

Sur la formation des étoiles

Des collègues parisiens, membres de l'Union des Physiciens ou de l'Association des Professeurs de Mathématiques, avaient convenu, durant l'école d'été de Champtercier, d'organiser une réunion commune de leurs Régionales au bénéfice de l'astronomie. La réunion s'est tenue le 21 février 1979, de 14h à 17 h 30 au lycée Louis-le-Grand, grâce à l'obligeance de M.Prouvost, Président de la Régionale UdP. M.Pierre Léna, professeur d'astrophysique à l'Université Paris VII avait accepté avec beaucoup de bonne grâce de nous faire une conférence sur un sujet d'actualité dont il s'occupe particulièrement. Nous le remercions vivement d'avoir pris sur son temps pour informer les professeurs qui ont suivi son passionnant exposé. Nous le remercions aussi d'avoir relu et corrigé le texte de cette rédaction qui lui a été soumis avant d'enrichir le sommaire de ce Cahier Clairaut.

Je me permets d'ajouter à cette présentation un souvenir personnel. Le 30 juin 1954, nous nous trouvions, tous deux Pierre Léna, sur la pelouse de Meudon pour observer une éclipse partielle de Soleil, lui avec ses camarades élèves du lycée Janson, moi avec mes élèves du club d'astronomie du lycée Voltaire. Depuis, Léna est devenu astronome "pour de vrai" et, entre autres travaux, il a observé la plus longue éclipse de Soleil de toute l'histoire... depuis un "Concorde" survolant l'Afrique...

°°°

1. Le cadre

=====
Dans le scénario que nous nous proposons de décrire et que nous intitule "la formation des étoiles", interviendront :

- des acteurs, forces, matériaux, rayonnement ;
- un facteur essentiel, le temps ;
- des lois physiques et par conséquent un certain nombre de constantes.

1.1. La force de gravitation dont l'importance est illustrée par la photographie d'un amas globulaire, ensemble d'étoiles sans matériaux interstellaires, considérées comme des points matériels et réunies en amas par interaction gravitationnelle.

Expression de cette force pour deux masses M et m à la distance R $F = G \frac{Mm}{R^2}$ avec $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-2}$

L'énergie potentielle associée est $U = - G \frac{Mm}{R}$
prise nulle lorsque les deux masses sont infiniment éloignées.

1.2. La pression gazeuse, formulée ici par la loi des gaz parfaits $P = \frac{\rho R T}{\mu}$ où $R = 8,3 \times 10^7$ ergs par degré et mole, T la température, ρ la densité et μ le poids moléculaire moyen (ici 1 ou 2 puisque le gaz est de l'hydrogène atomique ou moléculaire). La densité des milieux est si faible que la loi des gaz parfaits s'applique.

1.3. La pression de radiation, donnée par les deux formules

$$P_{\text{rad}} = \frac{h\nu}{c} \cdot n = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{S}$$

où n est le flux de photons d'énergie $h\nu$ à travers l'unité de surface par unité de temps, c la vitesse de la lumière, L la luminosité de l'étoile - c'est à dire la puissance totale émise -, S la surface de la sphère entourant l'étoile et sur laquelle cette pression de radiation est calculée.

La photographie de la double queue d'une comète met en évidence l'action de la pression de radiation sur les particules de poussière (partie de la queue directement opposée à la direction du Soleil) et de l'action du ventsolaire sur les atomes ou molécule de gaz (partie légèrement incurvée).

1.4. Les forces de cohésion des solides, forces de Van des Waals d'origine électro-magnétiques, sont de courte portée et n'agissent qu'au contact. Elles n'interviendront donc que lorsque les particules de matière interstellaire seront très proches les unes des autres.

1.5. Le champ magnétique est un acteur capricieux et complexe comme le montre une photographie de la couronne solaire où il intervient beaucoup. Faute de bien connaître son rôle dans le processus qui conduit à la formation d'une étoile, nous ne faisons que le mentionner.

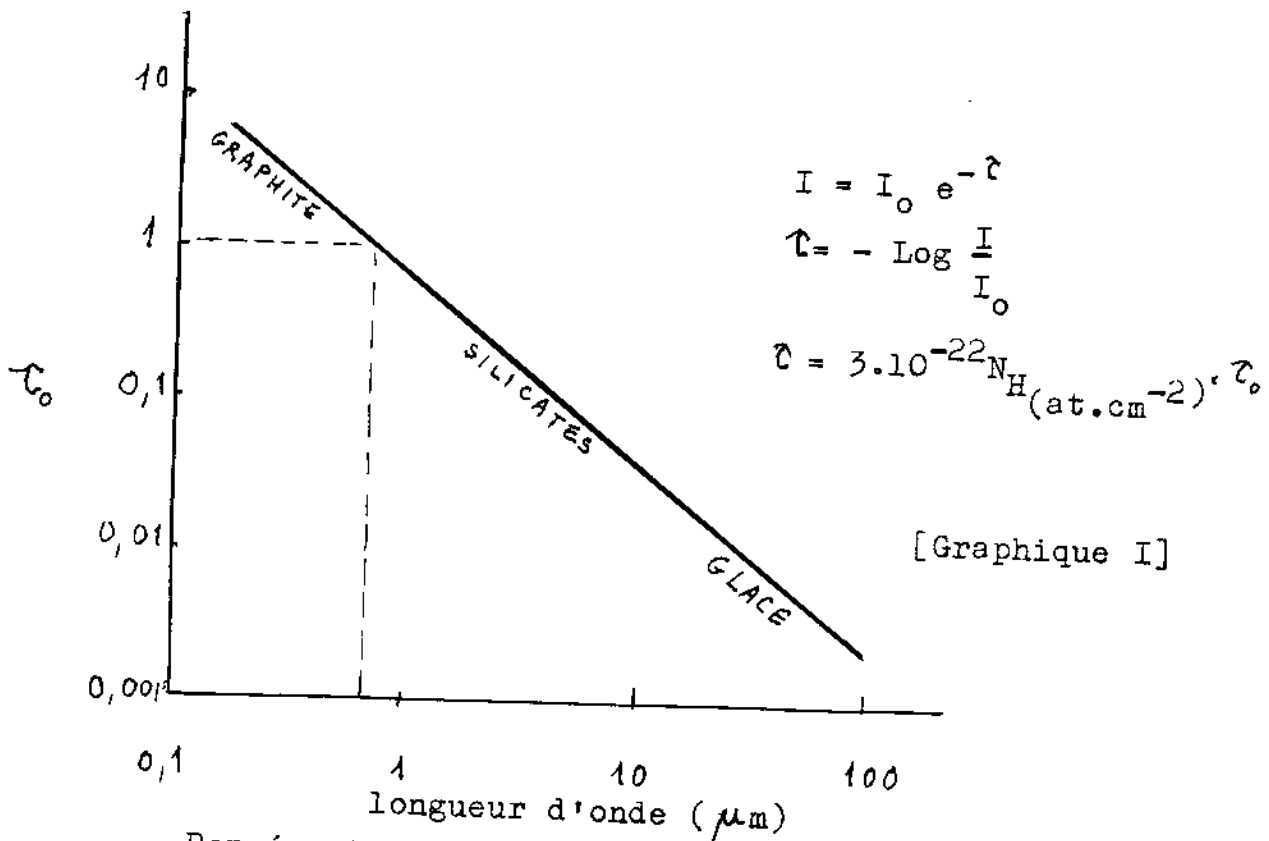
1.6. Le gaz, c'est à dire tout ce qui n'est pas étoile dans une galaxie, est constitué presque uniquement d'hydrogène sous forme atomique ou moléculaire ; mais il existe aussi des poussières associées à ce gaz : grains de très petite taille ($\leq 0,1 \mu\text{m}$); il n'en jouent pas moins un rôle important, non par leur masse (au plus 1% de la masse totale du gaz) mais par leur capacité d'absorber ou de réémettre le rayonnement.

1.7. Le rayonnement comporte des photons de toutes les longueurs d'onde, dont l'énergie va de 1 Gev à 10^{-7} ev soit un domaine de 10^{16} ev dont nous ne percevons, par la fenêtre de transparence de l'atmosphère à la lumière visible, qu'une fraction infime (un peu comme si, dans une symphonie de Mozart, nous n'entendions qu'une ou deux notes !). La radioastronomie a étendu nos moyens d'exploration ; avec les observatoires en satellite s'ouvre vraiment l'exploration de l'Univers. (Rappel : un photon d'énergie 1 ev correspond à une longueur d'onde $\lambda \approx 1,234 \mu\text{m}$ facile à mémoriser).

1.8. Le temps est un facteur essentiel dans notre scénario. A l'échelle galactique, les mouvements sont peu perceptibles et les phénomènes évolutifs peuvent passer inaperçus. Pourtant, comme l'image de la forêt le fait comprendre, l'évolution est observable : dans la forêt, nous voyons de jeunes arbres, des arbres qui donnent des graines, des arbres abattus qui pourrissent et retournent à l'humus. A partir de cette vision instantanée, l'existence d'une évolution peut se concevoir. De même, dans les bras d'une galaxie, nous voyons des nuages de matière dense, des protoétoiles, des étoiles géantes...Autrement dit, dans les bras d'une galaxie, nous pouvons observer différents témoins ou stades de l'évolution des étoiles et par conséquent de leur formation.

1.9. Absorption des photons par un gaz : elle dépend de "l'épaisseur optique", τ elle-même reliée à la densité de la colonne : nombre d'atomes de gaz dans une colonne de 1 cm^2 de section (sachant que pour l'hydrogène, $3 \cdot 10^{21}$ atomes par $\text{cm}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ g.cm}^{-2}$). La variation de l'intensité du rayonnement I est donnée par $I = I_0 e^{-\tau}$, la variation de τ en fonction de la longueur d'onde étant figurée par le graphique suivant. A température donnée, le rayonnement émis par cette même colonne de gaz est d'autant plus important que τ augmente. Il atteint la valeur du rayonnement du corps noir, indépendante de τ ; lorsque $\tau \gg 1$.

voir graphique¹ page suivante



Représentation approximative de la profondeur optique τ_0 due à une colonne de gaz augmentée de poussières contenant 3.10^{21} atomes d'hydrogène par cm^2 de section, en fonction de la longueur d'onde. On en déduit τ pour toute autre valeur de N_H .

1.10. Quelques constantes

Constante de Boltzmann $k = 1,38.10^{-23}$ Joules par Kelvin

Le Soleil : Rayon $R_{\odot} = 7.10^8$ m

Masse $M_{\odot} = 2.10^{30}$ kg

Luminosité $L_{\odot} = 4.10^{26}$ w

Masse de l'atome d'hydrogène $m_H = 1,7.10^{-27}$ kg

Distances : unité astronomique = 1 ua = $1,5.10^{11}$ m

parsec = 1 pc = 2.10^5 ua = 3.10^{16} m

Durée : 1 an = 3.10^7 s

2. Le nuage initial

===== Nous partons de l'observation : des nuages existent dans les bras des galaxies. Ils sont formés essentiellement d'hydrogène (H et H_2) et de grains de poussière représentant moins de 1% de la masse totale ; ces poussières sont formées de graphite, de silicates (fer, magnésium, aluminium, ...).

2.1. Ces nuages sont stables. Newton, en 1695, pensait qu'un tel nuage devait s'écraser sur lui-même par gravitation. Ceci est vrai si la température du nuage est nulle. Si ce n'est pas le cas, l'énergie thermique peut équilibrer le potentiel de gravitation $\frac{3}{2} kT = G \frac{Mm_H}{R}$, mettant ainsi une valeur critique de R.

Si la température du nuage est $T = 10$ K et la masse $M = 1 M_{\odot}$, on définit ainsi un "rayon de Jeans"
 $R_J = 10^{15}$ m = 0,03 pc.

Si le rayon du nuage est supérieur à R_J , il y a une sorte "d'équilibre hydrostatique" et la contraction ne va pas se produire.

2.2. Dans le nuage en équilibre radiatif :

- tous les photons ultra-violetts dus par exemple aux étoiles voisines présentes dans l'entourage du nuage, y pénètrent et y sont absorbés ; le nuage est opaque pour le rayonnement qu'il reçoit : ceci est dû à la très grande valeur de τ dans l'ultra-violet (voir graphique 1).
- tous les photons infra-rouges que le nuage émet en sortent ; le nuage est transparent pour son propre rayonnement : ceci est dû à la très faible valeur de τ dans l'infra-rouge.

L'opacité du nuage est pratiquement inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Ce sont les poussières dans le gaz qui sont responsables de l'absorption. Pour une masse de l'ordre de celle du Soleil, la luminosité est de l'ordre de celle du Soleil lorsque le rayon a la valeur R_J

ci-dessus : $L_J = 4\pi R_J^2 \sigma T^4 \tau \simeq 2L_{\odot}$

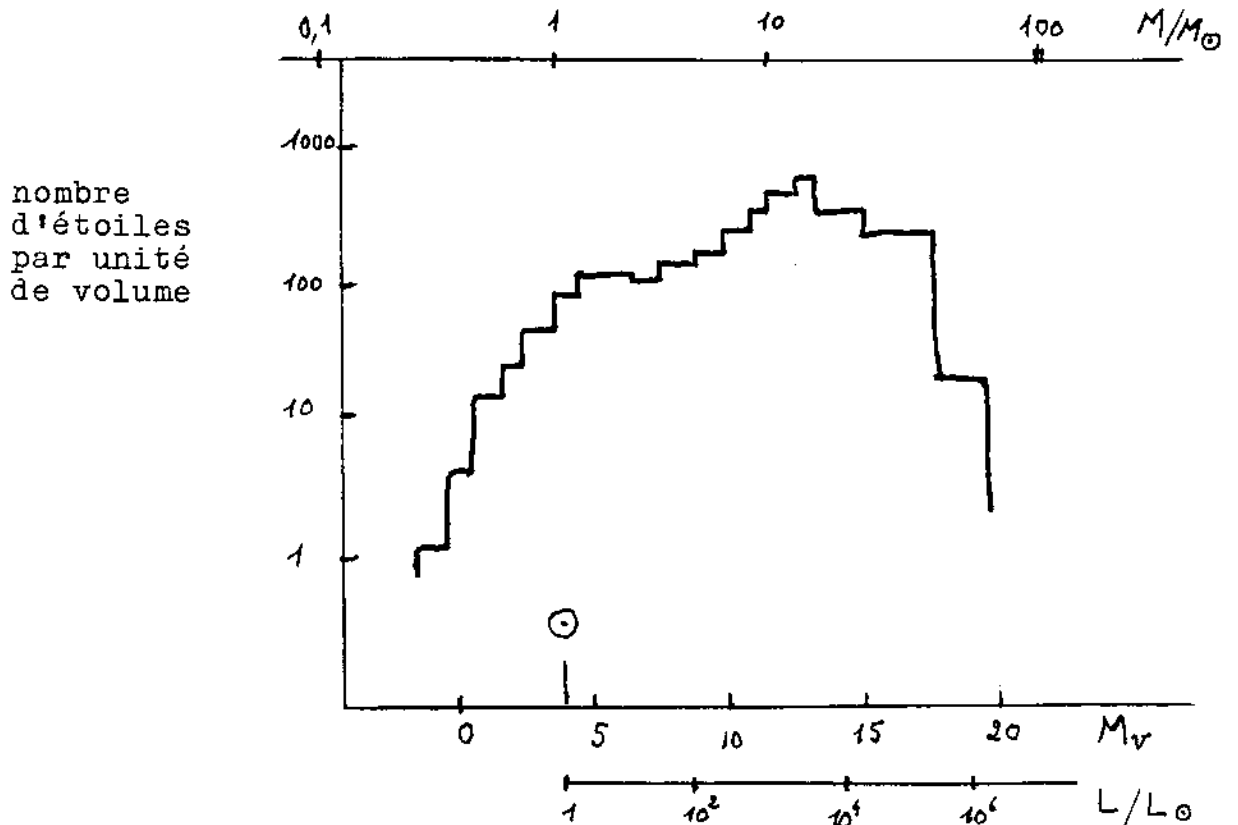
et toute l'énergie est rayonnée dans l'infra-rouge lointain ($\tau \simeq 10^{-3} N_H$).

2.3. La contraction se produit : chute libre des grains de matière à la vitesse v telle que $\frac{1}{2} m v^2 = G \frac{Mm}{r}$; donc v varie comme $r^{-1/2}$. La densité, fonction de r , est telle que $r^2 \rho(r) v(r) = \text{Cte}$ (qui exprime la conservation du flux de matière) donc ρ varie comme $r^{-3/2}$: il se forme un noyau compact de densité élevée au centre du nuage. Le temps de chute libre donne une idée de la durée de cette phase
 $T_{\text{chute}} = \int \frac{r^{1/2}}{v_i} dr = \frac{R_J}{v_i}$ de l'ordre de 10^6 ans.

Le nuage s'est donc fragmenté en morceaux de taille R_J probablement sous l'effet du champ magnétique ; mais on sait mal comment cela se passe exactement. On constate la fragmentation et la constitution d'étoiles dont certaines ont une masse inférieure à celle du Soleil, la plupart des masses de l'ordre de 1 à 10 M_\odot et il ne paraît pas exister des étoiles de masse supérieure à 100 M_\odot . En utilisant les étoiles proches du Soleil, on obtient la fonction de luminosité :

$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{3,3}$$

qui décrit comment évolue la luminosité d'une étoile en fonction de sa masse (cf graphique II).



[graphique II] : répartition des étoiles par luminosité (L) ou par masse (M) au voisinage du Soleil (l'échelle M_v est celle des magnitudes absolues).

3. La rotation

===== En se contractant, le nuage conserve son moment angulaire initial donc sa vitesse angulaire de rotation devrait beaucoup augmenter puisque la masse se rapproche de

de l'axe de rotation. Ce n'est pas ce que l'on observe ; il y a donc là une question ouverte ; est-ce un effet magnétique ?

En théorie, la sphère en rotation tend à se déformer pour donner un disque aplati ; en effet, la chute libre vers le plan équatorial se fait sans transfert de moment angulaire, donc plus facilement que la chute libre vers l'axe de rotation. On retrouve ainsi la répartition des planètes autour du Soleil dans le plan de l'écliptique.

4. L'accrétion

===== Avec l'augmentation de la densité, des collisions apparaissent entre les atomes du gaz et transforment l'énergie gravitationnelle de contraction en chaleur. On définit un temps de Kelvin-Helmholtz $t_{KH} = \frac{GM^2}{R} \times \frac{1}{L}$

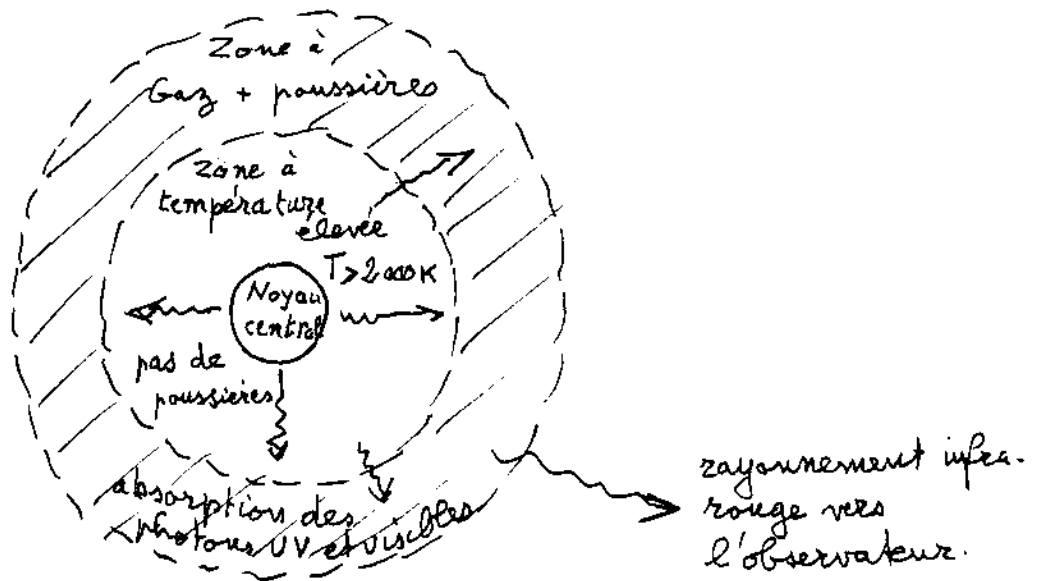
qui, avec $R = R_J$ et $L = L_{\odot}$ donne $t_{KH} = 60$ ans : c'est le temps nécessaire pour rayonner avec la luminosité L l'énergie libérée d'origine gravitationnelle.

Comme cette valeur de t_{KH} est petite devant le temps de chute, l'objet en condensation rayonne continuellement son énergie gravitationnelle et ne s'échauffe pas. Ce n'est que lorsque la densité devient suffisamment élevée que les régions centrales de cette sphère en contraction deviennent opaques à leur propre rayonnement. Il n'y a plus d'échange de chaleur rapide avec l'extérieur, et, d'isotherme, la contraction devient adiabatique. Dans les parties du coeur, l'agitation thermique est suffisante pour ioniser les atomes d'hydrogène ($T > 10^4$ K), et ultérieurement, au centre, pour "allumer" l'étoile en atteignant la température de la fusion thermonucléaire. Autour du coeur, subsiste une gangue absorbante qui rayonne dans l'infra-rouge. Une douzaine de tels objets - ou "cocons infrarouges" - sont aujourd'hui connus ou suspectés.

5. Le cocon infrarouge

===== (voir graphique III)

Le noyau central, à température élevée, émet un rayonnement ultraviolet qui ne peut s'échapper. L'élévation de température correspondante entraîne la sublimation des grains de poussière dans la région centrale. En frontière



[graphique III] : un modèle schématique du cocon dans sa phase finale.

de cette zone, la recombinaison de l'hydrogène bloque les rayonnements ultraviolets et visibles qu'absorbent également les poussières : ce cocon qui contient au centre la zone dense ne peut rayonner qu'une émission infrarouge, dont la longueur d'onde décroît au fur et à mesure que s'élève la température du cocon.

Quand la température de la zone dense atteint 10^6 K, les réactions thermo-nucléaires se déclenchent, l'étoile est formée et rayonne. Un nouvel équilibre hydrostatique et radiatif s'établit et le processus d'accrétion est alors terminé. Néanmoins les photons issus de l'étoile sont encore absorbés par le cocon et rerayonnés dans l'infrarouge. Ce n'est que très lentement que ce cocon va disparaître, comme "soufflé" par l'étoile, et que celle-ci pourra émettre librement son rayonnement dans l'espace. Cette phase "cocon" est vraisemblablement observée aujourd'hui sur une douzaine d'objets proches du Soleil.

6. Et ensuite ?

=====
Ce qui se passe dans le résidu gazeux autour de l'étoile est encore très mal calculé - et en tout cas

n'est pas observé. Des matériaux s'accumulent dans les zones de fragmentation opaques au rayonnement de l'étoile. Ils s'y refroidissent progressivement, et les phases les moins volatiles se condensent. Dans ce processus de fractionnement chimique, les corps solides peuvent prendre une composition analogue à celle du noyau et du manteau de la Terre. La voie est ouverte pour la formation du cortège planétaire de l'étoile.

Pierre LENA (rédaction G.W.)

Références bibliographiques :

"The origin and evolution of the solar system" par A.G.W.CAMERON, Scientific American, 233, 32.

"Nuages et cocons d'étoiles" par Pierre LENA dans La Recherche n°300, p.565 (mai 1979).