

STRUCTURE DE L'UNIVERS

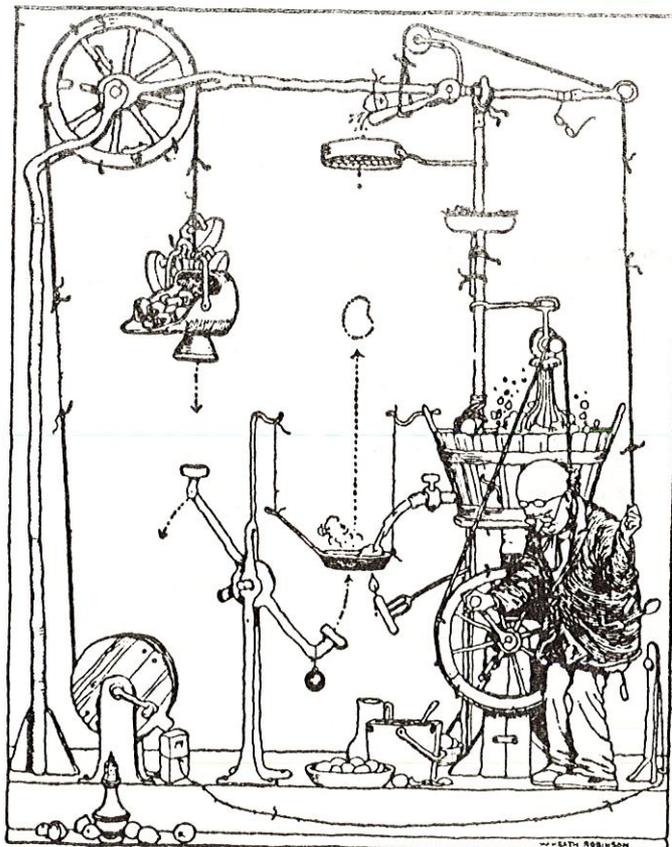
Quelques unités de physique

La loi du maximum de paresse
et la loi du maximum de bricolage

Eléments structurels de l'Univers

Petit aperçu sur le rayonnement
des astres

Petit aperçu sur les forces



QUELQUES UNITES ASTRONOMIQUES COMMODES

1 unité astronomique	= 1 Ua.
	= distance Terre-Soleil.
	= 1.496×10^{13} cm
	= 1.496×10^8 km
1 année lumière	= distance parcourue par la lumière pendant une année,
	= 9.46×10^{17} cm
	= 9.46×10^{12} km
1 parsec	= 3.26 années lumières.

On se sert souvent des grandeurs solaires comme base de référence, et ces grandeurs sont indiquées par \odot , par exemple :

Masse du Soleil	= 1 M_{\odot}
	= 1.99×10^{33} gm
	= 1.99×10^{30} kg
Rayon du Soleil	= 1 R_{\odot}
	= 6.96×10^{10} cm
	= 6.96×10^5 km

A titre de comparaison, les grandeurs terrestre (\oplus) sont :

Masse de la Terre	= 1 M_{\oplus}
	= 5.98×10^{27} gm
	= 5.98×10^{24} kg
Rayon de la Terre	= 1 R_{\oplus}
	= 6.378×10^8 cm
	= 6.378×10^3 km

Remarque : attention, les astronomes ont l'habitude, soit d'utiliser le système cgs, soit d'inventer leurs propres systèmes. Il faut s'y habituer, sinon on ne peut pas comprendre la littérature !

Table de conversion

	cgs	=	SI
Masse	g	=	kg x 10 ⁻³
Longueur	cm	=	m x 10 ⁻²
Temps	s	=	s
Densité	g cm ⁻³	=	kg m ⁻³ x 10 ⁻³
Force	dyne	=	newton x 10 ⁻⁵
Energie	erg	=	joule x 10 ⁻⁷
Puissance	erg s ⁻¹	=	watt x 10 ⁻⁷
Charge	esu	=	coulomb x 2.998 x 10 ⁻¹⁸
Champ magnétique	gauss	=	tesla x 3.335 x 10 ⁻⁷

De plus il est souvent commode d'utiliser :

1 uma = 1.66 x 10⁻²⁴ g pour exprimer les masses à l'échelle de la physique nucléaire

1 eV = 1.602 x 10⁻¹² erg pour exprimer les énergies des particules individuelles, y compris les photons.

Remarquons que nous pouvons aussi exprimer en eV la fréquence du rayonnement électromagnétique, ainsi que la masse d'une particule est une température, en utilisant les relations suivantes :

$$\text{Energie d'une particule} = MC^2 \text{ erg}$$

$$\text{Energie d'un photon} = h\nu \text{ erg}$$

$$\text{Energie cinétique d'une particule dans un milieu à la température } T = kT$$

où :

$$c = \text{vitesse de lumière} \\ = 3 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$$

$$h = \text{cte de Planck} \\ = 6.6 \times 10^{-27} \text{ erg s}$$

$$K = \text{cte de Boltzmann} \\ = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg K}^{-1}$$

Donc :

$$1 \text{ g} \begin{matrix} \equiv & (3 \times 10^{10})^2 & \text{erg} \\ & \equiv & 5.6 \times 10^{32} & \text{eV} \end{matrix}$$

$$1 \text{ herz} \begin{matrix} = & 6.6 \times 10^{-27} & \text{erg} \\ & = & 4.1 \times 10^{-15} & \text{eV} \end{matrix}$$

$$1 \text{ } ^\circ\text{K} \begin{matrix} = & 1.38 \times 10^{-16} & \text{erg} \\ & = & 8.6 \times 10^{-5} & \text{eV} \end{matrix}$$

A titre d'exemple :

masse d'électron	$\equiv 9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$
	$\hat{=} .5 \text{ MeV}$
photon de longueur d'onde 1 \AA	$\equiv 12 \text{ keV}$
un milieu à 10^8	$\equiv 8.6 \text{ keV}$ <i>par particule</i>

La loi du maximum de paresse et la loi du maximum de bricolage

A l'échelle du laboratoire, nous connaissons la matière, soit sous forme des particules élémentaires (protons, électrons, photons, neutrinos, hyperons, leptons etc...), soit sous forme de structures complexes (noyaux, atomes, molécules). Les particules interagissent grâce aux forces (force "faible", force "nucléaire", force "électrique", force "gravitationnelle"); on ignore aujourd'hui jusqu'à quel point ces forces sont les manifestations de la même force "fondamentale", mais en tout cas il est souvent commode de les considérer séparément, chacune obéissant à une "loi" particulière.

A l'échelle du laboratoire nous distinguons aussi certains états de matière (gazeux, liquide, solide, plasma); la distinction est commode, parce que à chaque état correspond un comportement global particulier (compressible, incompressible, conductible etc...). Le comportement est régi par un certain nombre de paramètres (température, densité, nombre d'électrons libres), dont l'habitude nous a souvent fait oublier l'origine, mais dont l'application dans un contexte astrophysique est souvent douteuse.

La physique s'efforce en général de réduire les phénomènes naturels divers à quelques lois cohérentes et universelles. Cette réduction est faite à partir d'expériences en laboratoire. La puissance d'une loi physique est

sa généralité et sa vérifiabilité : c'est cet aspect qui nous permet de faire des prédictions, de tester les prédictions avec de nouvelles expériences, et finalement de raffiner les lois - de faire des synthèses qui contiennent les cas précédents comme cas particuliers, tout en expliquant aussi de nouveaux phénomènes. Dans la physique de laboratoire, il y a une surabondance de données (ou au moins une grande liberté d'expérimentation), et le problème est de résumer cette information de façon simple ; on suit une sorte de loi du "maximum de paresse" : puisqu'il est toujours plus commode de réduire la nature à quelques lois très puissantes et générales, le physicien réduit son monde à quelques "recettes" simples qui lui permettent de tout interpréter.

L'astronome ne jouit pas de la même liberté d'expérimentation. Tout phénomène cosmique pourrait être interprété par une explication particulière, et l'ensemble des observations astronomiques pourrait être traité avec un grand nombre de recettes individuelles : comme on ne peut pas "toucher" la matière cosmique (à l'exception du système solaire), il serait facile de rendre cohérent cet ensemble de recettes. Tout de même, cela n'est ni commode, ni élégant. Si on croit que nos lois physiques sont universelles elles doivent aussi s'appliquer à l'univers - à ses composantes individuelles aussi bien qu'à l'univers dans son ensemble. L'univers ressemble alors à une sorte de laboratoire supplémentaire où se trouvent des conditions extrêmes qu'on ne peut pas atteindre directement chez nous. Certes, on ne peut pas y expérimenter, mais on peut vérifier si la physique connue s'applique à ce qu'on voit : l'astrophysicien se sert des lois connues à la fois pour mieux comprendre son monde et pour vérifier les lois elles-mêmes. En astrophysique, en effet, on "bricole" l'univers à partir des quelques recettes établies dans tout autre contexte.

L'hypothèse implicite que nos lois et notions fondamentales de physique s'appliquent partout n'a pas de preuves directes, mais le succès de l'astrophysique contemporaine suggère qu'on ne s'est pas complètement trompé. Bien sûr, la physique est en pleine évolution, et il est probable que plusieurs phénomènes observés soient régis par des lois ignorées à l'heure actuelle : pour éviter alors de fausses interprétations, on tâche toujours de rendre les observations cohérentes dans leur ensemble, et non seulement en tant que phénomènes individuels.

Toutefois, le dernier arbitre reste toujours l'observation.

Petit aperçu sur les éléments structurels de l'Univers

Il est utile de commencer par une définition de quelques éléments structurels et de se représenter leurs rapports.

Soleil : étoile la plus proche, ayant une masse de l'ordre de 10^{33} g (10^{30} kg) et un rayon de l'ordre de 10^{10} cm (10^5 km). Son débit d'énergie est de l'ordre de 10^{33} erg s⁻¹ ($\approx 10^{26}$ watt) - on suppose que le Soleil existe depuis environ 5×10^9 ans, ayant une "durée de vie" de l'ordre de 10^{10} ans.

Système Solaire : 9 planètes gravitant autour du Soleil; les plans des orbites sont presque confondus. La planète la plus lointaine se trouve à une distance de l'ordre de 10^{14} cm (10^9 km), Les masses des planètes varient d'environ $.3 \times 10^{27}$ g ($.34 \times 10^{24}$ kg) jusqu'à 2000×10^{27} g et leurs rayons d'environ 2×10^8 cm (2000 km) jusqu'à 7×10^9 cm (7×10^4 km). On suppose que la formation du système solaire fut presque contemporaine avec celle du Soleil.

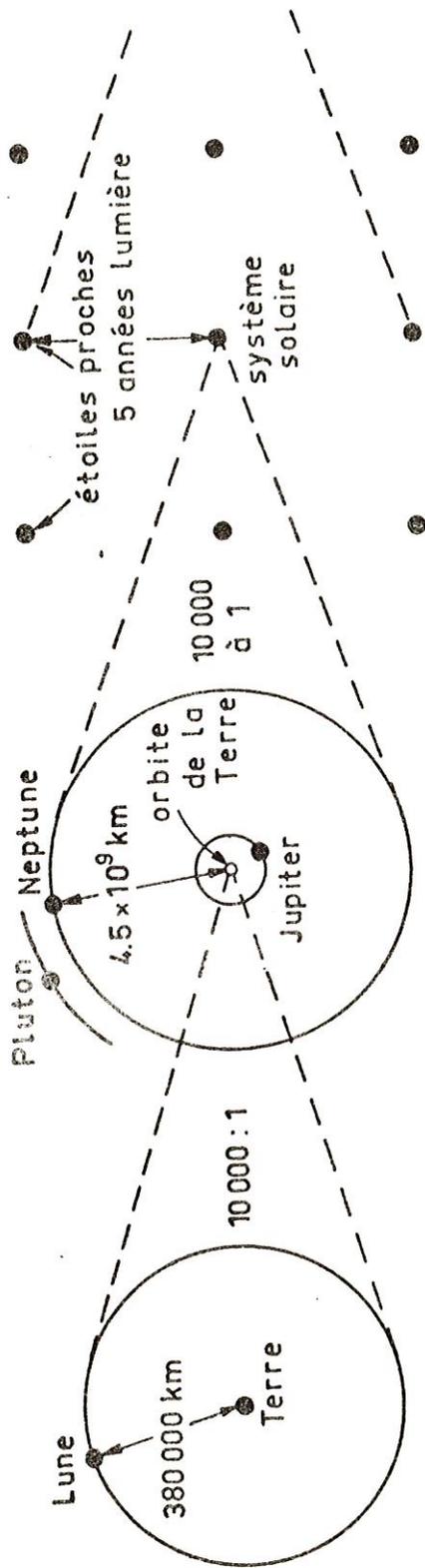
Remarquons que le système solaire peut être considéré comme une grande masse centrale (le Soleil) entourée d'un disque de matière.

Etoile : élément structurel fondamental de l'Univers à "petite" échelle. Les masses stellaires varient d'environ $.02 M_{\odot}$ à environ $60 M_{\odot}$, et leurs rayons d'environ 10 km à environ 10^8 km. L'étoile la plus proche au Soleil est à une distance de l'ordre de 1 parsec ; dans un volume de 1000 pc^3 autour du Soleil, on trouve environ 40 étoiles.

Galaxie : élément structurel de l'Univers à "moyenne" échelle - essentiellement un grand ensemble d'étoiles liées par la gravitation. Les masses des galaxies varient typiquement d'environ $10^8 M_{\odot}$ à environ $10^{12} M_{\odot}$; la galaxie dans laquelle nous trouvons a une masse de l'ordre de $10^{11} M_{\odot}$, répartie essentiellement dans un disque de rayon 15 Kpc et d'épaisseur environ 1 Kpc. La galaxie dans la constellation d'Andromède se trouve à une distance de l'ordre de 600 Kpc de la notre.

Amas des galaxies : élément structurel à grande échelle - essentiellement un ensemble de galaxies. Les rayons des amas des galaxies varient d'environ 3 Mpc jusqu'à environ 20 Mpc - leurs séparations sont inférieures à environ 300 Mpc.

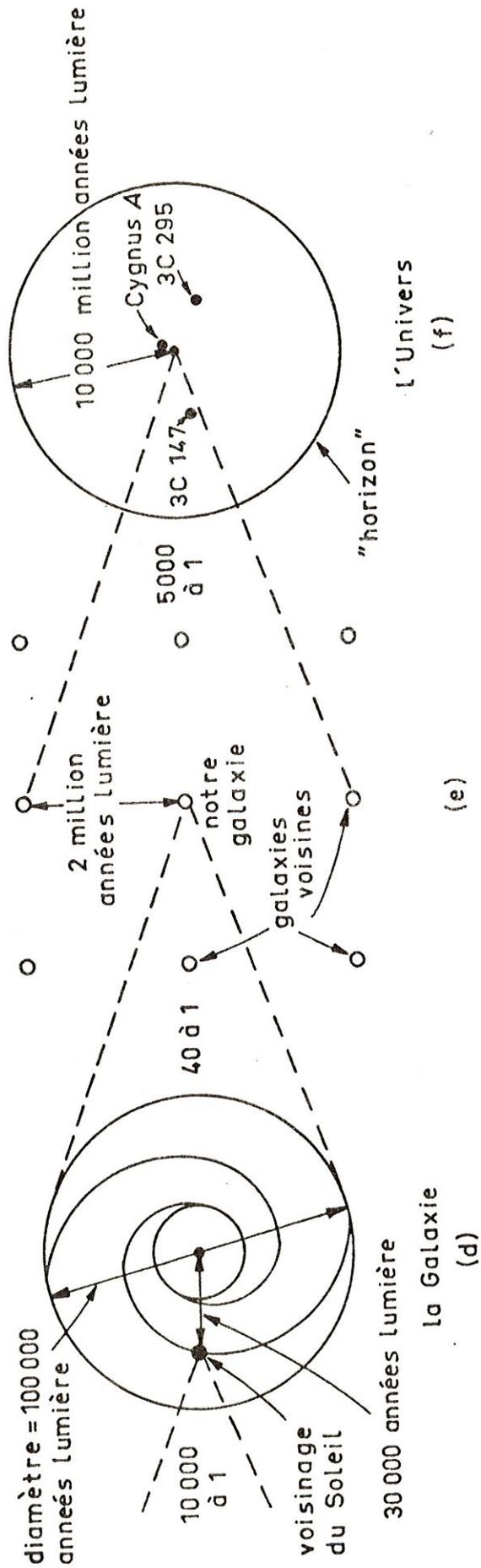
La figure UN 1 est une façon de représenter les différentes échelles de distance dans l'Univers - en commençant avec le système Terre-Lune, on "démultiplie" par des puissances de 10 pour arriver finalement à "l'Univers". Remarquons que le dernier image est en quelque sorte une escroquerie: le "rayon de l'Univers" ne représentent pas ce que éveille intuitivement la notion d'un rayon, mais est une distance au delà de laquelle les lois de physique nous empêchent d'observer. C'est une abstraction : à l'heure actuelle, nos instruments ne pénètrent même pas à une dixième de cette distance.



Voisinage du Soleil (c)

Système solaire (b)

Système Terre-Lune (a)



L'Univers (f)

(e)

(d)

Fig. UN 1



La figure UN 2 est une comparaison de certains paramètres physiques de l'Univers, en passant de sa structure microscopique à sa structure à grande échelle.

La figure UN 3 représente tout l'Univers dans un seul diagramme - ce n'est pas un miracle, ce n'est qu'un exemple de la puissance des échelles logarithmiques ! Les deux axes sont respectivement la masse et la dimension type : dans un tel diagramme, une droite représente une valeur constante de densité. On a reporté dans ce diagramme quelques éléments structurels de l'Univers, ainsi que les domaines où dominent les différentes forces principales.

On remarque tout particulièrement que, à très grande échelle, la force dominante est celle de la gravitation, tandis que à très petite échelle c'est la force nucléaire qui l'emporte. On verra par la suite que, sous certaines conditions assez esotériques, la force de gravitation peut l'emporter sur la force nucléaire.

Fig. UN 2

QUELQUES COMPARAISONS

OBJET	DIMENSION
PROTON OU ELECTRON	10^{-13} cm
ATOME	10^{-8} cm
HOMME	180 cm
ETOILE N	10^6 cm
TERRE	$1.3 \cdot 10^9$ cm
SOLEIL	$1.4 \cdot 10^{11}$ cm
	(4.7 sec lum)
GALAXIE	10^5 ann lum
UNIVERS	$3 \cdot 10^{10}$ ann lum

OBJET	MASSE (g)
ELECTRON	10^{-27}
ATOME H	$1.7 \cdot 10^{-24}$
MOLECULE ADN	10^{-17}
HOMME	$7 \cdot 10^{24}$
MONTAGNE	10^{11}
TERRE	$6 \cdot 10^{27}$
SOLEIL	$2 \cdot 10^{33}$
GALAXIE	$4 \cdot 10^{44}$
UNIVERS	$10^{53} - 10^{56}$

OBJET	TEMPS (s)
DUREE DE VIE D'UN PION	10^{-16}
PERIODE D'OSCILLATION D'UNE EMISSION RADIO	10^{-6}
BATTEMENT DU COEUR	1
UN JOUR	$8.6 \cdot 10^4$
UN AN	$3.2 \cdot 10^7$
UNE VIE HUMAINE	10^9
TEMPS ECOULE DEPUIS APPARITION DE L'HOMME	10^{14}
AGE DE LA TERRE	$1.5 \cdot 10^{17}$
AGE DE L'UNIVERS	$5 \cdot 10^{17}$

OBJET	ENERGIE (ergs)
MOLECULE DANS LA SALLE	$6 \cdot 10^{-14}$
PARTICULE A L'INTERIEUR DU SOLEIL	10^{-9}
MOUCHE EN VOL	10^4
L'HOMME EN PROMENADE	10^8
1000 KG CHARBON BRULE	10^{17}
BOMBE H MEGATON	$4 \cdot 10^{22}$
BON TREMBLEMENT DE TERRE	10^{27}
DEBIT DU SOLEIL DANS UNE JOURNEE	$3 \cdot 10^{39}$
SUPERNOVA	10^{49}
QUASAR PENDANT 10^6 ANS	10^{60}

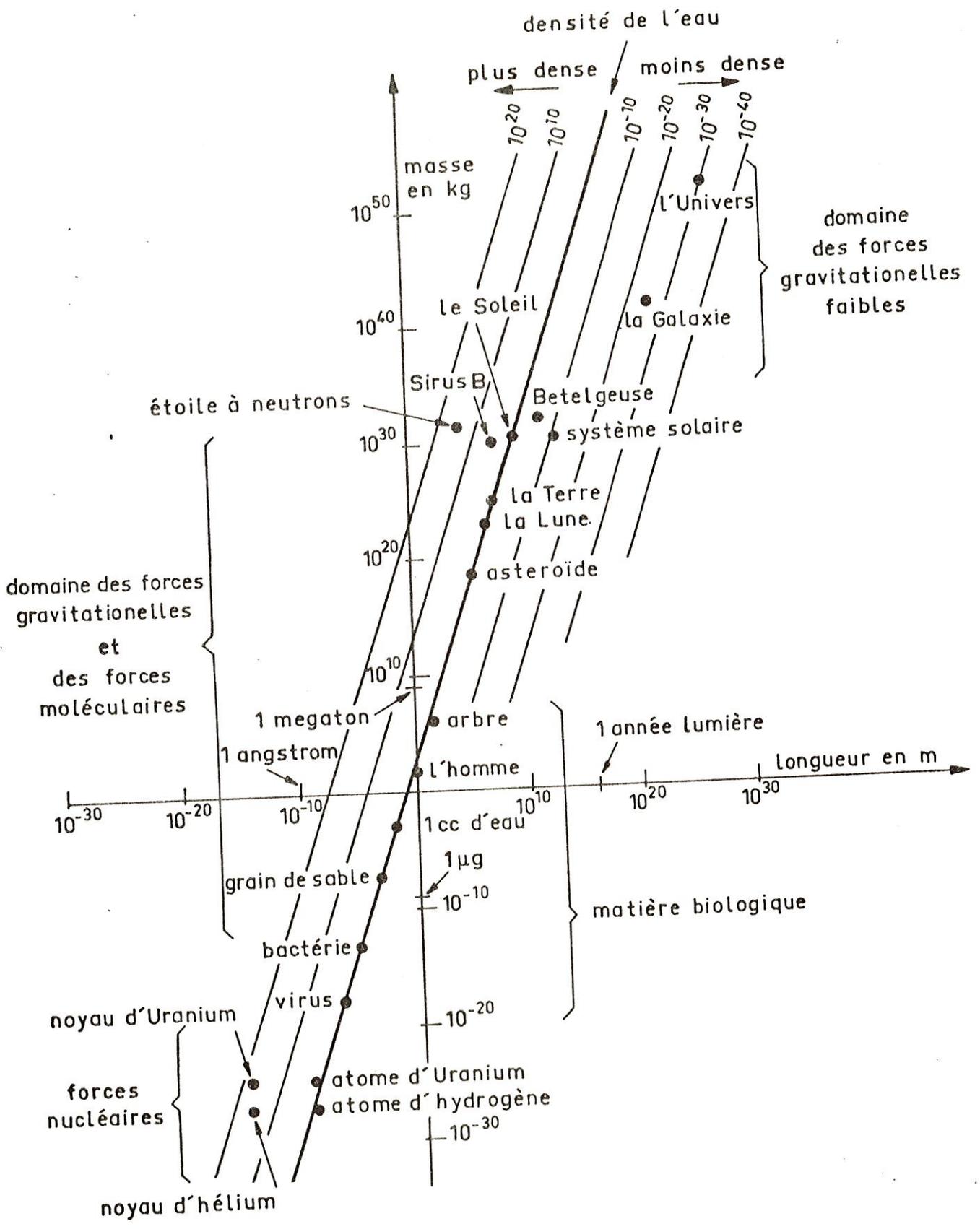


Fig. UN 3



Petit aperçu sur le rayonnement

Le collecte et l'analyse du rayonnement électromagnétique joue un rôle primordial dans l'astronomie - notre information nous arrive sur un photon !

L'astronomie contemporaine s'occupe essentiellement de toute la gamme spectrale - des rayons gamma jusqu'aux rayons radio métriques. Il est commode de diviser le spectre en quelques domaines :

Domaine	Longueur d'onde	
γ	$\leq 10^{-9}$ cm	$= 10^{-1}$ Å
X	10^{-9} cm - 5×10^{-6} cm	$= 10^{-1}$ - 500 Å
U-V	5×10^{-9} - 3×10^{-5} cm	$= 500$ - 3000 Å
Visible	3×10^{-5} - 10^{-4} cm	$= 3000$ Å - 10^4 Å
I-R	10^{-4} - 5×10^{-3} cm	$= 10^4$ Å - 5×10^5 Å
Radio	$\geq 5 \times 10^{-3}$ cm	$= \geq 5 \times 10^5$ Å

Remarquons que cette table est très approximative - par exemple, il n'y a pas de différence de nature entre un rayonnement X à 499 Å et un rayonnement U-V à 501 Å !

Les mécanismes de production de rayonnement des différentes longueurs d'onde ne sont pas toujours les mêmes (par ex. transitions atomiques, agitation thermique, etc...). Ce circonstance nous permet de mettre en évidence différents processus physiques dans les astres - à condition de pouvoir les étudier à travers tout le spectre électromagnétique.

Les différents domaines spectraux exigent différentes techniques de détection - par ex., radio récepteur, plaque photographique, bolomètre, compteur Geiger etc... De plus, du point de vue astronomique, les différents domaines posent différents problèmes, car la transmission de l'atmosphère terrestre (aussi bien que la transmission du milieu interstellaire) n'est pas la même à chaque longueur d'onde ; la fig. UN 4 montre (schématiquement) la transparence atmosphérique ainsi que les moyens d'observation utilisés dans différents domaines spectraux. On étudiera ces problèmes de façon plus détaillée par la suite.

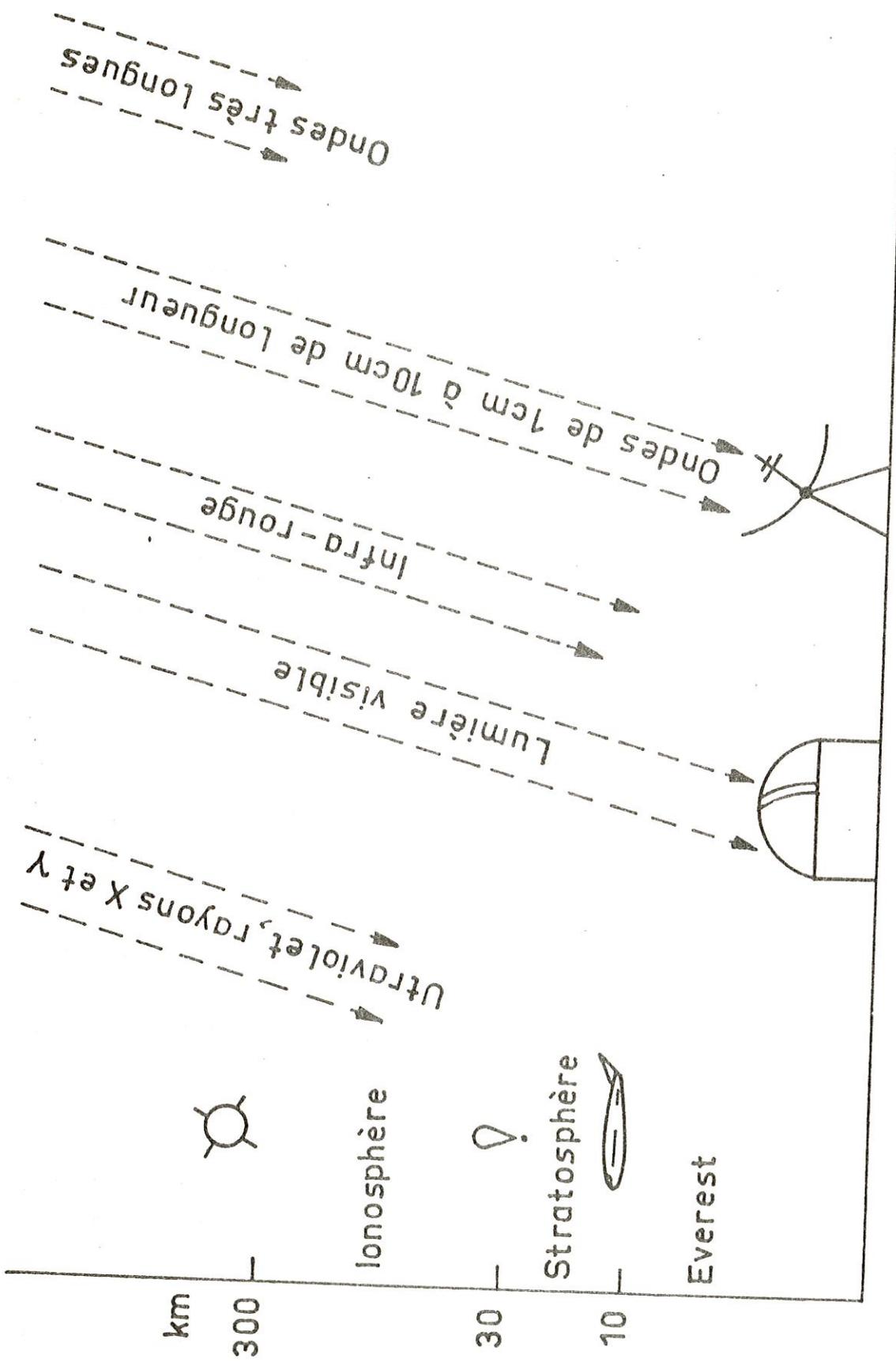
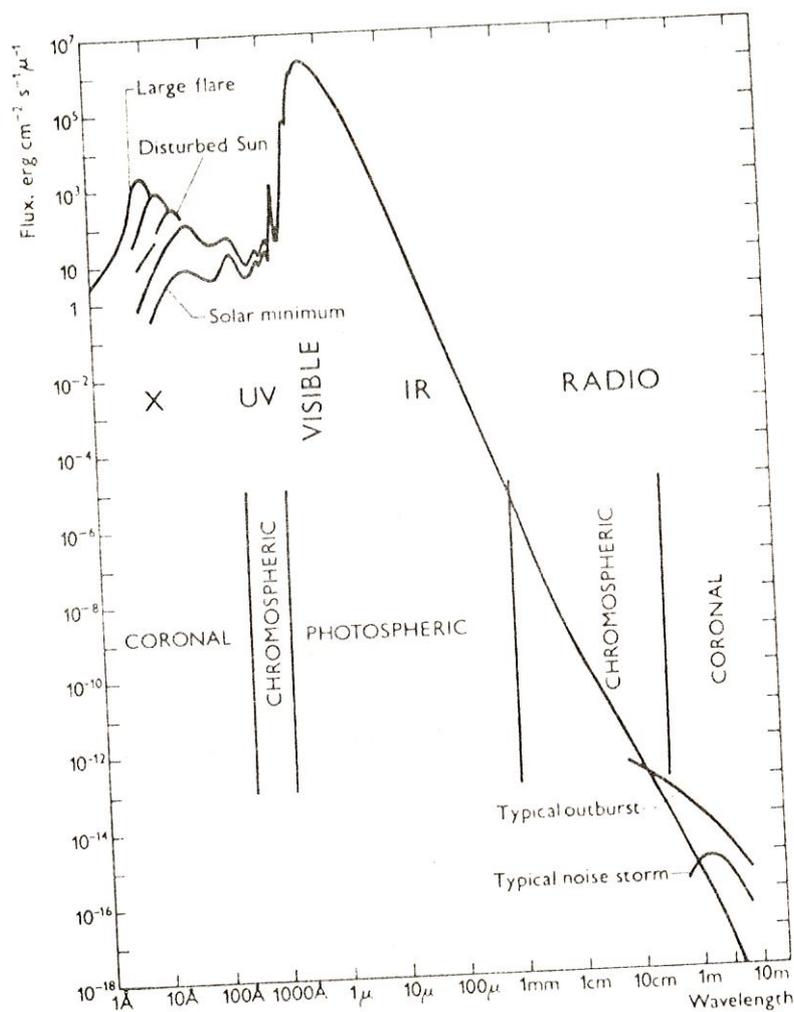


Fig. UN 4

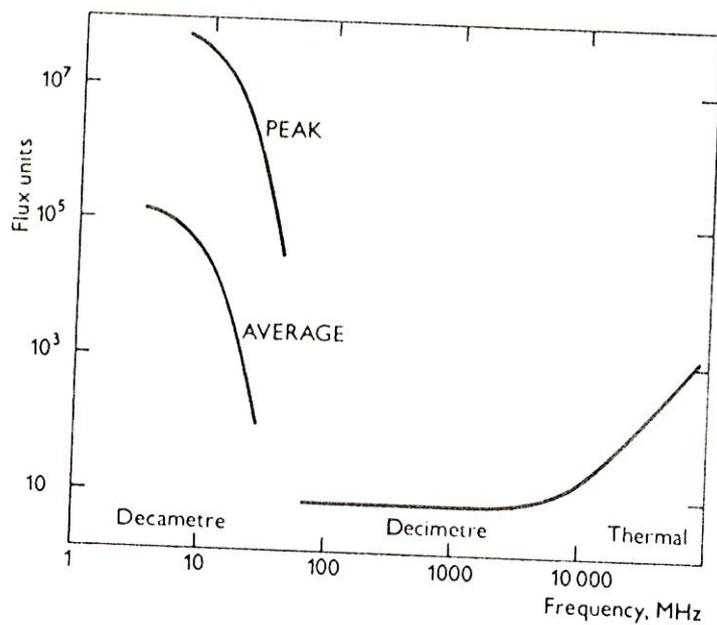
Il est intéressant de se représenter le spectre de quelques objets type dans l'Univers (il est bien entendu que ces distributions ont été "lissées", et représentent le rayonnement en dehors de l'atmosphère terrestre).

Le Soleil



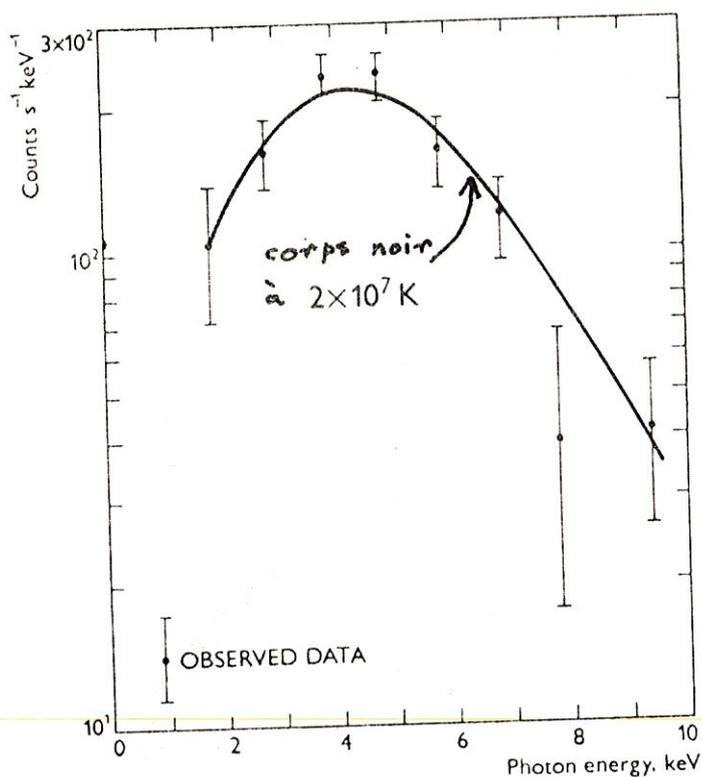
pris de "The Universe",
J. Kleczek

On remarque que dans le domaine du visible, le spectre ressemble grosso-modo à celui d'un corps noir à environ 6000°K (courbe de Planck) ; pourtant, au-delà de ce domaine, on remarque des écarts plus au moins importants, indicatifs alors de la présence des processus spéciaux.

Jupiter

pris de "The Universe", J. Kleczek

On remarque la présence d'une émission importante décamétrique bien supérieure à ce qu'on attendrait par extrapolation de l'émission dans le domaine infra-rouge. On conclut qu'il doivent y avoir d'importants processus non-thermiques.

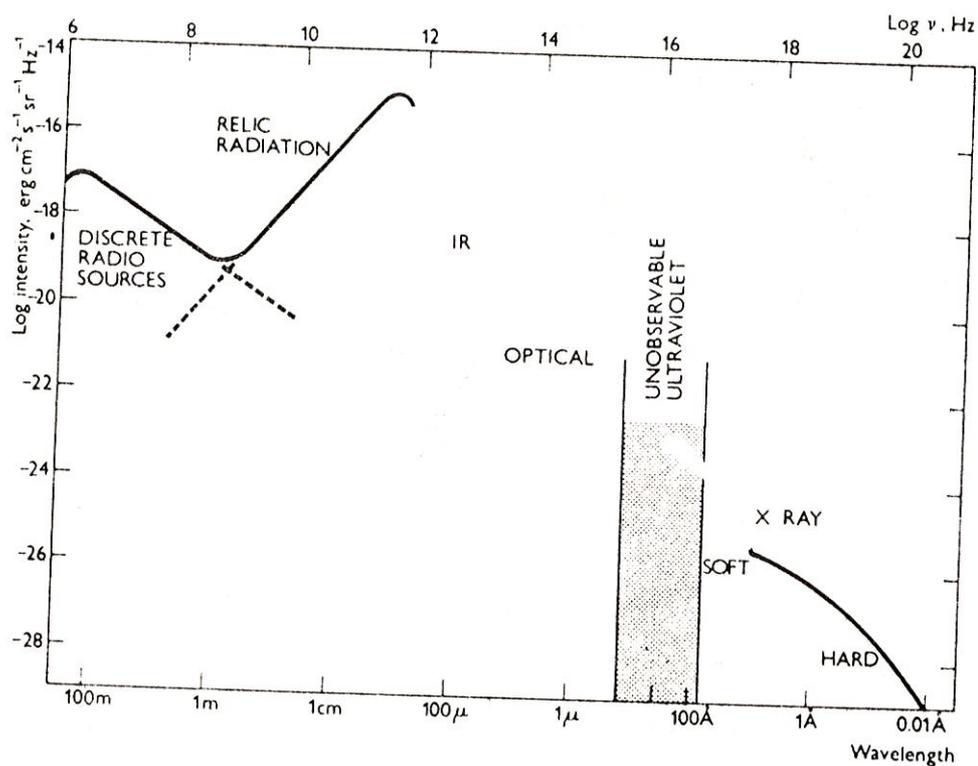
Source X Cyg X-3

pris de "The Universe",
J. Kleczek

L'émission est essentiellement dans le domaine X ; néanmoins, la distribution spectrale ressemble (mais les erreurs de mesure sont grandes) à celle d'un corps noir à 2×10^7 °K.

Le ciel

A part les sources discrètes, on reçoit aussi de l'Univers un rayonnement diffus isotrope qu'on ne sait pas identifier avec des sources particulières. La distribution spectrale de ce rayonnement est :



(on n'a pas de données entre $12\mu = 12 \times 10^{-6}$ m et environ 50 \AA).

Il semble que la partie centrimétrique de cette courbe peut être identifiée avec une émission thermique à environ $2.7 \text{ }^\circ\text{K}$ - c'est le célèbre "rayonnement à $3 \text{ }^\circ\text{K}$ " identifiée avec "l'origine de l'Univers". On ignore l'origine des autres rayonnements (ce qui ne va pas nous empêcher d'énoncer quelques hypothèses plus tard).

Petit aperçu sur les forces

La physique reconnaît l'existence d'au moins 4 forces : la force faible (qui régit, entre autres, les interactions où interviennent les neutrinos), la force de gravitation (qui régit l'attraction d'une ~~masse~~ à une autre), la force électrique (qui régit le comportement de la matière possédant une charge électrique), et la force nucléaire (qui régit la stabilité du noyau atomique). On ne sait pas encore jusqu'à quel point ces différentes forces sont liées entre elles, mais quelques raisonnements empiriques simples nous permettent d'estimer leur importance relative.

Nous allons négliger ici la force faible.

Force de gravitation.

Selon la loi de Newton, 2 masses M , m , ponctuelles, s'attirent : la force d'attraction s'écrit :

$$F_G = \frac{G M m}{r^2}$$

où r est la séparation de deux masses.

Considérons 2 protons séparés par 10^{-13} cm (dimension caractéristique d'un noyau) :

$$F_G \approx 2 \times 10^{-29} \text{ dyne}$$

La force de gravitation est de longue portée ; elle est attractive.

Force électrique.

La force électrique peut être attractive ou répulsive, selon les signes relatifs des charges ; selon Coulomb :

$$|F_e| = \frac{e^2}{r^2}$$

$$\approx 2 \times 10^7 \text{ dyne pour 2 protons à l'intérieur}$$

d'un noyau.

La force électrique est de longue portée ; pourtant, à l'échelle macroscopique, la matière est neutre, ce qui fait qu'on peut souvent la négliger entièrement.

Force nucléaire.

La force nucléaire est très mal connue - elle est peut-être une force fondamentale, ou bien la manifestation externe d'un phénomène beaucoup plus fondamental encore (comme par exemple, les forces inter-moléculaires qui sont dues au fond aux forces électriques et à la mécanique quantique).

Parler de la force nucléaire est une autre façon de dire qu'un noyau atomique composé de quelques nucléons est relativement stable - la force nucléaire l'emporte sur la force de répulsion électrostatique des protons à l'intérieur d'un noyau.

La force nucléaire est alors attractive pour des distances de l'ordre de 10^{-13} cm. Par contre, elle est répulsive pour des distances très inférieures à 10^{-13} cm, ce qui est une façon savante d'exprimer le fait qu'un noyau ne se contracte pas à un point.

La loi exacte de la force nucléaire n'est pas connue : nous pouvons la concevoir comme la montre la figure 3. Un fait simple nous permet d'estimer sa valeur caractéristique : on sait que la masse d'un noyau de deutérium M_D , composé d'un proton et d'un neutron, est inférieure à la somme des masses de ses composantes, soit :

$$M_D - (m_p + m_n) \approx - 9 \times 10^{-26} \text{ g}$$

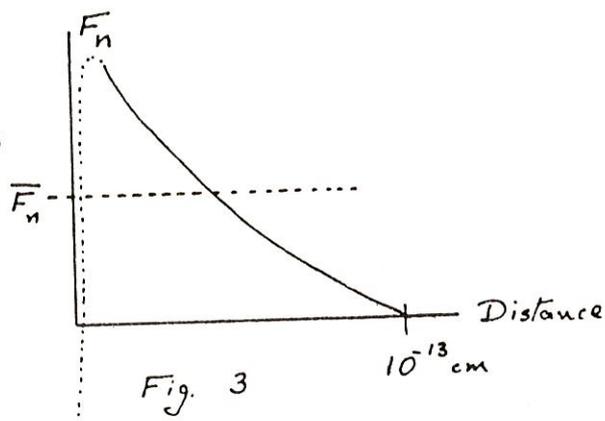
Cette différence de masse correspond à une énergie $9 \times 10^{-26} \text{ g} \times c^2 = 9 \times 10^{-26} \times (3 \times 10^{10})^2 \text{ erg}$; c'est l'énergie qu'il faut fournir pour séparer les composantes.

Pour simplifier le problème, on peut supposer qu'à l'intérieur du noyau, la force nucléaire est constante, égale à une valeur moyenne \bar{F}_n ; pour séparer les nucléons, il faut donc fournir une quantité de travail de l'ordre de $\bar{F}_n \times .5 \times 10^{-13}$.
Donc :

$$\bar{F}_n \times .5 \times 10^{-13} = 9 \times 10^{-26} \times (3 \times 10^{10})^2$$

d'où :

$$\bar{F}_n \approx 8 \times 10^8$$



Comparaison des forces

Source	Force	puissance relative	portée	exemple
baryon, meson	forte	1	10^{-13} cm	forces nucléaires
charge électr.	électr	10^{-2}	∞	forces atomiques et moléculaires
lepton	faible	10^{-14}	10^{-15}	désintégration beta
masse	gravtn.	10^{-40}	∞	structures cosmiques à grande échelle

