



Société Astronomique de Lyon

LA MAIN INVISIBLE DE L'UNIVERS
Christopher CONSEJICE
(voir notes de lecture d'Alain BRÉMOND page 4)



Montage B.D.N.

Bulletin N°63 - Juin 2007

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE LYON

BULLETIN N° 63 - Juin 2007

SOMMAIRE

| | Page |
|---|------|
| Editorial : le mot du président par Alain BRÉMOND | 3 |
| Notes de lecture Alain BRÉMOND, Daniel SONDAZ | 4 |
| Les rayons cosmiques conférence de Gaëlle BOUDOUL mise en texte par Juliette BRÉMOND | 6 |
| Quelques observations au pays des hommes intègres par Bernard CHEVALIER | 13 |
| Cours de cosmologie par Alain BRÉMOND | 15 |
| Le ciel de l'été | 24 |

Merci à : Juliette BRÉMOND, Alain BRÉMOND, Bernard CHEVALIER,
Bernard DELLA NAVE (BDN) et Daniel SONDAZ, pour leur contribution.

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE LYON

A succédé en 1931 à la Société Astronomique du Rhône, fondée en 1906.
Siège Social : Observatoire, avenue Charles André, F 69230 Saint Genis-Laval.
Tel. 06 74 42 26 29 e-mail : info@SoAsLyon.org Internet : <http://soasLyon.org>
Trésorerie : C.C.P. Lyon 1822-69 5
Cotisation
2006/2007 : 37 €
Scolaire : 25 €
Famille : 52 €
Conférences : 5 €, gratuites pour les cotisants,
et les habitants de Saint Genis-Laval
Réunions : Le vendredi, accueil de 21H à 21H30.
Observations. Bibliothèque, prêt de livres et de vidéos.
Discussions et activités.
Bulletin : Destiné aux adhérents. Les articles que vous désirez faire
paraître dans le bulletin sont à envoyer au siège de la Société
ou par e-mail Sal@astrosurf.com.

ÉDITORIAL

Le mot du Président

Alain BRÉMOND



Ce nouveau numéro de notre Bulletin est le fruit de la collaboration de plusieurs d'entre vous. Je tiens à saluer la venue de Bernard Della Nave à qui nous devons de nouvelles idées - dont cet éditorial !

Nous poursuivons la publication des textes des séances d'initiation et, lorsque la boucle sera bouclée, il y aura toujours de la place pour des mises à jours : l'astronomie avance si vite.

Les séances d'observation, à l'observatoire comme au crêt Malherbes ont été nombreuses cette année, avec une présence de plus en plus grande. C'est ainsi que la S.A.L. a fait honneur à la soirée d'observation de l'Observatoire avec huit télescopes mis à la disposition du public.

Merci à Bernard Chevalier pour l'organisation parfaite des séances d'observation hors les murs.

Du fait de la très grande diversité des nouvelles découvertes astronomiques, il n'est pas possible de toutes les rapporter dans ce bulletin, et certains d'entre nous, en particulier Daniel Sondaz, font des efforts pour sélectionner les sujets les plus intéressants ou les plus surprenants. Aidez-nous à suivre cette actualité astronomique.

Je terminerai ce bref éditorial en faisant appel à vous tous pour des articles, des notes, même brèves ou des idées de rubriques. Envoyez-nous aussi vos photographies astronomiques.

Astronomiquement et amicalement vôtre,

Alain Brémond

Président

Notes de lecture par Alain BRÉMOND

La main invisible de l'Univers

Christopher Conselice.
Astronome
à l'Université
de Nottingham
(Royaume-Uni).
Pour la Science, mars 2007



Le sujet porte sur l'énergie sombre (à ne pas confondre avec la matière sombre).

Plusieurs arguments (l'auteur parle de preuves) militent en faveur de cette force :

- L'étude des vitesses radiales et distance des supernovae lointaines montre que le taux d'expansion était plus faible dans le passé et que « l'Univers est en train de s'accélérer ».
- L'étude du fond diffus cosmologique semble aussi confirmer cette hypothèse lorsqu'on envisage l'évolution de l'Univers dans le cadre de la relativité générale.
- La répartition des galaxies dans l'univers permet de faire le bilan de la matière et de l'énergie présentes dans l'Univers et implique aussi cette énergie sombre.
- La croissance des galaxies et surtout le ralentissement considérable des fusions de galaxies entre 1 et 10 milliards d'années après le Big Bang supporte cette forme d'énergie.
- Enfin l'étude des amas de galaxies rentre bien dans ce cadre.

Qu'est ce que l'énergie sombre : une force répulsive (l'inverse de la gravitation). Son domaine d'action est ubiquitaire mais il n'est perceptible qu'à grande échelle. Son effet est considéré comme négligeable au niveau de la Galaxie et à plus forte raison au sein du système solaire. Sa réelle nature n'est pas connue (pas plus d'ailleurs que la nature intime de la force de gravitation, on est toujours à la recherche des gravitons).

La présence de cette énergie sombre explique la structure filamentaire de l'Univers et le ralentissement, mesuré, des fusions de galaxies et même du taux de formation d'étoiles. Elle limite la formation des amas galactiques et empêcherait la fusion de l'amas local avec l'amas de la Vierge.

Cet article, très simplement écrit est accessible à tous. Il fait un point clair sur cette question qui, comme souvent dans la science contemporaine en évolution est sujet à discussion et hypothèses compétitives.

Alain Brémond.

Notes de lecture par Daniel SONDAZ

La limite de Roche

C. Ferrari,
L'Astronomie novembre 2006

Parmi les nombreux résultats obtenus par l'astronome montpelliérain Edouard Roche (1820-1883), ceux concernant ce que l'on appelle maintenant le « lobe de Roche » et la « limite de Roche » sont apparus au fil du temps, comme étant d'une importance fondamentale.

Considérons deux corps sphériques proches (par exemple, les composants d'une étoile binaire serrée). Parmi les surfaces équipotentielles autour de chaque composante, il en est deux qui se touchent en un point situé sur la ligne des centres : ce sont les surfaces de Roche des composantes. Elles enferment chacune un volume appelé lobe de Roche. Si un point matériel se trouve à l'intérieur d'un lobe, il est attiré par l'un des corps ; s'il se trouve à l'extérieur des lobes, il échappe à l'attraction des corps.

Roche s'est intéressé au problème de la distance en deçà de laquelle un satellite en révolution autour d'une planète est disloqué par les forces de marée. C'est cette distance qu'on appelle limite de Roche. Il envisageait le cas d'un satellite fluide et homogène. Depuis, divers travaux ont aussi examiné le cas d'un satellite solide. La principale difficulté dans le cas solide est de savoir comment se propage la fracture. On a tendance à penser que les anneaux de Saturne, situés en deçà de la limite de Roche, ont été formés par la dislocation d'un petit satellite.



Edouard Roche
(1820-1883)

Edouard Roche (J. M. Faidit, L'Astronomie novembre 2006).

Dans le même numéro de L'Astronomie que le précédent, cet article retrace la vie d'Edouard Roche et passe en revue ses travaux.

Né à Montpellier en 1820, Roche a été étudiant à la faculté des sciences de cette ville où Pierre Lenthéric l'initie à la mécanique céleste. C'est l'abbé Peytal qui le familiarise avec l'astronomie pratique. Devenu docteur en mathématiques, il passe trois ans à Paris à l'Observatoire de Paris où il peut entendre les cours de Le Verrier et de l'illustre Cauchy. Rentré à Montpellier, il sera nommé professeur de mathématiques à la faculté des sciences. Elu en 1848 à l'Académie des sciences et lettres de Montpellier, c'est principalement dans les Mémoires de cette académie qu'il publiera ses travaux. Il meurt d'une maladie pulmonaire en 1883.

Ses principaux thèmes de recherche ont été la formation du système solaire, la mécanique céleste et la géophysique. Il effectua également des observations météorologiques assidues. Enfin, certains de ses travaux relèvent des mathématiques pures, de la physique et de l'observation astronomique. Certains pensent qu'à notre époque, ses travaux sur la limite de Roche lui vaudraient le prix Nobel. De son temps, ses résultats furent plutôt méconnus. Il faudra attendre le début du XX^{ème} siècle pour que Poincaré en reconnaisse l'intérêt, ce que leur vaudra alors un retentissement international. L'attachement de Roche à sa ville natale et diverses autres raisons ont fait qu'il préféra une carrière isolée en province à une brillante carrière parisienne dont les portes lui avaient été ouvertes.

La matière noire dans l'Univers (G. Manon, L'Astronomie décembre 2006).

L'auteur, Guy Manon, de l'Institut d'Astrophysique de Paris fait le point sur cette question dont il est un spécialiste.

Les astrophysiciens nomment densité critique la densité (5,5 protons par m³) au-delà de laquelle l'expansion de l'Univers finirait par s'arrêter et serait remplacée par une contraction. Il est donc très important, pour la cosmologie, de savoir si la densité de l'Univers est inférieure ou supérieure à cette densité critique. La théorie de l'évolution des étoiles permet de connaître le rapport masse /luminosité des étoiles ; la mesure directe de la luminosité d'une population d'étoiles permet alors de connaître sa masse. On peut en déduire la densité de masse de l'Univers sous forme d'étoiles : 0,0035 fois la densité critique. Les galaxies contiennent aussi de l'hydrogène atomique et moléculaire (tous deux

observables en radio) et de l'hydrogène ionisé (observable par la raie H γ) : leur masse est dix fois plus faible que celle des étoiles. Enfin les amas de galaxies contiennent de l'hydrogène chaud (observable dans le domaine X) qui contribue à la densité de l'Univers pour 0,06 fois la densité critique. Tout ceci constitue la « masse visible ».

Une méthode indirecte, fondée sur un résultat de mécanique appelé « théorème du viriel » permet de calculer la masse d'un système (amas d'étoiles, galaxie, amas de galaxies) à partir de l'analyse de ses mouvements internes. On découvre alors que plus de 80% de la matière de l'Univers est invisible à l'aide de nos moyens d'observation actuels : c'est la « matière noire ».

En 1998, on a découvert que l'expansion de l'Univers est accélérée. Cette accélération de l'expansion serait due à une énergie du vide ou énergie sombre. La densité d'énergie sombre et la densité matérielle de l'Univers sont reliées. La matière noire doit être non baryonique. La matière baryonique est la matière ordinaire, faite de protons, de neutrons et d'électrons comme les étoiles, la Terre ou nous-mêmes ! De quoi se compose-t-elle alors ? Les théoriciens ont inventé des particules massives interagissant faiblement, les WIMPs. L'auteur de l'article explique comment on peut déterminer la distribution de la matière noire dans les galaxies ou les amas de galaxies.

Comme ces WIMPs restent obstinément inaccessibles aux observations, on a tenté de remplacer cette matière noire en modifiant les lois de la gravitation à grande échelle. Mais ce n'est pas très convainquant.

Guy Manon estime qu'avec les progrès technologiques actuels, on devrait soit détecter la matière noire dans les cinq ans, soit rejeter les particules actuellement candidates pour former cette matière noire.

Le Big Bang en laboratoire (C. Roy, F. Daninos, J. O. Baruch ; La Recherche mars 2006) et Univers primordial. La soupe de quarks reconstituée (M. Riordan, W. Zajc ; Pour la Science juin 2006).

Les deux grandes revues de vulgarisation scientifique ont publié à quelques mois d'écart un article sur le même sujet. La complexité de celui-ci fait qu'on ne peut que recommander de lire les deux pour s'en faire une petite idée.

Les nucléons (protons et neutrons) sont constitués de quarks liés par l'interaction forte véhiculée par les gluons (comme l'interaction électromagnétique est véhiculée par les photons). Quarks et gluons n'existent pas à l'état libre ; sauf dans des conditions physiques extrêmes. L'interaction forte

décroît avec la distance ; si la distance entre quarks et gluons devient extrêmement faible, ils deviennent libres mais cela nécessite une température de plusieurs milliers de milliards de degrés, justement celle qui régnait dans les premières microsecondes de l'Univers. Pour que deux quarks deviennent libres il faut que leur distance soit inférieure au diamètre d'un proton (10^{-15} m). Les physiciens rêvaient d'observer un tel plasma de quarks et de gluons, c'est-à-dire de créer en laboratoire un Big Bang ou plutôt un « Little Bang » (nom d'un programme du CERN). Il ne s'agit évidemment pas d'observer directement un tel plasma, celui-ci n'existant que dans un volume extrêmement réduit et dans un temps extraordinairement court. On étudie les caractéristiques des particules auxquelles le plasma donne naissance en se refroidissant.

Dans les années 1990, on fit une série d'expériences au CERN en vue de la création d'un tel plasma : on faisait entrer en collision, à l'aide de l'accélération SPS, des noyaux de plomb. On obtint ainsi les premiers indices de l'existence du plasma de quarks et de gluons mais pas de preuves vraiment décisives.

De nouvelles expériences ont été faites à l'aide du collisionneur américain RHIC, mis en service en 2000 et permettant d'atteindre des énergies plus de dix fois supérieures à celles fournies par le SPS. Au RHIC, on fait entrer en collision frontale deux faisceaux de noyaux lourds se déplaçant à 99% de la vitesse de la

lumière. Lors de la collision de deux noyaux d'or, une énergie de plus de 20000 gigaélectronvolts est libérée. Il se produit une boule de plasma de quarks, antiquarks et gluons d'un diamètre de 10^{-14} mètre dont la température atteint quelques milliers de milliards de degré pendant un temps de l'ordre de 10^{-24} seconde, temps au bout duquel les quarks et les gluons se combinent en milliers de hadrons qui atteignent les détecteurs. Ce sont ces particules qui renseignent les physiciens sur le plasma. Ceux-ci ont eu la surprise de constater que le mélange quarks-gluons se comportait comme un fluide et non comme un gaz ainsi qu'ils le pensaient. Cette matière la plus dense et la plus chaude jamais observée est même plus proche du fluide parfait que tous les autres fluides. On ne sait pas expliquer pourquoi.

À l'été 2007, au CERN, débutera l'expérience « Alice » qui utilisera le nouveau collisionneur de particules LHC, d'une trentaine de kilomètres de circonférence. Il permettra d'atteindre une énergie de plus d'un million de gigaélectronvolts. On en attend évidemment beaucoup.

Daniel SONDAZ



Au cours d'une collision à très haute énergie



Gaëlle BOUDOUL

LES RAYONS COSMIQUES CES MESSAGERS DE L'UNIVERS

CONFÉRENCE de Gaëlle BOUDOUL (4 novembre 2006)

mise en texte par Juliette BRÉMOND



Juliette
BRÉMOND

Les rayons cosmiques représentent un sujet extrêmement vaste. En effet, sous le terme « rayons cosmiques » on regroupe plusieurs formes d'objets et de signaux. Généralement on classifie les rayons cosmiques comme étant les particules chargées qui nous viennent de l'Univers et qu'on détecte au niveau de la Terre.

1) LES PARTICULES CHARGÉES

Ces particules chargées ont été mises en évidence il y a un siècle environ, en 1912 par Monsieur Victor HESS qui avait pour coutume de se déplacer en montgolfière en emportant avec lui un petit détecteur de particules. Il s'agissait à l'époque de détecteurs assez rudimentaires basés sur l'électrisation de plaques métalliques. Il avait remarqué que,

lorsqu'il s'élevait avec sa montgolfière, il recevait beaucoup plus de signaux que lorsqu'il était au sol. En fait le nombre de particules cosmiques (qu'on ne connaissait pas à l'époque) augmentait avec l'altitude. Plus on montait, plus le nombre de particules reçues était impressionnant. Suite à cela, la question fut posée. Que pouvaient bien être ces particules chargées qui nous arrivaient de l'espace?

Petit à petit, l'astronomie a poursuivi ses progrès. On a réalisé que les étoiles avaient une naissance, une vie et une mort et appris que la mort d'une étoile était un phénomène très violent et que la plupart du temps, les étoiles finissaient en supernovae (explosion d'étoile). Lorsque l'étoile explose, elle dissémine dans l'Univers tout son contenu, toutes ses particules et dont un certain

nombre arrive sur Terre. Ces rayons cosmiques nous tracent, en quelque sorte, la vie des étoiles de notre voisinage. Pourquoi disons-nous dans notre voisinage, parce que ces particules étant chargées, elles sont soumises à une propagation dans notre galaxie qui suit le champ magnétique, et que le champ magnétique de notre galaxie dévie ces particules et leur permet de voyager un certain temps, avant que quelques unes atteignent la Terre. Ces particules chargées effectuent un long périple. Dans notre galaxie on estime qu'une particule doit voyager durant environ 1 million d'années.

L'étude des rayons cosmiques est alors devenue passionnante. En effet, au début du siècle dernier, dans les années 1920, 1930, on ne disposait pas de gros accélérateurs de particules mais on peut dire maintenant que la découverte de ces rayons cosmiques que l'on recevait sans les étudier, est la base de la physique des particules. On voit donc très bien cette interaction entre l'astrophysique de l'infiniment grand et l'infiniment petit, c'est-à-dire la physique des particules et du monde subatomique.

Ces rayons cosmiques ou particules sont essentiellement des protons et un peu de noyaux d'hélium qui sont synthétisés dans les étoiles. Il y a, en gros, près de 80 % de protons et près de 20 % de noyaux d'hélium et la petite différence qui reste pour faire 100 % sont représentés par tous les noyaux que l'on connaît, c'est à dire, le bore, le carbone, etc. dans des proportions très faibles, mais néanmoins non négligeables. Détecter ces particules qui sont à l'origine de la physique des particules, nous apprend aussi, d'un point de vue plus astrophysique, la structure de notre galaxie. Puisque ces particules voyagent durant environ un million d'années dans notre galaxie, elles sont en quelque sorte la trace de ce qui s'y passe. Ainsi, encore aujourd'hui, on installe de très gros détecteurs de particules afin de détecter ces rayons cosmiques et espérer mieux connaître la structure de notre galaxie. Souvent on installe des détecteurs au sol, mais malheureusement l'atmosphère dégrade ce signal. Au niveau du sol on ne reçoit en fait qu'un signal dégradé des rayons cosmiques initiaux car il y a interaction avec l'atmosphère. On utilise donc toujours la technique de Mr Victor HESS et on envoie des ballons sondes, bien plus haut que sa montgolfière, autour des pôles Nord ou Sud afin de permettre, par suite des vents qui règnent là-bas, de tenir environ 3 mois en tournant autour du pôle pour mesurer le flux de particules qui nous vient de l'espace.

Ce qui gêne les scientifiques pour détecter les rayons cosmiques, mais qui arrange l'humanité en général, c'est que la Terre est naturellement entourée d'un champ magnétique qui dévie les particules cosmiques. Nous sommes donc moins soumis à des radiations qui pourraient être nocives, mais les scientifiques sont ainsi privés de l'étude d'un grand nombre de particules. Toutefois le champ magnétique terrestre est ainsi fait que les lignes de champ convergent et ces particules sont ainsi naturellement guidées vers les pôles qui sont donc les lieux où l'on reçoit, sur Terre, le plus de particules. Ceci provoque d'ailleurs, par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère, ces magnifiques volutes que sont les aurores boréales. Mais, même là, l'atmosphère reste gênante.

On envoie, donc des détecteurs dans l'espace, soit sur des satellites, soit sur la station spatiale. Sur Mir, il avait été placé un petit détecteur assez rudimentaire, pour essai, mais il n'y a jamais eu de résultats scientifiques importants. Le but est maintenant d'installer un détecteur de rayons cosmiques (actuellement en construction) sur la station spatiale internationale. Nous serons là semble-t-il, à la meilleure place pour recevoir directement les particules cosmiques car au delà de l'atmosphère et suffisamment loin des lignes de champ magnétique.

Leur étude pourra ainsi nous apporter une espèce de cartographie de la galaxie. Suivant leur parcours et suivant le nombre de particules que l'on détecte et connaissant à peu près le nombre de supernovae qui ont eu lieu dans notre galaxie, on pourra ainsi tenter d'en connaître l'histoire et sa structure. En effet, sur ce plan il reste beaucoup de questions pour lesquelles personne n'a encore de réponse.

On parle actuellement beaucoup de « matière noire ». Lorsqu'on pointe les télescopes, on voit des étoiles, des planètes même, des galaxies, on sait qu'il y a beaucoup de gaz, quelques trous noirs. Tous ces objets là, lorsqu'on les compte, représentent une certaine masse, mais on étudie en même temps comment tournent les galaxies et on s'aperçoit ainsi que lorsque l'on compte tous les objets que l'on peut voir, cela n'explique pas du tout la rotation des galaxies. On a tout d'abord pensé que l'on s'était trompé dans le compte et qu'on avait oublié beaucoup d'objets. Puis on s'est rendu compte que l'erreur était tellement énorme qu'il n'était pas possible que l'on ait pu se tromper à ce point. On s'est ainsi rendu compte que, dans toutes

les galaxies que l'on observe, y compris la nôtre, il y a de la masse, de la matière, dont on ne sait absolument rien. Cette masse manquante qu'on ne voit pas mais dont on détecte les effets gravitationnels, représente une quantité énorme. On estime qu'elle représente 5 à 6 fois la masse de la matière visible. Et on ne sait toujours pas ce que c'est, ça ne rayonne pas, ça n'interagit avec aucun détecteur de particules, et pourtant c'est là. On a cependant émis quelques idées et là encore l'astrophysique rejoint la physique des particules. Au moment où l'on a commencé à s'apercevoir de ce manque de masse dans les galaxies, les physiciens des particules, surtout les théoriciens, ont pensé que lorsqu'ils travaillent sur les accélérateurs ils le font sur un certain jeu de particules, c'est à dire, des quarks, des gluons etc. mais les modèles utilisés sont insuffisants, car ces modèles expliquent beaucoup de choses, prédisent beaucoup de choses maintes fois vérifiées avec des précisions exceptionnelles, mais ne prédisent pas toutefois d'où vient la masse des particules. Ils ont donc étendu un peu ces modèles et se sont ainsi aperçus qu'il pourrait exister toute une autre classe de particules, que l'on n'a encore jamais vues mais qui pourraient faire des prédictions. Cette nouvelle classe serait ce qu'on appelle les particules supersymétriques, en bref, parce que les nouvelles particules que l'on n'a encore jamais vues, auraient quelques propriétés de symétrie avec celles que l'on connaît.

Parallèlement à ces deux recherches, au départ décorrélées, se sont rejointes. On a alors pensé que cette masse manquante serait peut-être représentée par ces particules que les théoriciens sont en train d'inventer. C'est actuellement vers cette idée que l'on converge sachant que, ni dans les accélérateurs, ni dans les galaxies, on n'a pu prouver l'existence de ces particules supersymétriques. Cela représente un grave problème que l'on cherche ardemment à résoudre. Au CERN un gros accélérateur va démarrer à la fin de l'année 2007 et tous les efforts vont converger vers la recherche de ces particules supersymétriques et si l'on arrive à les découvrir ce sera un moment exceptionnel pour la science. Ce qu'il faut voir, c'est que ces particules supersymétriques ont toutes les bonnes propriétés qui pourraient expliquer la matière noire. Ce sont des particules lourdes mais qui n'interagissent quasiment pas, d'où la difficulté de les détecter, tant dans l'Univers que dans les accélérateurs. Sans pouvoir l'affirmer, on pense que ce sont de très bons candidats, mais rien n'est encore démontré.

Quelle est l'utilité des rayons cosmiques dans cette recherche ? Imaginons que cette matière noire se présente sous forme supersymétrique. Aucun détecteur ne la verra

car rien n'interagira. Qu'est ce qu'un détecteur ? C'est ce qui réagit à un signal donné. L'œil est aussi un détecteur de lumière. Cependant, la physique des particules nous dit que si ces particules existent la particule la plus légère de ce nouveau bestiaire devrait pouvoir se désintégrer en des particules dites normales, c'est-à-dire celles de la vie de tous les jours. On s'est donc dit que les particules normales, on sait les détecter et qu'on pourrait tenter, à partir de l'espace, de détecter toutes les particules normales que l'on voit et se dire que, parmi tout ce bruit de fond que l'on connaît à peu près, on pourrait trouver un petit excédent qui pourrait provenir de la désintégration de particules supersymétriques. On essaie donc, au travers de détecteurs de rayons cosmiques de mettre en évidence, certes de façon indirecte, car finalement on ne va recueillir que la désintégration de ces particules, cette matière noire et de prouver sa nature.

Mais jusque là, rien n'est fait, ce ne sont que des projets à très long terme. On s'est d'ailleurs peut-être complètement trompé et même si nous sommes sur la bonne voie, le signal de ces particules supersymétriques sera extrêmement ténu par rapport au reste. On cherche donc parmi des particules un peu rares en espérant découvrir un signal. Ce qui apparaît le plus vraisemblable, c'est que les accélérateurs de particules mettront en évidence, avant l'astrophysique, ces particules supersymétriques, mais la recherche réserve toujours des surprises. Donc avec les rayons cosmiques, d'abord on regarde la structure de notre galaxie, puis on recherche la matière noire.

Un autre aspect important de la recherche pour ces rayons cosmiques, c'est une autre énigme très tenace, dans l'Univers, c'est l'antimatière. Qu'est ce que l'antimatière ? Ce n'est pas vraiment une énigme, on sait ce que c'est, on en fabrique dans les accélérateurs, les réacteurs nucléaires en fabriquent aussi beaucoup, on sait la manipuler, c'est vraiment la symétrie de la matière, comme un électron chargé négativement et un positon chargé positivement. Le problème est que, matière et antimatière étant symétriques, à l'origine, au moment du Big Bang, il aurait du être créé autant de matière que d'antimatière, or, les détecteurs de rayons cosmiques ne détectent quasiment aucune trace d'antimatière dans l'Univers.

Mais où est donc passée l'antimatière ? Nous n'avons pas encore la réponse.

En fait, théorie du Big-Bang qui décrit l'évolution de l'Univers, nous dit qu'il y a autant de matière que d'antimatière. La théorie de la physique qui régit les particules nous dit, matière et antimatière, c'est pareil, il devrait y

en avoir autant dans l'Univers. Nous nous sommes donc dit que, puisqu'on ne voit pas d'antimatière, cette dernière serait séparée de la matière ; nous serions donc dans un milieu de matière alors qu'un autre endroit de l'Univers serait fait d'antimatière. Pourquoi cette séparation entre les deux, cela ne nous est pas encore apparu explicable car ce devrait être une situation relativement homogène. Nous nous sommes dit également que, s'il y a dans l'Univers des zones de matière et d'autres d'antimatière, il doit y avoir des zones de contact entre les deux. Or, lorsqu'on fait se rencontrer de la matière avec de l'antimatière, il se produit des flashes de lumière. Mais en pointant les télescopes on devrait voir ces flashes de lumière. Or, on n'a rien vu. On cherche encore...

On se dit aussi que l'on n'a pas tout compris et que la matière et l'antimatière, ce n'est pas tout à fait la même chose et que peut-être la matière a été créée en excédent par rapport à l'antimatière. Cependant, le modèle standard de la physique des particules est un modèle fortement validé et cela remettrait tout en cause. Toutefois, en tirant le modèle standard dans ses retranchements, on peut imaginer qu'il y ait une légère différence entre matière et antimatière et les derniers résultats en physique des particules ont prouvé qu'il existait réellement une légère différence entre les deux. Et sans remettre vraiment en cause le modèle standard on peut déceler une légère asymétrie et des mesures très récentes nous disent que cette asymétrie est tellement faible que cela n'expliquerait quand même pas que la matière ait dominé l'Univers. Comme il s'agit d'expériences récentes, nous pensons qu'il faut être patients et qu'il convient de continuer de faire des mesures un peu plus poussées et qu'on expliquera peut-être cette dominance de la matière. Mais là encore, rien n'est prouvé. Toutefois, les détecteurs d'antimatière ont prouvé qu'il n'en existe pas dans notre « environnement proche » de l'ordre du super amas local de galaxies.

2) L'ASTRONOMIE GAMMA

Les physiciens aiment bien faire des classifications. Or les rayons cosmiques échappent un peu à cette classification, car on appelle « rayons cosmiques » l'ensemble des messagers de l'Univers et pas seulement les particules chargées. La lumière peut aussi être qualifiée de rayon cosmique. Et on peut dire qu'un télescope est aussi un détecteur de rayons cosmiques. Sans passer en revue tout ce que l'on peut observer au travers de la

lumière, nous allons sélectionner une partie de la lumière, celle que l'on appelle l'astronomie gamma.

On détecte, au sol ces rayons gamma, très énergétiques. Cette astronomie connaît actuellement un boom extraordinaire et la France est particulièrement impliquée dans la collaboration internationale pour détecter les rayons gamma. Un détecteur, dans les Pyrénées, « CAT », s'est récemment arrêté ; il y a eu aussi le détecteur « CELESTE ». Et lorsqu'il y a quelques décennies, l'astronomie gamma a vu le jour, on s'est aperçu qu'en changeant de longueur d'ondes, c'est à dire en passant du visible à la lumière gamma invisible à nos yeux, on découvrirait de nombreux objets astrophysiques. On peut dire qu'en astronomie, chaque fois qu'on change de messenger, on découvre autre chose. Les rayons gamma nous ont permis de mettre en évidence de véritables monstres dans l'Univers. Ces monstres, en fait, sont ce qu'on appelle des noyaux actifs de galaxies. On s'est aperçu qu'au centre des galaxies, il y a des jets énormes de rayons gamma, des flux gigantesques qui représentent une énergie colossale. Ce sont les phénomènes les plus violents de l'Univers qu'on détecte en rayons gamma. Que sont ces noyaux actifs de galaxies ? On les associe à la présence de très gros trous noirs autour desquels tourne toute la matière environnante. Comme ces trous noirs sont le siège de gravité intense, il y a des phénomènes de frottement, d'accélération, absolument gigantesques. Ces phénomènes libèrent une énergie colossale que l'on arrive à détecter en rayons gamma. Ces énergies sont si élevées qu'on n'arrive pas encore à les comprendre par modélisation.

La présence de trous noirs super massifs au centre des galaxies n'est pas encore claire. Il faut savoir que ces trous noirs, particulièrement celui au centre de notre galaxie, représentent plusieurs millions de fois la masse du soleil, donc vraiment des monstres. Leur formation n'est pas encore comprise. En modélisation on donne tous nos savoirs à l'ordinateur qui fait ce que nous pourrions faire nous, mais beaucoup plus rapidement ; On lui propose une certaine masse au départ, une distribution d'objets et on lui demande d'avancer vite dans le temps. Il suit l'évolution de la galaxie, mais on n'est jamais arrivé à dire à la fin : on a bien un trou noir super massif au centre. Les trous noirs sont bien là, on les observe en rayons gamma et dans d'autres longueurs d'ondes, on a du mal à comprendre pourquoi ils sont là, mais ils y sont.

L'astronomie gamma nous a permis de mettre en évidence ces sources au centre des galaxies et de mettre en évidence aussi ce qu'on appelle des « gamma-ray burst » c'est-à-dire des bouffées de rayons gamma qui arrivent d'un coup comme des flèches et qui s'arrêtent. Au départ, ce sont les militaires américains qui ont découvert cela et, au temps de la guerre froide, ils craignaient que ce ne soient les Russes qui fassent des essais nucléaires sur la face cachée de la Lune.

Il n'y a pas très longtemps que l'on croit avoir compris ce que sont les gamma-ray burst. Ce sont des énergies colossales vraisemblablement issues de la formation d'un trou noir, c'est-à-dire qu'il y a de la matière galactique qui tourne et qui, soudainement, sous son propre poids, s'effondre et au moment de ce phénomène d'effondrement, extrêmement rapide, il y a une libération d'énergie qui donne ce gamma-ray burst. On commence seulement à comprendre ce phénomène, les recherches se poursuivent.

3) LES RAYONS COSMIQUES D'ENERGIE EXTREME

En continuant sur ces phénomènes les plus violents de l'Univers et pour rester dans le cadre des noyaux actifs de galaxies, nous allons revenir aux particules chargées. Parmi le spectre de particules chargées, ils en existent certaines qui ont des énergies colossales, bien plus importantes que n'importe quel accélérateur pourrait atteindre. Ces particules très énergétiques sont très rares, de l'ordre de une particule par kilomètre carré et par siècle. Cela fait très peu, mais néanmoins elles sont là et on ne sait pas du tout pourquoi elles sont là.

On peut comprendre que ces particules, puisqu'elles sont très énergétiques ne peuvent pas venir de très loin, sinon elles auraient perdu leur énergie au cours de leur voyage. On pense donc qu'il y a quelque part dans l'Univers, des sources très énergétiques et pas très loin de chez nous, de l'ordre de l'amas de la galaxie. On aurait donc près de chez nous, de véritables monstres. Là encore, on suppose que ces monstres soient ces mêmes trous noirs super massifs qui nous envoient des grands jets de rayons gamma. Sans preuves réelles on suspecte cela car c'est le seul endroit que l'on puisse voir et qui soit très énergétique. Mais lorsqu'on essaie de faire tourner le modèle avec la science que l'on possède, on n'arrive pas à faire accélérer des particules. On pourrait dire qu'une particule par kilomètre carré et par siècle, c'est bien peu et est-ce finalement si important ? Oui ! Parce que justement on n'explique pas pourquoi elles sont là et pourtant elles y sont. Et

comment faire pour les détecter ? Si on ne peut pas multiplier les siècles, on peut multiplier les kilomètres carrés et Jim Cronin, prix Nobel a imposé l'idée de construire un détecteur aussi grand qu'un département français, dans la pampa argentine. Toute la surface n'est pas active mais on a mis régulièrement des détecteurs pour faire un maillage. Ce détecteur s'appelle Auger et il est en cours de prises de données. Même s'il y en a peu, il les voit ces particules. Et il y a un projet jumeau qui va être implanté en Amérique du Nord. On en place un dans l'hémisphère sud et un autre dans l'hémisphère nord pour voir deux côtés différents. Ils auront la même surface et le même but. Après la matière noire et l'antimatière, encore une énigme de l'Univers qui nous résiste et dont on a quelques idées, mais aucune preuve.

4) LES NEUTRINOS

En continuant l'étude de ces messagers de l'Univers, il y en a un autre : le neutrino. Il s'agit d'une particule minuscule que l'on connaît depuis près d'un siècle. Une particule si petite, si minuscule dont on disait à l'origine qu'elle n'avait pas de masse. Puis on s'est aperçu qu'elle n'avait pas une masse nulle, mais une masse extrêmement faible. Avant que l'on n'ait pu faire des mesures très précises de sa masse on a pensé que ce pourrait être un bon candidat pour la matière noire. Le neutrino interagit très faiblement, mais il y en a énormément. La Terre reçoit sans cesse des bouffées de neutrinos dont on ne s'aperçoit pas puisqu'ils nous traversent sans produire d'effets. On a alors pensé que, même s'ils ont une très faible masse, ils sont si nombreux qu'ils pourraient expliquer une partie de la matière noire. Toutefois, cette éventualité a été rejetée car même s'ils sont très nombreux, leur masse est trop faible pour pouvoir contribuer à la matière noire.

Mais s'ils interagissent si peu, comment les détecte-t-on ? La probabilité d'interaction est très faible mais non nulle et ils sont très nombreux. On place donc sous les montagnes, pour se protéger de tous bruits environnants, d'immenses cuves remplies d'eau et de germanium car la probabilité d'interaction du neutrino avec le germanium est certes très faible mais pas nulle. Donc sur le nombre, même s'il n'y a qu'une chance infime d'interaction, de temps en temps il y en a un qui interagit avec un atome de germanium et déclenche un signal. Là encore, le signal est vraiment très ténu c'est la raison pour laquelle on utilise des volumes extraordinaires.

Actuellement des projets encore plus gigantesques sont en cours. L'un d'eux, au sein duquel la France a une participation majeure

est appelé Antarès. L'idée est de ne pas utiliser de grandes cuves, mais la mer Méditerranée. On installe donc de nombreux détecteurs de lumière, au fond de la mer, à mille mètres de profondeur, au large de Toulon et on espère, que de temps en temps un neutrino va interagir et créer un signal. Antarès n'en n'est qu'à ses premiers balbutiements, tous les détecteurs ne sont pas encore installés et il démarre doucement.

On installe également des détecteurs sous la glace. Il s'agit du projet Ice Cube, au pôle Sud, où l'on creuse jusqu'à environ mille mètres sous la glace pour installer des détecteurs en espérant qu'avec un tel volume de glace on pourra détecter un signal.

Mais pourquoi veut-on détecter les neutrinos ? Il y a deux raisons à cela, la première étant liée à l'astrophysique et la seconde à la physique des particules. Pour la raison astrophysique c'est du fait que les neutrinos interagissent très peu. Autant les particules chargées sont soumises à tout ce qui traîne dans la galaxie, le gaz interstellaire, le champ magnétique qui les dévie, autant le neutrino lui, part tout droit et traverse une grande partie de l'Univers. Espérer faire de l'astronomie neutrinos qui est encore dans ses débuts et qui n'a pas vraiment démarré en tant que telle, c'est espérer, non pas avoir une cartographie de notre galaxie comme avec les particules chargées, mais une cartographie d'un bon morceau de l'Univers qu'ils ont traversé. Et là, en particulier, on espère sonder tout ce qui nous est invisible, par exemple le cœur des galaxies, car tout ce qui nous vient du cœur des galaxies est souvent complètement dégradé ou absorbé, comme la lumière ou les particules, alors que les neutrinos traversent et viennent jusqu'à nous. C'est donc essayer de faire comme de la radio médicale, aller chercher à comprendre leur structure interne au cœur des galaxies. C'est la raison astrophysique, c'est à dire, étudier les objets astrophysiques en leur sein.

Mais il y a aussi une raison pour les physiciens des particules. Le fait que les neutrinos aient une masse nous prouve qu'en fait ils changent de ce qu'on appelle en physique des particules, de saveur, c'est à dire qu'en gros, leurs propriétés peuvent changer au cours du temps ; il reste toujours un neutrino mais il n'est pas tout à fait le même suivant s'il est d'une saveur ou d'une autre. Ceci a été mis en évidence avec le soleil qui est un bon émetteur de neutrinos, comme tout bon réacteur nucléaire. Comme on comprend assez bien la physique du soleil on a pensé que si on mettait un détecteur de neutrinos face au soleil, on devrait mesurer tant de neutrinos. Mais en agissant ainsi on s'est aperçu qu'on en recevait vraiment

beaucoup moins que ce qui était prévu. On a de nouveau pensé à une erreur de calcul et on a recommencé. On a ensuite supposé un mauvais fonctionnement du détecteur. On a fait confectionner des détecteurs par des gens indépendants les uns des autres qui ne communiquent pas entre eux pour éviter de faire les mêmes erreurs. Et tout converge pour dire qu'il manque beaucoup de neutrinos à l'appel. En fait l'explication est toute simple : le neutrino change de saveur au cours de son voyage depuis le soleil jusqu'à nous. On détectait des neutrinos d'une certaine saveur, mais étant donné qu'ils en avaient changé en cours de trajet, on ne les voyait pas et ils manquaient à l'appel. On va donc essayer sur des distances plus grandes, des distances astrophysiques, d'étudier ce changement de saveur au cours de leur propagation. Encore une fois, astrophysiciens et physiciens des particules se rejoignent.

5) LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Je voudrais aussi vous parler d'un autre messager : les ondes gravitationnelles, qu'on appelle couramment les rides de l'espace-temps. Mais ces ondes gravitationnelles n'ont pas encore été détectées. Ce sont des objets prédits mathématiquement par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Il y a près de 100 ans, par un effort intellectuel incroyable, Einstein a émis sa théorie de la relativité générale. En ce qui concerne la relativité restreinte, on pourrait dire que c'était presque dans l'air du temps et que si Einstein n'avait pas eu l'audace de la formuler on peut penser que quelques années plus tard, un autre l'aurait fait à sa place.

En revanche, la relativité générale est vraiment une théorie sortie de sa tête uniquement, ce n'était vraiment pas quelque chose qu'on sentait venir. C'était tout à fait exceptionnel et cette théorie a été, à plusieurs reprises, prouvée dans le sens où les prédictions qu'elle faisait ont été vérifiées, l'éclipse, la position de Mercure par rapport au Soleil etc.

Et la relativité générale prédit l'existence d'ondes gravitationnelles, ces sortes de rides de l'espace-temps et il faut bien penser qu'en relativité, l'espace et le temps sont liés, mais ces ondes n'ont encore jamais été mises en évidence. Pour ça, on installe des interféromètres, c'est-à-dire qu'on fait se croiser des lasers de façon à ce que, si une onde gravitationnelle passe au milieu on devrait voir une interférence, un peu différente à un moment donné, avant et après le passage de l'onde. La distance entre les 2 lasers va évoluer un tout petit peu et on aura un peu de lumière différente. Actuellement un

interféromètre vient d'être mis en service en Italie, il s'appelle VIRGO. Il n'a pas encore détecté d'ondes gravitationnelles car il est en phase de démarrage. Les bras, c'est à dire les distances le long desquelles on envoie le laser sont de plusieurs kilomètres. Il faut donc pouvoir maintenir aligné, un faisceau extrêmement fin à plusieurs kilomètres de distance, sachant qu'une minuscule vibration de la Terre peut tout fausser. Il y a donc des contraintes parasismiques qui sont drastiques. D'un point de vue technique, c'est une expérience fascinante.

On espère ainsi mettre en évidence les ondes gravitationnelles émises par ce qu'on appelle des systèmes binaires, des pulsars etc. Et là encore, comme pour les neutrinos, on va pouvoir connaître le système émetteur d'ondes gravitationnelles encore plus précisément. En astronomie, chaque fois qu'on a changé de longueur d'ondes, c'est à dire chaque fois qu'on est passé de la lumière aux rayons gamma, aux rayons X, on a découvert de nouveaux objets. Et là, c'est même plus que ça, le pas est encore plus grand et je suis certaine que, lorsque l'astronomie des ondes gravitationnelles sera vraiment au point, un grand bond sera fait dans la connaissance de l'Univers.

VIRGO qui se trouve en Italie et sur lequel travaillent aussi des français, malgré la complexité de ce détecteur, ne représente qu'un prototype de la génération de futurs détecteurs. On n'est pas certain qu'il détectera beaucoup de sources astrophysiques, mais il prépare en fait la suite de la détection et cette suite sera représentée par le détecteur LISA

Le projet LISA est grandiose. On envoie 3 satellites, distants de plusieurs millions de kilomètres. Un laser sera pointé entre les 3 satellites et il devra être parfaitement stable si l'on veut espérer détecter une toute petite variation au moment où l'onde va passer. Chacun sait que le moindre déplacement d'un petit laser sur un écran fait un grand décalage. Aussi qu'en est-il lorsqu'il y a des milliers et des milliers de kilomètres entre la source du laser et le petit miroir récepteur ? LISA est prévu pour démarrer en 2012/ 2015 si aucun retard ne survient. Mais dès l'année prochaine des satellites vont être lancés pour être sûrs qu'on sache faire du vol en formation, et essayer de voir si on arrive à stabiliser les satellites, ce qui est absolument indispensable pour obtenir des résultats. Pour ce faire, les scientifiques ont de la chance car les militaires, qui souhaitent effectuer ce genre d'expérience de vol en formation, vont subventionner le projet. En 2007 on tente le vol en formation. Pendant ce temps VIRGO tente de détecter des ondes gravitationnelles et met au point la technique de détection. On

fait converger le tout et en 2012, ce sera LISA.

Mais jusque là les ondes gravitationnelles n'ont pas encore été détectées bien que certains disent qu'elles l'ont déjà été ! On a tout simplement regardé au télescope les systèmes binaires qui sont régis par un faible nombre de paramètres, la masse des 2 corps, leur période de rotation, la distance entre eux, et, connaissant ces paramètres on a pu s'apercevoir qu'ils ne tournent pas tout à fait comme il le faudrait et cette différence dans la rotation entre les calculs prédits et ce que l'on observe correspondrait exactement à l'énergie perdue sous forme d'ondes gravitationnelles, si elles existaient.

On peut dire que finalement, cette étude des systèmes, prouve de façon, certes indirecte, qu'il y a émission d'ondes gravitationnelles. Comme la théorie de la relativité générale nous dit que dans tel système on va avoir tant d'énergie perdue par ondes gravitationnelles et, comme par hasard, c'est exactement celle qui nous manque à la sortie. Mais, même si on les suppose, ce serait tellement mieux de les détecter vraiment

Mais il faut dire qu'en science on observe souvent des détections indirectes, comme les quarks qui sont les constituants de la matière et qu'on ne peut pas voir, mais seulement leurs effets. On pourrait donc dire que, comme pour les quarks, on n'a pas vu les ondes gravitationnelles, mais tout laisse à penser qu'elles sont là.



VIRGO

Le but est de détecter le rayonnement gravitationnel émis par certaines sources cosmiques. La mise en évidence des ondes gravitationnelles permettrait de mieux tester la théorie de la relativité générale de A. Einstein et d'ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation en astrophysique.

QUELQUES OBSERVATIONS AU PAYS DES HOMMES INTÈGRES

par Bernard CHEVALIER



En février dernier, à l'occasion d'un voyage en Afrique dont la finalité n'avait à priori rien à voir avec l'activité astronomique, j'ai pu néanmoins effectuer quelques observations objet de ce papier.

En effet ce voyage organisé par une association de Chaponost (La Case d'Alidou), avait pour enjeu un séjour solidaire de 8 jours dans un village situé au Sud Est du Burkina Faso.

Ce pays est situé entre le Mali au Nord et le Togo, Ghana au Sud et La Côte d'Ivoire au Sud Ouest. C'est l'un des pays des plus pauvres au Monde sans être cependant misérable au moins dans la région où nous étions et ses habitant(e)s sont actifs et joviaux.

Pour pouvoir profiter du ciel, j'avais emmené une lunette de 70mm à focale courte pour le transport en cabine avion (avec deux oculaires de 11 et 5mm) ainsi qu'un atlas de poche portant sur les deux hémisphères (Pocket Sky Atlas de Sky & Telescope).

Evoquons tout d'abord la qualité du ciel.

De façon générale levers et couchers de soleil s'effectuent malheureusement au sein d'une bande nuageuse située au raz de l'horizon de sorte que celle-ci fait apparaître un soleil blanc et peu de lueurs colorées dans le ciel. Ces levers et couchers de soleil sont inobservables sur la ligne d'horizon même, à cause de la bande nuageuse masquant, sur quelques degrés, cet horizon.

La transparence du ciel est bonne les meilleures nuits avec une belle vue sur la voie lactée et une magnitude limite relevée jusqu'à 5.46 (HR34624 dans le Grand Chien). Par contre certaines nuits celle ci fut réduite et plus généralement j'avais espéré une meilleure transparence dans cette zone totalement dépourvue de pollution industrielle et lumineuse. Après discussion avec les habitants il s'avère qu'avec la montée des températures en février, le ciel présente à cette époque un voile nuageux.

Par contre, on note une quasi absence de turbulence, aucun scintillement d'étoiles n'est discernable à l'œil nu et les étoiles sont parfaitement rondes à l'oculaire à 95X, aucune différence n'est notable entre planètes et étoiles comme on le verra par la suite.

La deuxième constatation notable tient à

l'apparence des constellations familières qui est évidemment différente de celle observée sous nos latitudes, notez que BonGoussougou, village où nous résidions, est par 11° de latitude Nord.

Ainsi Orion est au Zénith et Le Lion se lève à la verticale. J'ai eu quelques hésitations à discerner le lever de cette dernière constellation dans la mesure où les trois étoiles principales de la tête d'Orion formaient un quadrilatère avec Saturne considérée de prime abord comme une étoile (même absence de scintillement de la part des étoiles et de Saturne).

De nouvelles constellations étaient accessibles à cette latitude : Les Voiles, Le Centaure, Le Loup ainsi que la fameuse Croix du Sud. Par contre déception, il fut malheureusement impossible de voir les nuages de Magellan. Ces dernières galaxies n'étaient en effet à priori visibles qu'au raz de l'horizon en début de nuit et elles restèrent masquées par le voile nuageux situé à l'horizon.

Pour en venir aux observations proprement dites, la première séance a permis de revoir les objets familiers sous nos cieux, les trois suivantes d'explorer de nouvelles constellations et les dernières nuits ne permirent pas d'observer dans de bonnes conditions à cause d'une transparence réduite.

Ainsi dans le Grand Chien bas sur l'horizon sous nos latitudes, on trouve nombre d'amas ouverts : M41, CR132, M46 et M47.

Dans les Voiles des amas ouverts également : IC2391, NGC 2547 et un bel amas globulaire NGC 3201.

Dans la poupe, observation de l'amas ouvert NGCX 2451 et dans l'Hydre, l'amas globulaire M68 non résolu dans la lunette.

Dans la Carène, NGC 3114 bel amas ouvert avec une douzaine d'étoiles très brillantes et surtout la belle et imposante nébuleuse de la Carène visible dans une bonne partie de l'oculaire de 11mm soit sur 2 degrés environ et ce sans filtre.

Dans la Croix du Sud, la boîte à bijoux (NGC4755) est observable à l'œil nu avec une dizaine d'étoiles très brillantes à l'oculaire. La nébuleuse obscure du sac à charbon ne laisse effectivement rien voir mais ses contours restent peu définis vu sa faible hauteur sur l'horizon lors de l'observation.

Dans le Centaure apparaît un magnifique amas globulaire en la présence de Oméga du centaure, visible à l'œil nu et résolu en vision indirecte à l'oculaire. On y voit également les

amas ouverts NGC 3766 très peuplé, 5662 et 5460.

Enfin NGC 5897 est un bel amas globulaire dans le Loup et, dans le Scorpion haut dans le ciel vers 05.00h, on aperçoit les amas ouverts NGC 6231, M7 et NGC 6441 et les amas globulaires M4 et M62, ce dernier étant cependant non résolu. La nébuleuse entourant Antarès est visible sans filtre.

Enfin nous avons prévu une séance d'initiation locale et celle-ci a vu le nombre de participants largement dépasser nos prévisions. En effet, au cours de cette séance organisée sans annonce préalable sur une place du village, plus de cinquante personnes ont surgi de sorte que nous n'avons pu observer en deux heures que les Pléiades et Saturne. Cela démontre un réel engouement notamment de la part des jeunes, pour cette activité.

Au titre des jolies histoires racontées localement citons le fait que la présence des Pléiades au raz de l'horizon le soir annonce l'hivernage et que les étoiles filantes sont assumées être des filaments qui se détachent du nuage de la voie lactée.

Nous avons pu admirer également l'étoile du soir qu'est Venus bien visible en cette époque le soir ainsi que Jupiter et ses satellites très nets à 95X le matin.

J'espère que ces quelques notes vous donneront envie d'aborder le ciel Austral, voire de visiter l'Afrique et ce pays attachant qu'est le Burkina Faso.

En ce qui concerne les observations on vérifie une fois de plus l'importance de la qualité du ciel plus que celle de l'instrument.

Enfin j'ai particulièrement apprécié l'usage de l'Atlas de poche, simple et facile d'usage portant sur les objets du ciel profond atteignant une magnitude maximale de 10 à 12 selon les objets, magnitude largement suffisante avec une lunette de faible diamètre. Seul défaut la préface est en anglais, j'attends toujours le livre "Constellation" de Antonin Rukl 2 mois après en avoir passé commande.

Enfin je reste à votre disposition pour d'autres renseignements éventuels sur ce voyage.

Bernard CHEVALIER



COURS DE COSMOLOGIE par Alain BREMOND



Initiation à la cosmologie

Alain Brémond
Société Astronomique de Lyon

La cosmologie est la « branche de l'astronomie qui traite des études de l'Univers à grande échelle ». (Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics)

On distingue une cosmologie observationnelle, très liée à l'astronomie et une cosmologie théorique qui élabore des modèles que les observations cherchent à conforter ou à réfuter.

La cosmologie s'intéresse aux caractéristiques de l'Univers telles que sa taille, son âge, sa forme (sphérique, plate ...), les conditions de sa naissance, son évolution, etc, toutes ces choses étant reliées entre elles.

L'Univers est constitué de la Galaxie (la notre) avec son disque, le bulbe avec un trou noir au centre, les bras remplis d'étoiles jeunes dans les amas « ouverts », des nébuleuses (gaz et poussières) comme la nébuleuse d'Orion et dans le halo les amas globulaires.

Le « reste » de l'univers comprend les galaxies (voir cours de D. Sondaz) souvent réunies en amas et en super amas entre lesquels on trouve très peu de matière. Les quasars sont des galaxies très lointaines très lumineuses, géantes découvertes par leur émission radio. Les supernovae : « explosion » d'étoiles massives ou les novae, systèmes binaires en interaction, sont dans notre Galaxie mais les puissants télescopes modernes permettent d'en observer dans les autres galaxies. Enfin, les trous noirs représentent la destinée des étoiles supermassives.

Il existe des limites à l'observation lointaine de l'Univers. C'est d'abord le temps mis par la lumière pour nous atteindre qui fait que la lumière de certains objets très lointains pourrait ne pas nous avoir encore atteint. L'état de la matière au « début » de l'Univers, constituée de particules indépendantes, en particulier des électrons libres, constitue un « mur cosmologique ». Les photons interagissant continuellement avec les électrons et plus généralement avec toutes les particules, très denses, ne peuvent franchir ce « mur ».

Encore plus proche de la naissance de l'Univers et du Big Bang que nous évoquerons plus tard, l'état quantique de la matière fait que

distances et temps n'ont pas ici de sens.

I- Quelques rappels de physique

1- Les états de la matière et les unifications.

On distingue quatre forces dans l'Univers. Aujourd'hui ces 4 forces sont séparées.

La force nucléaire forte unit les éléments du noyau : protons et neutrons.

La force nucléaire faible est responsable de la radioactivité

La force électromagnétique dont le « support » est le photon

La gravitation

Avec une température (ou une énergie) plus importantes certaines de ces forces sont unifiées. Ce phénomène peut être étudié dans les accélérateurs de particules mais ceci n'a été fait pour l'instant que pour la réunion électrofaible (force électromagnétique et force nucléaire faible).

2- La métrique et la topologie: Les « formes de l'Univers »

2.1. La métrique décrit les propriétés géométriques locales. Elle évalue la distance entre deux points.

Sur un plan, la distance ds entre deux points est donnée par:

$ds^2 = dx^2 + dy^2$ (théorème de Pythagore) où ds est la distance entre les deux points et dx et dy les différences entre les coordonnées cartésiennes de ces deux points.

Dans l'espace:

$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ où dz est la troisième coordonnée de l'espace à trois dimensions.

Dans l'espace-temps à 4 dimensions, selon la relativité restreinte, l'intervalle entre deux événements (on ne parle plus de distance entre points mais entre événements) est donné par :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

ct est aussi une distance... mais ceci

correspond à un espace plat sans courbure (euclidien).

En fait la distance dans le plan et dans l'espace est donnée par l'équation de Robertson-Walker, plus complexe, qui fait intervenir un paramètre de courbure de l'espace : k .

$$ds^2 = R^2(t)[dr^2/(1-kr^2)] - c^2 dt^2$$

ou en coordonnées sphériques :

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t)[dr^2/(1-kr^2) + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)]$$

$k = 1, 0$ ou -1 (facteur de courbure de l'espace)
 $R(t)$ facteur d'échelle (une distance) croît avec t si l'Univers est en expansion.
 ds : distance de l'espace-temps
 r = coordonnée spatiale
 θ et φ sont des coordonnées angulaires
 r, θ, φ sont des valeurs à un temps t donné.

2.2. Une nouvelle[1] géométrie : la topologie

Elle exprime la forme générale de l'Univers

La topologie fait intervenir la notion de complexité des formes géométriques en trois dimensions. Par exemple :

- Les objets de complexité 1: plan, sphère aboutissent à un point en se rétrécissant.
- Au contraire les objets de complexité 2: beignet, bretzel n'aboutissent pas à un point.

Notion de connexité.

Dans un espace multiconnexé, si on sort par la face avant on rentre par la face arrière ou, si on sort de cet espace par la droite on entre instantanément par la face gauche ! [2]

En cosmologie on décrit trois surfaces:

Le plan

La sphère

La selle ou surface hyperbolique.

Sur ces surfaces les angles et les parallèles se comportent différemment :

Dans le plan, la somme des angles du triangle = 180° et les parallèles ne se coupent pas (Euclide)

Sur une sphère la somme des angles du triangle est supérieure à 180° et les droites se rejoignent toujours (Riemann). Par exemple, les méridiens terrestres se croisent tous aux pôles.

Sur une surface en selle, la somme des angles du triangle est inférieure à 180° et les parallèles divergent (Ligatchevsky).

Parcours sur les différentes surfaces.

Sur une sphère et plus encore sur un anneau de Moebius à une seule face, un voyageur - microscopique- penserait que son univers est sans limite bien que fini.

A l'échelon local un espace courbe paraît plat: c'est bien notre expérience sur Terre !

Mais attention, ces espaces topologiques sont des représentations simplifiées en 3 D. En réalité il faut penser en 4 D et il n'est plus possible de représenter ces surfaces par des figures.

3- Les distances

Nous avons vu que pour les étoiles proches les mesures pouvaient être calculées par les méthodes des parallaxes. Pour les galaxies, les étoiles variables Céphéides (voir le cours sur les galaxies de D. Sondaz) permettent d'évaluer la distance des plus proches. Pour aller plus loin d'autres méthodes sont nécessaires comme les supernovae ou bien la mesure du redshift par effet Doppler-Fizeau (cours de B. Della Nave) avec utilisation de la loi de Hubble.

Quelques échelles de distance :

- Une année lumière correspond à 9 400 milliards de km.
- Parsec (pc): 3,26 a.l. C'est la distance à laquelle un observateur verrait le rayon de l'orbite terrestre sous un angle de une seconde (parsec=parallaxe pour une seconde). Le Megaparsec (Mpc) correspond à un million de parsecs.

II- Historique

Un problème récurrent est à l'origine de bien des progrès en cosmologie: la vitesse de la lumière. On a pensé pendant très longtemps qu'elle était infinie et donc qu'elle se propageait instantanément. C'est Roemer (voir bulletin, article de Louis Sais) qui en 1675 montre, en étudiant les satellites de Jupiter, qu'elle a une vitesse finie. En effet, il avait constaté que l'émission de Io était retardée quand la Terre se trouvait plus loin de Jupiter. Il démontre que la lumière met dix-sept minutes pour venir de Jupiter à la Terre. Il estime alors que la lumière se déplace à environ 210000 km.s^{-1} en fonction de l'estimation (fausse) de la distance Terre-Soleil à partir de laquelle sont calculées toutes les distances du système solaire (3ème loi de Képler).

Bradley en 1728 met en évidence le phénomène de l'aberration. Il observe que les étoiles se déplacent dans le ciel en décrivant, en une

année, une petite ellipse. Il met ainsi en évidence la composition de la vitesse de la lumière et de la vitesse orbitale de la Terre : c'est l'angle d'aberration. On peut comparer ce phénomène à la pluie qui tombe verticalement pour un observateur au repos et obliquement pour un observateur en mouvement[3]. A cette époque on affine la vitesse de la lumière à $303\,000 \text{ km.s}^{-1}$. Olbers (1823) met en évidence un paradoxe. Si l'Univers est si immense qu'on le croît déjà à cette époque, alors il doit toujours y avoir une étoile dans une direction donnée (dans une forêt dense il y a toujours un tronc dans l'axe de vision). Si c'est le cas le ciel devrait être brillant partout. Cette absence de brillance totale n'est pas explicable par des poussières, car celles-ci seraient chauffées par la lumière des étoiles et donc émettraient dans une fréquence plus basse. Plus tard[4] deux explications seront données : la vitesse de la lumière est finie et l'Univers a un âge fini. Donc, dans certaines directions, la lumière de certaines galaxies ne nous a pas encore atteint.

L'expérience de Michelson et Morley (1881) met le feu aux poudres ! En effet ils montrent que, quelle que soit la direction où elle est mesurée, la vitesse de la lumière est constante, alors qu'elle devrait se composer avec la vitesse orbitale de la Terre.

La théorie de Lorentz va formaliser les résultats de l'expérience de Michelson et Morley qui donnait:

$$c + 30 \text{ km.s}^{-1} = c - 30 \text{ km.s}^{-1} = c !!!$$

c = vitesse de la lumière
 30 km.s^{-1} = vitesse orbitale de la Terre.

Maxwell (vers 1850) développe la notion de champ électromagnétique: des forces s'exercent à distance (magnétisme, électricité) et leur nature est semblable. Il établit des équations qui modélisent ces radiations. Alors pourquoi la gravitation ne serait-elle pas elle aussi un champ ?

H.A. Lorentz en 1892 et 1904 contribue à avancer dans la compréhension de ce paradoxe, mis en évidence par les expériences de Michelson et Morley.

Soit deux vitesses V et W exprimées en fraction de la vitesse de la lumière, Leur somme n'est pas $V + W$ mais $L(V,W) = \frac{V + W}{1 + V.W}$

Si une des vitesses = 1 (100% de la vitesse de la lumière) par exemple $V=1$

On a $L(V,W) = \frac{1 + W}{1+W} = 1 = c$

Exemple tiré de Michelson-Morley

$$L(V,W) = \frac{1+30}{1+30} = 1 = c$$

On obtient le même résultat avec $W = -30$.

Les travaux de Lorentz seront poursuivis par Poincaré qui avance la notion de relativité restreinte et celle d'ondes gravitationnelles, mais surtout par Einstein à qui l'on doit la révolution scientifique constituée par la relativité restreinte et la relativité générale.

A cette période comment voit-on l'Univers ?

On sait qu'il y a la Galaxie avec ses étoiles, et des nébuleuses. Plus tard certains pensent que certaines nébuleuses pourraient être d'autres galaxies mais ce n'est pas encore confirmé scientifiquement. La controverse entre Shapley et Curtis ne permet pas de trancher le débat. Le tout est entouré d'une substance, l'éther qui véhicule la lumière. La présence de cette matière aux propriétés étranges est discutée depuis Michelson et Morley mais sera retenu jusque vers 1915.

Tous les objets sont fixes bien que situés à des distances supposées diverses et parfois très éloignées.

Mais à partir de cette époque, vers 1920, les événements vont s'accélérer et la cosmologie va prendre son essor.

Rappelons le principe cosmologique base de toutes les hypothèses de travail ultérieures. Ce principe postule que l'univers (à grande échelle) est :

Homogène: il a la même structure dans toutes les directions

Isotrope: ses propriétés sont les mêmes dans toutes ses directions.

Des arguments le confirmeront avec en particulier le fait que la relation entre distance des galaxies et vitesse de récession est vraie dans toutes les directions de l'espace. Cette homogénéité sera confirmée par l'étude du rayonnement « fossile » avec des « bémols ». Nous aborderons ce sujet plus loin.

Les relativités d'Einstein.

C'est d'abord la théorie de la relativité restreinte (1905). Elle constitue d'une certaine façon une extension des travaux de Newton pour des vitesses proches de celle de la lumière et des idées de Galilée qui avait déjà parlé de relativité des déplacements. Elle traite du mouvement uniforme. Une extension de cette théorie lui a permis d'établir les notions d'espace-temps et le fait que la matière et l'énergie sont des principes équivalents : la fameuse équation $E = mc^2$.

La relativité générale (ou généralisée) s'intéresse aux mouvements accélérés. Elle permet de développer le concept de courbure de l'espace-temps au voisinage des masses

(1917) qui remplace celui de gravitation. Einstein applique ses découvertes théoriques à l'Univers. Son modèle d'Univers dépend de sa masse et de sa densité. Les particules (et la lumière) se déplacent sur des géodésiques de l'espace-temps, courbés par les masses (planètes, étoiles, galaxies). Ce phénomène sera vérifié en 1919 lors d'une éclipse de Soleil, par Eddington.

Les géodésiques de l'espace-temps peuvent être imaginés comme un tapis de trampoline plat et élastique. Si on y place un corps lourd il se courbe en cuvette. Lorsqu'on lance une bille, à proximité du corps sa trajectoire sera seulement déviée si elle va vite ou si elle en est assez éloignée de la masse; elle sera attirée si elle passe trop près ou si sa vitesse est trop lente.

Einstein (1917) aboutit à un modèle où la dynamique de l'Univers dépend de variables en fonction du temps, d'un facteur d'échelle $R(t)$, de la densité actuelle de l'Univers $\rho(t)$ par rapport à la densité critique $\rho(c)$ et la pression $p(t)$ pratiquement nulle depuis plusieurs milliard d'années.

Dans son modèle l'Univers est en expansion. Ne pouvant y croire il ajoute une constante cosmologique Λ qui rend l'Univers statique. Après la découverte de l'expansion par Hubble il le regrettera.

William de Sitter, astronome hollandais, montre la même année qu'il existe une autre façon d'utiliser les équations d'Einstein aboutissant à un Univers où la densité de matière tend vers 0. Son rayon de courbure tend vers l'infini. Ce modèle stationnaire prédit le décalage vers le rouge des galaxies (onze ans avant les découvertes des astronomes).

Eddington en 1922 publie un traité de relativité générale et retrouve, par le calcul, les observations des astronomes qui décrivent un décalage vers le rouge des galaxies.

L'abbé Georges Lemaître, astrophysicien belge, développe en 1927 une hypothèse de formation et d'évolution de l'Univers. Pour lui tout commence avec un atome géant primordial, de la taille du système solaire. Une gigantesque explosion est à l'origine de l'expansion : c'est le modèle du Big Bang (terme donné par Fred Hoyle, un opposant à cette théorie, en signe de dérision).

Alexandre Friedman (1922), mathématicien russe utilise les équations de champs d'Einstein. Pour lui l'univers peut avoir plusieurs destins possibles en fonction de sa densité. Il propose une notion de densité critique assez intuitive, en relation avec la gravitation. La densité de matière est à l'origine de la force

gravitationnelle. Deux forces opposées exercent leur action dans l'Univers. La vitesse initiale issue du Big bang éloigne les objets (représenté par H_0 dans la formule) alors que la gravitation (G due à la masse) tend à les rapprocher.

Il imagine alors trois modèles. Le facteur d'échelle $R(t)$, taille de l'Univers en fonction du temps, dépend de trois valeurs de k (lié à la densité critique): $-1, 0$ et $+1$.

Le destin de l'Univers dépend de sa densité. Si elle est en dessous d'une certaine valeur (la densité critique), la vitesse initiale n'est pas compensée par la gravitation: l'expansion sera alors infinie. Au contraire si la densité est supérieure: l'expansion ralentira, passera par un point zéro puis il y aura ensuite une phase de contraction (Big Crunch). Si enfin elle est exactement égale l'expansion s'arrêtera très lentement. C'est un des grands problèmes de la cosmologie moderne : quelle est la densité réelle de l'Univers qui conditionne sa destinée ? A ce stade un certain nombre de questions se posent:

- Mystère de l'origine : si les galaxies s'éloignent les unes des autres, alors il y a eu un moment où elles étaient proches voire groupées en une seule masse.
- Quel est le destin de l'Univers ? Ce qui revient à « peser » l'Univers pour connaître sa densité.
- Est-il fini ou infini ?

III- De la théorie à l'observation.

Comment déterminer la distance des galaxies ? C'est grâce aux Céphéides, étoiles variables nommées ainsi d'après delta Céphei que la distance sera mesurée. L'histoire se déroule en trois scènes. D'abord Henrietta Leavitt montre qu'il existe une relation entre la période de variation de l'éclat de ces étoiles et leur magnitude photographique. Plus tard Harlow Shapley calibre la relation à partir de céphéides de distance connue dans la Galaxie.



Lunette de 24 pouces utilisée par Vesto Slipher lors de la découverte des vitesses radiales des nébuleuses spirales. Copyright Observatoire Lowell. Flagstaff (Arizona)

La relation s'établit alors entre la période et la magnitude absolue. En mesurant ensuite pour n'importe quel objet contenant des céphéides la période de variation de l'éclat apparent (on en déduit la magnitude absolue M) et sa magnitude moyenne m , on peut calculer la distance d de l'étoile et donc de l'objet qui la contient par la formule :

$$m - M = 5 \log d - 5$$

Où d est mesuré en parsecs.

Edwin Hubble travaille en 1923 au Mont Wilson qui dispose de télescopes de très grands diamètres. Il découvre d'abord l'existence de Céphéides dans la galaxie d'Andromède et mesure donc sa distance qu'il évalue à 900 000 a.l. donc bien en dehors de notre galaxie. Les nébuleuses spirales sont donc bien des objets semblables à notre Galaxie mais situés en dehors d'elle à de très grandes distances.

Hubble met aussi en évidence l'expansion de l'Univers. C'est d'abord Vesto Slipher qui, en 1912, avait observé un décalage Doppler de 40 galaxies lointaines. Hubble reprend et complète le travail. Il montre que la plupart des galaxies[5] s'éloignent de nous dans toutes les directions. Leur vitesse de fuite est d'autant plus grande qu'elles sont plus éloignées. La relation est linéaire pour des vitesses éloignées de celle de la lumière. L'Univers est donc en expansion.

La loi de Hubble (1929) s'exprime ainsi :

$$z = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e = V_r / c = H_0 \cdot d$$

avec λ_o : longueur d'onde observée
 λ_e : longueur au laboratoire
 V_r : vitesse radiale
 H_0 : constante de Hubble
 c : vitesse de la lumière

Plus les galaxies sont lointaines plus elles s'éloignent vite: $V_r = H_0 \cdot d$

Plus z est grand, plus la galaxie est lointaine. z est utilisé comme mesure de distance à grande échelle.

$TH = 1/H_0$, ou temps de Hubble, mesure l'âge de l'Univers.

H_0 est exprimé en $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$. L'indice 0 indique que c'est la mesure actuelle de la « constante ».
 Or $1 \text{ Mpc} = 3,09.10^{19} \text{ km}$
 Et $1 \text{ année} = 3,16.10^7 \text{ s}$

$$TH = 1/H_0 = 3,09.10^{19} / H_0 \times 3,16.10^7 \text{ secondes}$$

Exemple : pour $H_0 = 75$, $TH = 13$ Giga années (milliards d'années)

Les valeurs de la constante de Hubble H_0 et l'âge de l'Univers ($1/H_0$) se sont affinées avec les études.

Pour Hubble elle était de 550, ce qui donnait un âge de l'Univers de 1,8 Ga, inférieur à l'âge de la Terre !

Baade trouve 275 et 3,6 Ga

Humason, Mayall et Sandage: 180 et 5,5 Ga

Sandage (en 1970): 50 et 20 Ga

De Vaucouleurs: 100 et 10 Ga

Actuellement 67 ± 10 et 13 Ga (WMAP)

Le Big Bang.

A la suite de l'hypothèse de l'abbé Lemaître, d'autres travaux ont précisé la notion, au fur et à mesure que les connaissances en physique atomique se précisaient.

Après la découverte du neutron, George Gamow, Ralph A. Alpher et Robert Herman (Gamow rajoute Beth dans sa publication pour faire α, β, γ !!!) publient en 1948 un article qui fonde les conceptions actuelles du Big Bang:

Au départ, l'Univers ne serait formé que de neutrons. Puis survient une phase de baryogenèse avec formation des protons :

Neutron = proton + électron + neutrino

Puis grâce au refroidissement des éléments lourds se forment par fusion protons + neutrons ; c'est la nucléosynthèse. Survient ensuite un découplage énergie-matière. Les photons jusqu'alors confiné par la matière deviennent libres: « que la Lumière soit »

Gamow prédit par le calcul ce rayonnement issu du Big Bang et refroidi depuis devrait persister aujourd'hui. Il calcul sa température qu'il pense être de 5 K. Autrement dit, il doit, selon lui, persister un rayonnement fossile correspondant à l'émission d'un corps noir à la température de 5K.

Le modèle du Big Bang sera confirmé et amélioré, en particulier par C. Hayashi en 1950 puis en 1964 Y.B. Zel'dovitch en URSS, Hoyle et Tayler en Grande Bretagne, Peebles aux USA.

Une importante confirmation viendra de la découverte (prévue) du rayonnement radio « fossile » par Penzias et Wilson (1965).

P.J.E. Peebles avait affirmé qu'au début de l'univers il devait exister un fond de rayonnement très intense responsable de la

formation de l'hélium à partir de l'hydrogène. Il prédit que ce rayonnement avait du persister en se refroidissant. La température actuelle devrait être, selon lui de 10 K.

Au même moment, deux radioastronomes Arno Penzias et Robert Wilson travaillaient sur une antenne de réception de signaux de télécommunication avec le satellite ÉCHO. Leur antenne donnait un bruit de fond anormal dans toutes les directions de l'espace. Après études ils en concluent que cela correspond à un rayonnement électromagnétique lié à une température basse de 3,5 K (1965).

IV- Comment voit-on l'histoire de l'Univers? Du Big Bang au Modèle Standard.

Nos hypothèses viennent de la relativité générale et de la physique quantique. Elles sont confirmées pour la période située au-delà du temps de Planck par les expériences réalisées avec les accélérateurs de particules, puis, à partir de 300 000 ans après le Big Bang par les observations astrophysiques.

- Avant le temps de Planck (10^{-43} seconde) rien ne peut être connu réellement.

- Après le temps de Planck, c'est le début de la physique (importance des accélérateurs de particules). On note l'apparition de l'unification avec la supergravité (gravité quantique). Les quatre forces auraient été unifiées. Ceci n'est possible seulement en cas de très haute énergie (température). Conditions non encore réalisées dans les accélérateurs.

Pendant cette période l'Univers aurait eu 10 dimensions avec des trous noirs quantiques selon Hawking.

Dans l'Univers règnent de très hautes pression et température. La matière, les photons ne peuvent exister sous ses conditions.

- Survient ensuite une phase de rupture de symétrie précisée par la Grande Théorie Unificatrice: GUT. Il se produit un changement de phase (semblable par exemple à celui que l'on observe dans les transformations eau-vapeur ou glace-eau). Ici apparaissent la matière et l'espace-temps avec libération d'une énergie colossale. Celle-ci est responsable de la phase d'inflation (expansion à une vitesse supérieure à celle de la lumière)

- Ensuite apparaissent les quarks et les leptons (électrons et neutrinos) : c'est l'ère électrofaible.

- De 10^{-35} à 10^{-10} seconde se forment les particules élémentaires, c'est la baryogenèse. Les quarks fusionnent pour former les baryons:

neutrons et protons ainsi que les mésons.

- De 1 seconde à 3 minutes après le Big Bang, les particules élémentaires sont formées :

Les baryons:

Proton formé de 3 quarks: 2 u et 1 d dont la charge est de $2(+1/3) + (-1/3) = 4/3 - 1/3 = 3/3 = +1$

Neutron formé de 3 quarks: 2 d et 1 u dont la charge est de $2(-1/3) + 2/3 = 0$

Les mésons (2 quarks)

Pion: +1, Tau

- La température diminuant des atomes se forment, c'est la nucléosynthèse. C'est principalement de l'hydrogène constitué d'un seul proton ; un proton et un neutron forment le deutérium, un proton et deux neutrons, le tritium et deux protons et deux neutrons l'hélium. Et c'est tout ! Le reste sera formé dans les étoiles et libéré dans l'espace par les supernovae.

- Les atomes se forment par rapprochement des électrons, l'Univers qui n'est plus ionisé devient transparent. Cela se produit après environ 300 000 ans.

C'est la limite des observations en astrophysique. En amont de cette « recombinaison la lumière est « piégée » et aucune observation n'est possible sur ce qui s'est passé au cours de ces 300 000 premières années.

- Ce sont des fluctuations d'énergie qui permettent la formation des galaxies. Des fluctuations de densité apparaissent, observées par l'étude du fond de rayonnement cosmologique (WMAP). L'hydrogène forme des amas qui forment des protogalaxies puis des étoiles sur les zones de collisions des nuages de gaz d'hydrogène. Une question reste posée: qui des étoiles ou des galaxies se sont formées en premier. Il semble que l'on n'ait pas de réponse certaine (voir article de D. Sondaz).

V- Quelques hypothèses actuelles.

A partir de ce modèle standard, de nombreuses questions se posent sur l'évolution de cet Univers ainsi formé. Nous avons vu que son évolution est conditionnée par sa densité et par sa courbure. Il est donc capital de connaître la densité de l'Univers et donc sa composition en matière et en énergie, ce qui est pareil (depuis Einstein).

Cette évolution de l'Univers est mesurée par le paramètre $H(t)$ qui mesure le degré d'expansion en fonction du temps; actuellement H_0 (constante de Hubble).

La matière-énergie (paramètre de densité) est subdivisée en différents constituants dont certains sont connus et d'autres pas.

La matière normale baryonique ou ordinaire, l'énergie cinétique des particules et des radiations sont bien connues.

Au contraire, la matière sombre et l'énergie sombre bien que prévues par les observations restent de nature inconnue.

Les paramètres qui permettent d'étudier l'évolution possible de l'Univers sont :

La courbure k que nous avons déjà rencontrée. $a(t)$, noté parfois $R(t)$, est le facteur d'échelle. Il mesure l'espacement des corps en fonction du temps.

L'équation de Friedmann :

$$H^2 = 8\pi G \rho / (\rho - k/a^2)$$

décrit les possibilités d'évolution de l'Univers en fonction des paramètres de densité de celui-ci.

$\Omega_m = 8\pi G \rho_{\text{(matière)}} / (3 H^2)$ concerne la matière

$\Omega_\Lambda = 8\pi G \rho_\Lambda / 3H^2 \equiv \Lambda / 3H^2$ concerne la constante cosmologique

$\Omega_k = -k/(aH)^2$ le rayon de courbure k

On a $\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$ (somme des densités).

Mais comment varient ces paramètres ? Ces variations déterminent les différents modèles d'Univers. D'où quelques questions:

- Y a-t-il assez de matière pour fermer l'univers ?
- L'expansion de l'univers est-elle en accélération ?
- L'univers est-il courbé ?

Quelles peuvent être les sources de nos connaissances ? Ce sont :

- L'étude du rayonnement micro-onde (fossile) du fond cosmologique à $T=2,73$ K.
- L'analyse de la structure de l'Univers à grande échelle
- Les lentilles gravitationnelles
- Les supernovae de type Ia qui permettent de mesurer des distances très lointaines.

1- Les satellites COBE et WMAP ont mesuré dans l'espace, le champ micro onde. Il correspond au fond de rayonnement cosmologique à 2,73 K. On a noté la présence de variations d'intensité très faibles, de l'ordre de 10^{-5} , situées à grandes distances, lorsque l'Univers n'avait que quelques centaines de

millions d'années.

Les observations conduisent à l'existence d'une période d'inflation, c'est à dire à une période d'expansion très rapide très proche du Big Bang. Elle s'est ensuite ralentie et s'est terminée lorsque la température est devenue trop faible pour faire place à l'expansion.

Les fluctuations de températures, les « rides » du temps, ont été bien étudiées grâce au satellite WMAP en 2003. La mesure de l'inhomogénéité de la matière et de l'énergie à $z = 1000$ correspondant à 100 000 ans après le Big Bang permet une nouvelle compréhension de l'Univers:

- L'Univers serait âgé de 13,7 milliards d'années avec seulement une marge d'erreur de 1%.

- Les premières étoiles se seraient allumées 200 millions d'années après le Big Bang.

- La lumière détectée par WMAP date de 380 000 années après le Big Bang.

- Le contenu de l'Univers serait fait de 4% d'atomes, 23% de matière sombre froide et 73% d'énergie sombre. Pour certains, cette énergie sombre ressemble plutôt à une "constante cosmologique" qu'à un champ d'énergie à pression négative appelée "quintessence". Mais la quintessence n'est pas totalement exclue. Les neutrinos rapides ne jouent pas un rôle majeur dans l'évolution de la structure de l'Univers. En effet ils auraient pu empêcher l'agrégation précoce des gaz de l'Univers, retardant l'émergence des premières étoiles; ces hypothèses sont en conflit avec les données de WMAP.

- Le taux d'expansion (la constante de Hubble) est $H_0 = 71 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$ (avec une marge d'erreur d'environ 5%).

- Le destin de l'Univers : il serait en expansion constante accélérée.

2- Les lentilles gravitationnelles produisent des déviations des rayons lumineux provenant d'une source lointaine invisible, par une masse (galaxie) qui donne ainsi une image de l'objet lointain. On note que l'abondance des galaxies augmente avec la distance. Pour une valeur donnée de H_0 cette distance dépend de la constante cosmologique Λ . On obtient une valeur de $\Omega_\Lambda = 0,75$.

Une autre méthode consiste à utiliser les amas de galaxie comme lentilles gravitationnelles.

3- Les supernovae de type Ia (SNIa) sont des couples d'étoiles formés d'une naine blanche et d'une géante rouge. De la masse est transférée périodiquement de la géante vers la naine. A partir d'une certaine quantité de matière transférée une réaction de fusion nucléaire se produit, ce qui entraîne une augmentation

importante de la luminosité de l'étoile. La magnitude absolue atteinte est identique d'une SNIa à l'autre ce qui permet le calcul de distance de galaxies lointaines (chandelle standard) en mesurant la courbe de luminosité et la magnitude apparente.

Les SNIa on apporté des informations importantes pour la cosmologie. Leurs distances sont plus lointaines que celles qui sont suggérées par un univers dont l'expansion se ralentirait. Au contraire elles montrent que l'expansion est en accélération: $\Omega_{\Lambda} > 0$ (actuellement 0,75 + ou - 0,1)

Y a-t-il assez de masse pour clore l'univers?

Pour l'étudier on a utilisé plusieurs méthodes. On mesure bien sûr la masse associée à la lumière[6] des constituants de l'Univers (amas de galaxies) mais aussi la fraction baryonique, l'abondance des amas et leur évolution ainsi que le degré d'inhomogénéité de l'univers (mass power spectrum).

Ces différentes méthodes donnent des résultats de même ordre de grandeur :

- Relation Masse/Luminosité $\rightarrow \Omega_m = 0,2 \pm 0,1$
- Fraction baryonique $\rightarrow \Omega_m = 0,3 \pm 0,1$
- Abondance et évolution des amas galactique $\rightarrow \Omega_m = 0,25 + 0,15; - 0,1$
- Etude de l'inhomogénéité de l'Univers $\rightarrow \Omega_m < 1$

Au total la masse baryonique est donc petite. Mais y a-t-il autre chose ?

C'est le problème de la matière et de l'énergie manquante.

Quels sont les arguments en faveur de l'existence de la matière sombre ? La vitesse de rotation d'une galaxie est reliée à sa masse M et à son rayon r tel que $v^2 = M/r$. L'étude de nombreuses galaxies et amas de galaxies montre que les vitesses ne peuvent être expliquées par la seule masse « visible ». Normalement la vitesse à l'intérieur d'une galaxie devait diminuer du centre vers la périphérie (loi de Kepler). En réalité il n'en est rien... L'étude de nombreuses galaxies et amas de galaxies montre que les vitesses ne peuvent pas être expliquées par la seule masse « visible ».

Il existe donc « quelque chose » qui fait que ce mouvement est différent de celui prédit par les lois de Képler et de Newton: la « matière sombre ». Elle serait abondante dans le halo des galaxies.

De quoi serait faite la matière sombre?

De matière baryonique (ordinaire: protons, neutrons...) invisible comme les MACHOs: objets massifs compacts du halo.

De particules « exotiques », les WIMPs: particules massives faiblement interactives

(neutralinos, axions); matière sombre froide.

De neutrinos (matière sombre chaude). Mais on sait aujourd'hui qu'ils ne joueraient aucun rôle ou un rôle mineur.

En fait aujourd'hui on ne connaît que très peu de choses à propos de la matière sombre.

Qu'est-ce que l'énergie sombre ?

L'étude des SNIa montre qu'elles sont plus éloignées que ne le laisserait penser l'hypothèse d'un Univers en décélération. Au contraire même, l'expansion s'accélérerait. Cela suppose une énergie sombre avec une pression négative : Ω_{Λ} . Elle compenserait l'effet de la gravitation et elle augmenterait avec le temps.

Problème : si l'énergie sombre existait en grande quantité, dès le début de l'Univers alors la matière n'aurait pas pu s'effondrer et il aurait été impossible que des structures se forment. L'énergie sombre a donc due être faible dans le passé et augmenter ensuite.

Ces deux éléments ont une existence hautement probable ; mais d'autres hypothèses sont soulevées.

Qu'est-ce que la Matière-Ombre ?

Définie par Green, Schwartz et Abdus Salam, elle suppose un « Univers-ombre » et supporte la théorie des cordes et des p-branes. Cet univers-ombre ne communiquerait avec le notre que par la gravitation. Il serait invisible. Une galaxie serait mêlée à une galaxie-ombre. Les effets gravitationnels s'additionnant les objets seraient donc bien maintenus en cohésion, la rotation des galaxies bien expliquée, mais la masse de la galaxie-ombre n'étant pas mesurable on a donc bien une masse manquante.

La « quintessence »

Ce serait un champ cosmique (idem champ électrique) dont l'énergie serait plus faible en chaque point que son énergie potentielle. Elle serait responsable de l'accélération. En se modifiant avec le temps elle pourrait donc permettre des inhomogénéités responsables de la création d'objets dans le passé et des irrégularités du rayonnement cosmologique micro onde de fond (2,73K).

Alors l'expansion de l'Univers s'accélère-t-elle ?

Méthode : On utilise les SN 1a comme chandelles standard pour mesurer la distance.

Deux études montrent que l'Univers est en expansion accélérée. Une explication, l'énergie sombre à pression négative telle Ω_{Λ} . Ce résultat a été confirmé par la méthode des lentilles gravitationnelles qui donnent une valeur limite supérieure de $\Omega_{\Lambda} < 0,75$

L'Univers est-il courbe ?

Méthode : l'étude du rayonnement cosmologique à 2,73 K. Il permet une mesure de l'inhomogénéité de l'Univers lointain à $z = 1000$ (100 000 a.l. après le Big Bang).

Selon les résultats apportés par les travaux réalisés grâce aux satellites COBE et WMAP, l'Univers est plat (ou presque).

A mesure que l'Univers s'étire il tend à devenir plat. Il ne peut être plat, car pour qu'il le soit, il faudrait démontrer que le rayon de courbure est infini, mais on ne pourrait jamais le savoir puisqu'il faudrait explorer des portions d'espace toujours plus éloignées pour détecter une éventuelle courbure (Magnan).

VI- Conclusions (actuelles)

Si l'univers

- A une densité ρ à la densité critique : $\Omega_m = 1/3$

- Est plat $\Omega_k = 0$

- Alors il y a une énergie sombre diffuse qui était négligeable au moment de la formation des structures (pression de l'énergie sombre actuellement négative).

- L'Univers est en accélération $\Omega_\Lambda = 2/3$.

- L'absence de courbure de l'espace est en faveur du processus d'inflation initiale.

N.A. Bahcall " ... la connaissance du destin de l'Univers nécessitera une compréhension de la physique qui sous-tend le concept d'énergie sombre."

M. Tegmark " la prochaine décennie sera excitante. Une avalanche de données en astrophysique mesure l'espace-temps avec une précision inégalée nous permettant de savoir s'il obéit aux équations d'Einstein et si la matière sombre, l'énergie sombre et les trous noirs sont réels. "

Références

Scientifiques :

The cosmic triangle : revealing the state of the Universe. Bahcall N.A. et A. Science 1999;284:1481

Measuring spacetime: from the Big Bang to Black Holes. Tegmark M. Science 2002;296:1427

J. Rich: principes de cosmologie: difficile

M. Lachièze-Rey: Initiation à la cosmologie

J.P. Luminet: L'Univers chiffonné

E. Harrison: Le noir de la nuit: bien

J.P. Luminet: L'invention du Big Bang

S. Weinberg: Les trois premières minutes de l'Univers (date de 1978 mais reste intéressant).

S. Hawking: L'Univers dans une coquille de noix

Annexe.

Age de l'Univers et modèles cosmologiques

1- Selon le modèle standard :

Age de l'Univers (aujourd'hui) : $t_0 = 1/H_0 f(\Omega)$ avec

$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c = \rho_0/3H_0^2/(8\pi G)$ avec une constante cosmologique nulle. Mais est-elle nulle ?

Dans le cas de $\Omega_0 = 1$ on a $t_0 = (2/3)H_0^{-1}$

Correction $T = T_H \times 2/3$ (dans le modèle standard $f(\Omega)=2/3$)

Exemple :

Avec $H_0 = 75$ (mesure de WMAP) on a $T_H = 13$ Ga

Si $T = T_H \times 2/3$ alors $T = 13 \times 2 / 3 = 8,7$ Ga seulement.

Y a-t-il d'autres arguments pour un âge de l'Univers de 13 milliards d'années ?

2- L'étude de l'abondance relative des isotopes (décroissance radioactive) et la connaissance du fonctionnement des étoiles permettent des évaluations de cet âge :

Le Rubidium 87 se transforme en Strontium 87 en 47 milliards d'années. Cela donne un âge de 13,5 Ga.

3- D'autres méthodes donnent des âges voisins

Age des étoiles du halo galactique: 12,5 à 15 Ga

Age des étoiles des amas globulaires: 11,5 à 13,3 Ga

Age des étoiles naines blanches: 11,5 Ga

[1] Relativement nouvelle elle a été développée au XIXème siècle !

[2] Voir le livre de Jean Pierre Luminet : l'Univers chiffonné.

[3] Ici les deux vitesses qui se composent sont celles des gouttes de pluie et celle de la personne en déplacement.

[4] Pressenti par Edgar Poe dans Eureka.

[5] Cas particulier: la galaxie d'Andromède se rapproche de nous et fusionnera dans quelques millions d'années. Elle appartient au même amas que nous.

[6] A toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes radios les plus longues

Première photographie de la Grande

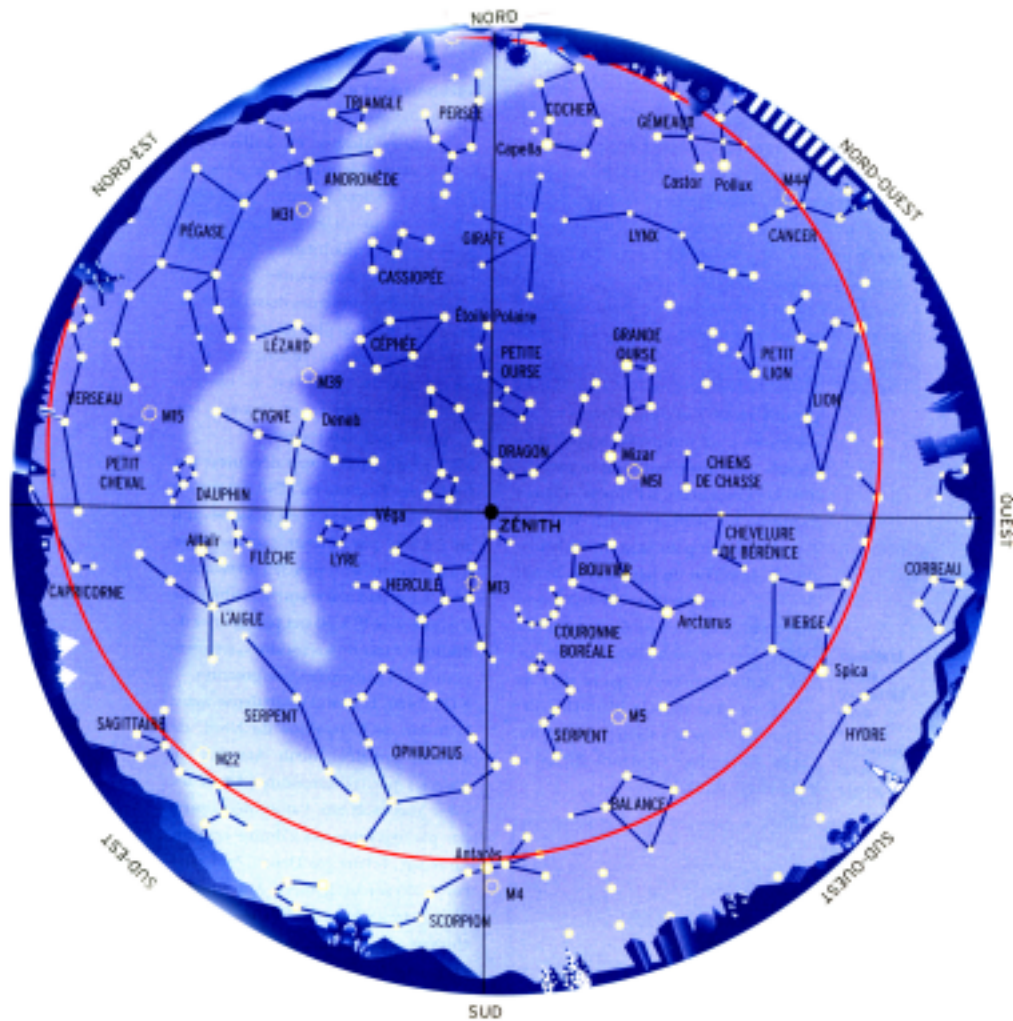
nébuleuse d'Andromède prise par Isaac Roberts en 1888.



Elle confirme la structure spiralee que l'on avait dessinée, en particulier par Lord Rosse

LE CIEL DE L'ÉTÉ

Bernard DELLA NAVE



Le ciel de l'été est très riche en objets variés. A l'oeil nu ou avec des jumelles, avec une petite lunette ou un télescope de plus grand diamètre, de belles soirées d'observation nous attendent. Petits et grands, débutants et experts trouveront de quoi satisfaire leur curiosité : la Lune qui est un spectacle dont on ne se lasse pas, les planètes, amas ouverts, et pour peu qu'on soit sous un ciel éloigné de toute lumière, amas globulaires, nébuleuses et galaxies (sans oublier la Voie Lactée et ses ramifications) seront au rendez-vous.

A tous, bonnes observations et bonnes vacances.

Quelques objets à découvrir, à redécouvrir ou à voir absolument :

Amas ouverts : M6 Sco, M7 Sco, M18 Sgr, M29 Cyg, M39 Cyg, M44 Cnc, M45 Tau, M67 Cnc...

Amas globulaires : M3 Boo, M4 Sco, M5 Ser, M13 Her, NGC 869-884 Per...

Nébuleuses : M17 Sgr, M20 Sgr, M27 Vul, M57 Lyr, M64 Com, M97 Uma...

Galaxies : M31 And, M51 Uma, M65 Leo, M66 Leo, M95 Leo, M96 Leo...

Etoiles : Antarès Sco, Alcor et Mizar Uma, Albireo bêta Cyg, le triangle de l'été Altair Aql, Deneb Cyg et Véga Lyr, 61Cygni ... et bien d'autres objets.

Sites : <http://perso.orange.fr/astroclub.toussaint/Ete/Etelight.htm>

www.astrosurf.com ; www.radio-astronomie.com ; serge.bertorello.free.fr ;

www.groupeastronomiespa.be/photos.htm ; www.saf-lastronomie.com/bib/articleu.htm ;

jfcolliac.free.fr/ ; olympus.umh.ac.be/articles/Divers/O6webcam48.pdf

etc.