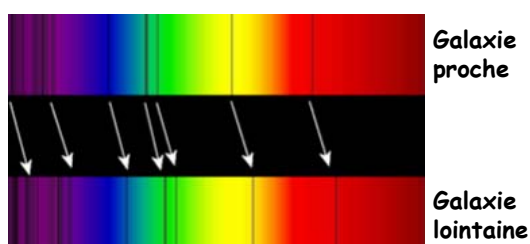




Vitesse des galaxies

1914 : avènement de la spectroscopie, étude des nébuleuses



Décalage des raies: effet Doppler



2

Nous savons aujourd'hui que notre univers n'est pas immuable Il devient de plus en plus grand, il évolue. D'où nous vient cette connaissance?

L'observation de l'évolution de notre univers remonte au début du 20^e siècle, avec l'avènement de la spectroscopie. La lumière blanche qui traverse un prisme se retrouve dispersée en un arc-en-ciel qui révèle l'ensemble des fréquences composant cette source. Dans le cas des étoiles ou des galaxies, le gaz qui entoure la source lumineuse absorbe la lumière à certaines fréquences, caractéristiques des éléments chimiques le constituant. Des raies sombres se superposent alors au spectre continu, à des fréquences bien précises.

Dans les spectres des galaxies lointaines, ces raies sont globalement décalées par rapport aux fréquences attendues! Ce phénomène est semblable à l'effet Doppler sonore qui rend la sirène d'une ambulance plus aiguë lorsqu'elle s'approche, et plus grave lorsqu'elle s'éloigne. De même, les raies sont décalées vers le rouge si la galaxie étudiée s'éloigne de nous, et vers le bleu si elle se rapproche.

Loi de Hubble

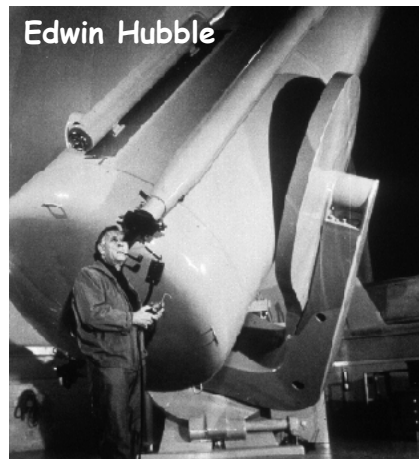
Décalage des raies en absorption ou en émission dans spectre
⇒ Mesure de la **vitesse** des nébuleuses par rapport à nous

1920: décalage systématique vers le rouge
⇒ Toutes les galaxies s'éloignent de nous
(Vesto Slipher)

1929: $vitesse = H \times distance$

où H est la « **constante de Hubble** » :

Plus les galaxies sont lointaines,
plus elles s'éloignent vite.



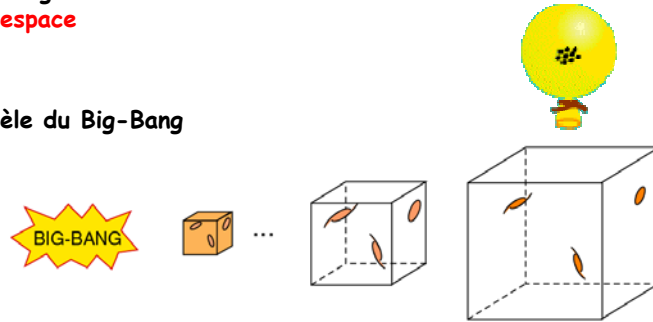
La mesure du décalage des raies d'absorption dans les spectres permet de calculer la vitesse des galaxies par rapport à notre propre galaxie. En 1920, l'astronome américain Vesto Slipher constate que le déplacement des raies se fait presque systématiquement vers le rouge, et par conséquent que les objets s'éloignent tous de nous.

De plus, ce mouvement d'éloignement relatif est isotrope dans l'univers: une galaxie située à une distance donnée de nous, où qu'elle soit, s'éloigne toujours de la nôtre à la même vitesse. Il existe donc une relation entre la vitesse de récession des galaxies et la distance qui nous sépare d'elles, connue sous le nom de **Loi de Hubble**, du nom de son découvreur, [Edwin Hubble](#), en 1929.

Notre univers en expansion

Tous les objets s'éloignent les uns des autres:
⇒ **Expansion de l'espace**

Validation du modèle du Big-Bang



Gravité: force attractive
⇒ On s'attend à un **ralentissement de l'expansion**

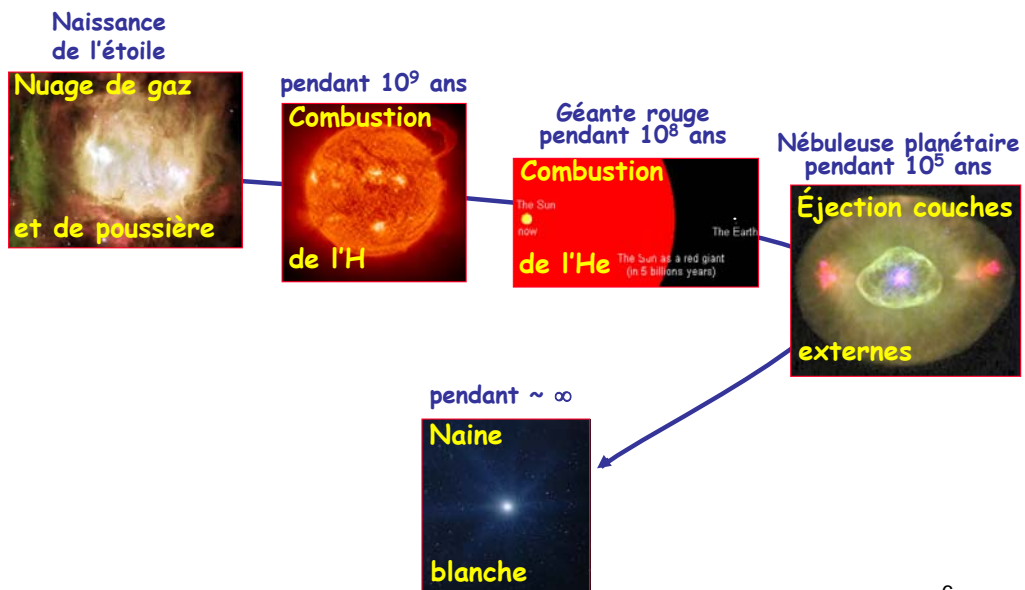
La constante de Hubble est-elle vraiment constante
au cours de l'histoire de l'univers ?

4

La loi de Hubble confirme une prédiction de la relativité générale formulée par Einstein, à savoir que sauf dans des conditions bien particulières, l'univers ne peut demeurer statique. L'éloignement croissant de tous les objets qui nous entourent traduit en fait l'expansion de l'espace. Il en est de même pour des points dessinés à la surface d'un ballon : il n'y a pas de point central, tous s'éloignent les uns des autres lorsque l'on gonfle le ballon.

Dans le modèle du Big Bang communément admis de nos jours, l'espace subit au départ une phase de croissance. Toutefois, la force de la gravité ne pouvant qu'attirer des objets entre eux, on s'attend naturellement à un ralentissement de l'expansion, pouvant conduire éventuellement à une recontraction de l'espace si la densité de matière dans l'univers est suffisamment importante. Comment peut-on tester cette hypothèse? Autrement dit, la constante de Hubble est-elle vraiment constante au cours de l'histoire de l'univers?

Génèse d'une supernova (1/3)



6

Les supernovae sont des explosions spectaculaires d'étoiles. Leur progéniteur est une étoile de faible masse, née dans un nuage de gaz et de poussière et passant l'essentiel de sa vie à consommer l'hydrogène qui la constitue, formant peu à peu de l'hélium. Lorsque le cœur de l'étoile s'est comprimé sous l'effet de sa propre gravité, les couches externes peu denses de l'étoile se sont évaporées, ne laissant plus qu'un corps inerte appelé naine blanche. Cette naine blanche pourrait demeurer telle quelle pour l'éternité.

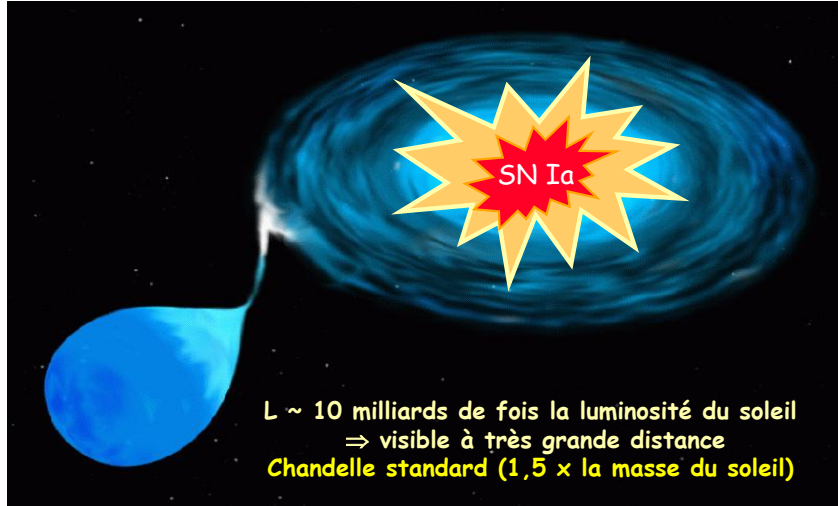
Génèse d'une supernova (2/3)

Naine blanche absorbant la matière
de son compagnon



Toutefois, contrairement à notre soleil, la majorité des étoiles sont en système binaire. La naine blanche que nous venons de décrire a donc une chance importante de se retrouver accompagnée d'une étoile à un stade antérieur de son évolution et donc moins dense. La naine blanche peut alors continuer à évoluer, absorbant peu à peu la matière de son compagnon. Mais elle ne peut grossir indéfiniment. Lorsqu'elle atteint la masse critique de 1 fois et demi la masse de notre soleil, la naine blanche explose, donnant naissance à une supernova.

Génèse d'une supernova (2/3)

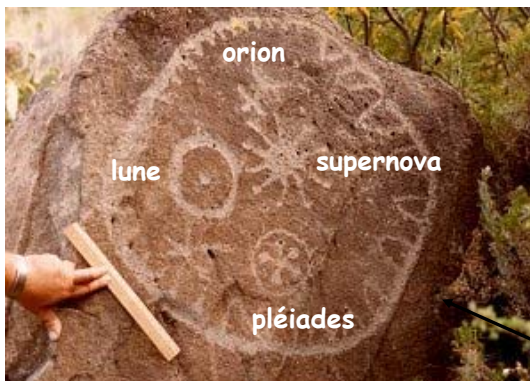


8

La lumière émise est 10 milliards de fois plus intense que celle de notre soleil, soit autant que la lumière émise par une galaxie toute entière. Ces événements astrophysiques sont donc extrêmement brillants, et visibles aussi loin que l'on peut voir des galaxies. De plus, explosant toujours à la même masse, dans des conditions toujours semblables, ce sont d'excellents étalons lumineux.

Supernova de 1054

Visible en journée
pendant 23 jours !



Pétroglyphes indiens
relatant l'événement

9

Nous pouvons retrouver la trace de plusieurs supernovae ayant explosées par le passé dans notre propre galaxie. La plus spectaculaire fut probablement celle qui explosa en 1054 et dont on retrouve le récit dans les archives de la cour impériale chinoise. Les astronomes la décrivent comme une étoile invitée apparut subitement dans le ciel, aussi brillante que la lune, six fois plus lumineuse que Vénus et visible en plein jour pendant près d'un mois! Nous ne connaissons aucun récit européen relatant cet événement spectaculaire, le moyen âge n'ayant guère laissé de place aux observations astronomiques. Par contre, des pétroglyphes indiens retrouvés en Arizona permettent clairement d'identifier cette supernova, grâce à sa position dans le ciel relativement à la lune, aux pléiades et à la constellation d'Orion.

Supernova de 1987

Explosion dans le grand nuage de Magellan,
à 160.000 années-lumière de la terre



Peu de supernovae (~1 / siècle / galaxie)



Recherche automatisée

40 000 galaxies



1 supernova par jour !

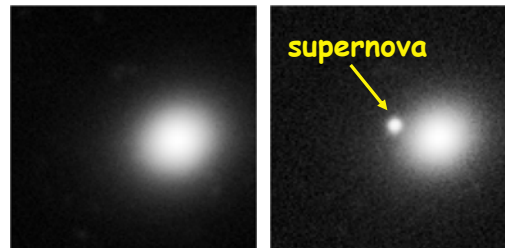
10

Durant les 4 derniers siècles, la seule supernova visible à l'œil nu depuis la terre fut celle qui se produisit en 1987 dans le grand nuage de Magellan, une petite galaxie satellite de notre galaxie, à 160 000 années-lumière de nous. L'image de gauche montre la région dite de la tarentule dans le grand nuage de Magellan. La flèche indique la position de l'étoile qui va donner naissance à la supernova clairement visible sur l'image de droite.

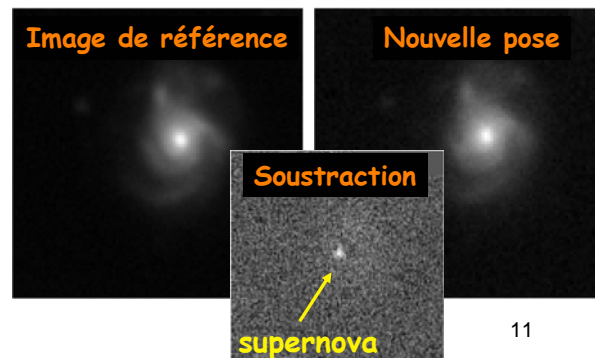
Le taux d'explosion des supernovae est estimé à environ 1 événement par siècle et par galaxie. De fait, nous ne connaissons qu'une poignée de supernovae historiques. Ainsi, pour espérer utiliser les supernovae comme sondes de l'univers lointain, il est nécessaire de mettre en place une recherche automatisée de supernovae, couvrant un très grand nombre de galaxies. Si on parvient à observer quelques 40 000 galaxies, on peut alors espérer découvrir une nouvelle supernova par jour !

Recherche de supernovae

- **recherche manuelle**
uniquement possible
si objet très visible



- **recherche automatisée**
par soustraction
d'images numériques

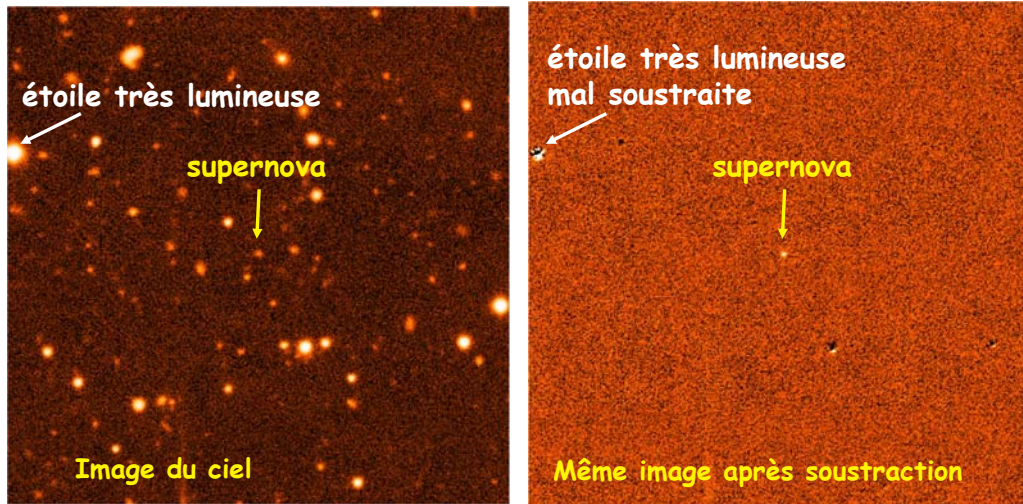


11

Dans le cadre d'une recherche automatisée, il n'est plus possible, comme par le passé, de trouver les supernovae par simple comparaison visuelle entre deux clichés (cas des 2 images du haut, où l'image de gauche est prise avant l'explosion, et celle de droite après). Aujourd'hui (images du bas), les astrophysiciens utilisent des images prises par des caméras numériques, permettant un traitement approprié. Une image de référence prise avant l'explosion est soustraite de la nouvelle pose, mettant clairement en évidence sur l'image soustraite (image en bas au centre) la supernova, pourtant non discernable dans la nouvelle pose. Cette technique de soustraction d'image est appliquée dans un grand nombre de projets recherchant des objets variables.

Sur une grande zone du ciel

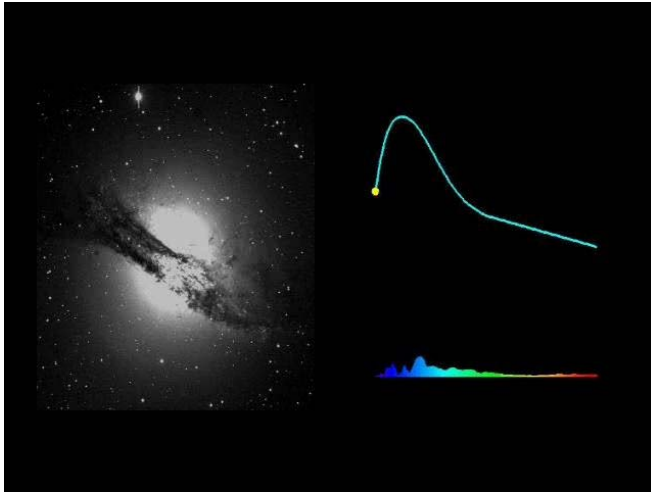
Disparition des objets stables (la plupart des galaxies et étoiles)
Apparition des objets variables (dont les supernovae)



12

La soustraction d'une image de référence prise auparavant permet ainsi de traiter rapidement une grande quantité de données. La plupart des points lumineux dans l'image de gauche sont des galaxies lointaines. Dans l'image de droite, obtenue après soustraction d'une image de référence, toutes ces galaxies, dont la luminosité est constante, ont disparu, ne laissant comme seul objet que la supernova apparue entre la pose ayant servi pour la l'image de référence et la nouvelle pose.

Etude d'une supernova



Chaque nuit, nouvelle mesure

→ courbe de lumière

→ éclat perçu

+ éclat réel connu
(chandelle standard)

→ distance de la supernova

Spectre

→ vitesse d'éloignement

13

Pour étudier l'expansion de l'univers à l'aide des supernovae lointaines, 2 données sont nécessaires pour chacune d'elles: la distance de la supernova, et sa vitesse d'éloignement. La distance est obtenue par la mesure nuit après nuit de la lumière émise par la supernova. Cette courbe de lumière nous permet de déterminer la luminosité maximale émise, et donc, puisqu'une supernova est une chandelle standard, sa distance. La vitesse d'éloignement est déterminée sur le spectre de la supernova, par la mesure du décalage des raies comme nous l'avons vu au début de cet exposé.

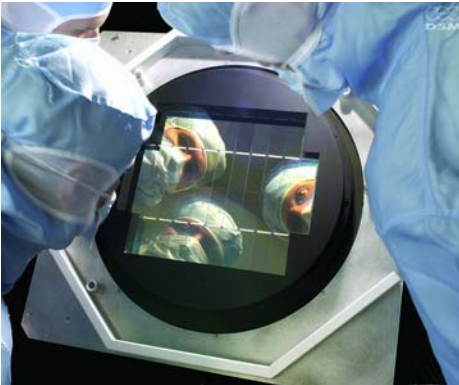
L'image montre une galaxie dans laquelle explose une supernova (point lumineux qui apparaît sur la gauche dans la zone sombre du disque de la galaxie). La courbe du haut illustre l'évolution de la luminosité perçue, tandis que le graphique du bas montre le spectre de la supernova, soit l'étalement de sa lumière après passage à travers un prisme (comme nous l'avons vu au début de l'exposé).

Une expérience dédiée : SNLS

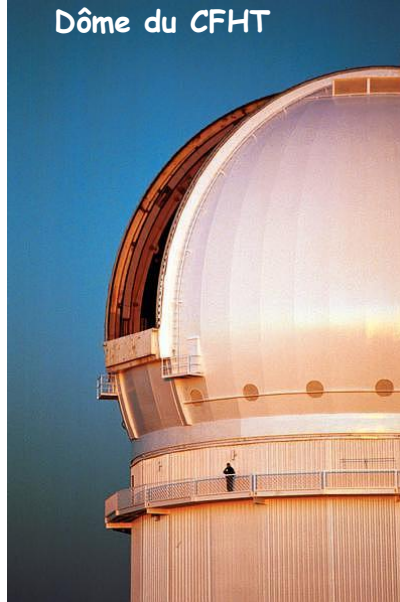
(prise des données : 2003-2008)

Prise des données au télescope de 4m
du site Canada-France-Hawaï (à Hawaï)

avec la caméra CCD Megacam
(400 millions de pixels)
la plus grande caméra numérique au monde



Dôme du CFHT



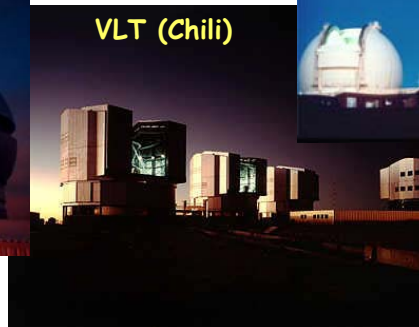
Le projet de recherche automatisée de supernovae lointaines le plus ambitieux est mené par le groupe franco-canadien SNLS (pour SuperNova Legacy Survey). Les données sont prises à l'observatoire du Canada-France-Hawaï, à 4205m d'altitude, avec un télescope comportant un miroir argenté de 4m de diamètre. Sur le chemin de ronde, la présence d'un astronome permet de se rendre compte de la taille gigantesque du dôme abritant le télescope. Le télescope est doté d'une caméra CCD de 400 millions de pixels, la plus grande caméra numérique en fonctionnement au monde en 2007 (environ 100 fois plus grosse que les appareils photos numériques en circulation aujourd'hui).

Obtention du spectre

La mesure de la dispersion de la lumière nécessite des télescopes de **8m** de diamètre (parmi les plus grands aujourd'hui)



Gemini (Hawaï + Chili)



VLT (Chili)



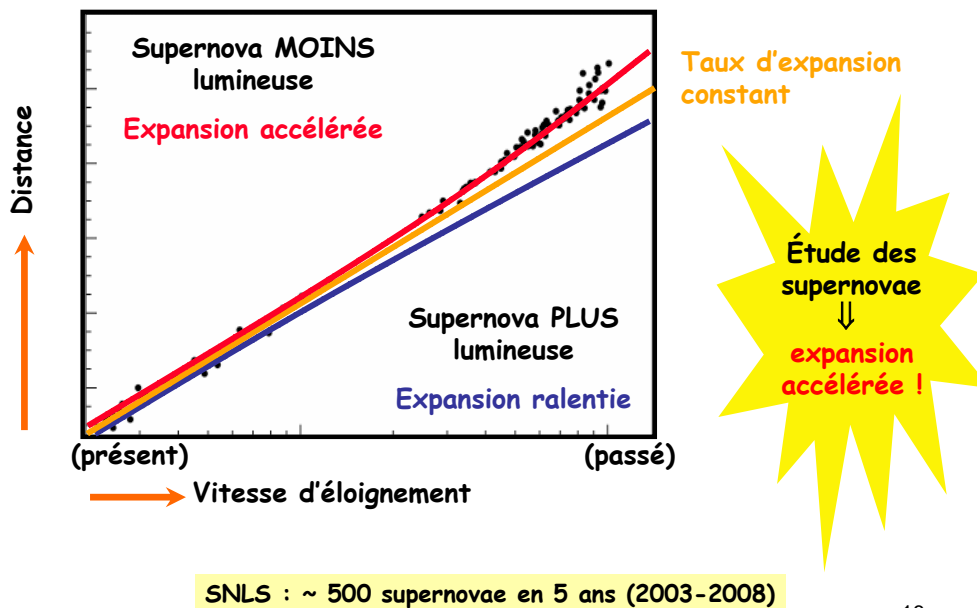
Keck (Hawaï)

Spectre → Vitesse d'éloignement

15

Pour obtenir un spectre de la lumière émise, il est nécessaire d'employer des télescopes encore plus puissants, ayant des miroirs de 8m de diamètre, comme ceux présentés sur ce transparent, situés dans les meilleurs observatoires du monde, à Hawaï ou au Chili.

Diagramme de Hubble avec SNLS



16

Les points noirs représentent près d'une centaine de supernovae découvertes par SNLS pendant la première année du projet et qui ont conduit à une publication de reconnaissance internationale. C'est déjà aujourd'hui le plus grand lot homogène de supernovae utilisé en astrophysique et en cosmologie. Le projet SNLS observera à terme (en 5 ans) plus de 500 supernovae.

Superposons à ces données la droite (en orange) correspondant à un taux d'expansion constant, c'est à dire à une relation de proportionnalité entre la distance et la vitesse d'éloignement, comme l'avait observé Hubble sur des galaxies proches. Clairement, si cette droite est en accord avec les mesures des supernovae proches (partie inférieure du graphique), ce n'est plus du tout le cas pour les supernovae les plus lointaines, c'est-à-dire pour celles ayant explosé il y a longtemps (il y a plusieurs milliards d'années).

Comparons alors les données à ce que l'on devrait avoir dans le cas d'une expansion ralentie, comme on pourrait s'y attendre en raison des effets attractifs de la gravité. La courbe bleue évolue en sens inverse de ce que montre les données!

Les données sont en effet compatibles avec la courbe rouge, et favorisent un univers dont l'expansion est accélérée, contrairement à ce que l'intuition nous avait suggéré!

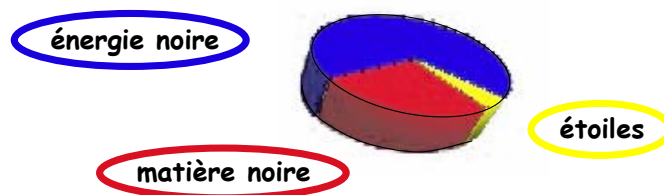
Energie noire

- **Expansion accélérée**

nouvelle forme d'énergie: **l'énergie noire**
de pression négative

- **Compte tenu de l'accélération mesurée,**
notre univers est constitué de

- **70% d'énergie noire**
- **30% de matière***



* Voir conférence sur la matière noire

17

Cette découverte va à l'encontre de tout ce qui était attendu. Comme nous l'avons vu, tout constituant connu, que ce soit du rayonnement ou de la matière, visible ou pas, ne peut que ralentir l'expansion en raison des effets d'attraction gravitationnelle sur la matière. Ces résultats requièrent donc un nouveau constituant, auquel on a donné le nom d'énergie noire, et dont la pression, négative (!), accélérerait l'expansion de l'univers. La mesure du taux d'accélération nous permet de déterminer le contenu de notre univers. Compte tenu des derniers résultats, notre univers serait formé de 70% d'énergie noire, et de 30% seulement de matière, la majorité étant invisible.

Confirmations indépendantes

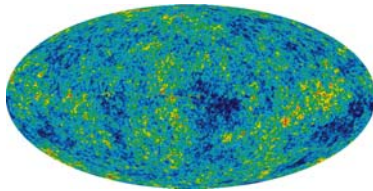
Supernovae moins lumineuses que prévu

- lumière absorbée (poussières galactiques)?
- évolution des supernovae?

Nécessité de **mesures indépendantes**

Etude du ciel en lumière radio:

image de l'univers
380 000 ans après le big bang



Etude des **galaxies** et de leurs
positions relatives à différentes
époques



Confirmation de l'existence de l'énergie noire



18

Un résultat si bouleversant a bien sûr soulevé des polémiques. Cette accélération, qui se manifeste par une baisse apparente de la luminosité des supernovae, ne pourrait-elle être expliquée par exemple par une mauvaise prise en compte de l'absorption de la lumière par des poussières galactiques? Ou par une évolution des supernovae dans le temps qui rendrait les supernovae lointaines moins lumineuses que les proches?

Des mesures complémentaires ont été menées, portant soit sur l'étude de l'univers en lumière radio qui fournit une image de l'univers 380 000 ans après le Big Bang, soit sur la distribution des galaxies dans l'univers et qui nous fournit des précisions sur la distribution de la matière au travers des âges (en regardant des galaxies à différentes époques). Ces mesures ont conduit au même constat: l'univers est dominé de nos jours par une énergie noire. Ces confirmations provenant d'études indépendantes ont permis de convaincre la communauté scientifique, jusque là sceptique devant un résultat aussi bouleversant.

Mystères de l'énergie noire

- Évolution : nous vivons à un instant bien particulier où coexistent dans notre univers 3 composantes très différentes, alors que dans le **passé**, univers dominé par la **matière noire**, dans le **futur**, univers dominé par l'**énergie noire**



- Réponse de la physique théorique :
aucune interprétation fiable aujourd'hui

19

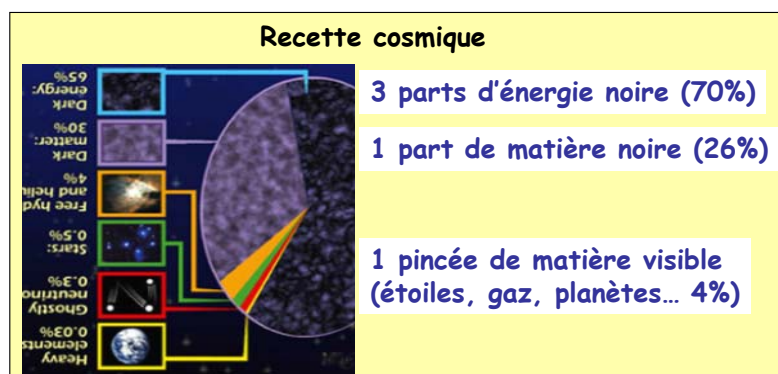
Cette énergie noire pose problème. En particulier, nous vivons aujourd'hui à un instant bien particulier où coexistent en proportions à peu près semblables (à un facteur 10 près) trois composantes de nature totalement différente: l'énergie noire, la matière noire et les étoiles. Toutefois, les évolutions différentes des densités de ces 3 espèces font que dans un passé relativement proche l'univers était essentiellement constitué de matière noire, alors que dans un futur pas si lointain il ne serait plus constitué que d'énergie noire, avec une contribution tout à fait négligeable de matière noire ou d'étoiles!

Qui plus est, aucune théorie solide ne permet aujourd'hui d'expliquer l'origine de l'énergie noire.

Conclusion

Malgré l'accroissement fantastique de la précision des mesures, l'univers nous apparaît encore plus sombre et mystérieux qu'on le pensait quelques années plus tôt.

La **matière ordinaire** est très **minoritaire** (4%), tandis que **96%** de l'univers est soit de la **matière noire** (26%), soit de l'**énergie noire** (70%).

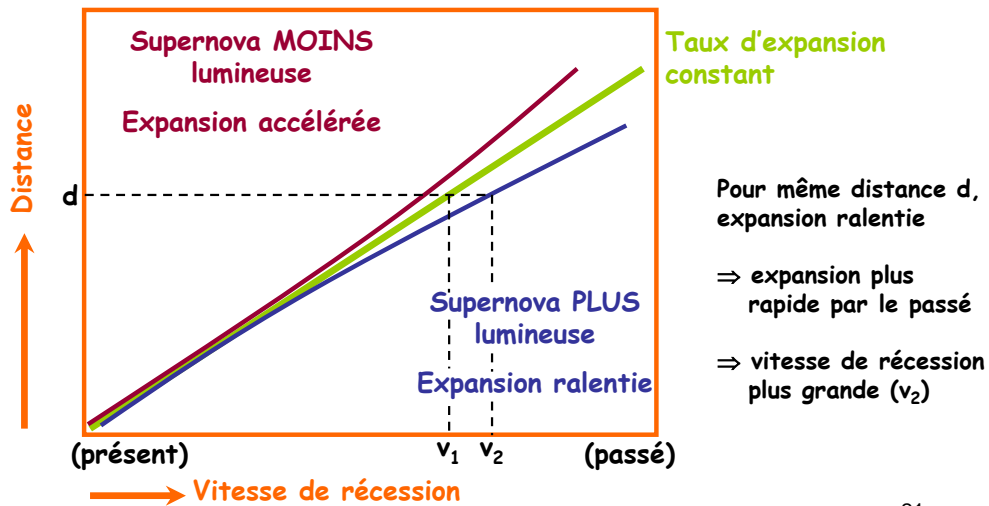


20

Notre univers est donc bien plus sombre encore que nous l'avions imaginé, et toutes les étoiles, nébuleuses et galaxies que les astronomes ont étudiées durant des millénaires ne constituant finalement qu'une infime fraction de notre univers. Non seulement la majorité de la matière de notre univers est invisible, mais la matière elle-même ne constitue qu'1/3 de l'univers, le reste étant sous une forme à laquelle a été donnée le nom d'énergie noire, dont la nature nous échappe encore.

Diagramme de Hubble

Un taux d'expansion variable?
(vitesse = $H(t) \times$ distance)



Comment ces données nous permettent-elles, enfin, de déterminer l'évolution éventuelle du taux d'expansion de notre univers? Considérons 2 supernovae situées à la même distance de l'observateur; l'une explosant dans un univers dont le taux d'expansion est constant (courbe verte), l'autre dans un univers dont l'expansion est ralentie avec le temps (courbe bleue). Pour cette 2ème, le taux d'expansion lors de l'explosion était donc plus grand que le taux d'expansion aujourd'hui. Par conséquent, sa vitesse de récession lors de l'explosion, qui traduit directement le taux d'expansion, est plus grande que pour la supernova ayant explosé dans un univers dont le taux d'expansion est constant, égal à celui de nos jours. Que donnent les données?

Confirmation indépendante

Supernovae moins lumineuses que prévu

- lumière absorbée (poussières galactiques)?
- évolution des supernovae?

Nécessité de **mesures indépendantes**

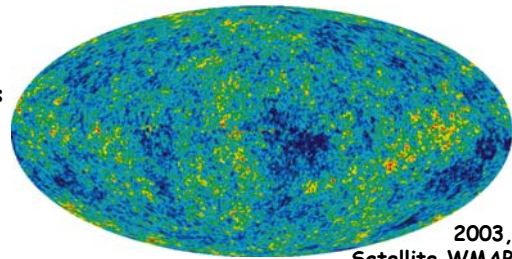
Etude du ciel en lumière radio: **image de l'univers 380 000 ans après le big bang**

Taille caractéristique des grumeaux
liée à composition et masse de l'univers
(matière + énergie noire)

Comparaison aux simulations
sur ordinateur



Confirmation de l'existence de l'énergie noire



22

Un résultat si bouleversant a bien sûr soulevé des polémiques. Cette accélération, qui se manifeste par une baisse apparente de la luminosité des supernovae, ne pourrait-elle être expliquée par exemple par une mauvaise prise en compte l'absorption de la lumière par des poussières galactiques? Ou par une évolution des supernovae dans le temps qui rendrait les supernovae lointaines moins lumineuses que les proches?

Une réponse a été apportée par le satellite WMAP, qui a observé le ciel en lumière radio. L'image qu'il a pu obtenir est celle de l'univers tel qu'il était à l'âge de 380 000 ans: un univers extrêmement uniforme, avec de petits grumeaux qui formeront plus tard les galaxies. La taille caractéristique de ces grumeaux dépend de la composition et de la masse de l'univers. Une comparaison de cette carte avec des simulations sur ordinateur ont permis de confirmer, de manière totalement indépendantes aux études menées sur les supernovae, l'existence d'une grande quantité d'énergie noire de nos jours.