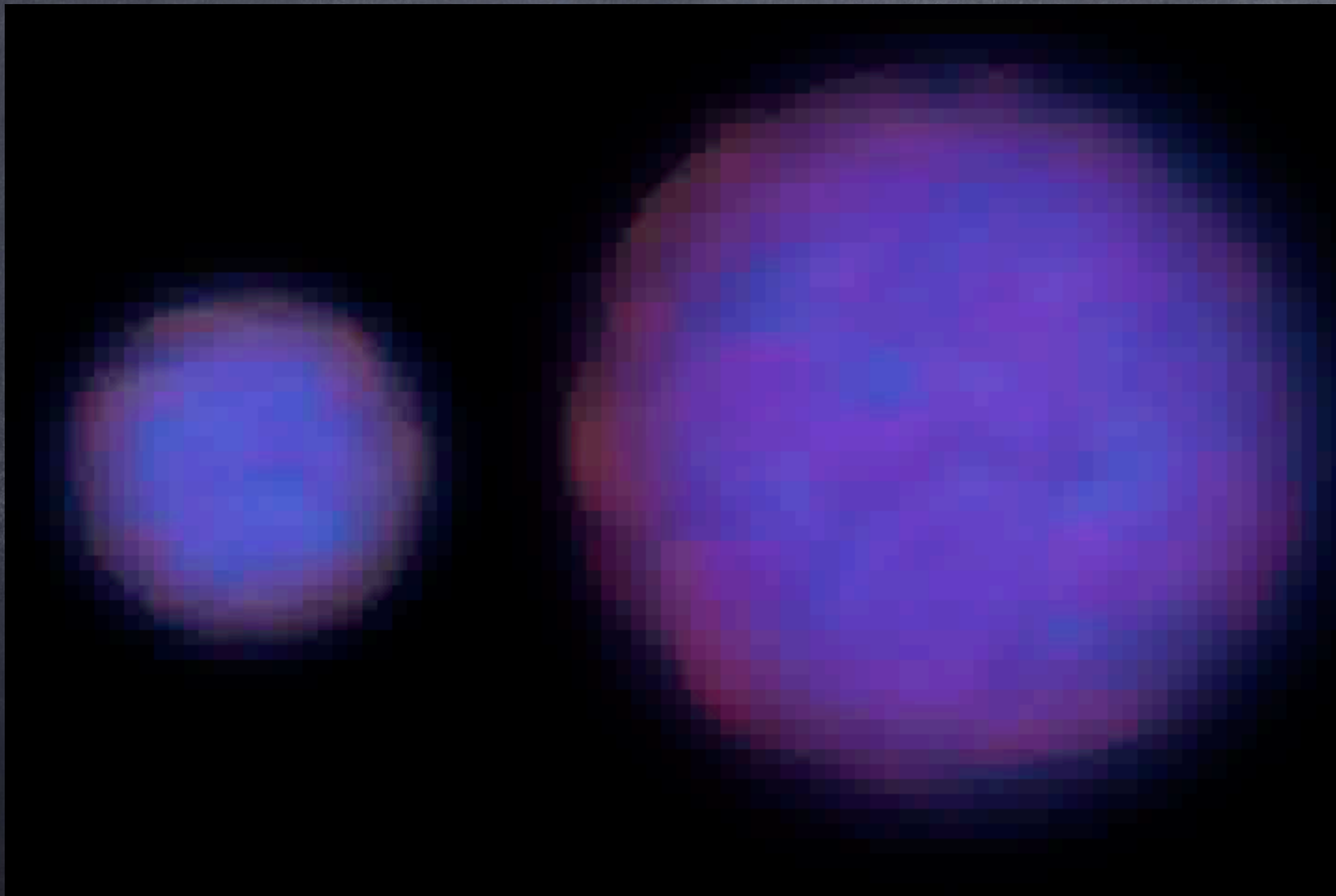
la matière noire se détecte par effet de lensing sur des objets situés en arrière-plan

La matière noire

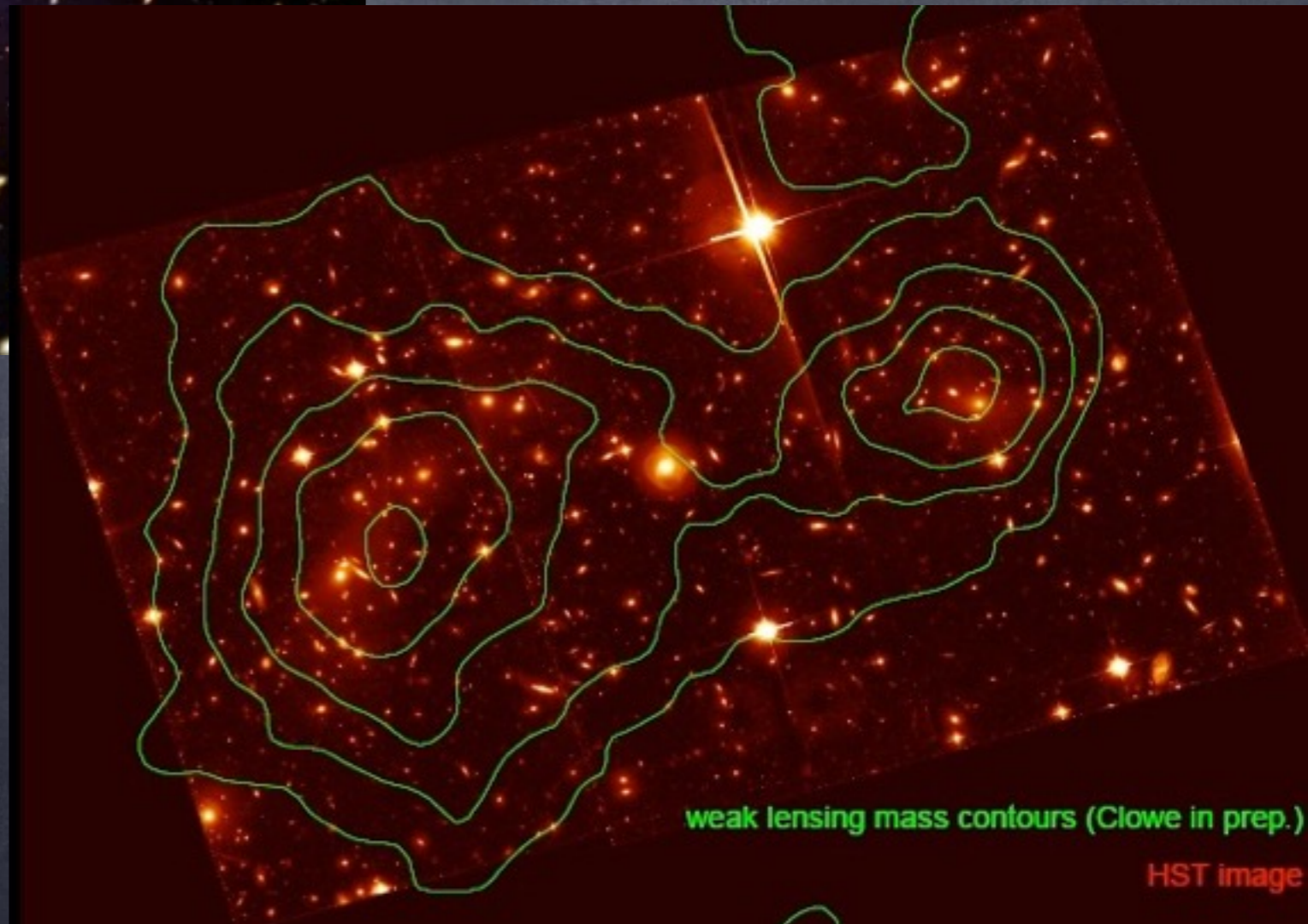


dans des modèles sans matière noire (comme celle de gravitation modifiée) le lensing doit suivre la distribution du gaz (la masse) or le lensing dans cet amas est plus fort dans 2 régions situées de part et d'autre du centre du nouvel amas (rose = matière baryonique, bleu = matière noire)

La matière noire



La matière noire



contours de masse (obtenus à partir du lensing)

weak lensing mass contours (Clowe in prep.)

HST image

La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

univers en expansion : la croissance d'une fluctuation de densité est linéaire et non exponentielle

$$\delta = \frac{\delta\rho}{\rho} \propto a(t) \propto \frac{1}{1+z}$$

Aujourd'hui, sur des échelles de 1 Mpc, on **mesure** $\delta(t_0) \sim 1$

Les baryons peuvent s'effondrer à partir de $z_{\text{dec}}=1000$

donc $\delta(t_{\text{dec}}) \sim 10^{-3}$ nécessaire !

or $\delta(t_{\text{dec}}) \sim 10^{-5}$ insuffisant mais observé !

La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

donc $\delta(t_{\text{dec}}) \sim 10^{-3}$ nécessaire !

or $\delta(t_{\text{dec}}) \sim 10^{-5}$ insuffisant mais observé !

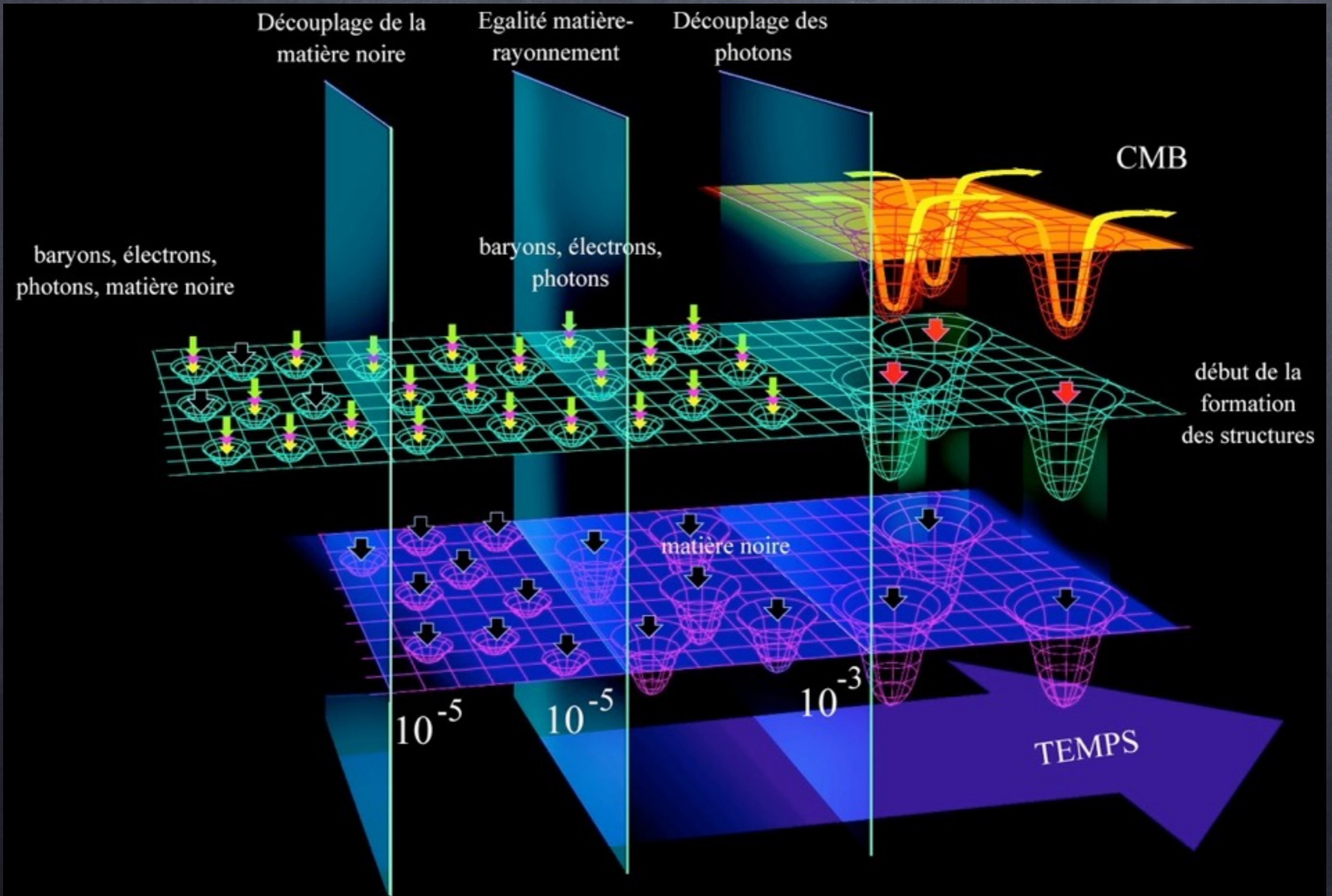
un mécanisme a dû permettre aux baryons (les futures galaxies) de s'effondrer à partir d'amplitudes de l'ordre de 10^{-3} très peu de temps après le découplage pour atteindre une amplitude de 1 aujourd'hui

candidat :

une matière **non-baryonique** n'ayant que des interactions gravitationnelles et donc ayant pu commencer à **s'effondrer dès z_{eq}**

La matière noire

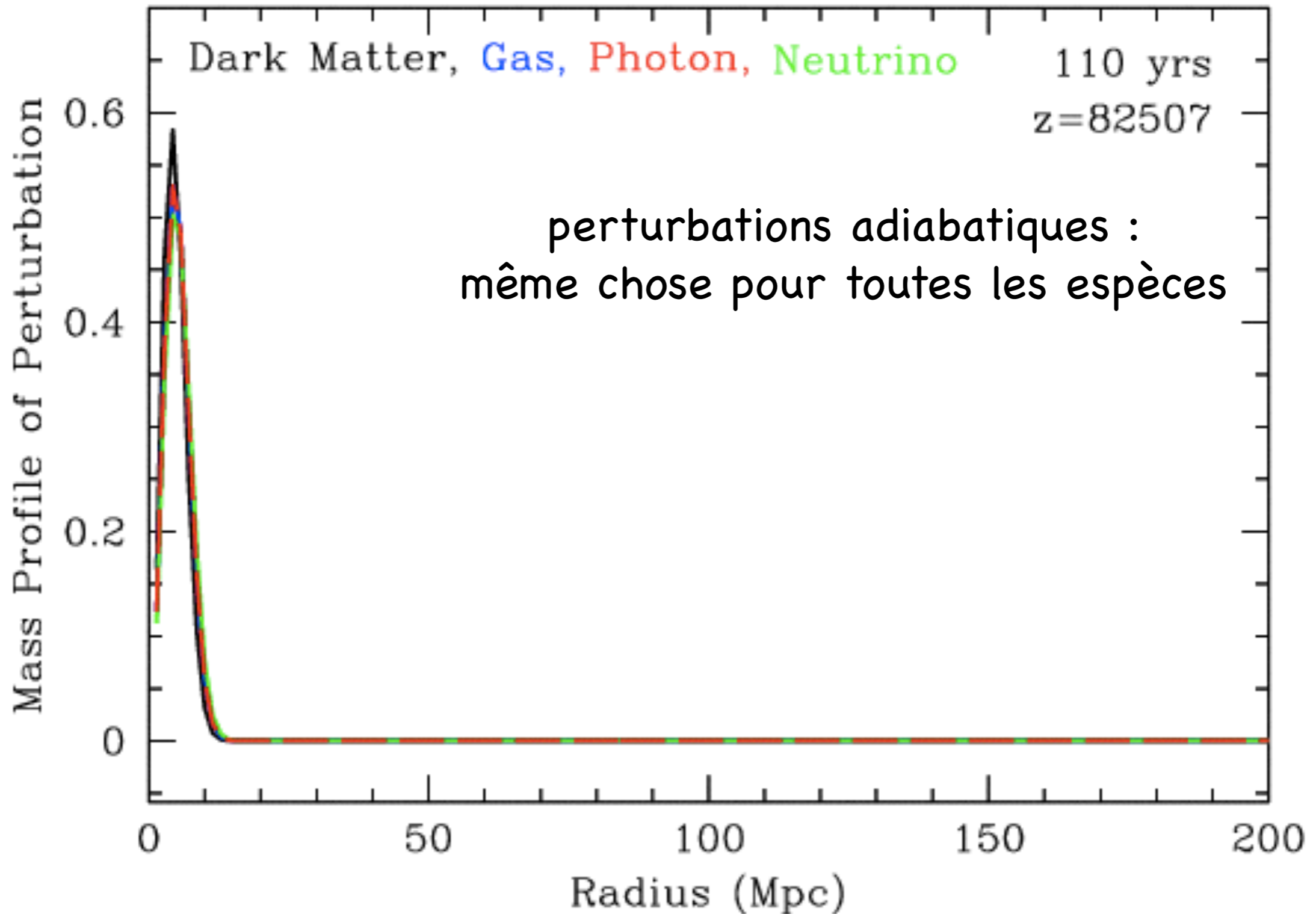
formation des structures (galaxies etc...)



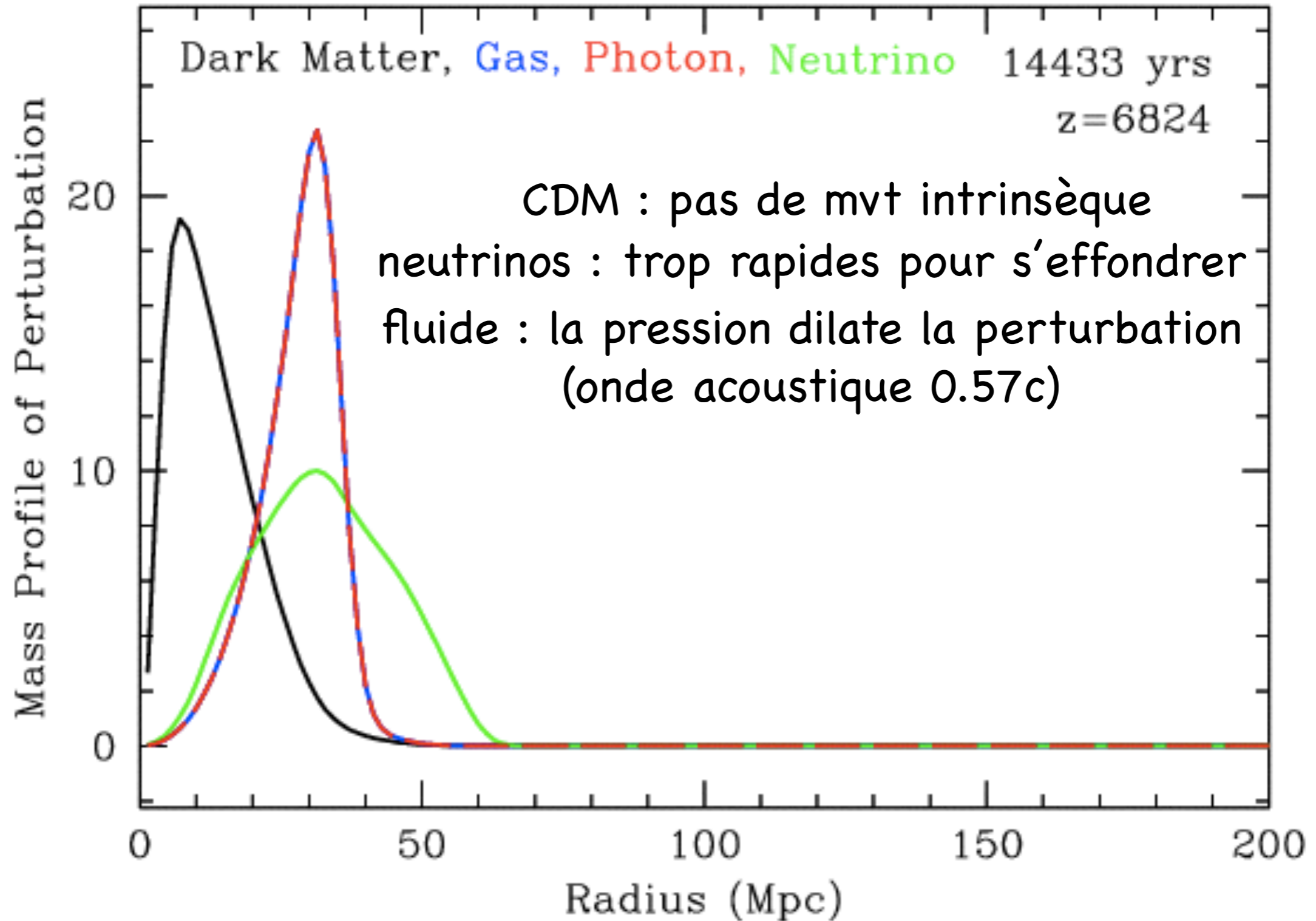
La matière noire

évolution d'une surdensité

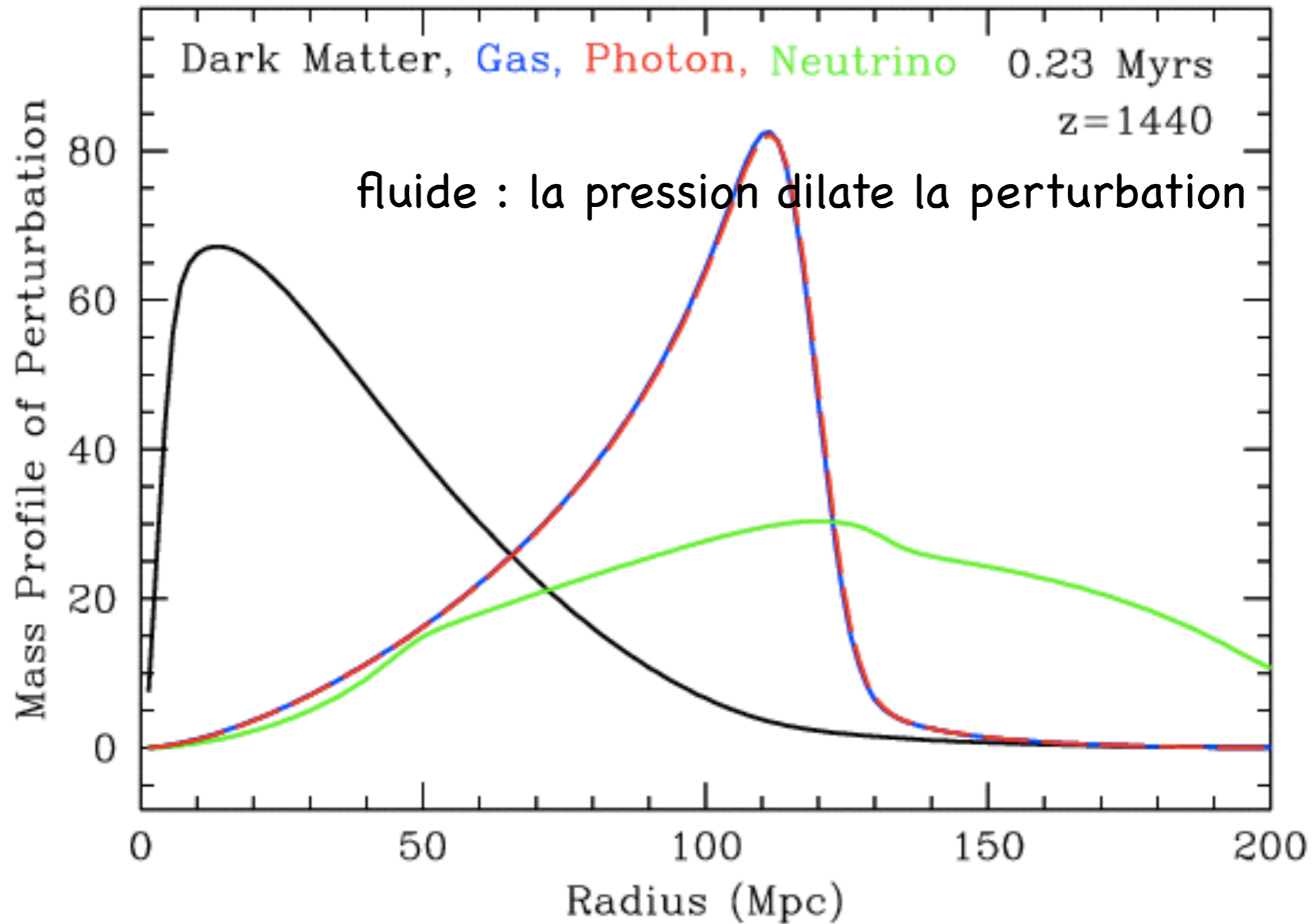
(Eisenstein 2005)



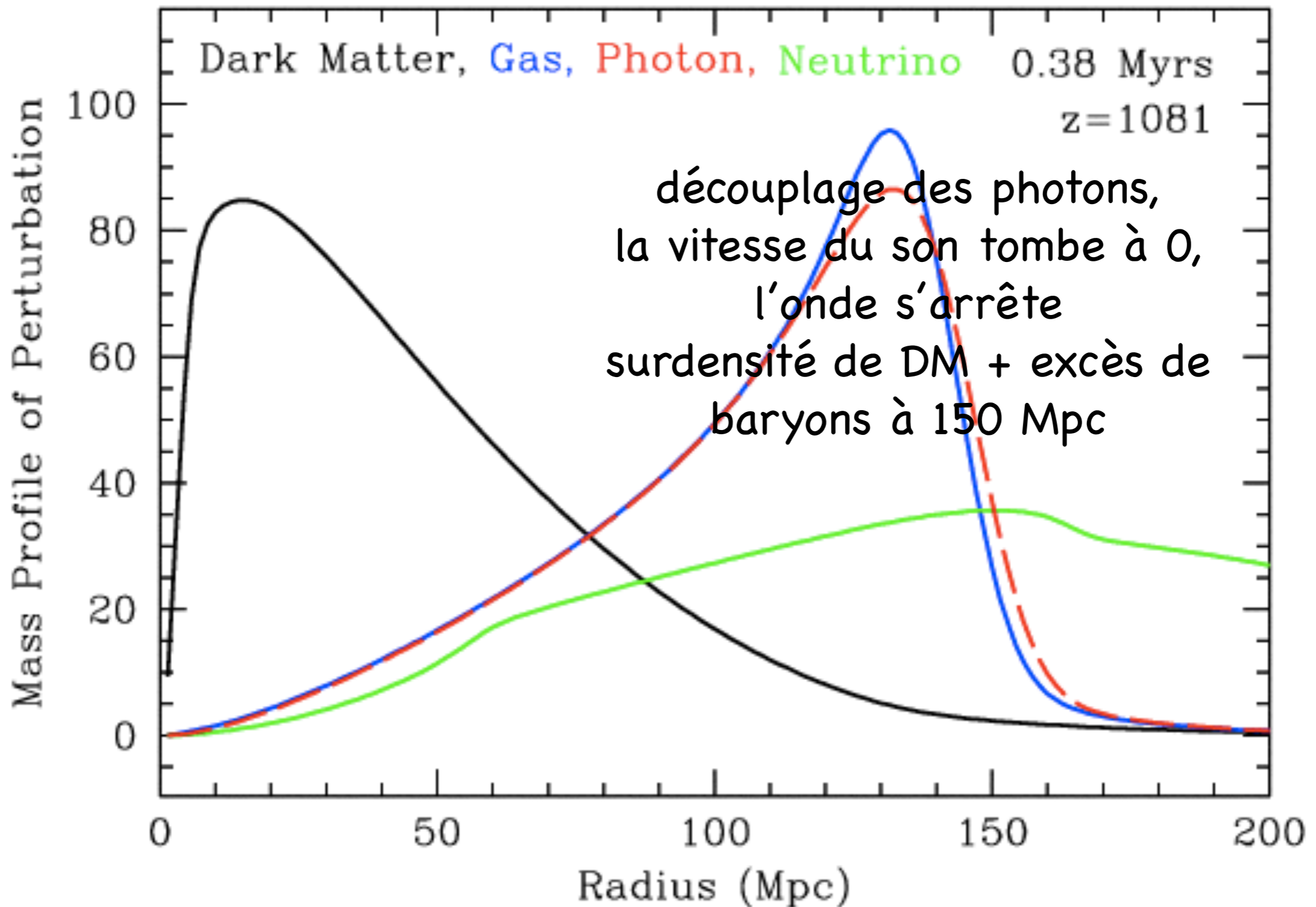
La matière noire



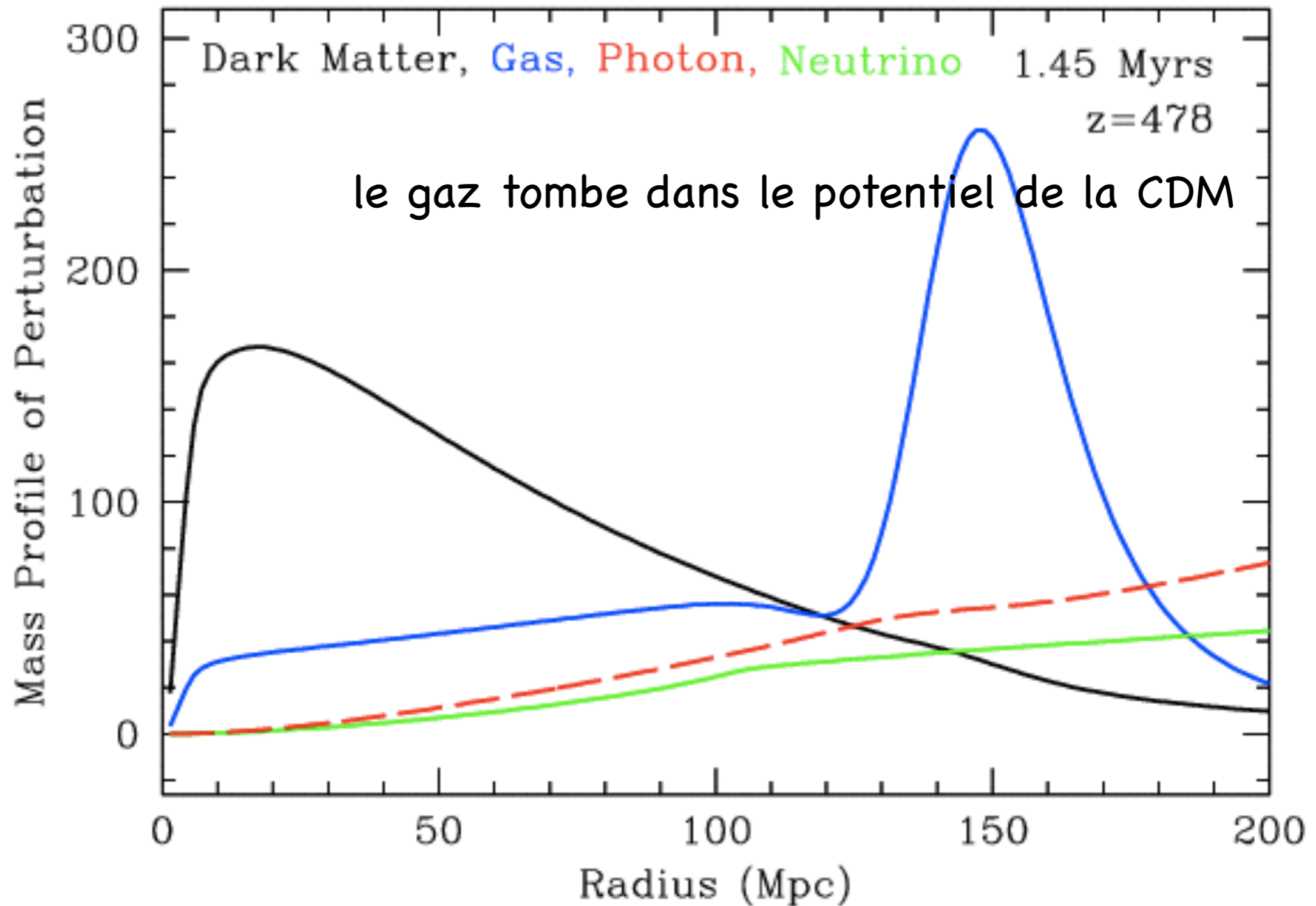
La matière noire



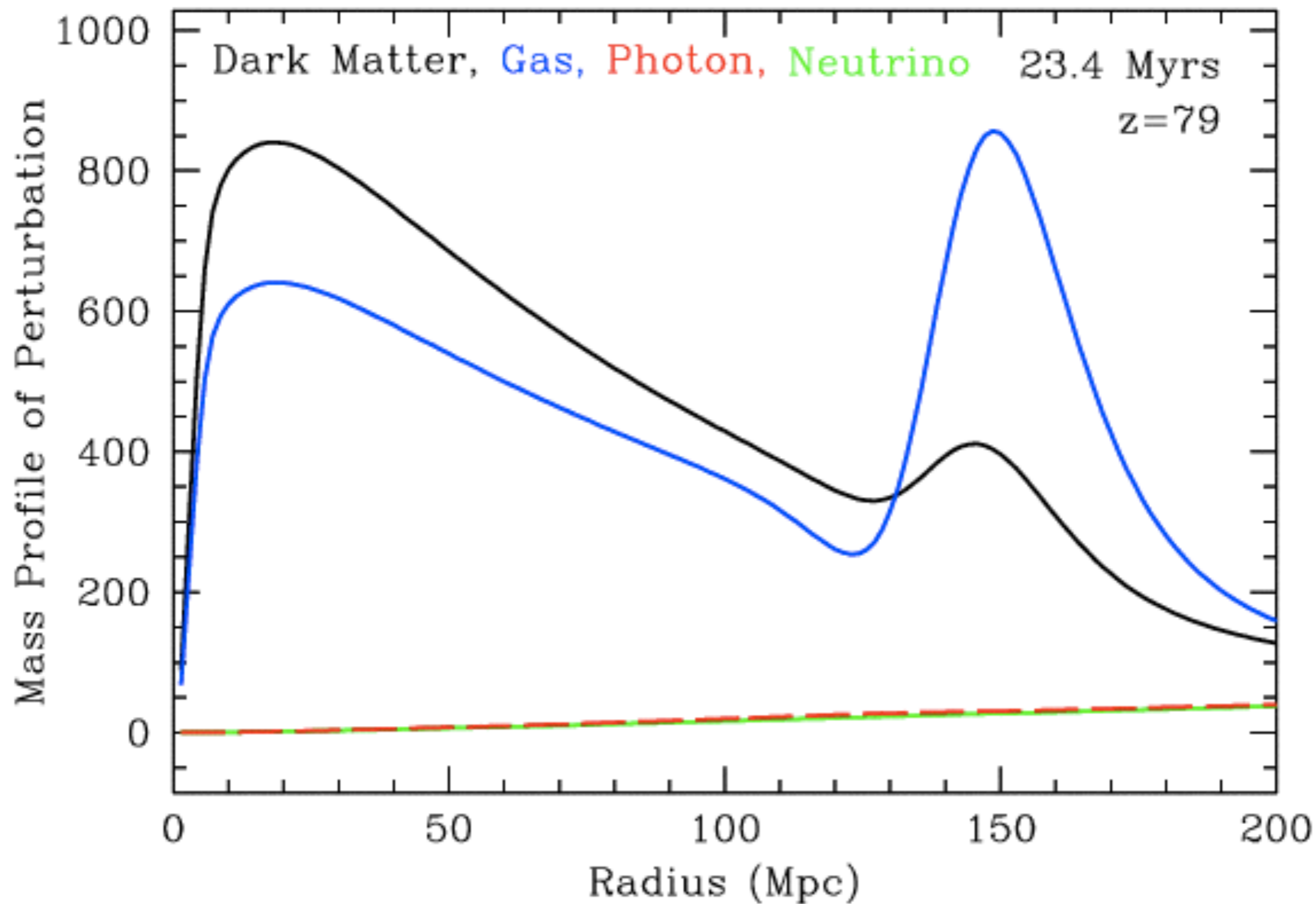
La matière noire



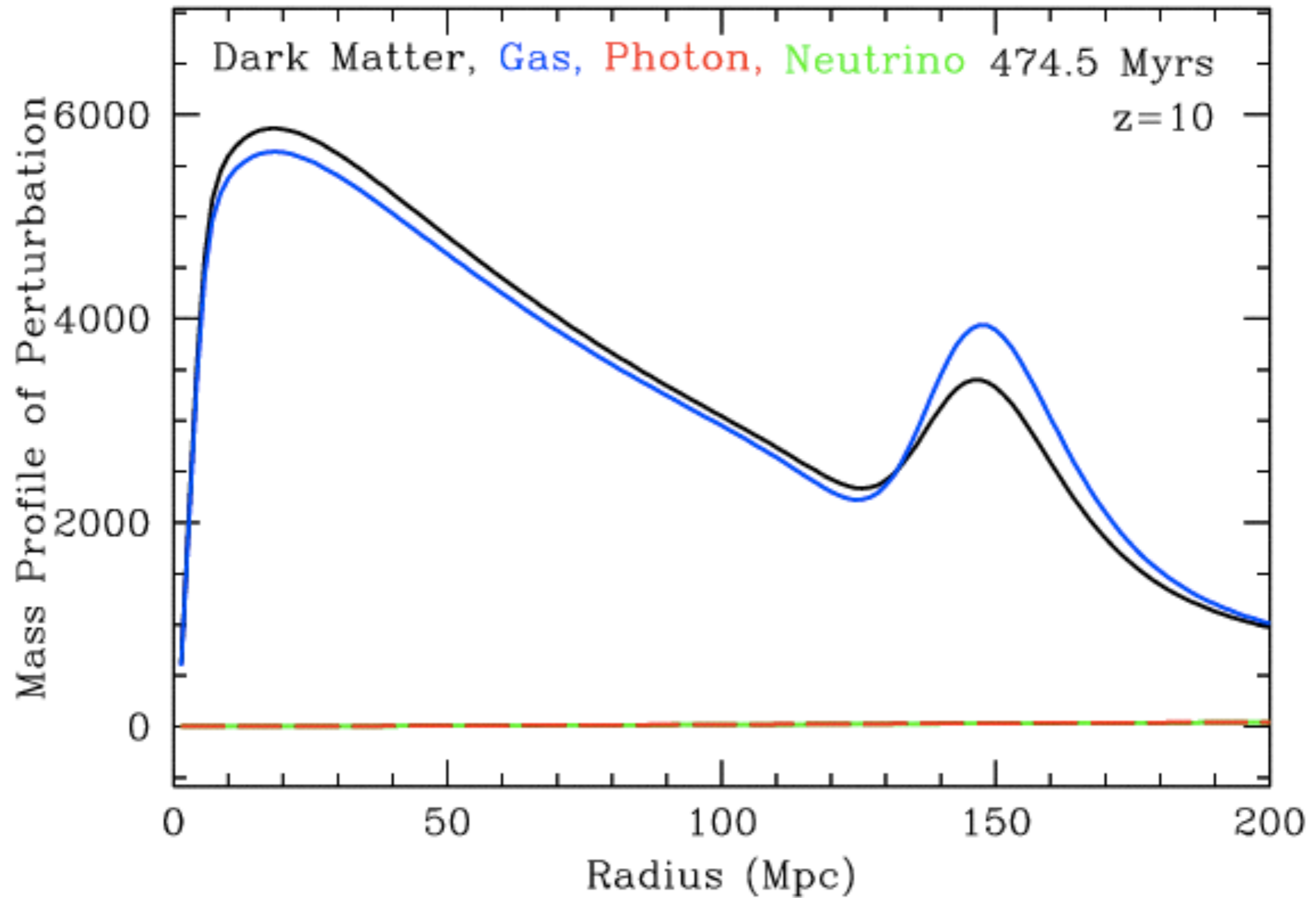
La matière noire



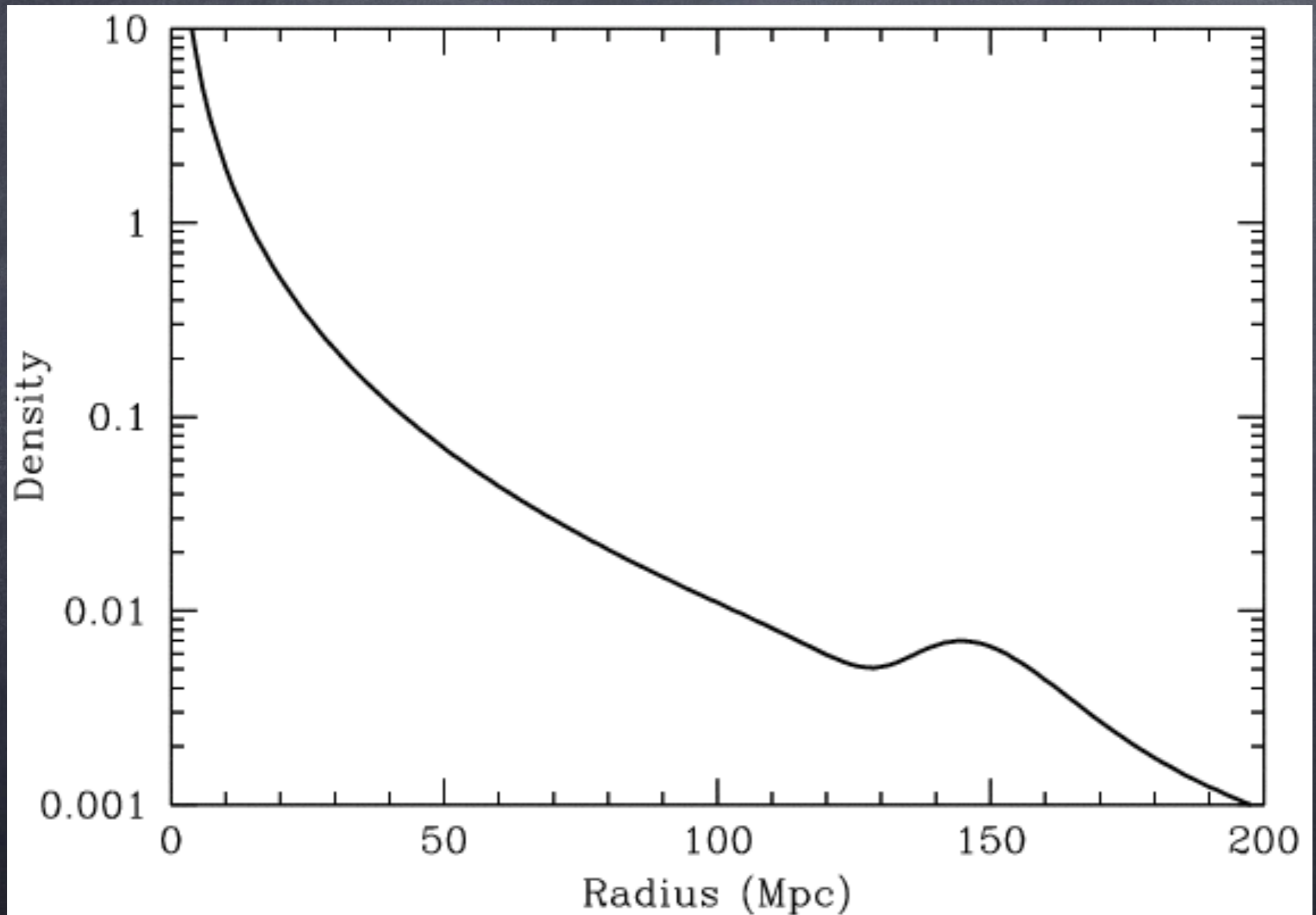
La matière noire



La matière noire

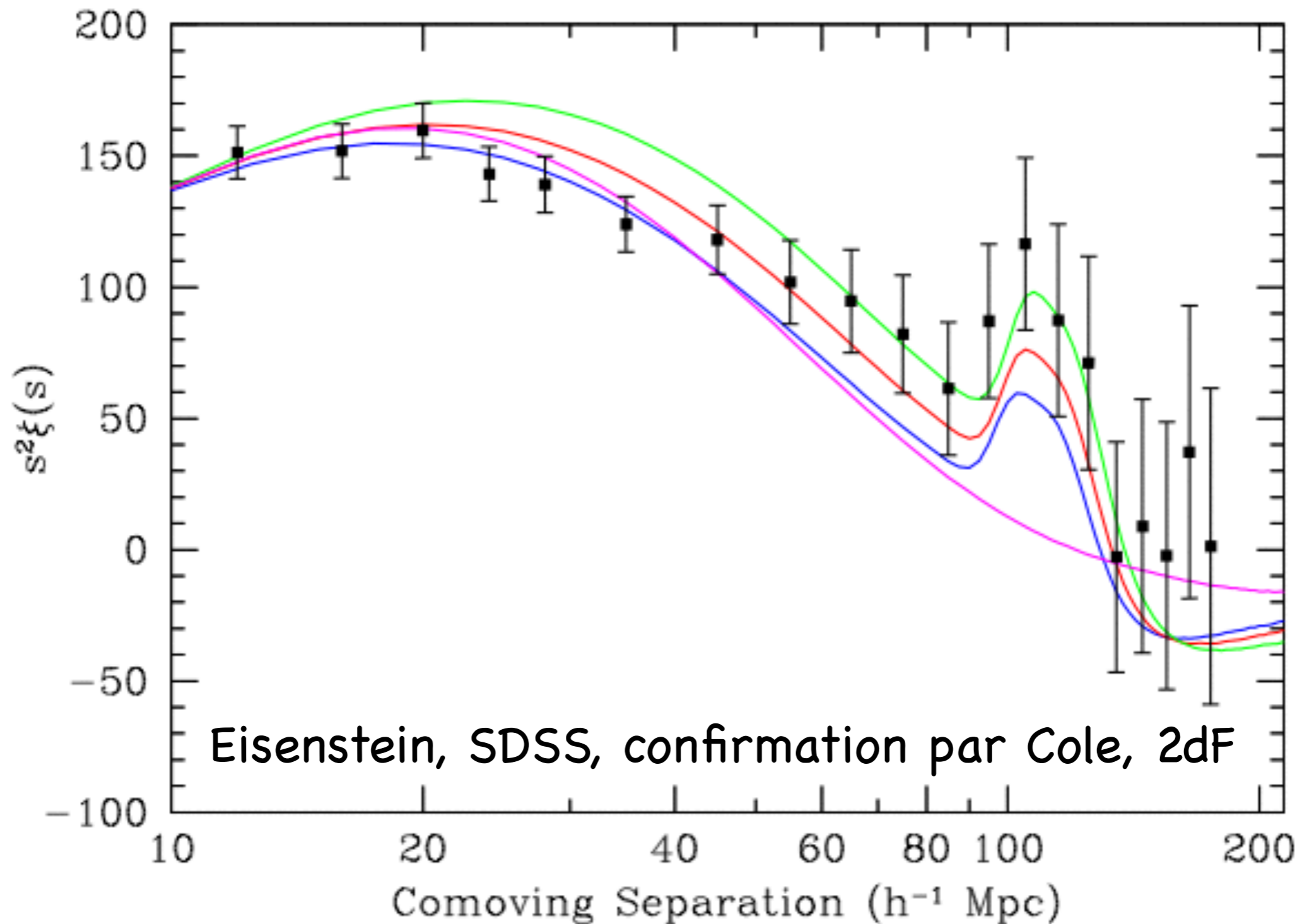


La matière noire

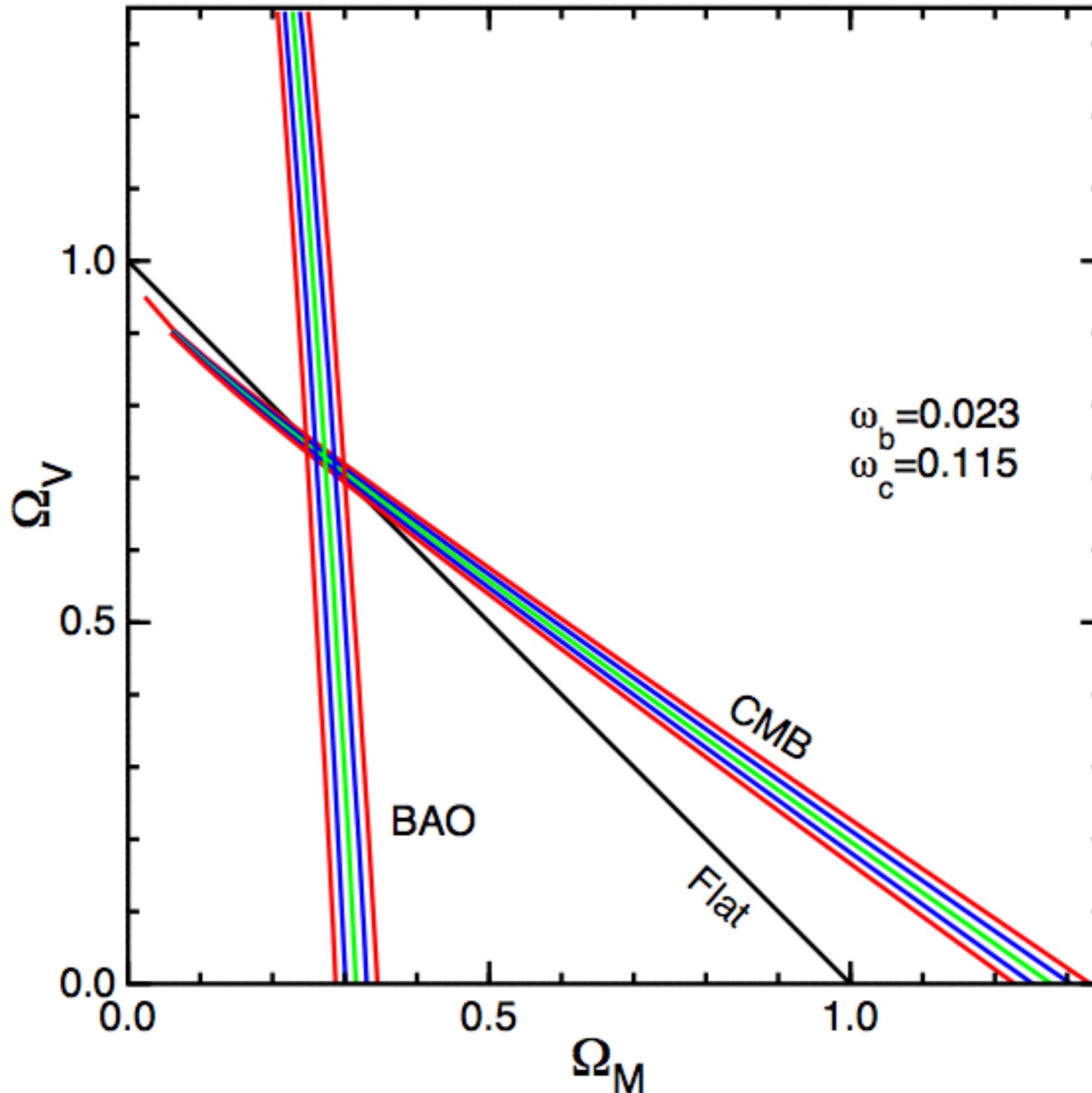


La matière noire

la croissance est bien comprise entre $z=1000$ et aujourd'hui !



La matière noire



La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

$$\delta = \frac{\delta\rho}{\rho} \propto a(t) \propto \frac{1}{1+z} \quad \text{si } \Omega_m^{\text{NR}} \text{ domine}$$

la croissance d'une fluctuation de densité (de matière noire si $t < t_{\text{dec}}$, de toute matière si $t > t_{\text{dec}}$) n'est possible que si la masse contenue dépasse une certaine valeur limite : c'est la

masse de Jeans

$M < M_{\text{Jeans}}$ l'expansion domine et la fluctuation disparaît

$M > M_{\text{Jeans}}$ la fluctuation s'effondre et croît

La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

par exemple si les constituants de la matière noire sont des neutrinos massifs (qqes eV) alors la taille des structures pouvant s'effondrer sont de la taille d'un **super-amas** car à $z=z_{eq}$, leur libre parcours moyen est de :

$$13 \Omega_{\nu}^{-1} h^{-2} \text{ Mpc}$$

toute fluctuation de taille inférieure sera diluée par l'expansion et les fluctuations pouvant croître sont des super-amas de 10^{15} masses solaires environ, qui se fragmentent plus tard en amas et galaxies, c'est le scénario **top-down** pour la formation des structures

La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

dans cet exemple, les particules de matière noire à l'origine des structures étaient relativistes au moment de leur découplage, on dit qu'il s'agit de matière noire chaude (HDM)

HDM : ok pour former des grandes structures (un peu trop...) mais les galaxies se forment trop tard (vers $z=1$ ou 2)

abandon du modèle

La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

inversement, si la DM est formée de particules massives (qqes GeV), la masse de Jeans correspond à des structures bien plus petites qu'une galaxie (amas globulaire) qui fusionnent par la suite pour former les galaxies, amas et super-amas

c'est le scénario **bottom-up**

ici les particules de DM sont non-relativistes lors de leur découplage, on appelle cette matière noire la matière noire froide (CDM)

La matière noire

formation des structures (galaxies etc...)

MAIS

dans les modèles CDM, les galaxies se forment un peu trop tard, vers $z=3$ ou 4 (alors qu'on en observe à des z plus grands)

mais avec un modèle Λ -CDM c'est bien mieux !

La matière noire

$$t_0 \quad 13.69 \pm 0.13 \text{ Gyr}$$

$$13.72 \pm 0.12 \text{ Gyr}$$

$$H_0 \quad 71.9^{+2.6}_{-2.7} \text{ km/s/Mpc}$$

$$70.5 \pm 1.3 \text{ km/s/Mpc}$$

$$\Omega_b \quad 0.0441 \pm 0.0030$$

$$0.0456 \pm 0.0015$$

$$\Omega_b h^2 \quad 0.02273 \pm 0.00062$$

$$0.02267^{+0.00058}_{-0.00059}$$

$$\Omega_c \quad 0.214 \pm 0.027$$

$$0.228 \pm 0.013$$

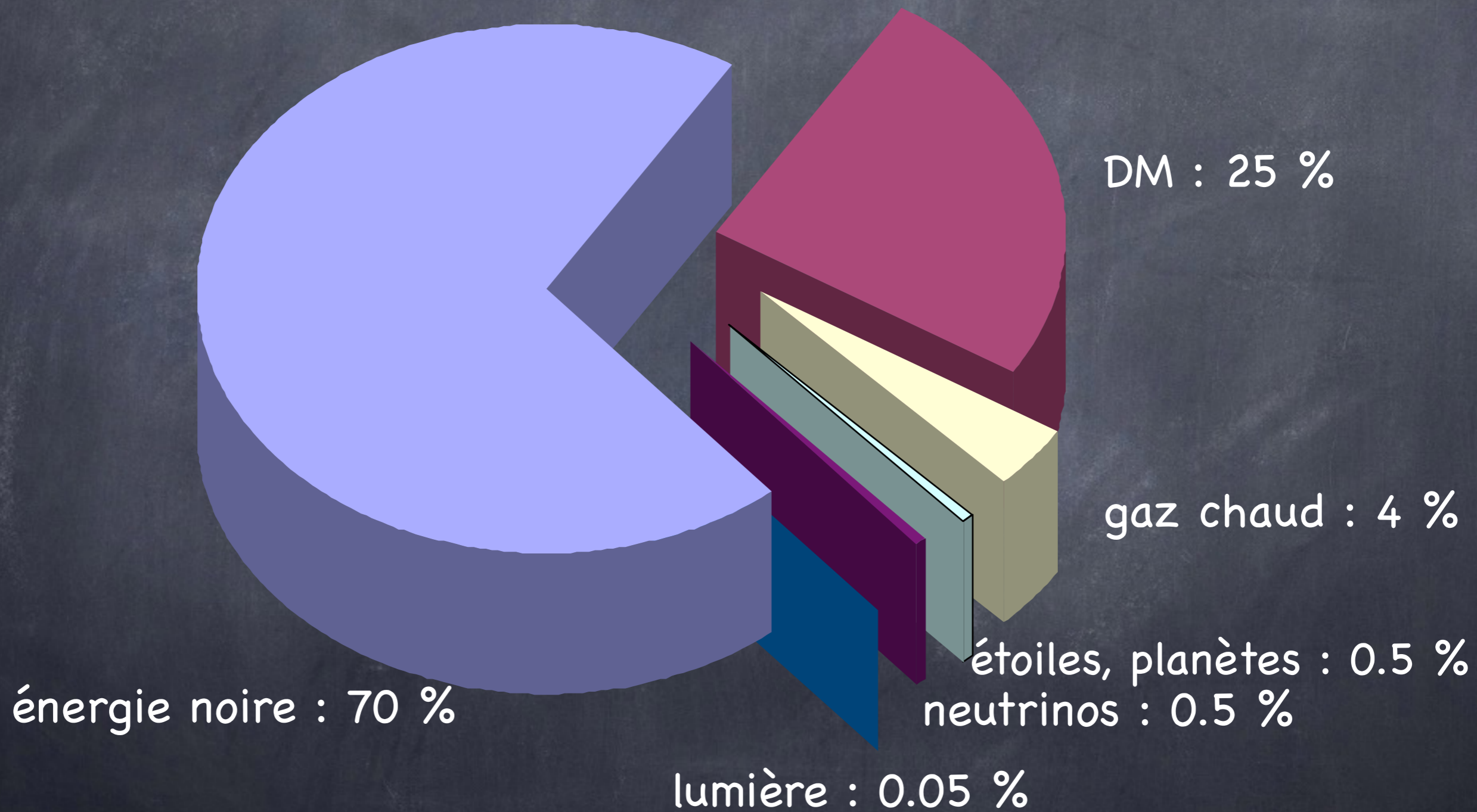
$$\Omega_c h^2 \quad 0.1099 \pm 0.0062$$

$$0.1131 \pm 0.0034$$

$$\Omega_\Lambda \quad 0.742 \pm 0.030$$

$$0.726 \pm 0.015$$

Composition



Les SN



Les SN : intérêts pour la physique

supernova = indicateur de distance

enrichit le milieu interstellaire en **éléments lourds** (C, Fe, U !)

favorise la création de **nouvelles étoiles** par les ondes de choc

l'étude de l'explosion permet d'en apprendre beaucoup sur la **physique stellaire**

compréhension de la **physique des neutrinos** (rôle important dans les mécanismes d'explosion)

la matière dont nous sommes faits a été synthétisée dans les étoiles et libérée dans les explosions de SN (poussière d'étoiles dirait Hubert)

Les SN : observations

l'explosion de l'étoile la rend **aussi brillante qu'une petite galaxie** (des milliards fois plus brillante qu'avant l'explosion) : on peut la voir de très loin (jusqu'à 5 Glyr) mais seulement pendant peu de temps (de quelques semaines à quelques mois)

c'est un événement **très rare** (1 fois tous les 20 à 30 ans dans 1 galaxie)

visible à l'œil nu si la SN est dans notre galaxie ou dans les Nuages de Magellan (à 150 klyr) : ça s'est produit 8 fois au minimum en 2000 ans (d'autres SN ont pu être masquées par le disque galactique)

Les SN : observations

observations historiques :

supernovae de 185, 369, 1006, 1054 et 1181

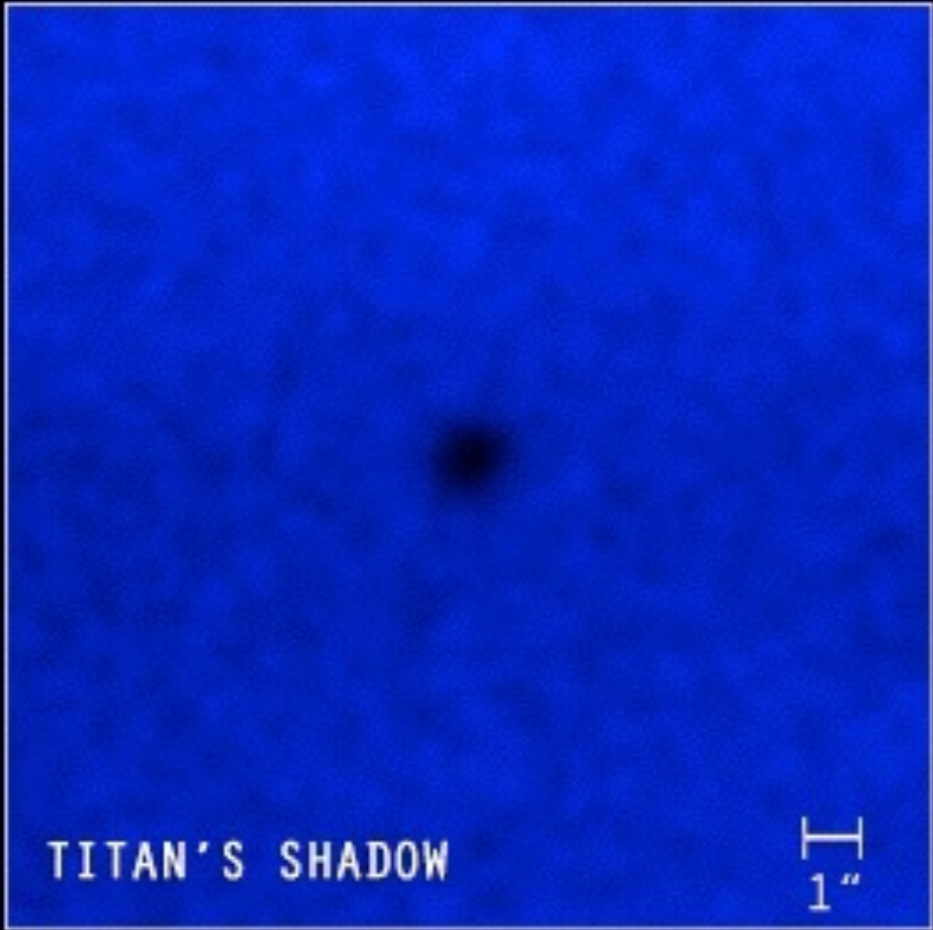
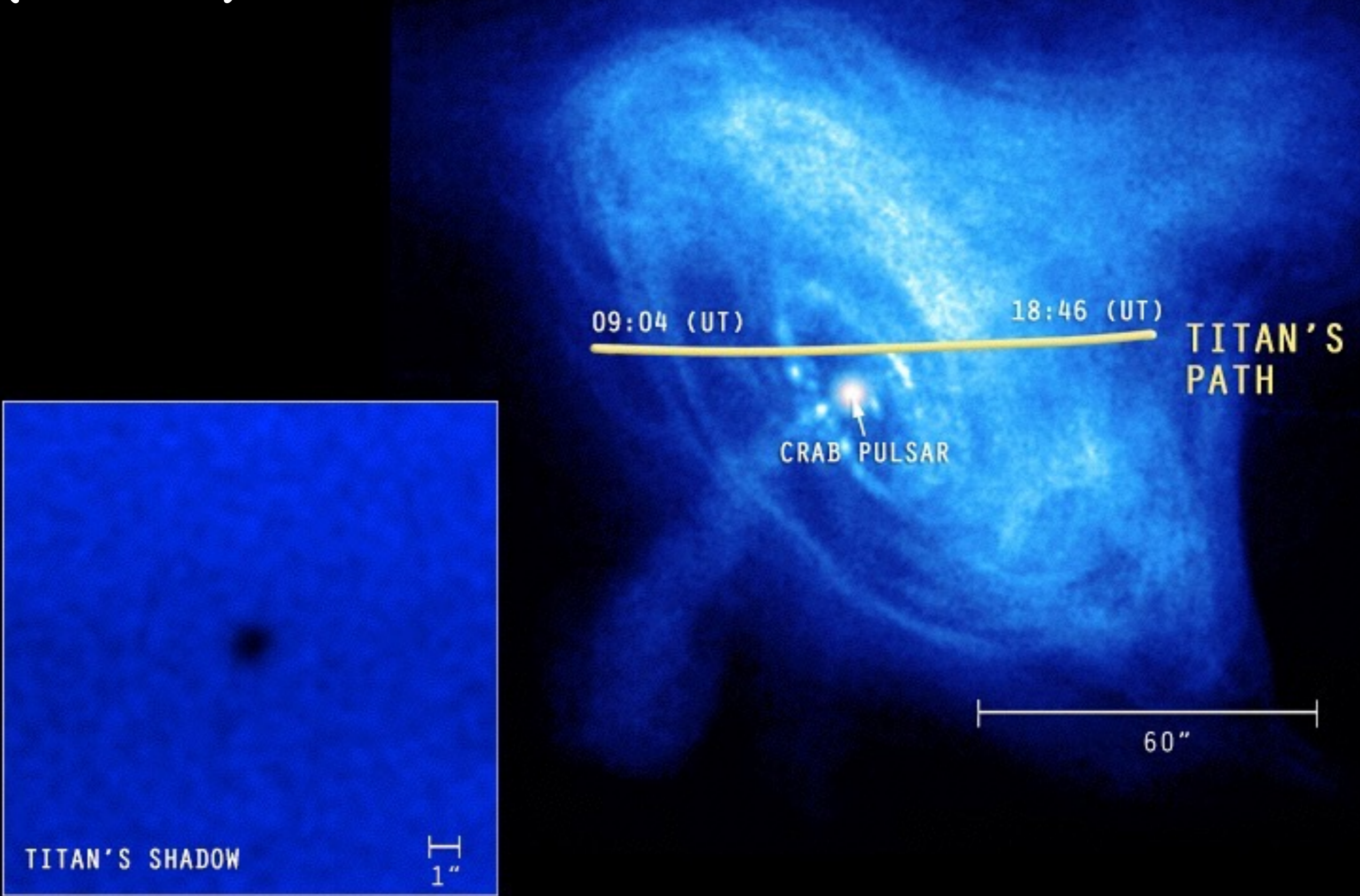
celle de 1006 : très brillante, observée par les chinois, présente dans les archives arabo-persanes et dans les chroniques des monastères d'Europe occidentale

celle de 1054 : position donnée à l'époque assez précise de sorte qu'on l'identifie à la nébuleuse du Crabe, source très intense de lumière visible, radio, X et gamma

Nébuleuse du Crabe



Nébuleuse du Crabe (Chandra)



Les SN

SN plus récentes : 1572 (vue par Tycho Brahe) et
1604 (celle de Kepler)

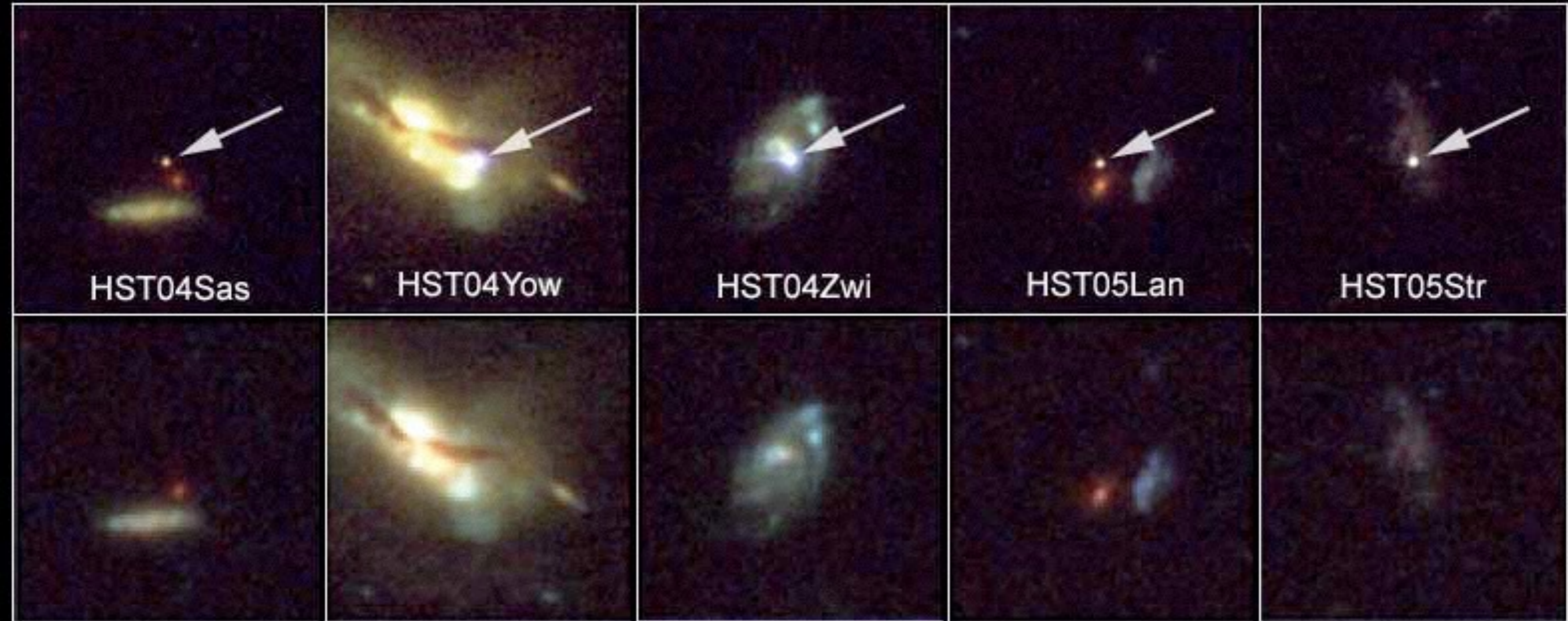
elles étaient visibles en plein jour ! (comme Vénus)

la plus récente visible à l'œil nu : SN1987A dans
le Grand Nuage de Magellan (étudiée en UV, X,
radio, visible) et détection du flux de neutrinos
prédit par les modèles d'explosion

Les SN

Host Galaxies of Distant Supernovae

HST ■ ACS/WFC



NASA, ESA, and A. Riess (STScI)

STScI-PRC06-52

Les SN

bref historique

avant la découverte de Hubble, on avait baptisé "novae" les nouvelles étoiles qui apparaissaient, en général dans des nébuleuses (on ne savait pas qu'il s'agissaient d'autres galaxies)

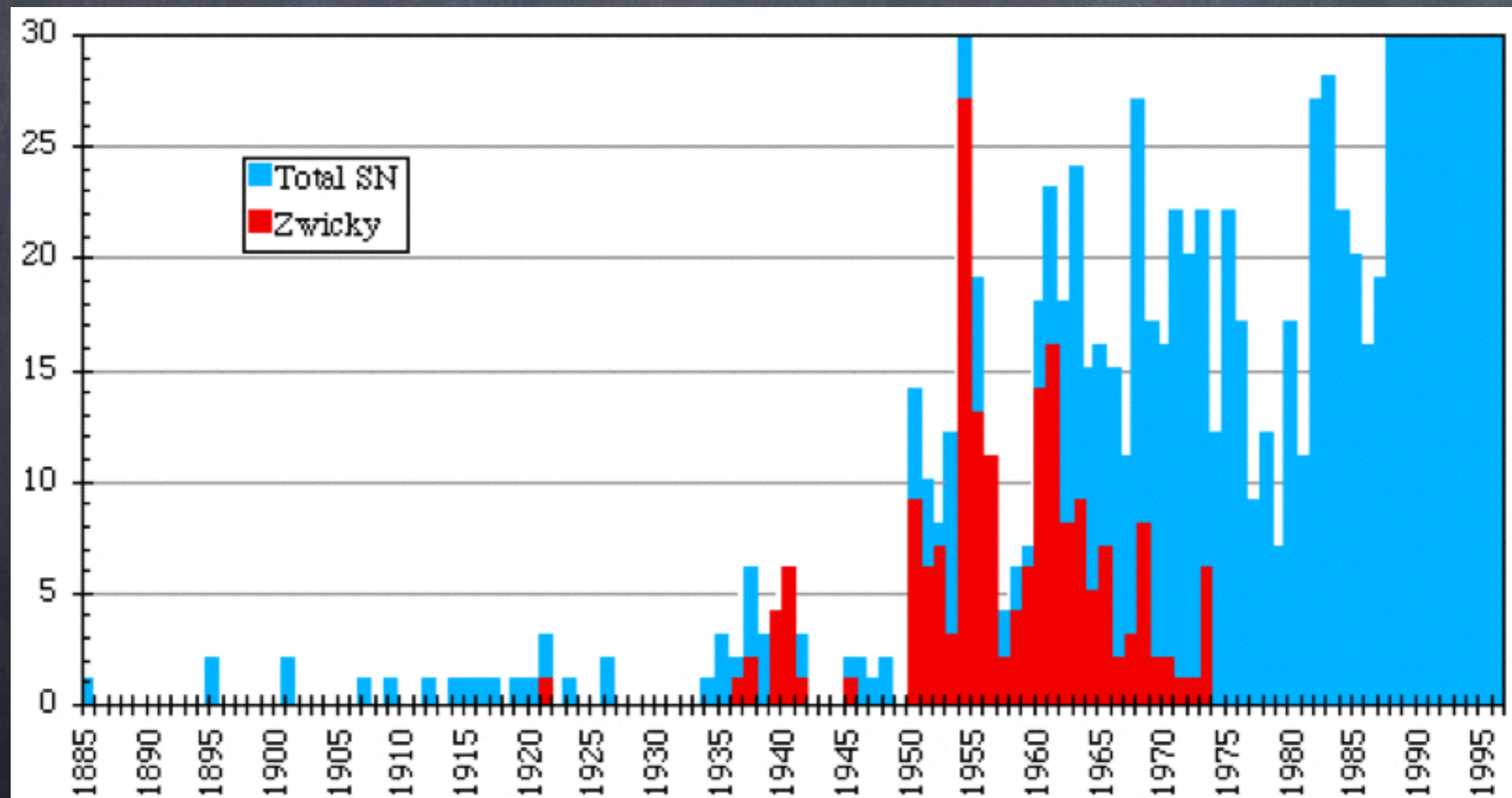
Baade et Zwicky ont réalisé par la suite que ces étoiles devaient être des milliers de fois plus brillantes que les novae habituelles de notre galaxie : invention du terme de **supernovae** (1933)

estimation de l'énergie dépensée dans une explosion de SN : SN = mort d'une étoile et non la naissance, mort par effondrement gravitationnel

Zwicky imagina même le concept d'étoile à neutrons (résidu de l'explosion) et le rôle des SN dans la production des rayons cosmiques mais, il n'a pas été pris au sérieux (comme pour la DM, 99% invisible)

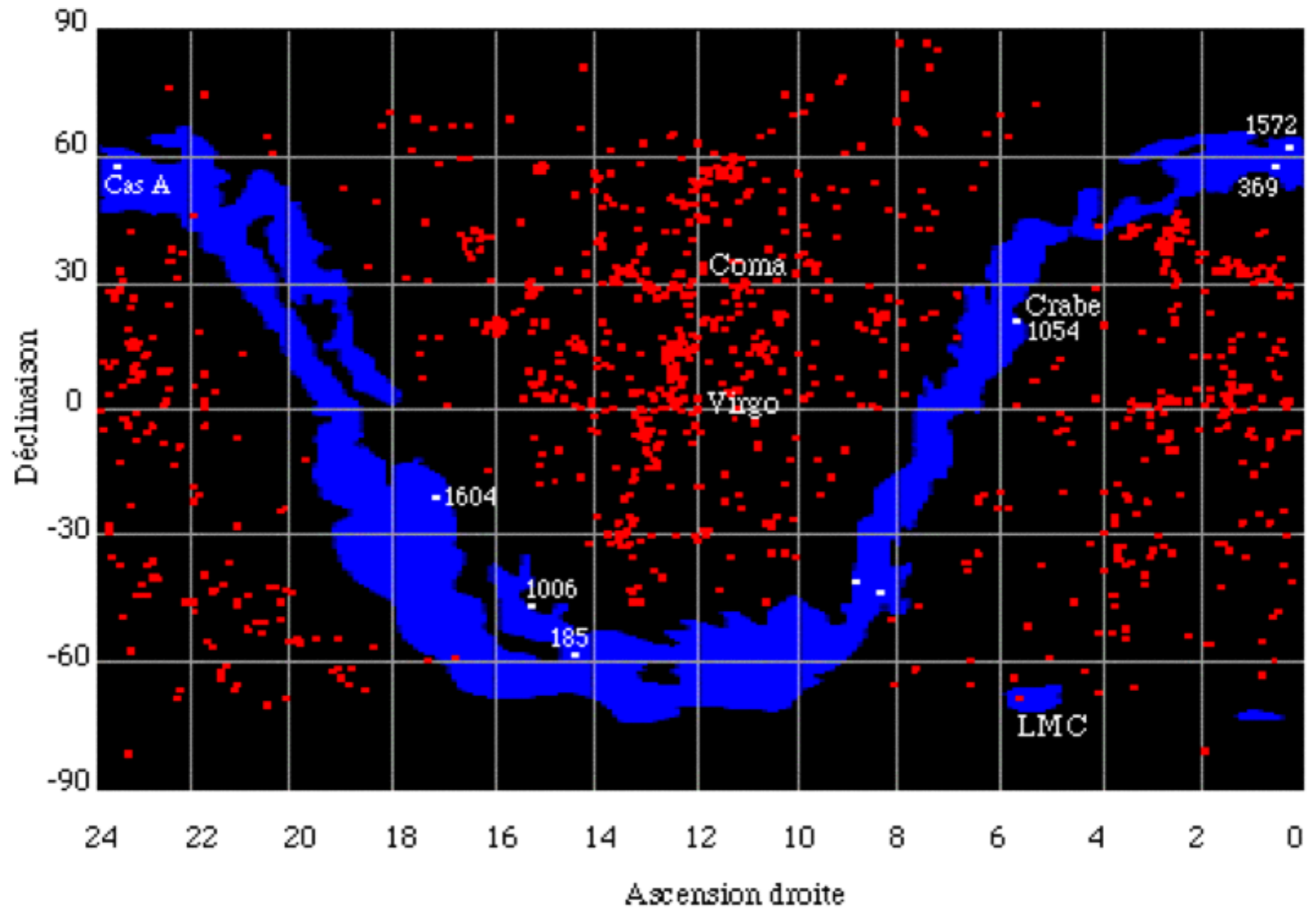
Les SN

Mais Zwicky = homme de caractère
il se lance dans une recherche systématique de SN
(téléscope de type Schmidt)



Les SN

Distribution des supernovae



Les SN

Différents types de SN

les luminosités maximales sont différentes
les courbes de lumières sont différentes
les spectres sont très différents

Spectres :

les raies signent la **présence de certains éléments**
chimiques (H, C, Si, Fe...)

la hauteur des raies signe leur **abondance**
la largeur est liée à leur **vitesse** et la **température**
la variation en temps du spectre informe sur la
dynamique de l'objet

Les SN

Différents types de SN

La classification des SN se fait en fonction de leur spectre, notamment en fonction de la **présence ou de l'absence de certaines raies**

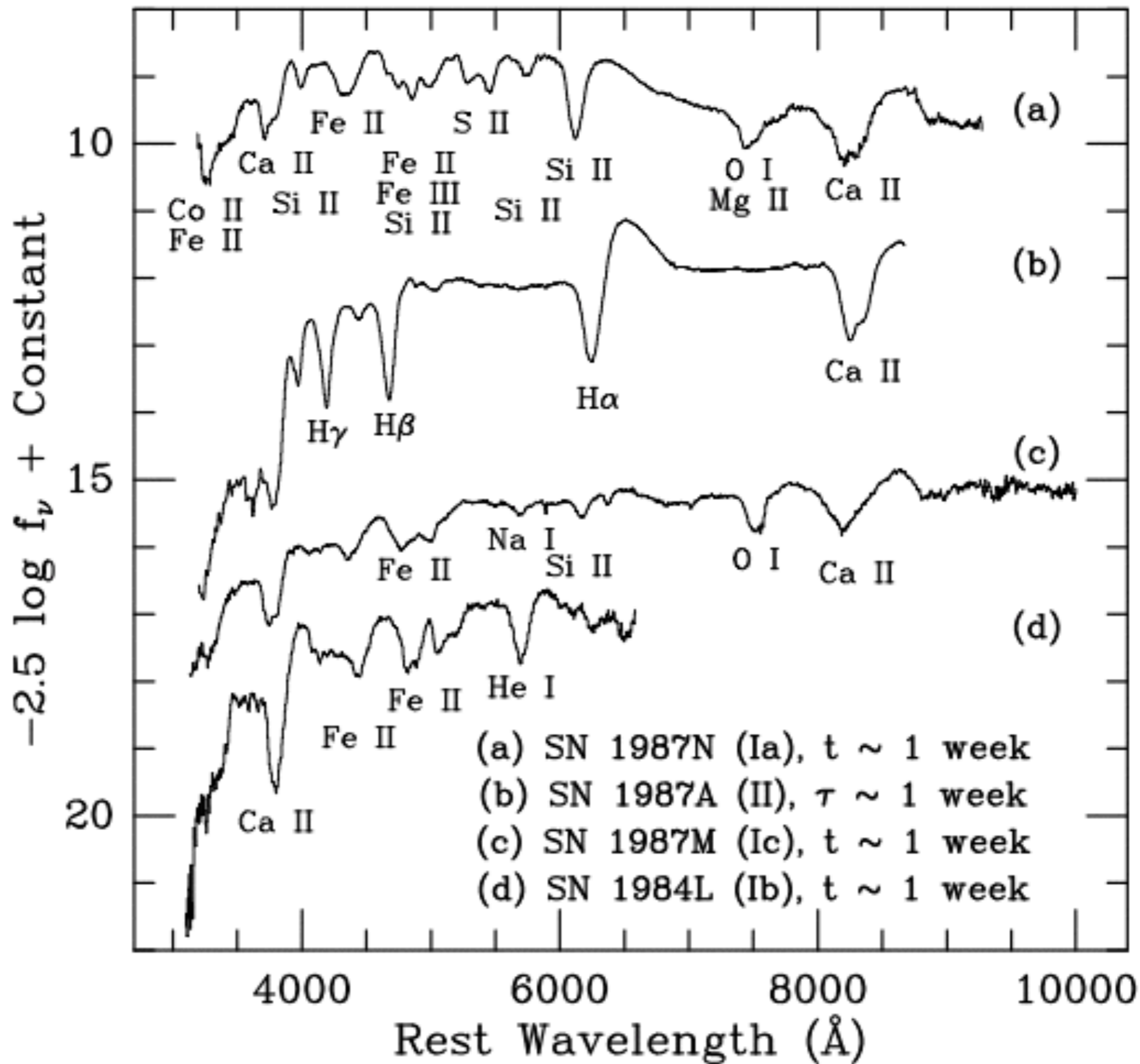
SN de type I

pas de raies de l'hydrogène (pourtant la raie la plus fréquente) indiquant que ces objets ont été privé de leur H au cours de leur évolution

type Ia : raies du Si ionisé

type Ib : pas de raie de Si mais raies de He

type Ic : ni Si ni He



Les SN

Différents types de SN

SN de type II

présence des raies H-alpha (transition des niveaux $n=3$ et $n=2$, 656.3 nm) et H-béta ($n=4$ à $n=2$, 486.1 nm)

type II normal : domination des raies de H, présence de raies He

type IIb : domination des raies de He

Le spectre d'une SNI est essentiellement un spectre de corps noir avec en plus des raies d'absorption (phase photosphérique) du Si ionisé, du Ca, du Mg et du Fe. Peu après l'explosion (qqes semaines plus tard), le spectre change et apparaissent les raies d'émission (phase nébulaire) du Co et du Fe (signe de la composition interne après l'explosion).

Les SN

Courbes de lumière des SN

J : jour de l'explosion

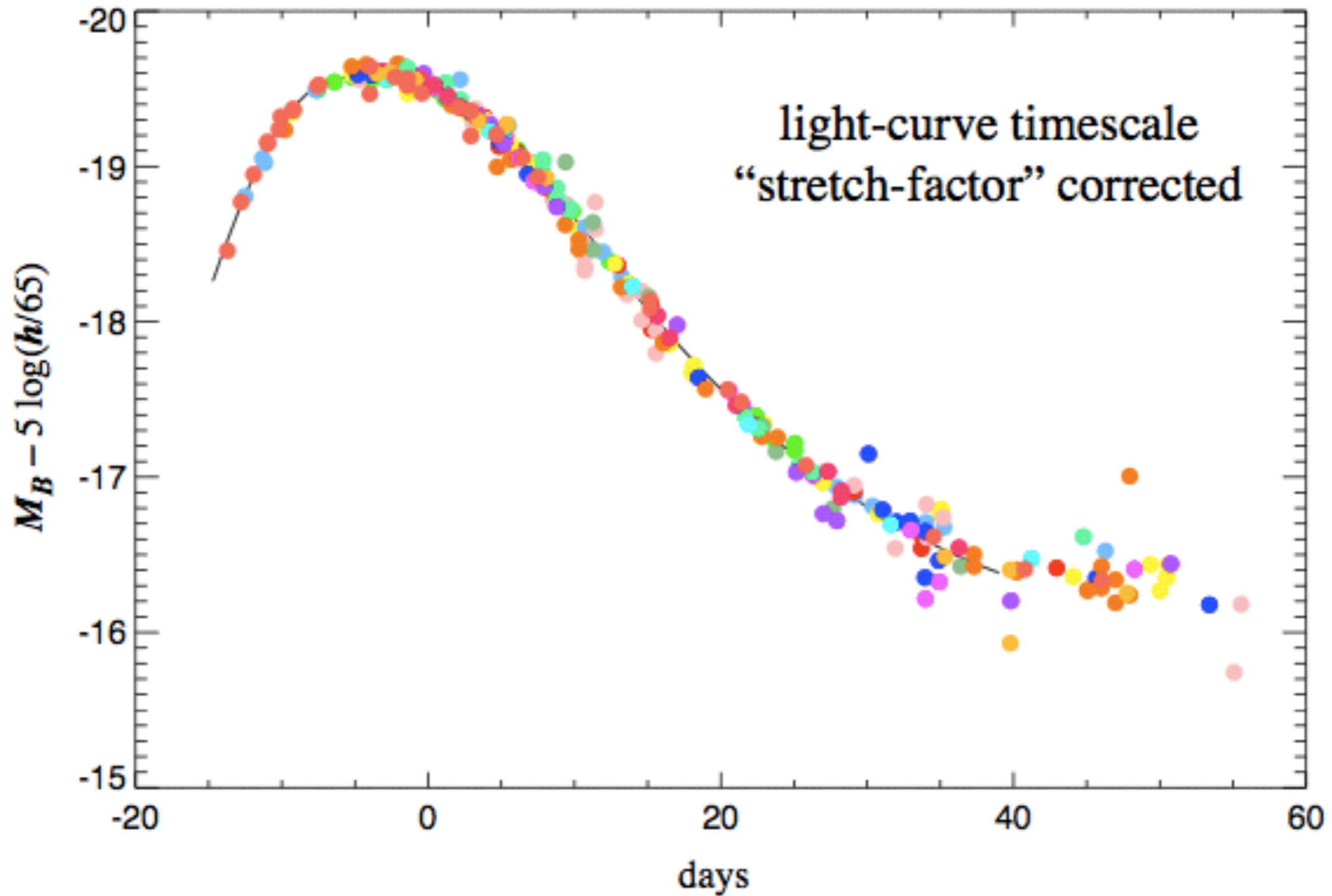
J+15 : la luminosité augmente énormément puis décroît lentement (un facteur 100 en 6 mois)

Cas remarquable des SNIa : leurs courbes de lumières sont pratiquement toutes **superposables**, ce qui n'est pas du tout le cas des autres SNI ni des SNII

attention : 80-90% des SNIa sont bien homogènes
dispersion de flux de 50% malgré l'homogénéité (effet de 25% sur la distance) mais après correction du "stretch factor", on arrive à 15% (7% sur la distance)

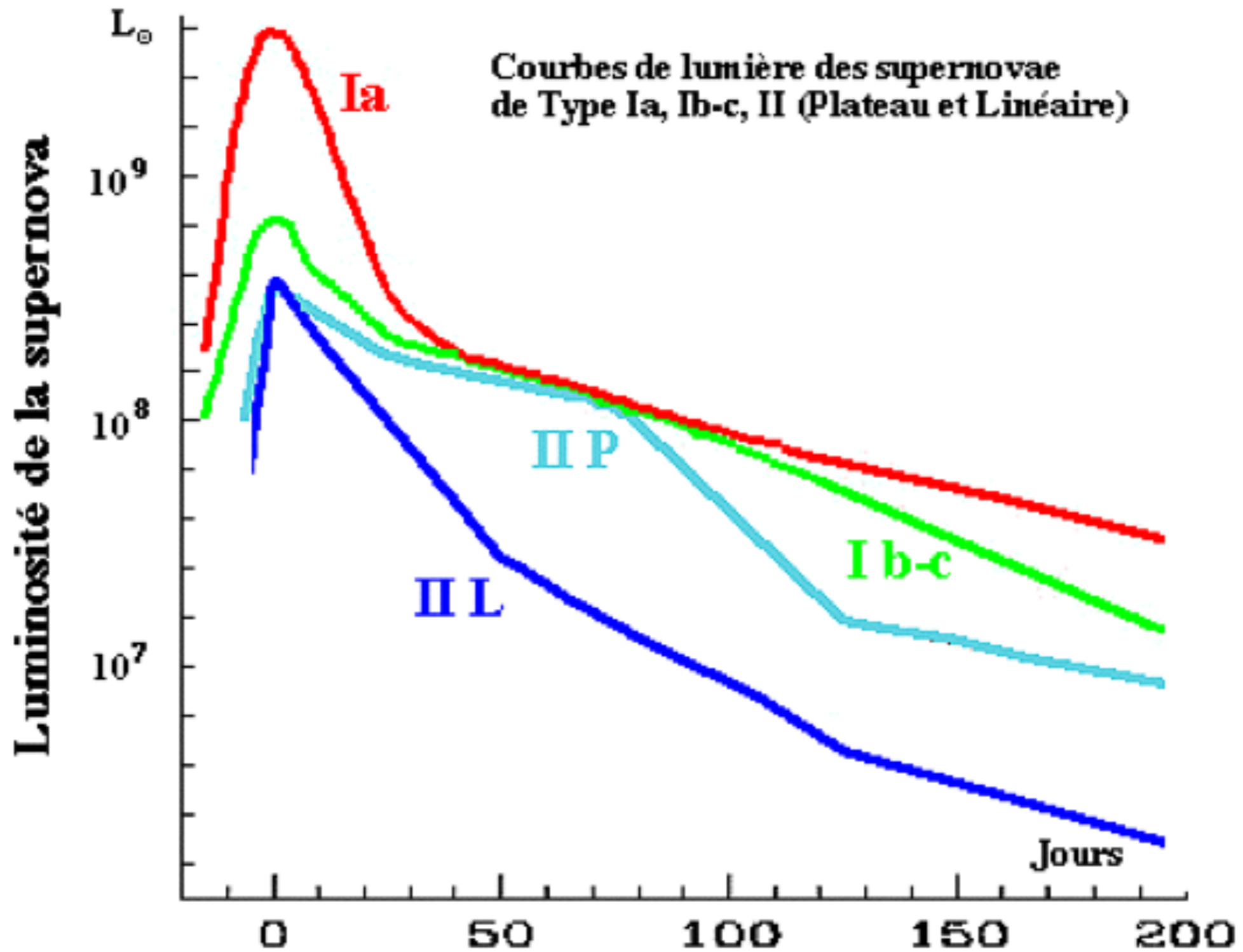
Les SN

stretch factor : lié à la quantité de Co dans la SN1a qui va jouer sur l'opacité



Kim, et al. (1997)

Les SN

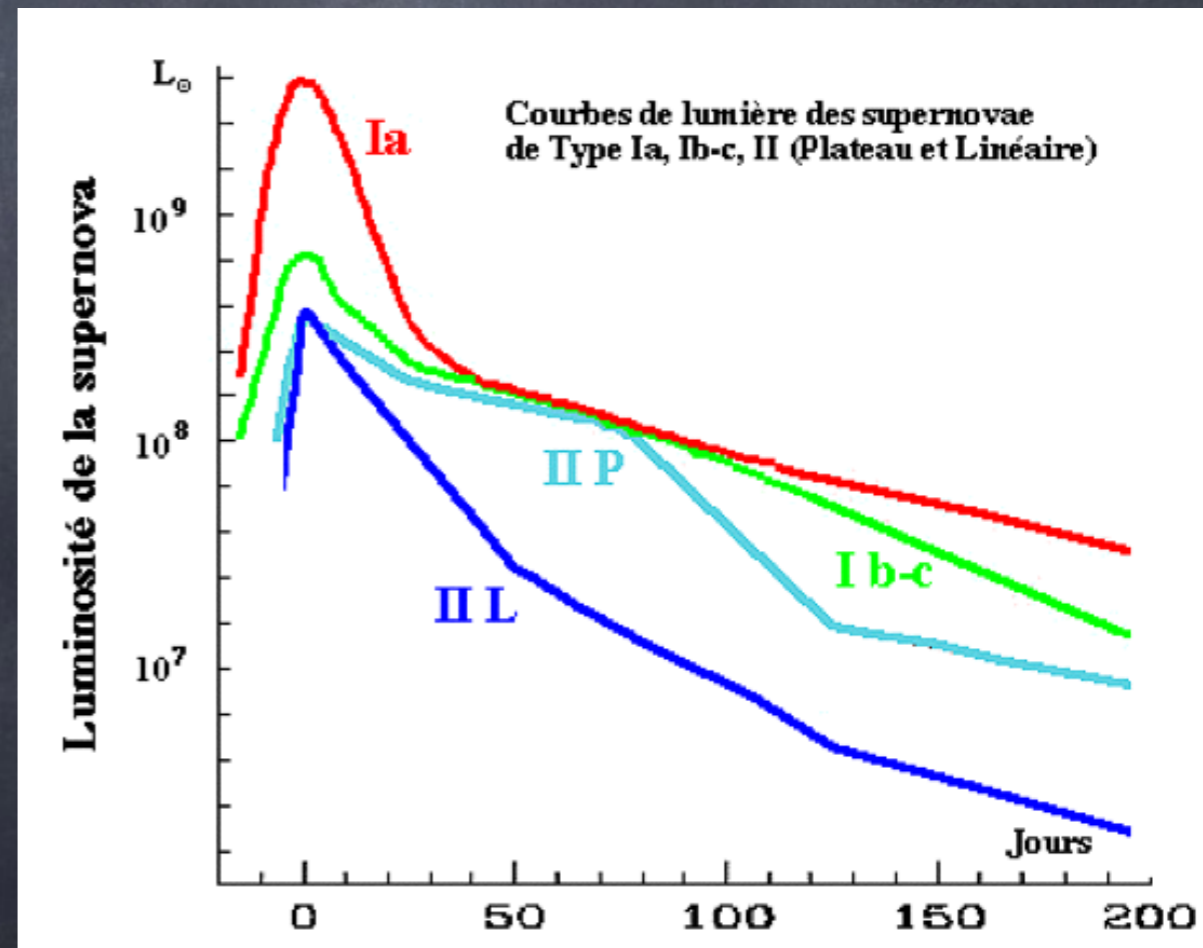


Les SN

la courbe de lumière pour des SNI montre 2 décroissances exponentielles successives : une de 10 jours l'autre de 111 jours (périodes de désintégration du Ni56 en Co56 et du Co56 en Fe56)

l'explosion transforme donc une partie de l'étoile en Ni dont la désintégration fournit l'énergie lumineuse de la SN

Pour les SNIa, le max de luminosité est aussi quasi-constant : $2 \cdot 10^9 L_{\odot}$



Les SN

en résumé : propriété extraordinaire des SNIa

les courbes de lumières sont "identiques"
les luminosités maximales sont "identiques"

donc pour la cosmologie,
détecter une SNIa c'est mesurer la luminosité
apparente et connaissant la luminosité absolue
permet d'en déduire la distance

on dit que les SNIa sont des chandelles standard

Les SN

mécanisme d'explosion des SNIa

les SNIa n'ont ni H ni He, sont détectées que parmi des étoiles très vieilles et ont le même comportement après explosion

naine blanche en système binaire avec une géante rouge qui a une atmosphère très étendue et ténue, déformée par le champ gravitationnel de la naine blanche



Les SN

mécanisme d'explosion des SNIa

au fil du temps, la masse de la naine blanche augmente, jusqu'à atteindre la limite de Chandrasekhar ($1.4 M_{\odot}$) rendant la naine blanche instable : une combustion nucléaire explosive s'amorce et la naine devient supernova

son cœur de C et O est converti en Ni56 (environ $0.6 M_{\odot}$ et donnera ensuite Co56 puis Fe56). Les couches externes seront converties en Si, Ca etc...

énergie cinétique libérée : 10^{51} ergs = 10^{44} J (2/3 de l'énergie nucléaire libérée)

L'uniformité des propriétés des SNIa vient de la masse limite de Chandrasekhar

Les SN

lien avec la cosmologie

$$D_L = a_0 r (1 + z)$$

$$D_L = \frac{1}{H_0} \left(z + \frac{1 - q_0}{2} z^2 + \dots \right)$$

si on connaît la luminosité absolue d'un objet, on en déduit la distance et connaissant z on peut en déduire q_0

magnitude apparente $m = M + 5 \log \frac{D_L}{10 \text{ pc}}$

module de distance $\mu = m - M$

Les SN

lien avec la cosmologie

magnitude apparente $m = M + 5 \log \frac{D_L}{10 \text{ pc}}$

$$\mu = 25 + 5 \log \frac{D_L}{1 \text{ Mpc}}$$

or on connaît l'expression de la distance de luminosité en fonction des paramètres cosmologiques soit :

$$\mu = 25 + 5 \log a_0 (1 + z) g^{-1} \left(\int_0^z \frac{c dz'}{a_0 H_0 E(z')} \right)$$

$$\mu = f(H_0, \Omega_{0m}, \Omega_{0\Lambda})$$

Les SN

lien avec la cosmologie

et pour des objets proches :

$$\mu = 25 - 5 \log H_0 + 5 \log cz + \frac{5}{2 \ln 10} (1 - q_0) z + \dots$$

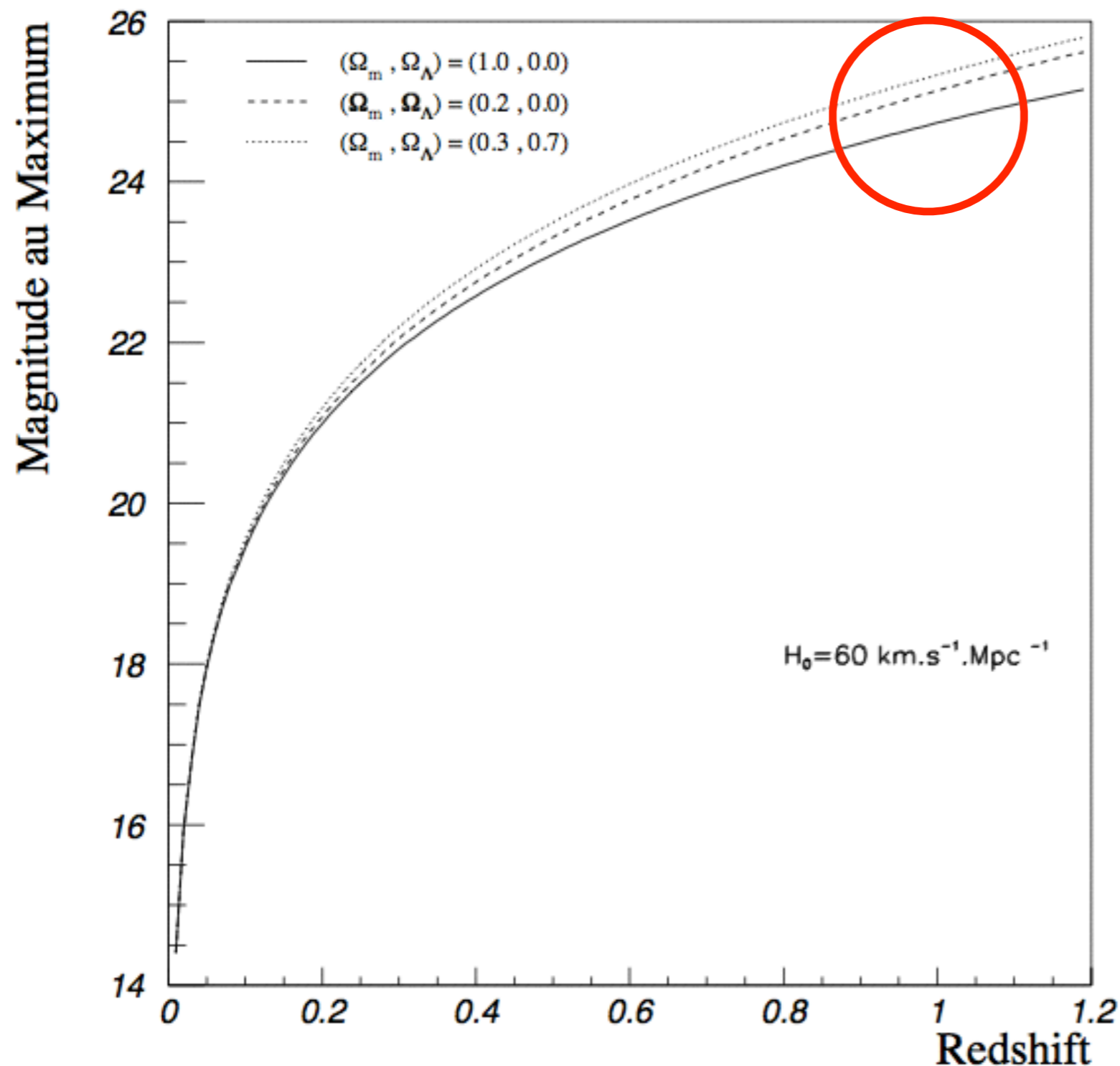
$$\mu = f(H_0, q_0)$$

Pour des objets proches, si on connaît la magnitude absolue (chandelle standard), si on peut mesurer la magnitude apparente et son redshift alors on obtient directement q_0

Pour des objets lointains, on utilise la relation exacte qui permet de distinguer les contributions de matière et de constante cosmologique (mais il faut alors des objets à différents redshifts).

Les SN

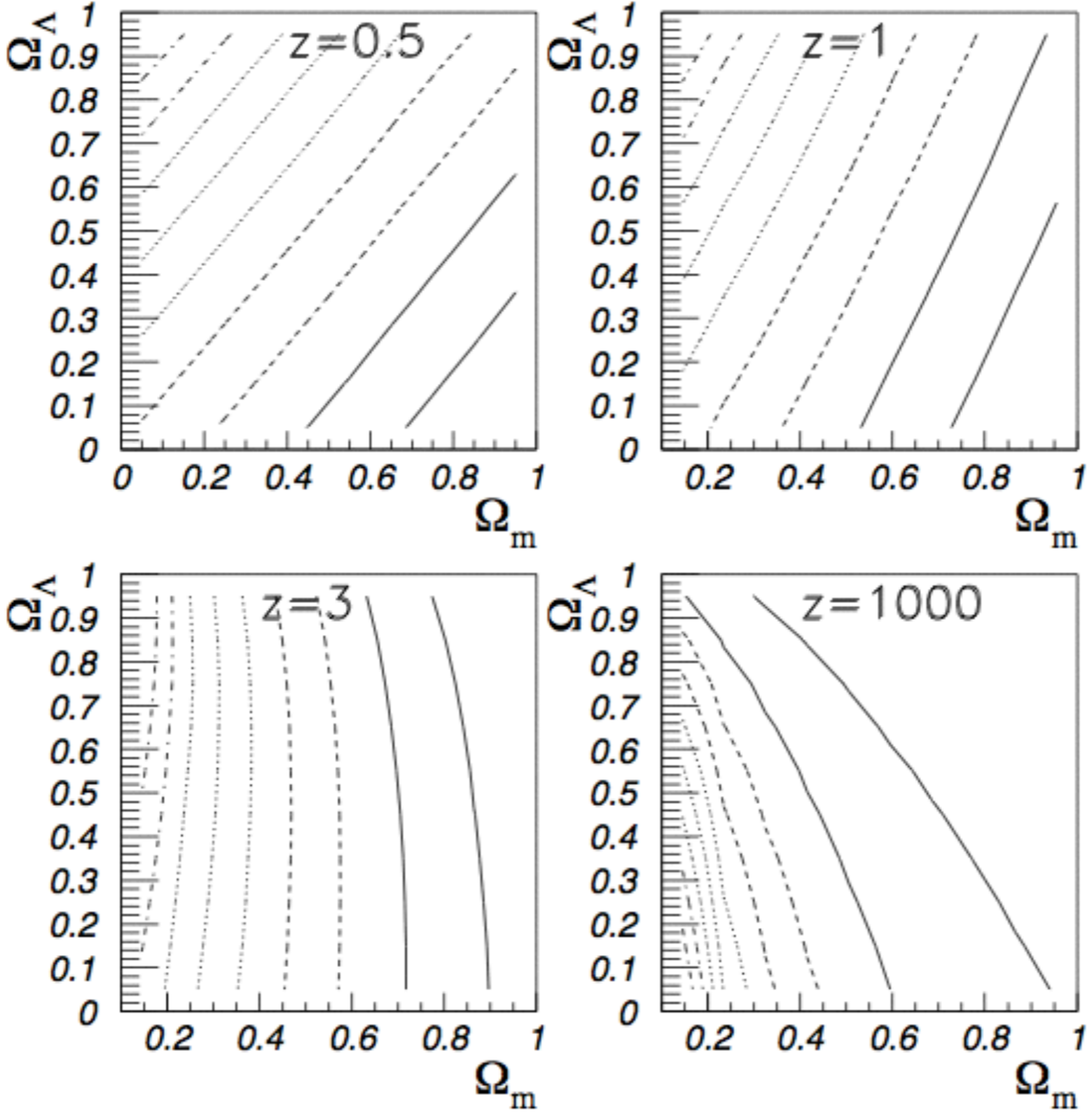
lien avec la cosmologie



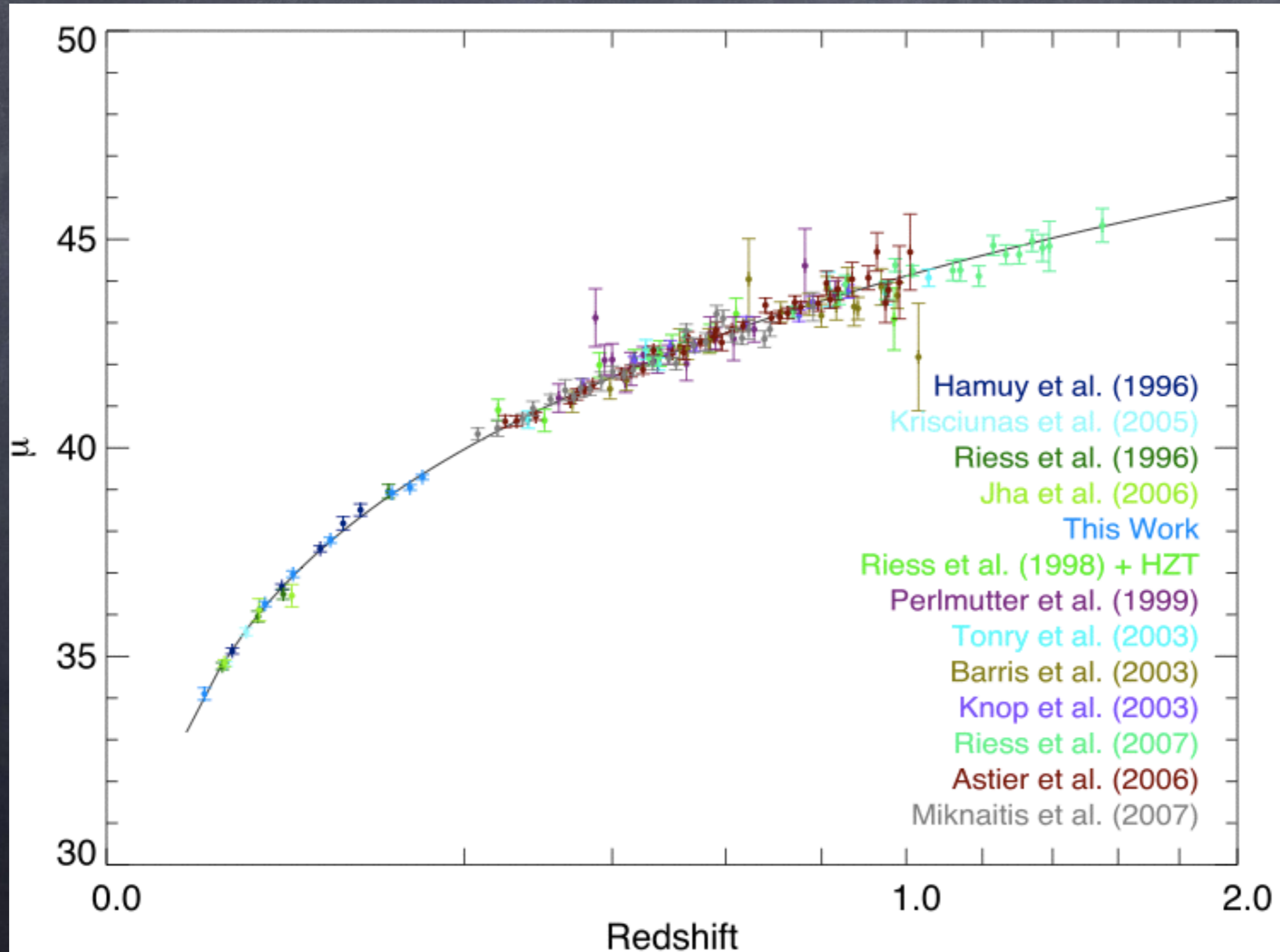
à grand z , l'écart entre les modèles cosmologiques devient plus grand que la dispersion des magnitudes au maximum !

Isocontours de D_L

Isocontours de Distance de Luminosité ($h=0.6$)



Données actuelles sur le module de distance



Meilleures contraintes

