

**Texte de la 184<sup>ème</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 2 juillet 2000.**

**La cosmologie moderne : les nouveaux outils d'observations de l'Univers  
par Laurent Vigroux**

La nuit semble être noire. Il n'en est rien. Avec les instruments d'observations modernes, la nuit est brillante. Mais le paradoxe est qu'elle ne soit ni noire, ni infiniment claire. Brillante certes, mais pourquoi si peu ? Dès le XVII<sup>e</sup> siècle, le physicien Danois Olberg avait montré tout le parti que l'on peut tirer de la brillance du ciel. Si l'Univers était uniforme et infini, la brillance du ciel due à la superposition de l'émission de toutes les sources qui le composent devrait être infinie. Heureusement pour la vie sur Terre, il n'en est rien. Il a fallu attendre le milieu du vingtième siècle pour comprendre les implications profondes de ce paradoxe. Le cadre de cette compréhension a été fourni par Einstein avec sa théorie de la gravitation. Les observations de Hubble dans les années 1920-1930 ont montré que l'Univers était en expansion. On sait maintenant que les constituants de l'Univers ne sont pas immuables, ils évoluent dans le temps. On sait qu'ils ne sont pas répartis de manière uniforme dans l'espace, et on sait que l'Univers observable est fini. C'est pourquoi la nuit n'est que grise. Notre compréhension de la cosmologie a fait des progrès spectaculaires ces vingt dernières années. Cela tient aux progrès des observations, grâce surtout aux observatoires spatiaux, mais aussi aux progrès spectaculaires de la théorie et des simulations numériques. Quels sont ces progrès, c'est ce que nous allons passer en revue dans la suite de cette conférence.

**Le rayonnement**

La principale source d'information sur l'Univers et ses constituants provient de la lumière. Par lumière, on entend l'ensemble du spectre des ondes électromagnétiques, qui s'étend des rayons gamma et X, à haute énergie, jusqu'aux ondes micro-ondes et radios à basse énergie, en passant par la lumière visible, à laquelle nous sommes plus habitués. Le véhicule d'information de la lumière est une particule appelée photon, et, dans les théories de physique moderne, on peut décrire la propagation de la lumière aussi bien en termes d'ondes, que de photons. En général, à basse énergie, le nombre de photons reçus par un télescope moderne est très élevé, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers par seconde, et on préfère décrire les phénomènes en termes d'ondes. A haute énergie, les photons sont plus rares, de l'ordre de quelques photons par seconde en rayons X, et de quelques photons par jour dans les gammas de très grande énergie, et on préfère décrire les phénomènes en terme de photons. Mais la physique sous-jacente reste la même. L'avantage principal de la lumière est qu'elle se propage en ligne droite sans être trop absorbée. Elle permet donc d'observer des sources très lointaines et de les localiser. Depuis des temps immémoriaux, la lumière a été le principal, sinon le seul, moyen d'observation du ciel. Les deux principales sources de lumière sont un rayonnement fossile lié aux premières étapes de l'évolution de l'Univers, et la somme des rayonnements émis par les constituants de l'Univers, étoiles, galaxies et amas de galaxies.

**Le rayonnement fossile**

Contrairement aux rêves des technocrates, les plus grandes découvertes sont le fruit d'actions non préméditées. Il en est ainsi de la découverte du rayonnement fossile. La guerre de

39-45 a eu de nombreux effets négatifs. Elle a néanmoins entraîné un progrès notable des techniques. Hiroshima a montré que ce n'était pas toujours pour le meilleur. Mais les progrès des techniques des radars ont été à l'origine des progrès spectaculaires de la radioastronomie après guerre. Le relais fut pris ensuite par le développement des télécommunications. C'est ainsi que deux ingénieurs de la Bell Telephone, Penzias et Wilson, en essayant de régler une antenne très sensible, ont buté sur un bruit de fond isotrope et continu. L'étude de ce bruit de fond a permis de l'identifier à un rayonnement prédit dans le cadre des théories d'expansion de l'Univers. Contrairement à ce que l'on affirme souvent, ce rayonnement n'est pas lié au big-bang. Il est produit bien après l'explosion initiale. Il existe dans n'importe quelle théorie d'expansion qui prédit que l'Univers est passé dans des phases suffisamment chaudes et denses pour que les atomes soient entièrement ionisés. Dans ces conditions, l'Univers est rempli de protons, de noyaux, d'électrons et de photons. Les photons interagissent avec les électrons. Ils sont en équilibre avec eux, et ne peuvent pas se propager sur de grandes distances. A cause de l'expansion de l'Univers, la matière se refroidit, jusqu'au moment où les atomes se forment. Les électrons se combinent avec les noyaux pour former des atomes. L'Univers devient alors transparent pour les photons, qui n'ont plus rien pour interagir. Le spectre d'énergie des photons est alors celui d'un corps noir à la température de l'Univers à l'époque de la recombinaison. Par la suite, la température de ce corps noir se refroidit du fait de l'expansion de l'Univers. Il est à l'heure actuelle voisin de  $2,7^{\circ}\text{K}$ , c'est à dire  $-270,3^{\circ}\text{C}$ . C'est pour cela que l'on ne l'observe que dans le domaine des micro-ondes et des ondes radio. Le pic de l'émission se trouve vers 1,4 mm. Depuis la découverte initiale, il aura fallu trente ans pour que l'on puisse mesurer ce spectre d'émission de corps noir cosmologique avec une grande précision. Cela fut effectué au moyen du satellite américain COBE lancé en 1989. On peut maintenant affirmer avec certitude que cette émission est bien d'origine cosmologique.

Ce rayonnement est isotrope et uniforme avec une très grande précision. On peut néanmoins déceler des petites déviations, qui, traduites en termes de température, correspondraient à des fluctuations de quelques micro kelvin. C'est-à-dire des fluctuations de quelques parties par million. Ces fluctuations dans le spectre des photons correspondent à des fluctuations de densité des électrons à l'époque de la recombinaison. L'Univers était alors presque homogène, mais pas tout à fait. Ces fluctuations de densité ont par la suite donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Mesurer les fluctuations de température du corps noir cosmologique revient à déterminer les fluctuations de densité pratiquement à l'origine du monde. COBE fut le premier observatoire qui permit de prouver l'existence de ces fluctuations. Malheureusement, ce résultat est peu contraignant pour les modèles cosmologiques, car les échelles angulaires auxquelles COBE avait accès sont sans commune mesure avec la taille des galaxies et des amas que l'on observe aujourd'hui. COBE a prouvé que l'Univers n'était pas complètement homogène ; il n'a pas permis de déterminer dans quel type d'univers nous vivons. Pour progresser, il faut réaliser des instruments qui ont une résolution angulaire voisine de quelques minutes d'arc, bien mieux que les 7 degrés de COBE. BOOMERANG, un télescope américain italien, lancé en 1999 par un ballon dans un vol circum-antarctique de quinze jours, a réussi pour la première fois à fournir une carte des fluctuations à des échelles angulaires de l'ordre de la vingtaine de minutes d'arc. L'analyse de ces fluctuations a montré qu'elles impliquaient un univers de type plat. Rappelons qu'il y a trois types de géométries possibles dans les modèles d'univers compatibles avec la relativité générale d'Einstein. Ces univers sont définis par leur courbure, positive, négative ou nulle. Les résultats de BOOMERANG semblent montrer que nous sommes dans ce dernier cas, c'est-à-dire le modèle le plus simple, le plus banal. Tant

pis. Pour être tout à fait certain de ces résultats, il faudra attendre le satellite européen PLANCK Surveyor, qui sera lancé en 2007 par l'Agence Spatiale Européenne. Ce satellite aura une meilleure résolution angulaire que BOOMERANG et les instruments similaires qui sont en cours de réalisation dans divers pays, dont la France, et surtout, il effectuera une cartographie complète du ciel, ce que ne feront pas les autres projets. Vous voulez savoir dans quel univers vous vivez ? Attendez 2007 et vous aurez la réponse.

### **L'Univers et ses constituants**

L'étude du corps noir cosmologique permet de voir quelle était la structure de l'Univers à ses débuts. Cela n'indique en rien comment se sont formés les objets, galaxies, ou amas de galaxies, que nous observons dans notre environnement proche. Heureusement, nous pouvons utiliser une loi physique bien connue pour remonter le temps : la vitesse finie de la lumière. Observer une galaxie située à un milliard d'années lumière, c'est l'observer telle qu'elle était il y a un milliard d'années. La pêche aux galaxies jeunes consiste à aller rechercher les plus lointaines. Malheureusement, une autre loi de la physique vient contrarier ce plan : la luminosité apparente d'un objet diminue comme le carré de la distance de cet objet ; c'est-à-dire très rapidement. Projets une galaxie dix fois plus loin, elle nous apparaîtra cent fois plus faible. Pour donner un ordre de grandeur, une galaxie comme la nôtre située à 5 milliards d'années lumière, soit à la moitié de son âge actuel, nous apparaît cent fois moins brillante que le ciel d'une nuit noire. Autant dire que la recherche des galaxies jeunes nécessite de très grands télescopes, qui sont les seuls à avoir un pouvoir collecteur suffisant pour détecter les galaxies les plus lointaines. C'est pourquoi, cette recherche ne s'est avérée fructueuse qu'après la mise en service des grands télescopes de la classe 8-10 m de diamètre. Les premiers furent les télescopes Keck situé au sommet du Mauna Kea dans l'île d'Hawaii. L'Europe n'est pas en reste avec les quatre télescopes de 8 m situés dans le désert d'Atacama, et qui constituent le Very Large Telescope. En fait la recherche a commencé avec le Hubble Space Telescope, satellite de la NASA avec une forte participation de l'ESA. Le fait d'être dans un satellite, au-dessus de l'atmosphère terrestre, permet d'avoir des images beaucoup plus piquées qu'au sol. C'est un atout indispensable pour détecter les objets les plus faibles. La stratégie qui a été suivie ces dix dernières années a consisté à détecter des galaxies lointaines avec le Hubble Space Telescope, puis à les caractériser avec les télescopes géants au sol. Cette méthode s'est révélée payante, puisque entre 1996 et 1998, plusieurs groupes ont réussi à démontrer que les galaxies lointaines étaient différentes des galaxies locales. Si on retrouve bien le pendant des galaxies proches, on trouve aussi pléthore de galaxies plus petites, et qui ont des couleurs plus bleues que les galaxies locales. Cette couleur est due à la présence d'étoiles jeunes. Ces petites galaxies sont donc dans des phases intenses de formation d'étoiles, environ trois fois le taux observé dans les galaxies proches.

Chercher des galaxies jeunes en utilisant la lumière visible, est-ce la bonne approche ? Pour répondre à cette question, il faut savoir quels sont les mécanismes d'émission de lumière par les galaxies. La source principale d'énergie est la gravitation. C'est elle qui permet à la galaxie d'exister en tant qu'objet individuel. C'est elle aussi, qui permet aux étoiles de se former et d'atteindre en leur centre des densités et des températures suffisantes pour que les réactions nucléaires se déclenchent. La source principale de rayonnement d'une galaxie est due aux étoiles qui la peuplent. Une galaxie normale contient quelques centaines de milliards d'étoiles. L'énergie nucléaire dégagée en leur sein se transforme en rayonnement. Le soleil nous éclaire à l'énergie

nucléaire. Paradoxe amusant sur les énergies propres. Une galaxie n'est pas composée seulement d'étoiles. Elle est aussi remplie de gaz et de poussières. Ces poussières interstellaires sont des grains allant de quelques centaines d'atomes, jusqu'à des grains microscopiques de quelques microns de longueur. Ils se décomposent en deux grandes familles, des grains carbonés, et des silicates. Ces grains absorbent une grande partie du rayonnement des étoiles. Du coup, ils sont chauffés et émettent eux-mêmes de la lumière. Certes, c'est un chauffage modeste, puisque la température moyenne des grains interstellaires est voisine de 20°K, soit -250°C. Cela est néanmoins suffisant pour que cette émission soit mesurable dans l'infrarouge. Ce processus de transformation de l'énergie, absorption du rayonnement des étoiles, chauffage des poussières et ré-émission dans l'infrarouge peut être si efficace que dans des cas extrêmes, des galaxies rayonnent presque 100 % de leur énergie dans l'infrarouge. Cela fut une des grandes découvertes du satellite IRAS lancé en 1983 et réalisé en partenariat américain, anglais et hollandais. Ce satellite a été à l'origine d'une lignée de satellites dédiés à l'étude du ciel en infrarouge : ISO, européen lancé en 1995, SIRTf américain qui sera lancé en 2002 et FIRST, européen, qui sera lancé en 2007. Chacun d'eux représente un gain en termes de sensibilité, couverture en longueur d'onde et résolution spatiale. En combinant les observations d'ISO, et celles de COBE, on a pu montrer que les galaxies émettent globalement 3 fois plus d'énergie dans l'infrarouge que dans le visible et l'ultraviolet. ISO a montré que, lorsqu'elles avaient la moitié de leur âge actuel, les galaxies étaient beaucoup plus souvent de forts émetteurs infrarouges. Si seulement 3 % des galaxies actuelles émettent plus d'énergie dans l'infrarouge que dans le visible, elles étaient 30 % dans ce cas il y a 5 milliard d'années. Quelle est l'origine de ce phénomène ? Selon toute vraisemblance, il s'agit d'épisodes de formation d'étoiles intenses qui se sont déroulées dans le passé. Par l'étude des galaxies ultra lumineuses en infrarouge, découvertes par IRAS, on sait que ces galaxies sont en interaction avec d'autres galaxies et qu'elles subissent des flambées de formation d'étoiles très intenses, à la suite de ces interactions. Les observations dans le visible ont montré qu'il y avait, il y a quelque 5 milliards d'années, une population de petites galaxies qui n'ont pas leur équivalent de nos jours ; les observations en infrarouge montrent que les grandes galaxies de l'époque subissaient des flambées de formation d'étoiles liées à des interactions entre galaxies. La tentation est forte de réconcilier ces deux observations dans un scénario où les petites galaxies sont progressivement avalées par les grosses, entraînant ces épisodes de forte émission infrarouge. La vie des galaxies n'est pas plus tranquille que celle des êtres vivants. Les gros mangent les petits. Ce processus de fusion hiérarchique est prédit par les modèles cosmologiques. La rapidité avec laquelle il se déroule dépend fortement des paramètres du modèle. On peut donc par l'étude des galaxies lointaines contraindre les modèles et la valeur de leurs paramètres. SIRTf, et surtout FIRST permettront d'affiner cette vision, et surtout de pouvoir retracer dans le temps cette évolution. ISO n'a pu que décrire ce qui s'est passé lors des cinq derniers milliards d'années, FIRST permettra de remonter presque jusqu'au début de l'histoire des galaxies.

ISO, SIRTf et FIRST permettent de détecter ces galaxies lointaines ; ils permettent d'en mesurer le flux en fonction de leur longueur d'onde ; leur faible résolution angulaire ne leur permet pas d'en réaliser de véritables images. Pour ces observatoires, les galaxies sont des points. Pour en réaliser des images, il faut utiliser un autre principe. Même dans l'espace, la résolution angulaire d'un télescope est limitée par un phénomène appelé diffraction. Il est impossible de résoudre deux sources qui ont séparées par des angles plus petit qu'un angle limite égal au diamètre du télescope divisé par la longueur d'onde de l'observation. Pour un télescope de 2 m en orbite, le pouvoir séparateur est limité dans le visible à 0.1 seconde d'arc, soit 1/36000 de

degré. Cela peut paraître peu, mais c'est déjà trop pour réaliser des véritables images d'objets qui ne font que quelques secondes d'arc de diamètre, comme les galaxies qui nous intéressent. Le diamètre des télescopes en orbite est limité par les capacités de lancement. Même si les USA et l'Europe envisagent de lancer vers 2010 un télescope de 8 m de diamètre en orbite, le New Generation Space Telescope, cela restera encore très loin de ce qu'il faut pour pouvoir faire des images de ces galaxies. Sur terre, à ce phénomène de diffraction se rajoute une déformation des images due à la turbulence atmosphérique ; les images ont des résolutions de l'ordre de la seconde d'arc, les bonnes nuits. La seule solution pour s'affranchir, soit de la diffraction, soit de la turbulence atmosphérique, c'est d'utiliser un autre principe d'imagerie : les interférences. Comme on l'apprend dans les classes de physique, si l'on combine la lumière captée par deux télescopes, on obtient un système de franges noires et brillantes, qui dépend de la phase respective des ondes lumineuses qui arrivent sur les deux télescopes. En analysant le système de frange, on peut calculer le déphasage des deux ondes, et donc en déduire leur direction d'origine. L'avantage de cette méthode est que l'interfrange entre les franges brillantes et sombres dépend du rapport entre la distance entre les deux télescopes et la longueur d'onde de l'observation. En combinant deux télescopes distants de 100 m, on peut obtenir le même pouvoir séparateur qu'avec un télescope monolithique de 100 m de diamètre, et ce, quelque soit le diamètre des télescopes de l'interféromètre. Ce principe est utilisé depuis de nombreuses années en radioastronomie. Il commence à être utilisé dans le visible. Le Very Large Telescope européen aura un mode interférométrique combinant la lumière reçue par les quatre télescopes qui le composent. Mais l'instrument privilégié pour l'étude des galaxies lointaines sera ALMA. L'Atacama Large Millimeter Array sera un réseau de 64 antennes de 12 m de diamètre chacune, qui sera installé de manière conjointe par les américains et les européens dans le désert de l'Atacama à 5000 m d'altitude, au Chili. Il fonctionnera dans l'infrarouge lointain et le submillimétrique. Sa mise en service est prévue vers 2010. Il permettra d'obtenir des images avec une résolution angulaire meilleure qu'un centième de seconde d'arc. Enfin, nous pourrions réellement voir à quoi ressemble une galaxie jeune.

## **La matière**

L'Univers n'est pas constitué que de rayonnement, il est aussi matériel. Les étoiles, les galaxies ont été découvertes il y a longtemps. Mais cela ne fait pas le compte. Dès 1935, l'astronome Zwicky, en utilisant le télescope du mont Palomar, avait montré qu'il devait y avoir une quantité de matière importante qui n'avait pas encore été découverte. Il était arrivé à cette conclusion en mesurant les vitesses des galaxies dans les amas de galaxies. Depuis Newton, on sait qu'il existe une relation entre l'accélération des corps et la masse gravitationnelle. Si on augmentait la masse du soleil, la terre tournerait plus vite autour du soleil. Inversement, si on connaît la distance de la terre au soleil et la vitesse de rotation de la terre, on peut en déduire la masse du soleil. Il en est de même avec les galaxies dans un amas. La mesure de la vitesse des galaxies dans un amas permet de calculer la masse de l'amas. Comme on connaît la masse des galaxies, de par leur luminosité, il est facile de comparer les deux estimations. Problème : la masse estimée par la dynamique est dix fois plus grande que celle identifiée dans les galaxies. On a trouvé par la suite que les galaxies tournaient également trop vite pour leur masse identifiée dans les étoiles. Il existe donc une composante de matière cachée, qui représente presque 90 % de la masse de l'Univers. Bien que les étoiles et les galaxies soient des objets brillants et

remarquables, elles ne représentent qu'une infime partie de l'Univers. Qu'est ce que cette masse cachée ?

Depuis une cinquantaine d'années, les astrophysiciens l'ont cherché sous toutes les formes possibles. D'abord de la matière entre les étoiles ; on a trouvé un milieu interstellaire composé de gaz et de poussières, mais il ne représente qu'un dixième de la masse des galaxies. On a postulé un milieu gazeux dans les amas de galaxies, entre les galaxies. On l'a trouvé. Il s'agit d'un gaz très peu dense, un noyau par litre, et très chaud, quelques dizaines de millions de degrés. Ce milieu a été découvert dans les années 70 grâce à son émission dans les rayons X. Mais là encore, cela ne suffit pas, bien que ce gaz représente une masse supérieure d'un facteur 2 à la masse présente dans les galaxies. On l'a cherché sous la forme d'étoiles isolées de très faible masse, des gros Jupiter en somme. Ces étoiles sont trop petites pour que des réactions nucléaires s'y déclenchent. Elles restent donc sombres, d'où leur nom de naines brunes. On en a trouvé, mais pas assez. Les recherches se poursuivent. Les physiciens des particules se sont mis de la partie, en cherchant des particules inconnues. Bien que les théories dites supersymétriques qui tentent de concilier la gravitation et la mécanique quantique, prédisent l'existence de nouvelles particules, il n'est pas évident de chercher des particules dont on ignore tout. Pour l'instant, les recherches sont vaines. La nature de cette matière noire reste la grande énigme de la cosmologie.

Mais la matière noire devient de moins en moins noire. On arrive par des moyens détournés à en réaliser des images. Le gaz des amas est un outil privilégié d'analyse. Ce gaz est maintenu dans l'amas par l'attraction gravitationnelle exercée par la matière noire. Si l'on connaît la répartition de ce gaz, on peut en déduire la répartition de la matière en résolvant les équations de la dynamique. Cette méthode avait été mise au point depuis quelques années, mais on manquait d'une information essentielle : le profil de température du gaz en fonction de la distance à l'amas. Le gaz est en effet en équilibre entre sa pression interne, liée à sa température, et l'attraction gravitationnelle. Sans profil de température, on ne peut pas résoudre les équations de l'équilibre. C'est maintenant chose faite grâce à l'observatoire en rayon X européen XMM-Newton. Ce satellite, lancé à la fin de 1999, vient de permettre pour la première fois de déterminer de manière précise le profil de température du gaz dans un amas. Cela a permis d'en déduire le profil de densité de la matière noire. De là, on peut calculer quelques grandeurs typiques de cette matière noire comme sa température, sa pression interne, ou sa compressibilité. Heureusement pour les théoriciens, ces résultats ne sont en accord avec aucune des théories qui avaient été développées jusque-là. Il leur reste du travail pour encore quelques années. Plus directement, la matière noire fournit elle-même les outils pour l'observer. Dans la gravitation générale d'Einstein, la lumière ne se propage pas en vraie ligne droite. Elle se propage le long de lignes qui sont déformées au passage d'une masse gravitationnelle. Cette prédiction a été vérifiée de manière éclatante au début du siècle en observant comment la position d'une étoile sur le ciel semblait changer, au fur et à mesure que les rayons lumineux entre elle et nous passaient près du soleil. De la même manière, si nous observons une galaxie située derrière un amas de galaxies, l'image de cette galaxie nous apparaîtra déformée à cause de son passage dans le champ gravitationnel de l'amas. La matière noire déforme les images de l'Univers lointain. Cet effet de lentille gravitationnelle est connu depuis longtemps. Mais ce n'est que depuis quelques années que nous disposons d'instrument d'imagerie suffisamment sensible et fiable pour pouvoir l'utiliser de manière systématique pour étudier la distribution de la matière noire dans les amas. L'image des galaxies déformées par un effet de lentille gravitationnelle se présente sous la forme d'un arc. Le premier arc gravitationnel a été trouvé grâce à des observations menées sur le télescope Canada-France-Hawaii en 1985. Depuis, en particulier grâce au télescope spatial

Hubble, on en a trouvé dans presque tous les amas observés. De la forme de l'arc, on peut en déduire la perturbation des rayons lumineux, et donc la distribution de la matière noire. La problématique de l'observation est renversée. D'habitude, on a une source, un télescope et on étudie l'image. Dans ce cas-là, on dispose d'une source, d'une image, et on calcule le télescope qui a produit cette image. Le télescope à matière noire est le plus gros instrument dont nous disposons ; chaque amas de galaxie représente un télescope de plusieurs centaines de millions d'années lumières de diamètre et de plusieurs dizaines de milliers de milliards de masses solaires de masse ! Heureusement que la nature nous l'offre. Le télescope à matière noire a déjà permis de faire des cartes de la matière noire dans les amas. Très récemment, encore, grâce à des observations effectuées avec le télescope Canada-France-Hawaii, il a été possible d'étendre cette méthode à des échelles dépassant la taille des amas classiques. Ce sera le domaine privilégié de recherches de MEGACAM, la prochaine grande caméra d'imagerie qui sera installée sur le télescope CFH à la fin 2001.

*Insérer ici les trois figures*

Un univers plat, des galaxies qui se forment par fusion hiérarchique, de la matière noire qui sert de télescope, les progrès accomplis ces dernières années ont profondément bouleversé notre connaissance de l'Univers et de ses constituants. En combinant les observations à toutes les longueurs d'onde, grâce aux observatoires spatiaux, nous avons pratiquement identifié toutes les sources qui sont à l'origine de la brillance du ciel. Le recensement de l'Univers est maintenant pratiquement achevé. C'est en soi un résultat spectaculaire. L'aboutissement de recherches commencées il y a plus de deux mille ans. Mais l'aventure continue. Il nous faut maintenant comprendre la physique de ces objets, leurs interactions et leur évolution. Il faut préciser le type d'univers dans lequel nous vivons. La génération actuelle des grands télescopes au sol, et la prochaine génération d'observatoires spatiaux permettra d'atteindre tout ou partie de ces objectifs. La grande inconnue reste la nature de la matière noire. Toutes les recherches ont été vaines. Dans quelles directions chercher maintenant ? Des pistes existent. Seront-elles fructueuses ? Bien malin qui peut le prédire. On ne peut qu'espérer que la solution sera trouvée un jour. Ce sera probablement par une découverte fortuite comme l'a été la découverte du rayonnement fossile.

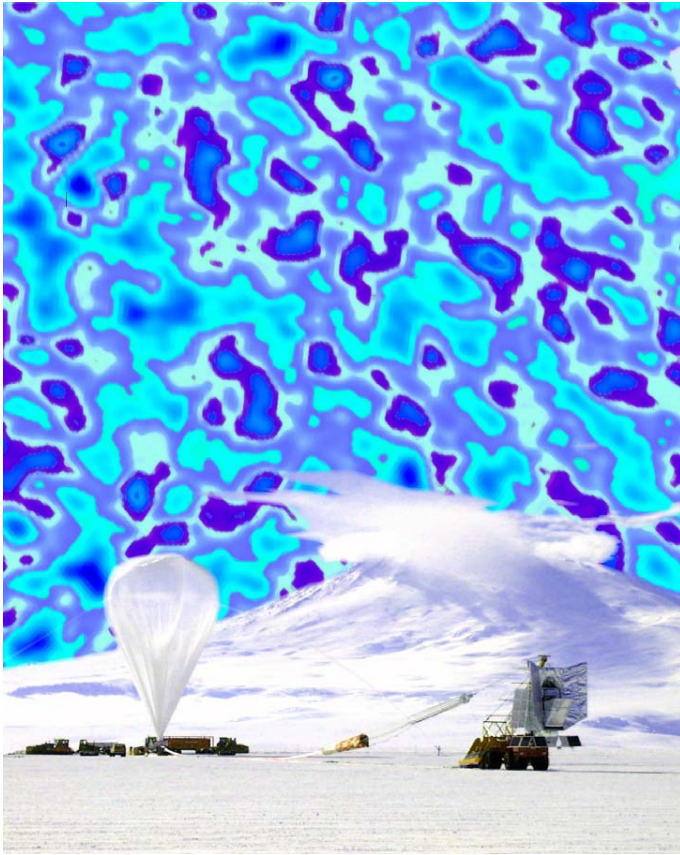


fig1



VLT at Paranal

ESO PR Photo 46/99 (8 December 1999)

© European Southern Observatory



fig2





fig 3