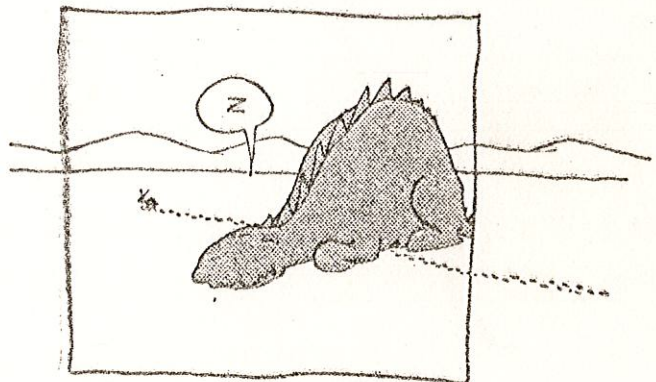
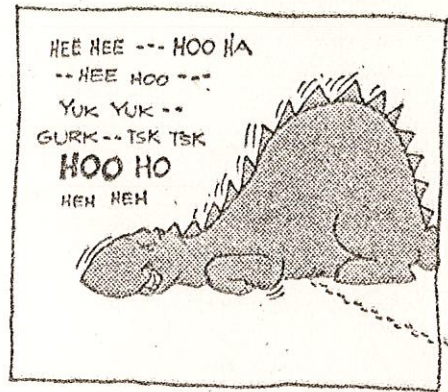
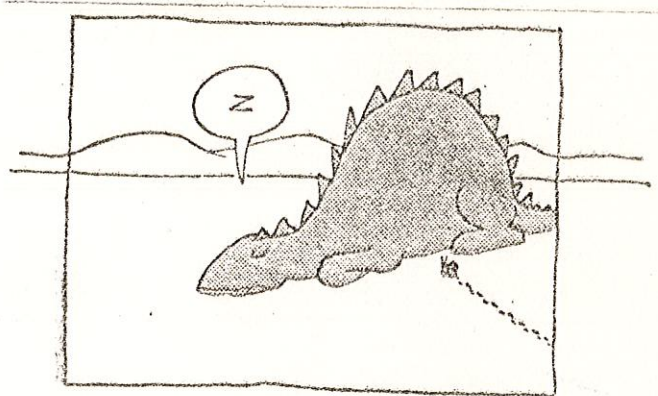


LE ZOO COSMIQUE

- Le système solaire
- Les étoiles
- Les galaxies
- Les monstres
- Le fond du ciel
- Composition chimique





## LE SYSTEME SOLAIRE

Le système solaire est constitué de 9 planètes gravitant autour du Soleil. Elles se trouvent plus ou moins dans le même plan, leur mouvement est dans le même sens et les orbites sont presque circulaires.

Les planètes se manifestent par la lumière réfléchiée du Soleil et, à l'exception éventuelle de Jupiter, n'ont pas de sources d'énergie importantes propres. Jupiter paraît rayonner (en infra-rouge) plus d'énergie qu'il n'en reçoit (mais il est loin, pour autant, d'être une étoile).

Planète	Masse (g)	Rayon (km)	Distance (km)	Densité (g cm <sup>-3</sup> )	Période de révolution autour du Soleil (années)
Mercure	0.34 X 10 <sup>27</sup>	2 432	57.9 X 10 <sup>6</sup>	5.4	.24
Vénus	4.87	6 050	108.2	5	.61
Terre	5.98	6 378	149.6	5.52	1.
Mars	0.64	3 394	227.9	3.9	1.88
Jupiter	1 900.0	68 700	778	1.4	11.86
Saturne	596.0	57 550	1 427	.71	29.46
Uranus	87.0	25 050	2 870	1.32	84
Neptune	103.0	24 700	4 496	1.63	164.79
Pluton	.66 ?	2 900 ?	5 910	?	248.4

On remarque la forte croissance de densité des planètes intérieures à l'orbite de Jupiter, à mesure que l'on s'éloigne de cette dernière.

A l'exception de Mercure, Vénus et Pluton, les planètes sont accompagnées de satellites. Saturne, en plus, possède un anneau composé de fragments de matière solide ou poussiéreuse : l'anneau est très mince par rapport à son diamètre. On remarque qu'en général tous les satellites d'une planète donnée se trouvent dans le même plan.

En 1977, une série d'observations semble avoir montré que Uranus est entouré d'un disque de matière : ce disque n'a pas encore été observé directement.

La région entre Mars et Jupiter contient un grand nombre de corps solides, relativement petits (typiquement  $\approx 200$  km) : ce sont des astéroïdes (ou planétoïdes). On en connaît actuellement environ 2 000 ; certains ont des orbites assez excentriques.

Les comètes gravitent autour du Soleil sur des orbites très excentriques. Elles sont composées de matière solide faiblement liée : à grande distance on ne les voit pas. Leur queue caractéristique est composée de matière fine éjectée du corps principal au moment de leur approche du Soleil. Les comètes sont probablement la source d'une "poussière" interplanétaire -une matière solide très finement divisée (quelques centaines de microns de diamètre)- qui se trouve partout dans le système solaire.

Les météores et les météorites sont composés de grains de matière qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre. Les météores sont trop petits pour survivre à la traversée de l'atmosphère, tandis que les météorites arrivent jusqu'à la surface de la Terre. On remarque que les météorites représentent un échantillon direct de la matière cosmique, et en tant que tels devraient nous renseigner sur l'histoire du système solaire, dont on ignore à l'heure actuelle l'origine.

Le rayon du système solaire est environ  $5\,900 \times 10^6$  km.

La disponibilité des sondes interplanétaires a fait naître un regain d'intérêt pour les corps du système solaire. Le résumé qui suit ne prétend pas être complet : son but est de soulever quelques points d'intérêt particulier.

#### LE SOLEIL :

Le Soleil est l'étoile la plus proche.

Ses grandeurs physiques sont :

Masse	= $M_{\odot}$	= $1.99 \times 10^{33}$ gm
Densité moyenne	= $\rho_{\odot}$	= $1.41$ gm cm <sup>-3</sup>
Rayon	= $R_{\odot}$	= $6.96 \times 10^5$ km
Débit d'énergie	= $L_{\odot}$	= $3.9 \times 10^{33}$ erg sec <sup>-1</sup>
Température superficielle	: $T_{\odot}$	$\approx 6\,000^{\circ}$ K

On remarque la densité moyenne : cela confirme que le Soleil est composé essentiellement d'hydrogène à l'état gazeux, à haute température et pression.

On peut considérer que le Soleil est composé de 4 zones distinctes : l'intérieur : invisible, dû à l'opacité de la matière solaire ; le rayon de cet "intérieur" est sensiblement le rayon du Soleil cité ci-dessus. Nos informations concernant l'intérieur sont déduites essentiellement à partir des lois de physique, et le fait que le Soleil rayonne. La stabilité mécanique du Soleil à grande échelle exige que la température centrale dépasse  $10^7$ °K largement. Une petite région centrale très dense fournit de l'énergie par des processus de fusion thermonucléaire ; une mince région près de la surface manifeste des mouvements de convection.

la photosphère : la "surface" normalement visible ; son épaisseur est d'environ 500 km, et sa température varie de  $\approx 6\ 500$ °K à l'intérieur jusqu'à  $\approx 4\ 500$ °K à l'extérieur. La photosphère est le siège des taches solaires (régions relativement froides de forts champs magnétiques) et de la granulation (la manifestation observationnelle de la convection interne).

la chromosphère : région très faiblement éclairée en ce qui concerne les longueurs d'ondes accessibles au sol, mais qui rayonne très fortement en ultra-violet -il est donc bien observable en satellite. L'épaisseur de la chromosphère est d'environ 8 000 km, et la température monte de  $4\ 500$ °K à l'intérieur jusqu'à  $\approx 15\ 000$ °K à l'extérieur. La chromosphère rayonne aussi en radio. Elle est responsable en particulier pour les protubérances-des "jets" de matière éjectés violemment de la surface et qui s'étendent souvent jusqu'à quelques fois  $10^4$  km. Normalement, cette matière retombe sur le Soleil, mais une certaine fraction est perdue. Les protubérances peuvent être associées avec des sursauts en rayons X et rayons radio.

la couronne : région diffuse et mal définie, où la température monte jusqu'à  $10^6$ °K. La couronne est très faiblement éclairée, étant normalement vue pendant les éclipses naturelles et artificielles. Elle rayonne aussi en rayons radio.

On remarque l'importance croissante des observations dans les domaines X et U-V : faites essentiellement en satellite, elles nous permettent d'étudier plus directement la structure de la couronne.

La rotation du Soleil est différentielle : à l'équateur, la période est d'environ 25 jours, tandis que vers les pôles elle est  $\approx 30$  jours.

Le Soleil semble avoir un champ magnétique global d'environ 1 gauss (témoin, par exemple, la forme des protubérances près des pôles solaires) ; cependant, dans certaines régions actives, le champ peut monter jusqu'à quelques centaines ou quelques milliers de gauss (à l'intérieur des taches). L'origine du champ global n'est pas connue.

L'activité du Soleil (mesurée, par exemple, par la fréquence des taches solaires, des protubérances, l'activité en rayons X et radio, etc...) n'est pas constante, mais varie de façon périodique avec une période de 11 ans. Cette périodicité est actuellement interprétée comme un effet du champ magnétique et de la rotation différentielle. Remarquons que cette périodicité semble <sup>être</sup> modulée des variations à très grande échelle de temps : on en ignore complètement la raison.

En outre, le Soleil est la source d'un flux continu de particules énergétiques qui se manifeste comme une sorte de "vent" : c'est la direction instantanée de ce "vent solaire" qui détermine la direction d'une queue cométaire. En effet, on peut considérer le milieu interplanétaire comme en quelque sorte l'extension très tenue du soleil - dans le voisinage de la Terre, il y a de l'ordre de  $10$  particules par  $\text{cm}^3$  ( $5e^+$  et  $5p$ ).

#### LA TERRE :

Sa densité moyenne est d'environ  $5.5 \text{ gm cm}^{-3}$ . Pourtant, la densité moyenne de la matière superficielle ne dépasse pas  $\approx 3,4 \text{ g cm}^{-3}$  : par conséquent, la Terre doit avoir un noyau très dense  $\gtrsim 10 \text{ g cm}^{-3}$ . A l'heure actuelle, on distingue 4 zones internes principales :

le noyau interne : rayon  $\approx 1\,217 \text{ km}$  ; très probablement solide et très dense.

le noyau externe : s'étend jusqu'à  $3\,473 \text{ km}$  ; liquide, composé probablement de Fe et Ni à une densité d'environ  $10-11 \text{ g cm}^{-3}$ .

le manteau : matière cristalline, composée de métaux tels que le Fe et le Mg ; plus dense que la croûte.

la croûte : matière solide, densité  $2,7-3 \text{ g cm}^{-3}$  ; épaisseur  $\approx 35 \text{ km}$  ; c'est la zone des séismes. La surface de la Terre est géologiquement assez active. La croûte paraît fragmentée en quelques grandes "plaques" qui "flottent" sur le manteau, d'où la dérive des continents et, en particulier, la formation des montagnes.

La Terre a un champ magnétique essentiellement dipolaire  $\approx 3$  gauss. Son origine n'est pas connue.

La température à l'intérieur de la Terre monte à un taux de  $\approx 30^\circ/\text{km}$ . A la surface de la Terre, il y a une "fuite" d'énergie d'environ  $50 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec}$ . On pense que son origine est la désintégration d'une matière radio-active située à l'intérieur.

L'atmosphère de la Terre est dominée par l'oxygène moléculaire ( $\approx 21\%$  du volume) et l'azote moléculaire  $\text{N}_2$  ( $\approx 78\%$  du volume). Une autre composante importante est la vapeur d'eau -sa contribution varie de 0 à 1% selon l'endroit. D'autres molécules (par exemple, le gaz carbonique  $\text{CO}_2$ , le méthane  $\text{CH}_4$ , l'argon Ar) ne constituent qu'une trace. On remarque en particulier la faible teneur en hydrogène ( $\approx 5 \times 10^{-7}\%$ ) et en hélium ( $\approx 10^{-4}\%$ ).

Au sol, la pression, la température moyenne et la densité sont environ  $10^6 \text{ dyn cm}^{-2}$ ,  $290^\circ\text{K}$ , et  $1.2 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$  respectivement.

#### LA LUNE :

Ses grandeurs physiques sont :

$M_L$	=	$7 \times 10^{25} \text{ g}$
$R_L$	=	$1.7 \times 10^8 \text{ cm}$
Distance	=	$3.8 \times 10^{10} \text{ cm}$
$\rho_L$	=	$3.3 \text{ g cm}^{-3}$

La structure interne de la Lune est très différente de celle de la Terre. A l'heure actuelle, grâce au projet Appolo, on distingue 3 régions principales :

un noyau : rayon  $\approx 700 \text{ km}$  ; partiellement fondu, de composition inconnue ;

un manteau : qui s'étend jusqu'à 60 km de la surface ; rigide.

une croûte : d'épaisseur 60 km , dont la surface est couverte d'une couche de poussière.

Les séismes lunaires (faibles par rapport aux séismes terrestres) proviennent des régions profondes du manteau.

Les échantillons lunaires témoignent d'une répartition de matière différente de celle de la Terre.

La Lune n'a pas d'atmosphère.

La Lune n'a pas non plus de champ magnétique global. Pourtant, les échantillons individuels de matière lunaire témoignent d'un processus de magnétisation dans le passé.

L'origine de ce champ éventuel, ainsi que l'origine de la Lune ne sont pas connues.

Géologiquement, la Lune est à l'heure actuelle très tranquille ; on pense que sa structure superficielle ("mers", cratères, etc...) a été formée il y a très longtemps (plus longtemps qu'il y a  $3 \times 10^9$  ans), essentiellement par bombardement météorique et écoulement de lave.

#### MERCURE :

La grande densité de Mercure témoigne d'une composition interne métallique : le rayon de ce noyau métallique doit être  $\approx 0,7$  fois le rayon de Mercure.

La sonde Mariner 10 a montré que la surface de Mercure possède un champ magnétique intrinsèque. Son origine est inconnue : la planète est petite (le noyau devrait normalement être solide), et sa rotation sur elle-même (période  $\approx 59$  jours) est très lente.

Mercure n'a pas d'atmosphère.

#### VENUS :

Comme la Terre, Vénus possède probablement un noyau de Fe.

Nos connaissances de la surface de Vénus sont limitées par des nuages très épais qui l'entourent. La surface a été étudiée essentiellement par le radar et les sondes soviétiques "Venera", qui sont entrées dans l'atmosphère même (dont 2 se sont posées sur la surface et ont renvoyé 2 photographies).

La pression de l'atmosphère à la surface est environ égale à 90 fois la pression de l'atmosphère terrestre ; sa température est d'environ  $700^\circ\text{K}$  et varie très peu d'un côté à l'autre. Il y a quelques évidences pour la présence de montagnes et éventuellement de "cratères".

Les sondes soviétiques ont suggéré la présence de la vapeur d'eau à la surface, en petites quantités, mais le résultat est contesté.

Les nuages en contiennent très peu. Ils sont composés essentiellement de  $\text{CO}_2$  avec  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  et  $\text{CO}$  <sup>ou  $\text{H}_2\text{O}$</sup> . Récemment, on a proposé qu'il devait y avoir aussi des quantités de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . En somme, la surface de Vénus est une très bonne approximation de l'enfer classique !!



La sonde Mariner 10 a photographié de grands mouvements atmosphériques atteignant des vitesses de  $100 \text{ m s}^{-1}$  ; pourtant, la planète tourne sur son axe avec une période de 243 jours (dans une direction opposée à sa révolution autour du Soleil).

Le champ magnétique intrinsèque est inférieur à 0.005 gauss.

Les photographies de la surface ont mis en évidence la présence de cailloux : cela suggérerait que la planète est encore géologiquement active.

### MARS :

Les sondes ont montré que la surface de Mars est couverte de cratères (météoriques et volcaniques), de montagnes, de "plaines" et de "canyons". Il y a aussi une quantité importante de poussière. Le relief est très réduit par rapport à la lune, témoignant d'un processus d'érosion. Le réseau de "canaux" d'autrefois n'existe pas -mais il existe des "failles" qui ressemblent curieusement aux lits d'anciennes rivières.

Certaines formations superficielles suggèrent que l'intérieur de Mars n'est pas (ou n'a pas été dans un passé récent) entièrement mort : en effet, d'après sa densité et son rayon, il semblerait que sa structure interne doive être intermédiaire entre celle de la lune et celle de la Terre.

La température équatoriale varie de  $300^\circ\text{K}$  (jour) à  $200^\circ\text{K}$  (nuit) ; la température polaire est d'environ  $150^\circ\text{K}$ . Mars tourne sur elle-même avec une période d'environ 24 h.

Mars possède une atmosphère. Sa pression est  $\approx 10^{-3}$  fois celle de l'atmosphère terrestre (approximativement la pression à l'altitude de 20 km au-dessus de la surface de la Terre) ; elle est composée de  $\text{CO}_2$ , avec des traces de  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ . Les pôles martiens sont couverts d'une mince couche de matière réfléchissante, qui se sublime pendant "l'été" martien.

Deux sondes se sont posées sur la surface de Mars. Elles ont mis en évidence la présence d'eau (soit sous forme givrée, soit sous forme de minéraux hydratés) ; de plus, on a pu montrer que les calottes polaires contiennent des quantités très importantes d'eau givrée. Il est très probable que leur composition "de base" est la glace qui se couvre de  $\text{CO}_2$  givré en hiver. Il n'y a pas d'eau liquide à la surface de Mars.

Les sondes n'ont pas pu déceler des molécules organiques ni de vie ; la chimie des minéraux superficiels semble très compliquée

et assez différente de celle de la Terre, étant à l'heure actuelle interprétée par la présence des "peroxydes" (composées contenant une surabondance d'oxygène).

Le champ magnétique global est inférieur à .001 gauss; la matière superficielle (comme ont montré les sondes) est magnétique en partie.

Mars est accompagné de 2 petits satellites -Phobos et Deimos. Les sondes ont mis en évidence que leurs surfaces sont couvertes de cratères (apparemment d'origine météorique). De plus, Phobos est traversé par un curieux système de "failles" parallèles -on en ignore complètement la raison. Les satellites ne sont pas sphériques, ressemblant plutôt à de très grands cailloux.

Les sondes ont permis une très bonne détermination de la densité de Phobos et de Deimos ; on trouve  $\approx 2 \text{ g cm}^{-3}$ , une valeur qui est très faible par rapport à la densité de la Lune, mais qui est voisine de celle de certaines météorites. Compréhension qui peut.

#### JUPITER :

La densité de Jupiter, ainsi que la densité des autres planètes lointaines, est très faible par rapport à la densité des planètes intérieures : on en conclut que ces planètes doivent être très abondantes en éléments légers -H, He . Dans ce sens, la composition de Jupiter ressemblerait à la composition de la matière à partir de laquelle le système solaire s'était formé.

La surface de Jupiter, ainsi que celles des autres planètes lointaines, est couverte en permanence d'un système de nuages impénétrables. Comme la période de Jupiter sur elle-même est  $\approx 10$  heures, ces nuages forment un système caractéristique de "bandes" (on remarque que la période de rotation <sup>est</sup> mesurée par le mouvement de ces nuages : on observe en effet une rotation différentielle) parallèles à l'équateur.

Jupiter rayonne (en infra-rouge) environ 2 fois plus d'énergie qu'il n'en reçoit du Soleil : l'origine de ce rayonnement n'est pas connue, mais il semble influencer fortement le système de nuages. En particulier, on remarque la présence de processus extrêmement turbulents ; ils peuvent être transitoires, ou (comme la "grande tache rouge" connue depuis 150 ans au moins) quasi-permanents. On remarque aussi qu'à cause de la source interne d'énergie, les phénomènes d'ordre "météorologique" seront très différents de ceux de la Terre.

Jupiter est la planète la plus massive et la plus grande du système solaire. Néanmoins, malgré sa source interne d'énergie, Jupiter est loin d'être une étoile -si on considère comme étoile un corps qui produit son énergie par réactions de fusion thermonucléaire : sa masse devrait être au moins 10 fois plus grande pour que ces réactions puissent se reproduire.

Les nuages de Jupiter sont composés pour la plupart de H, avec une certaine quantité de He, d'ammoniac et de méthane ; il y a aussi des traces de deutérium, d'acétylène et d'éthane. La sonde Pioneer 10 a montré que le rapport He/H est  $\approx 0.18$  -du même ordre de grandeur que le Soleil.

Jupiter possède un champ magnétique de 4-10 gauss. La planète est source de sursauts électro-magnétiques, qui se manifestent par un rayonnement intense radio, et d'électrons qui peuvent parfois atteindre des énergies relativistes. Les mécanismes responsables ne sont pas connus. La planète est entourée d'un plasma, analogue à l'ionosphère de la Terre.

Jupiter possède 13 satellites. Le satellite Io est d'un intérêt particulier : ses dimensions sont comparables à celles de la Lune, mais il interagit électriquement de façon importante avec le champ magnétique de la planète ; en particulier, certains sursauts électromagnétiques semblent être modulés par le mouvement de Io. En outre, ce satellite possède une atmosphère très ténue.

#### SATURNE :

Saturne était considéré jusqu'en 1977 comme étant la seule planète du système solaire à posséder un anneau. L'anneau est très mince -entre 10 et 100 km d'épaisseur- étant composé de fragments de matière solide ou poussiéreuse.

L'aspect général de Saturne ressemble à Jupiter. Pourtant, on n'observe pas d'émission radio, et on pense que le champ magnétique, s'il y en a un doit être très faible. On ne comprend pas cette différence entre deux planètes apparemment très analogues.

Saturne possède 10 satellites. On remarque tout particulièrement Titan -un corps dont les dimensions sont comparables à celles de Mercure ou Mars, mais dont la densité est d'environ  $2 \text{ g cm}^{-3}$ . Titan est entouré d'une atmosphère massive composée de méthane, avec une certaine quantité d'hydrogène moléculaire, d'ammoniac, ainsi que de  $\text{C}_2\text{H}_2$  et  $\text{C}_2\text{H}_6$ . La présence de  $\text{H}_2$  pose un problème : en effet un objet de la taille de Titan ne peut pas retenir un gaz aussi léger.

URANUS :

En 1977, le passage d'une étoile relativement brillante derrière la planète a révélé la présence probable d'un anneau (ou plusieurs anneaux) : en effet, l'étoile a subitement baissé sa brillance plusieurs fois avant de passer derrière la planète. Après l'occultation, l'étoile a de nouveau baissé sa brillance à des endroits presque diamétralement opposés.

L'anneau éventuel n'a pas encore été photographié directement - en effet, la planète est probablement trop brillante.

Uranus est accompagné de 5 satellites.

Remarquons une particularité de cette planète : son axe de rotation est presque dans le plan orbital.

PLUTON :

Pluton est la planète la plus lointaine du système solaire. Sa masse et son rayon sont encore très mal connus. Récemment, on a pu mettre en évidence la présence de méthane givré sur sa surface.

UN PEU DE NUMEROLOGIE MYSTERIEUSE :1.- La "loi" de Titus Bode :

On trouve que les distances des planètes au Soleil suivent approximativement une progression géométrique :

$$r_n = r_0 B^n$$

où :

n	=	1	pour	Mercure
	=	2		Vénus
	=	3		La Terre
	=	4		Mars
	=	5		Astéroïdes
	=	6		Jupiter
	=	etc...		

La constante B est égale à environ  $1.7 \pm .3$

Remarquons qu'il est nécessaire d'inclure les astéroïdes (dans leur ensemble) dans cette "loi".

Il se trouve que les systèmes de satellites de grandes planètes vérifient aussi une loi de Bode : les valeurs de B sont respectivement : 1.6, 1.3, 1.5 pour Jupiter, Saturne et Uranus.

On ignore la raison (s'il y en a une) de cette "loi".

## 2.- Moment cinétique du système solaire :

Le moment cinétique d'un corps est égal à  $Mr^2 \omega$ , où  $M$  est sa masse,  $\omega$  sa vitesse angulaire,  $r$  le rayon du mouvement circulaire. On peut donc calculer le moment cinétique du Soleil, ainsi que ceux des planètes autour du Soleil. On trouve que le moment cinétique du Soleil est environ 50 fois plus petit que la somme des moments cinétiques de toutes les planètes -pourtant le Soleil est environ 1 000 fois plus massif que la masse de toutes les planètes dans leur ensemble.

On ignore comment cette distribution s'était faite ; remarquons que dans le cas des systèmes de satellites, les planètes centrales dominent en masse et en moment cinétique.

## 3.- Rotation et révolution de Mercure :

La période de révolution autour du Soleil est de 87,7 jours tandis que la période de rotation est d'environ 58,6 jours. Donc, le rapport de la période de rotation à la période de révolution est approximativement  $3 / 2$  ; ce phénomène n'est pas expliqué.

## 4.- Conjonction inférieure de Vénus :

La période de révolution de Vénus autour du Soleil est de 224,7 jours tandis que sa période de rotation est de 243 jours dans un sens opposé au mouvement autour du Soleil. A des intervalles réguliers ("période synodique") Vénus et la Terre se rapprochent au plus près ; il se trouve que la période de rotation est telle que, à ce moment de "conjonction inférieure", Vénus présente toujours la même face à la Terre. On en ignore la raison.

## LES ETOILES

L'univers est composé essentiellement d'étoiles.

Les masses stellaires varient de  $.02 M_{\odot}$  à  $60 M_{\odot}$ , et leurs rayons de 10 km à  $\approx 10^{13}$  cm.

Les étoiles sont très chaudes (leurs températures superficielles varient de  $3000^{\circ}\text{K}$  à  $50\,000^{\circ}\text{K}$ , et leur températures internes de  $10^6$  à  $10^9^{\circ}\text{K}$ ) et se manifestent en général par leur propre rayonnement. Les étoiles peuvent rayonner dans les domaines X, ultra-violet, visible, infra-rouge et radio.

L'étoile la plus proche du soleil est à 1.1 parsec. Dans un volume de  $1000 \text{ pc}^3$  autour du Soleil, on trouve environ 40 étoiles.

On ne sait pas à l'heure actuelle s'il y a d'autres étoiles autour desquelles gravite un système planétaire : le candidat le plus probable est "l'étoile de Barnard" (à  $\approx 2$  pc du Soleil), qui paraît accompagnée d'un corps de masse environ  $10^{-3} M_{\odot}$ . Cette composante n'est pas observable et c'est en effet le mouvement anormal de l'étoile principale qui nous révèle la présence d'une composante invisible : nos informations sont obtenues alors de façon très indirecte et imprécise. Il est probable qu'une composante de masse planétaire ne serait pas détectable avec les méthodes actuellement disponibles.

### ETOIILES BINAIRES. MULTIPLES ...

Les étoiles ne sont pas toujours isolées : on trouve assez fréquemment des systèmes composés de deux, trois, quatre étoiles liées directement *par la gravitation. Les étoiles doubles proches nous renseignent* sur les masses stellaires. On pense maintenant qu'au moins un astre sur deux est un système binaire.

La duplicité d'un astre peut être reconnue par plusieurs méthodes. Mentionnons-en quelques unes :

- a) on observe le mouvement autour d'un barycentre de deux étoiles. Il faut alors des systèmes relativement proches et relativement ouverts - leur nombre est alors limité ;
- b) on peut parfois interpréter le mouvement d'une étoile apparemment isolée comme étant un mouvement autour d'un barycentre : on conclut dans ce cas que l'étoile visible est accompagnée d'une étoile de masse comparable, mais de très faible éclat ;

c) le plus souvent, les étoiles sont trop lointaines, ou les composantes sont trop serrées, pour qu'on puisse identifier leur duplicité par des méthodes géométriques. On a alors recours aux changements subits d'éclat d'un astre (l'éclipse d'une composante par l'autre, dans le cas où la Terre se trouve dans le plan orbital du système, affaiblit l'éclat global du système -étoiles à éclipse), ou à une analyse relativement raffinée du spectre d'un astre (binaire spectroscopique : mouvement périodique autour du barycentre  $\Rightarrow$  effet Doppler périodique  $\Rightarrow$  décalage périodique vers le rouge et le bleu des raies spectrales ; comme les deux composantes se déplacent en sens opposés par rapport à la Terre, les raies spectrales peuvent être dédoublées).

Depuis quelques années, il y a un regain d'intérêt dans le comportement physique des étoiles binaires, et surtout dans les processus d'échange de matière entre une composante et une autre. En effet, on pense aujourd'hui que les novae, ainsi que beaucoup de source-X ponctuelles galactiques sont des systèmes doubles.

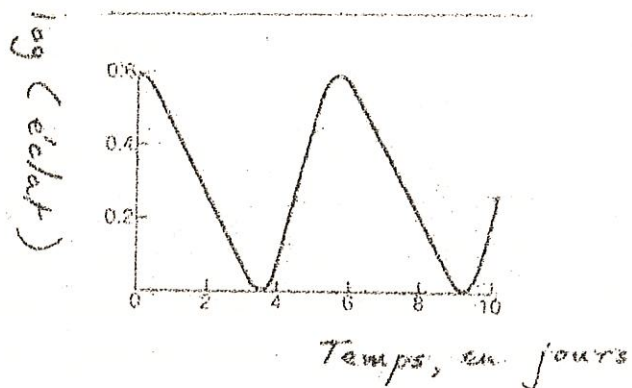
#### VARIATION DE LA LUMINOSITE (VISIBLE) STELLAIRE

L'existence d'une vie terrestre et aussi des observations d'ordre géophysique, nous indiquent que l'éclat du Soleil a dû changer très peu depuis la solidification de la Terre ( $> 4 \times 10^9$  ans). Le soleil semble donc assez stable ; on suppose que la plupart des étoiles le sont aussi.

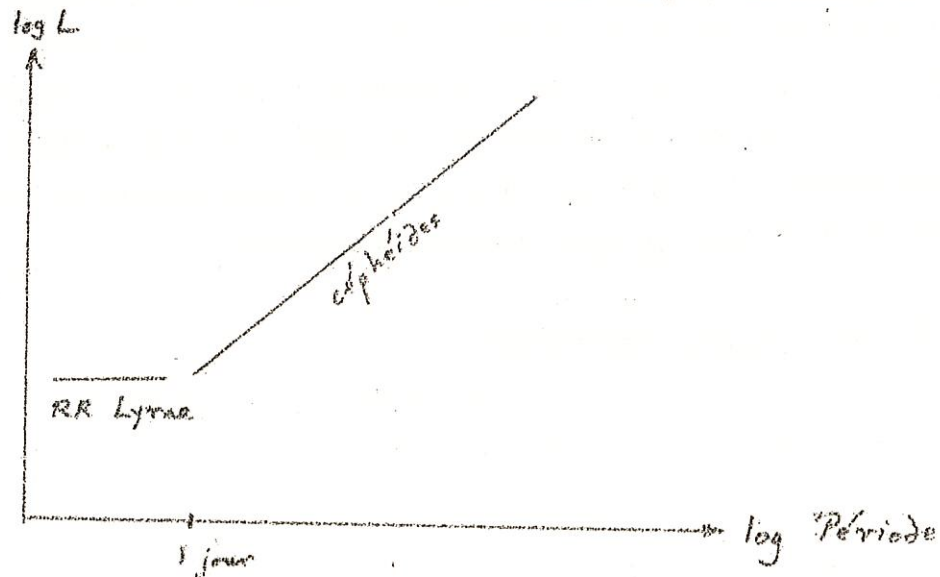
Toutefois, on observe que la luminosité d'un certain nombre d'étoiles change ; ces changements peuvent être périodiques ou non, rapides ou lents. On distingue quelques classes importantes.

#### LES ETOILES VARIABLES PERIODIQUES

Leur luminosité varie de façon très régulière sur une échelle de temps de quelques jours à quelques semaines.



Parmi les variables périodiques, on distingue 2 classes particulièrement intéressantes -les variables "Céphéïdes" et les variables "RR Lyrae". Pour ces deux classes, on a pu constater que la période et la valeur moyenne de la luminosité intrinsèque sont liées de façon simple : en fait, si pour ces étoiles on porte le logarithme de la luminosité intrinsèque ( $\log L$ ) en fonction du logarithme de la période ( $\log P$ ) on trouve :



(très schématisique)



La luminosité intrinsèque et la distance de la plupart des étoiles ne sont pas mesurables directement ; par contre, dans le cas des variables céphéides ou RR Lyra, il suffit de mesurer leur période pour en tirer leur luminosité intrinsèque. Comme la luminosité apparente (la grandeur que l'on mesure) est liée à la luminosité intrinsèque par la distance de l'étoile, on voit qu'on peut se servir de ces variables comme d'une sorte de "mètre cosmique".

On note que les Céphéides sont généralement très brillantes ( $\geq 10^4 L_{\odot}$ ), visibles de très loin, et nous permettent alors de sonder de grandes distances.

La période des variables Céphéides et RR Lyra paraît très stable : on l'interprète comme une pulsation des couches externes stellaires.

#### ETOILES A ERUPTION

De temps à autre, de façon aléatoire (ce qui veut dire que nous n'avons pas encore trouvé la loi) certaines étoiles relativement froides (donc plutôt rouges en couleur) changent leur éclat subitement : en quelques secondes leur brillance se trouve multipliée de quelques facteurs. La brillance revient ensuite à la valeur "ambiante" au bout de quelques minutes ou quelques heures.

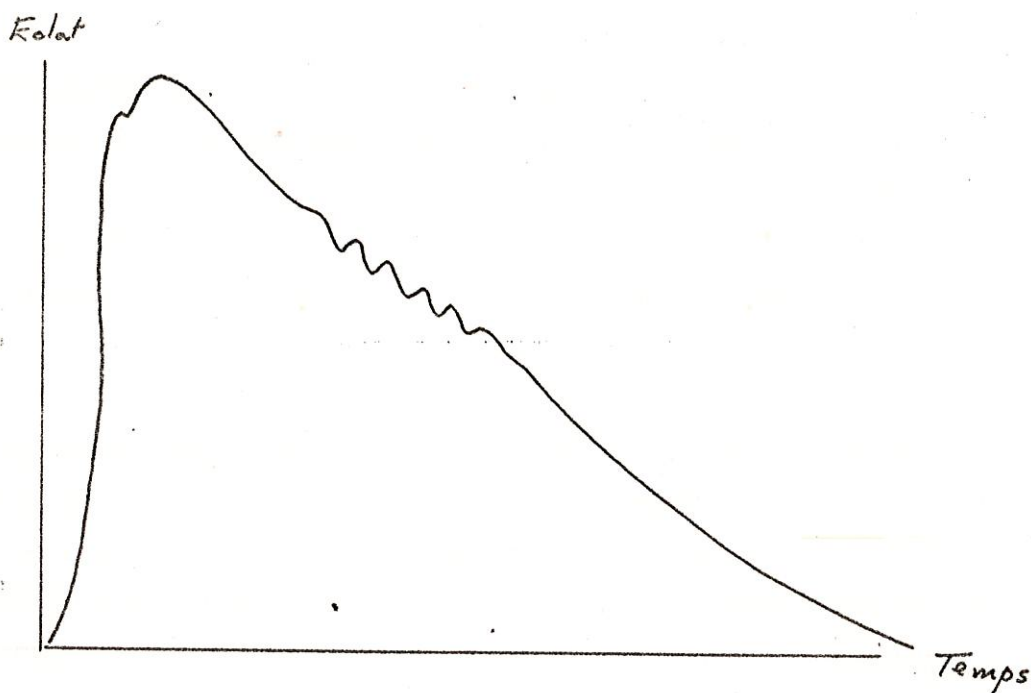
Pendant une éruption, le spectre change de façon importante -on observe en particulier des raies d'émission ; parfois, ces "éruptions" dans le domaine du visible sont accompagnées "d'éruptions" dans le domaine radio.

A l'heure actuelle, on suppose que ces changements d'éclat sont produits par des phénomènes stellaires analogues aux protubérances solaires.

#### NOVAE

De temps en temps, une étoile relativement chaude et brillante (mais généralement relativement petite -  $< R_{\odot}$ ) change d'éclat par un facteur de l'ordre de  $10^4 - 10^6$  dans une période inférieure à 2-3 jours. Le changement de la luminosité ne semble pas être dû à un accroissement de la température -c'est plutôt le rayon qui croît énormément et très vite. Au bout de quelques jours, on détecte l'émission de couches de matière s'éloignant de l'étoile à des vitesses  $\lesssim 2 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$ .

La luminosité d'une nova descend à sa valeur précédente sur une échelle de temps de quelques années ; certaines étoiles ont manifesté un tel comportement plusieurs fois (jusqu'à 3 fois) sur des intervalles d'une dizaine d'années.



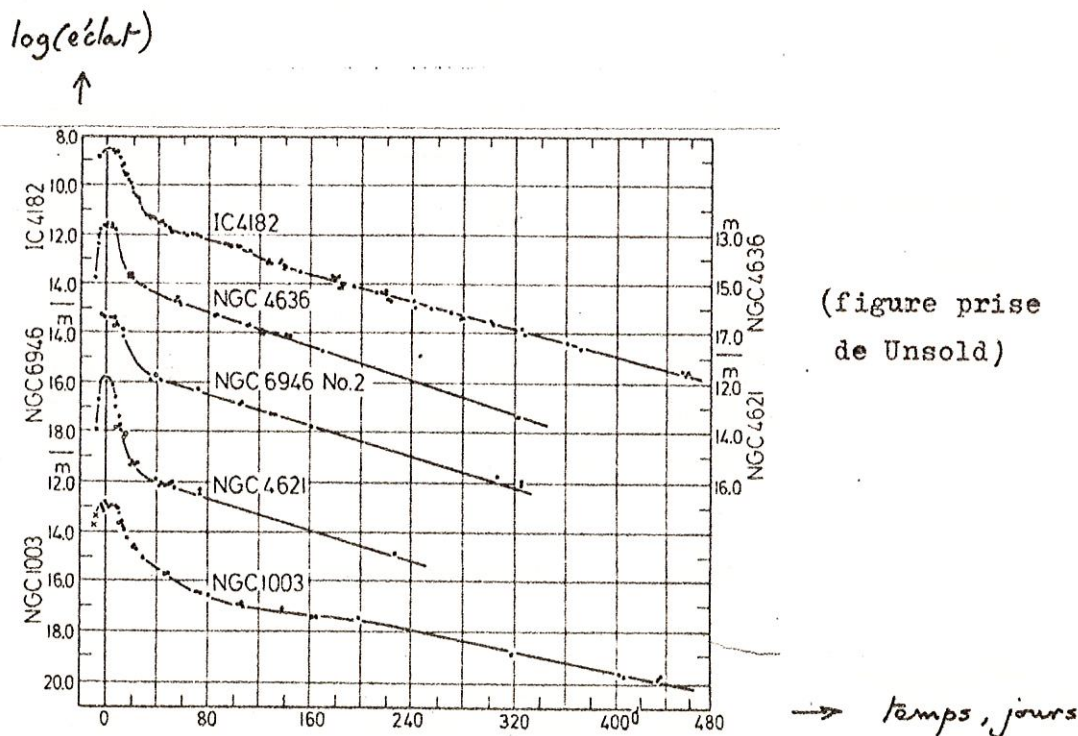
On observe environ 50 novae par an.

Le phénomène "nova" ne devrait pas être confondu avec celui de la "supernova" -voir prochain paragraphe. Il y a non seulement une différence quantitative, mais aussi qualitative : tandis que l'explosion supernova semble changer complètement la nature d'une étoile (jusqu'à la détruire), l'explosion nova paraît moins "nocive". Depuis quelques années, on pense que les novae sont en fait des systèmes binaires assez serrés, dont une composante serait une étoile très petite et dense (naine blanche -voir beaucoup plus loin : évolution stellaire). On suppose que l'autre étoile s'étale subitement (voir aussi évolution stellaire) ce qui déclenche un

processus de transfert de matière de l'étoile géante vers la petite. Par la suite, on suppose que le changement d'éclat est dû à l'énergie potentielle libérée quand la matière arrive sur l'étoile naine. Le processus est donc non-destructif et pourrait éventuellement se répéter de temps à autre.

### LES SUPERNOVAE

De temps en temps, une étoile devient extrêmement brillante pendant une courte période : sa luminosité peut monter jusqu'à  $10^8 - 10^{19}$  L pendant quelques jours. Ensuite, sa luminosité décroît lentement sur une échelle de temps de l'ordre de quelques mois.



Le spectre d'une supernova témoigne de l'éjection de grandes quantités de matière : on a repéré des vitesses allant jusqu'à  $7\,000 \text{ km s}^{-1}$ .

Les supernovae sont extrêmement rares : il n'y a que 3 cas historiques dans le voisinage du Soleil :

- en 1054 - dite supernova du "Crabe" ; observée par les Chinois ;
- en 1572 - dite supernova de Tycho-Brahé ;
- en 1604 - dite supernova de Képler.

Ces supernovae étaient visibles en plein jour.

Depuis l'ère télescopique, aucune supernova n'a été observée dans notre galaxie ; pourtant, comme elles sont très brillantes (jusqu'à la brillance d'une galaxie entière) on peut les étudier dans d'autres galaxies (il y en a heureusement beaucoup) et tous nos renseignements sur leur nature physique sont obtenus par ce moyen.

Le taux de production de supernovae par une galaxie "type" est un domaine où il vaut mieux ne pas s'aventurer : on trouve dans la littérature des chiffres allant de 3 par siècle à 1 par 3 siècles !

On trouve que les supernovae peuvent être réparties en 2 groupes : les supernovae d'un groupe se ressemblent et, en particulier, elles ont la même luminosité intrinsèque au maximum. Elles nous fournissent alors un autre "mètre cosmique" très puissant (quoique peu utile, car elles sont peu nombreuses).

Les supernovae sont interprétées comme de gigantesques explosions ayant lieu à la fin de la vie d'une étoile dont la masse dépasse  $\approx 1.4 M_{\odot}$ . En effet, les 3 cas historiques ont laissé des "débris" observables :

- le Crabe : il reste un objet étendu très lumineux et turbulent dit "nébuleuse du Crabe" ; cet objet est une source radio et une source étendue d'émission en rayons-X ;
- la Supernova de Tycho Brahé : il reste une radio source et une faible luminosité ;
- la Supernova de Képler : il reste une faible luminosité.

### LES PULSARS

Voir les "sources radio ponctuelles".

### SOURCES RADIO PONCTUELLES

L'évolution rapide de la radio-astronomie après 1970, et surtout du pouvoir séparateur des radio-télescopes a amené l'identification de quelques classes de radio sources ponctuelles dans notre galaxie. Nous en mentionnons trois.

RADIO-ETOILES : Ce sont des objets dont le flux d'énergie dans le domaine radio changent de quelques facteurs dans un délai d'environ 10 minutes. Cette activité est aléatoire ; les objets de ce type sont aussi souvent des "éruptions" dans le domaine du visible (mais pas toujours simultanément), et dans le domaine X (voir sources X).

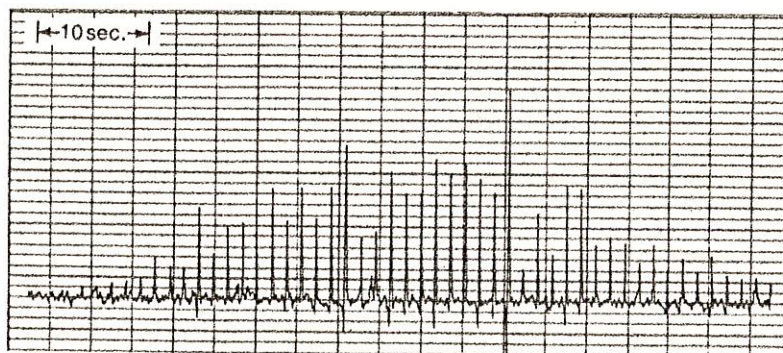
Il semble que cette classe de "radio étoile" est le plus souvent un système binaire et que l'activité est liée de façon encore obscure au transfert de matière entre les deux composantes.

LES MASERS COSMIQUES : Ce sont des régions très compactes (dimension angulaire  $\approx 10^{-2}$  à  $10^{-4}$  arsec sur le Ciel ; on ne connaît pas leurs dimensions spatiales puisque on ignore leurs distances) dont l'émission a été identifiée avec celle de la molécule  $H_2O$  (22.2 MHz) et celle du radical OH (1650 MHz). Pour tenir compte de l'intensité d'émission observée, on est amené à supposer que le processus responsable est celui d'un "pompage" comme dans les lasers et les masers de laboratoire ; pourtant, on ignore la nature de ce pompage.

Les sources masers sont variables, mais non-périodiques, avec une échelle de temps de quelques mois. On remarque que souvent quelques masers se trouvent dans une même région du ciel.

On a souvent énoncé l'idée (sans beaucoup de preuves pour autant) que les sources masers sont associées avec des régions où les étoiles sont en formation (à l'heure actuelle, on ignore comment les étoiles se forment!)

PULSARS : L'émission d'un pulsar est caractérisée par des "pulsations" de rayonnement (qui durent quelques millisecondes) se répétant de manière très régulière ( $\Delta P/P < 10^{-13}$ ) sur une échelle de temps qui va, selon le pulsar, de .03 sec à environ 4 sec.



On remarque que l'amplitude d'émission d'un pulsar n'est pas constante : cette fluctuation irrégulière est interprétée (tout au moins en partie) comme un effet dû à un plasma interstellaire ténu (cf. La scintillation des étoiles vues à travers l'atmosphère terrestre).

Les pulsars sont généralement observés par leur émission en radio : pourtant, quelques uns montrent le même phénomène dans d'autres domaines spectraux (X,  $\gamma$ ). On connaît deux pulsars (dont l'un est dans la nébuleuse du Crabe) dont les pulsations sont visibles en optique aussi ; le pulsar du Crabe émet en radio, en visible, en rayons X et en rayons  $\gamma$ .

Un pulsar est actuellement interprété comme le débris d'une explosion de type supernova : il est très significatif que la nébuleuse du Crabe en contienne un (mais remarquons que l'identification pulsar-supernova est sûre seulement dans ce cas -un cas manifestement atypique !).

En 1977, on connaît 147 pulsars, dont 1 seulement est dans un système binaire. Rappelons que pour les étoiles en général, 1 étoile sur 2 est un système binaire.

## Sources X

On observe (en ballon stratosphérique, fusée ou satellite) des sources ponctuelles rayonnant dans le domaine de rayons X.

Les sources sont variables - elles peuvent être périodiques, avec périodes variant de quelques secondes à quelques jours souvent avec plusieurs périodicités superposées, ou irrégulières (temps typique parfois aussi petit que 1 ms) ; elles peuvent aussi manifester des "éruptions" durant quelques secondes à quelques minutes. De plus, certaines sources semblent arrêter leur émission X pendant des durées plus ou moins bien définies, pour recommencer après.

Certaines sources X émettent aussi en visible et en radio - parfois, mais pas toujours, le comportement dans les divers domaines spectraux sont corrélés. Un certain nombre de sources X ont été identifiées avec des systèmes binaires.

Remarquons que beaucoup d'objets dont nous avons déjà parlé rayonnent aussi en rayons-X (par exemple, le Soleil, certains pulsars) ; les sources X se distinguent par le fait que la quantité d'énergie émise dans le domaine X est comparable, et parfois bien supérieure, à celle émise dans les autres domaines spectraux.

## Les Amas Stellaires

A part les systèmes d'étoiles multiples, on trouve aussi de grands groupes stellaires. En mentionnons deux qui sont particulièrement importants.

### Amas Galactiques ou ouverts

Ce sont des groupes de forme ouverte et irrégulière contenant environ  $10^2$  à  $10^4$  étoiles liées par la gravitation. Leurs diamètres varient typiquement de 1.5 à 20 pc. Les amas galactiques sont distribués dans un disque qui se confond avec la Voie Lactée - un disque d'épaisseur <sup>de</sup> quelques Kpc et de rayon  $\approx 15$  Kpc.

### Amas Globulaires

Ce sont des groupes très compacts de forme sphérique contenant  $10^4$  à  $10^6$  étoiles liées par la gravitation. Dans un amas globulaire la distance entre les étoiles est typiquement d'environ 1 année-lumière, et leurs diamètres sont typiquement 40 pc. Les étoiles sont souvent très concentrées vers le centre

d'un amas globulaire. L'amas globulaire le plus proche est à une distance d'environ 3 kpc ; on en connaît environ 120.

On observe que l'ensemble des amas globulaires constitue un système quasi-sphérique de rayon environ 15 kpc.

### La Galaxie

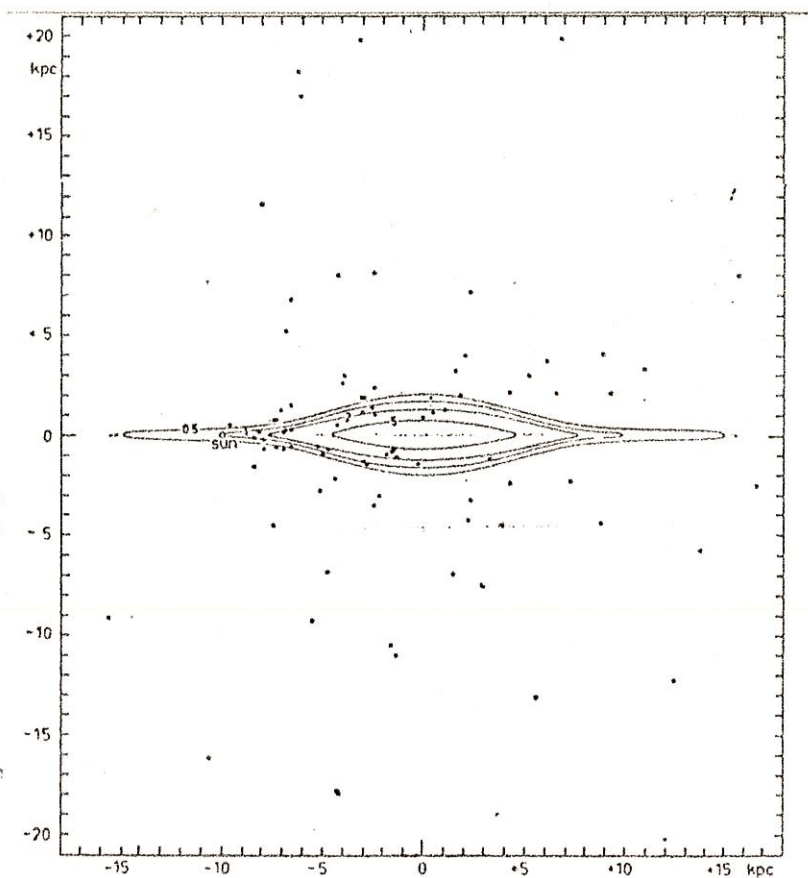
L'ensemble des étoiles et des amas stellaires forme un système cohérent lié par la force gravitationnelle : la Galaxie.

La masse totale de notre galaxie est d'environ  $10^{11} M_{\odot}$  répartie essentiellement dans une "galette" de rayon 15 kpc. Le Soleil se trouve dans la galette à environ 10 kpc du centre. Cette galette n'est pas uniforme : au centre son épaisseur est de l'ordre de 2 kpc, tandis que à la distance du Soleil l'épaisseur n'est qu'environ 500 pc. Environ  $10^8 M_{\odot}$  est concentrée au centre dans un "noyau" galactique de diamètre  $\approx 100$  pc.

Les amas galactiques sont répartis dans le disque galactique (façon savante d'appeler la galette) ; les amas globulaires, ainsi qu'un certain nombre d'étoiles, sont distribués dans un "halo" sphérique de rayon 15 kpc. Remarquons que la masse "visible" dans le halo n'est qu'une très petite fraction de la masse totale de la Galaxie ; pourtant, à l'heure actuelle, un certain nombre d'astronomes pensent qu'il pourrait y avoir environ  $10^{11} M_{\odot}$  dans le halo sous forme d'étoiles "éteintes", "mortes" etc. et donc difficile à observer. Il est évidemment difficile à éliminer cette hypothèse.

Vue de profil, notre galaxie présente l'aspect suivant :

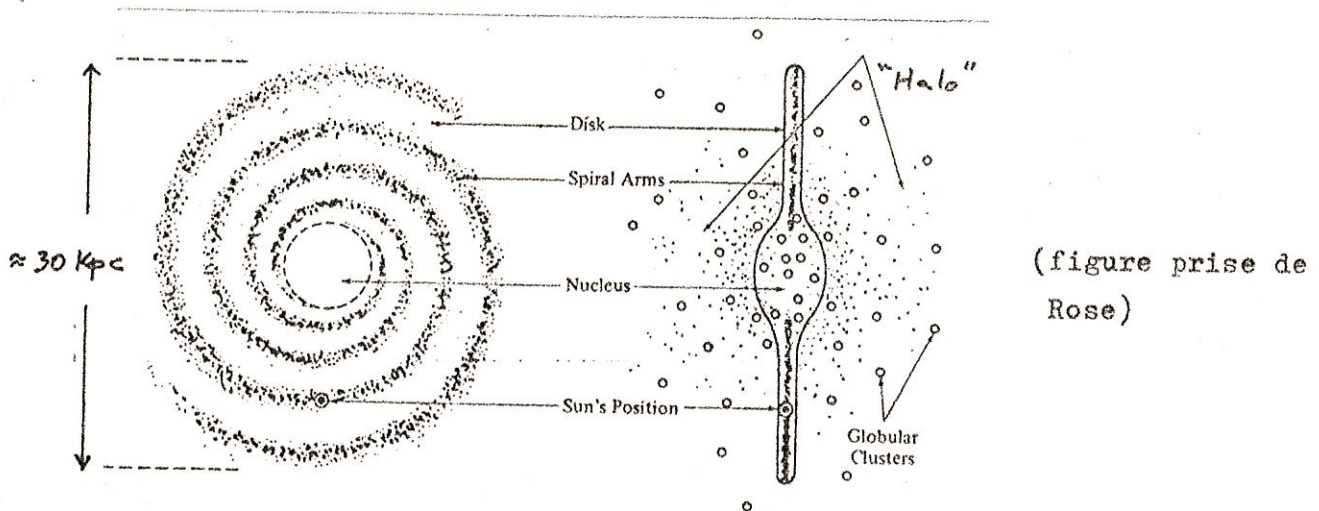




(figure prise  
de Unsöld)

Comme le Soleil se trouve dans le disque, on va voir beaucoup plus d'étoiles dans le plan que dans une direction qui en est perpendiculaire : en effet, la Voie Lactée montre bien ce phénomène.

Etant à l'intérieur de la Galaxie, il est évidemment difficile de se représenter comment elle apparaîtrait vue de l'extérieur ; des indications indirectes (surtout à partir des observations dans le domaine radio) nous font supposer que la "matière brillante" (étoiles, hydrogène émettant à 21 cm, nébuleuses etc.) est répartie en "bras spiraux" dans le disque : vue de l'extérieur, notre galaxie présenterait l'aspect suivant :



(figure prise de Rose)

Soulignons que les bras spiraux ne représentent pas une très forte concentration de la masse totale du disque : ils se distinguent de façon nette parce que les sources fortes de rayonnement s'y trouvent.

La région interstellaire n'est pas vide : on y trouve des atomes de gaz, des électrons, certaines molécules, et de la matière solide sous forme de grains de poussière de dimension  $\lesssim 10^3 \text{ \AA}$ . Le gaz (pour la plupart composé d'hydrogène) et les molécules se manifestent par un rayonnement radio-électrique, tandis que les poussières absorbent la lumière et se manifestent donc par un obscurcissement général.

La densité de toute cette matière diffuse moyennée sur le disque galactique est d'environ .1 à .5 atomes/cm<sup>3</sup>.

On trouve une concentration très forte de poussières vers le centre galactique : on ne peut pas, en effet, observer optiquement (à part les objets particulièrement brillants), au-delà d'environ 3 kpc du Soleil. La Voie Lactée n'est qu'une région très locale. Nos informations concernant le centre de la

Galaxie sont dues presque exclusivement à l'astronomie radio et l'astronomie infra-rouge - l'énergie dans ces domaines spectraux peut traverser de très grandes épaisseurs de poussières sans atténuation importante.

La Galaxie possède aussi un champ magnétique très faible ( $\approx 3 \mu\text{gauss}$ ), et est traversée par des particules extrêmement énergétiques - les rayons cosmiques. La composante la plus importante des rayons cosmiques est le noyau d'hydrogène ; on y trouve aussi des électrons et une proportion non négligeable de noyaux atomiques. La densité des rayons cosmiques est faible, mais comme leur énergie est très élevée (énergie maximum observée  $\approx 10^8$  erg), ils contribuent de manière importante au bilan énergétique de la Galaxie. A l'exception des rayons cosmiques d'origine manifestement solaires et éventuellement des rayons cosmiques les plus énergétiques, leur distribution spatiale semble isotrope.

Il est intéressant de se représenter l'importance relative des différentes composantes principales de la Galaxie :

Composante	densité moyenne de la masse ou de l'énergie
Etoiles ("visibles")	$\approx .075 M_{\odot} / \text{pc}^3$
Gaz (essentiellement l'hydrogène neutre et l'hélium)	$\approx .025 M_{\odot} / \text{pc}^3$
Poussière	$\approx .0002 M_{\odot} / \text{pc}^3$
Rayons cosmiques	$\approx .5 \text{ eV} / \text{cm}^3$
Champ magnétique	$\approx .2 \text{ eV} / \text{cm}^3$
Lumière	$\approx .5 \text{ eV} / \text{cm}^3$

Notre Galaxie est dynamique : elle est en rotation différentielle (période  $\sim 250 \times 10^6$  années à la distance du Soleil), et le centre est le siège des processus violents et énergétiques.

La distribution de la matière interstellaire est très inhomogène : sur un fond de matière diffuse on observe des concentrations locales dont la densité peut aller jusqu'à  $10$  à  $10^6$  atomes  $\text{cm}^{-3}$ . On en distingue 4 sortes

différentes :

### Les nuages sombres

Composés en général de poussières mais sans étoiles dans leur voisinage, ces nuages se manifestent par un fort obscurcissement de toute étoile située derrière : dans un champ brillant, on voit un "trou". Les étoiles vues à travers de tels nuages paraissent moins bleues (plus rouges) qu'un échantillon d'étoiles vues directement.

### Les nébuleuses par reflexion

Elles sont aussi composées de poussières, mais cette fois-ci éclairées par une ou plusieurs étoiles proches - ces nuages se manifestent alors par la lumière réfléchie.

### Les nuages lumineux

Ils sont constitués en général d'un mélange de poussières et de gaz chauffé par une ou plusieurs étoiles : ces nuages se manifestent par une sorte de fluorescence étendue et irrégulière. Leurs dimensions varient de 20 à 200 pc.

### Les nébuleuses planétaires

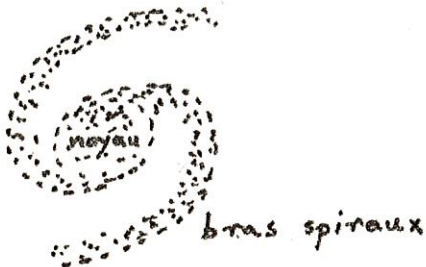
Ce sont des nuages "fluorescents" très réguliers (sphériques) autour d'une étoile excitatrice. On constate que ces nuages sont en expansion par rapport à l'étoile excitatrice : la vitesse d'expansion est typiquement  $25 \text{ km s}^{-1}$ . Leurs dimensions sont typiquement de l'ordre de .05 pc.

## Les Galaxies

La matière dans l'Univers semble organisée en galaxies qui, d'une manière très générale, sont composées d'étoiles, gaz, poussières etc... comme la nôtre.

Les galaxies sont souvent réparties en 3 groupes principaux :

### Les galaxies spirales



On voit clairement une structure spirale : ces galaxies ressemblent alors à la nôtre. Bien sûr, on en voit sous différents angles.

On constate que les spirales présentent une rotation différentielle, comme notre galaxie. Elles contiennent des gaz interstellaires, de la poussière, etc... Les bras spiraux se manifestent particulièrement bien en lumière bleue.

Leurs masses varient de  $10^8 M_{\odot}$  à  $10^{12} M_{\odot}$

### Les galaxies elliptiques



On ne distingue aucun bras spiral, et la galaxie prend une forme elliptique ou sphérique. Leurs masses varient de  $10^6$  à  $10^{12} M_{\odot}$ . Par rapport aux galaxies spirales, les elliptiques semblent avoir très peu de matière interstellaire.

### Les galaxies irrégulières

Elles n'ont pas de forme nette. On constate souvent la présence des "jets" de matière qui semblent avoir de grandes vitesses par rapport au centre. Leurs masses varient de  $10^4 M_{\odot}$  à  $10^7 M_{\odot}$ .

On connaît aussi quelques galaxies sous forme d'anneau.

Les galaxies se manifestent non seulement par la lumière intégrée des étoiles qui les composent et de la matière interstellaire, mais aussi souvent par un rayonnement radio ou infra-rouge ou (plus rarement) X.

L'intensité du rayonnement radio peut être beaucoup plus importante que la lumière dans le visible : c'est le cas des "radio-galaxies". On remarque que les galaxies irrégulières sont souvent des sources intenses de rayonnement radio.

Les autres galaxies peuvent nous renseigner sur la structure de la nôtre, parce qu'on les voit sous tout angle et toute condition : bien qu'on se

trouve à l'intérieur de la nôtre, les conditions idéales d'observation sont loin d'être réunies : les poussières nous empêchent d'observer directement le noyau dans le domaine du visible. On remarque à cet égard l'importance croissante d'autres domaines spectraux (radio, I - R, ...).

### Les Amas des Galaxies

La distribution des galaxies dans l'Univers n'est pas uniforme - on trouve qu'elles sont généralement organisées en amas quasi-sphériques, la distance moyenne entre galaxies à l'intérieur d'un amas étant  $\approx 300$  kpc. Les dimensions des amas varient entre  $\sqrt[3]{3}$  Mpc et 20 Mpc environ ; la séparation entre amas est typiquement inférieure à environ 300 Mpc. On ignore à l'heure actuelle si les amas sont repartis uniformément ou non : par contre, les astronomes ne le sont pas, certains croyant fermement dans l'existence de superamas, et d'autres croyant aussi fermement que les superamas n'existent pas.

A l'heure actuelle, grâce aux observations dans le domaine des rayons X, on pense qu'il pourrait y avoir une matière intergalactique très peu dense dans certains amas ; on ignore s'il y a quelque chose entre les amas.

### Les Quasars

Les quasars sont des objets apparemment très éloignés. On les distingue comme classe spéciale de la manière suivante :

1) ils sont composés d'une source optique quasi-ponctuelle, souvent identifiée avec une source radio. La source optique est parfois à l'intérieur ou à côté d'une région étendue optiquement faible, qui se révèle plus intense en radio que la source elle-même. En tout cas, la plupart des quasars semblent avoir plusieurs composantes émettant en radio - si on admet les distances, la séparation des composantes peut atteindre  $\approx 100$  kpc.

2) les raies spectrales sont fortement décalées vers le rouge.

3) l'émission en U-V est nettement supérieure à celle des étoiles normales ; l'émission en infra-rouge l'est aussi.

4) leur luminosité varie sur une échelle de quelques semaines à quelques années.

L'énergie rayonnée par ces objets est très grande : si on admet leurs distances, les quasars semblent débiter  $\approx 10^2$  fois plus énergie qu'une galaxie ordinaire, et ceci dans une région  $\approx$  quelques années lumière.

On ignore à l'heure actuelle la nature physique des quasars.

### Les "monstres" cosmiques

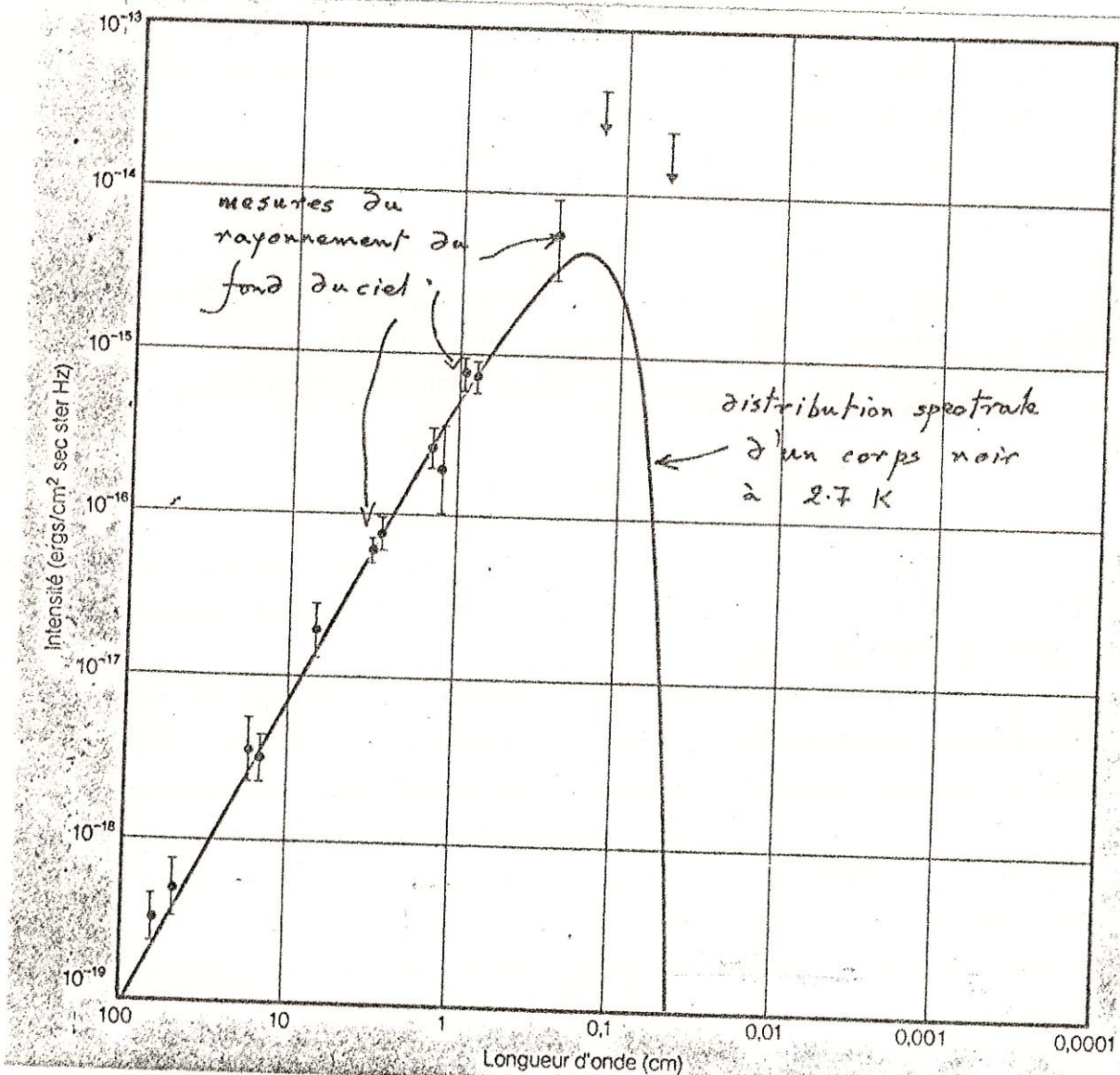
Comme beaucoup de quasars semblent avoir plusieurs composantes radio, il est intéressant d'étudier leurs séparations relatives et surtout comment cette séparation varie au cours de temps.

Les mesures sont très difficiles à réaliser, et exigent les techniques de l'interférométrie transcontinentale les plus raffinées. C'est ainsi qu'on ait pu mettre en évidence quelques "monstres" : des objets dont les composantes semblent s'éloigner les unes des autres à des vitesses supérieures à la vitesse de lumière. On n'a que des modèles très peu plausibles pour interpréter cette contradiction apparente avec la relativité restr inte.

Remarquons que la quantité mesurée est une séparation angulaire : la transformation en séparation spatiale fait intervenir la distance - grandeur qu'on ne connaît que très mal (ou pas du tout, selon certains astronomes).

Rayonnement du fond du Ciel

En plus du rayonnement des objets précédents, on constate la présence d'un rayonnement diffus. On observe ce rayonnement en ondes millimétriques radio, ou (récemment) en infra-rouge ; le rayonnement n'a pas de source précise, et a une distribution apparemment isotrope dans le ciel. A l'heure actuelle, on l'identifie avec le "reliquat" d'un rayonnement primordial qui aurait accompagné "la naissance de l'Univers".





La composition chimique de l'Univers

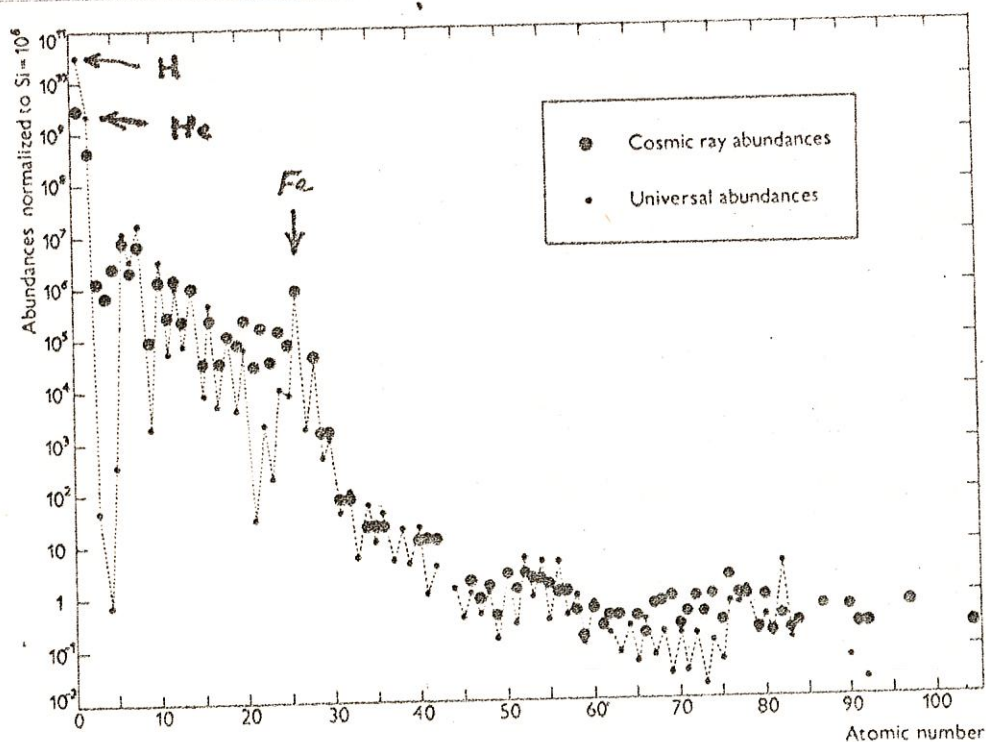
On a identifié tous les éléments naturels qui nous sont connus. On trouve en général que l'hydrogène et l'hélium sont de loin les plus abondants, et représentent à eux seuls 98% de la matière. On remarque ensuite :

a) à mesure que la masse croît, l'abondance décroît très rapidement. On remarque particulièrement le groupe Li, Be, B, dont l'abondance est très nettement au-dessous de la moyenne.

b) on observe ensuite une remontée, le maximum étant atteint pour le fer.

c) l'abondance décroît ensuite beaucoup moins rapidement, avec des petites remontées à certaines valeurs du poids atomique.

Les rayons cosmiques contiennent une surabondance d'éléments légers par rapport à ce qu'on observe dans le système solaire, dans les étoiles, et dans la matière interstellaire.



(figure prise de Kleczek)

Un peu de numérologie encore plus mystérieuse

Considérons les constantes fondamentales de physique:

$$\begin{aligned}
 e &= \text{charge électronique} = 4.8 \cdot 10^{10} \text{ esu} \\
 m_e &= \text{masse de l'électron} = 9.1 \cdot 10^{-28} \text{ g} \\
 m_p &= \text{masse du proton} = 1.7 \cdot 10^{-24} \text{ g} \\
 G &= \text{constante gravitationnelle} = 6.7 \cdot 10^{-8} \text{ dyn cm}^2 \text{ g}^{-2} \\
 c &= \text{vitesse de lumière dans le vide} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm s}^{-1} \\
 h &= \text{constante de Planck} = 6.6 \cdot 10^{-27} \text{ erg s} \\
 t_0 &= \text{"âge de l'Univers"} = 10^{11} \text{ ans}
 \end{aligned}$$

A partir de ces constantes, on peut construire un certain nombre de constantes sans dimensions; on peut les répartir en deux groupes selon la présence (groupe B) ou non (groupe A) de l'âge de l'Univers:

Groupe A

$$\begin{aligned}
 e^2 / G m_e m_p &= 2.27 \cdot 10^{39} \\
 e^2 / G m_e^2 &= 4.17 \cdot 10^{42} \\
 e^2 / G m_p^2 &= 1.24 \cdot 10^{36}
 \end{aligned}$$

Groupe B

$$\begin{aligned}
 t_0 / (e^2 / m_e c^3) &= 6.74 \cdot 10^{40} \\
 t_0 / (e^2 / m_p c^3) &= 1.24 \cdot 10^{44} \\
 t_0 / (h / m_e c^2) &= 7.86 \cdot 10^{37} \\
 t_0 / (h / m_p c^2) &= 1.44 \cdot 10^{41}
 \end{aligned}$$

On remarque que toutes ces valeurs (sans dimensions) sont très grandes.

Dirac, en 1937 et en 1976, a spéculé que le rapport d'une constante du groupe A à une constante du groupe B est une quantité que ne varie pas avec le temps-doncne varie pas avec l'âge de l'Univers. On appelle cette spéculation "l'hypothèse des grands nombres".

Si on admet cette spéculation, on remarque que certaines constantes de physique, généralement considérées invariantes avec le temps, peuvent varier avec le temps.

Il est évidemment très difficile de mettre en évidence une variation des constantes de physique à une échelle de temps cosmologique.

Une variation de la valeur de la constante gravitationnelle entraînerait des phénomènes liés à la stabilité des orbites planétaires, de la Lune etc., et changerait aussi le taux de refroidissement de la Terre après sa formation. On a pu ainsi montrer que:

$$dG/dt \quad 2 \cdot 10^{-11} \frac{G}{\text{an}}$$

Des changements temporels dans les autres constantes se manifesteraient dans les taux des réactions thermonucléaires et donc dans des phénomènes liés à la structure et évolution des étoiles. On ne sait pas encore si on peut éliminer ou non cette possibilité.

