



**Association Française
pour l'Avancement des Sciences**

Actes du 94^e Congrès

9 au 14 Juillet 1975



Université Libre de Bruxelles

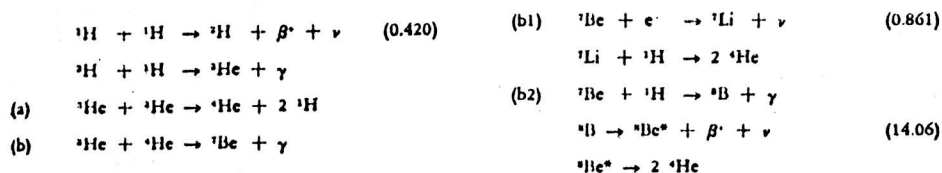
STABILITE DU SOLEIL VIS-A-VIS DES ONDES DE GRAVITE
ET PROBLEME DES NEUTRINOS SOLAIRES

A. BOURY, M. GABRIEL, A. NOELS,
R. SCUFLAIRE
Institut d'Astrophysique de l'Université
de Liège
B 4200 COINTE-OUGREE

I. VUES CLASSIQUES SUR LA STRUCTURE DU SOLEIL ET PROBLEME DES NEUTRINOS.

La théorie de la structure du Soleil est basée sur l'existence en son sein de réactions nucléaires qui libèrent assez d'énergie pour assurer sa luminosité pendant une très longue période. Formé il y a environ 4,5 milliards d'années par condensation du milieu interstellaire, il s'est contracté rapidement jusqu'à ce que la température dans ses régions centrales soit assez élevée pour que l'hydrogène commence, par fusion thermonucléaire, à se transformer en hélium. Cette contraction gravifique a pris environ quelques dizaines de millions d'années. La phase de consommation de l'hydrogène central dure toujours: son abondance relative en masse qui était initialement de 0,74 est maintenant d'environ 0,38.

La fusion de quatre atomes d'hydrogène en un atome d'hélium, processus exoergique qui libère 26 MeV, se fait par la chaîne de réactions nucléaires assez complexe que voici :



Au lieu de la réaction ${}^1\text{H} + {}^1\text{H}$ on a 2,5 fois sur 1000 la réaction ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} + e^- \rightarrow {}^2\text{H} + \nu$ (1.44). Nous avons indiqué entre parenthèses l'énergie maximum, en MeV, emportée par le neutrino de chaque désintégration radioactive.

Tandis que les photons libérés interagissent immédiatement avec la matière et ne diffusent que très lentement vers l'extérieur par absorptions et réémissions successives, les neutrinos ne sont pratiquement pas absorbés et nous arrivent directement du centre solaire.

L'idée est venue de détecter ces neutrinos et d'obtenir ainsi de l'information sur les régions intérieures du Soleil, autrement invisibles. En fait, l'importance relative des maillons (b), (b1), (b2) dépend fortement de la température; or, le neutrino le plus facilement détectable est le neutrino de 14 MeV émis par le Bore 8. On avait aussi à sa disposition un moyen de détermination sensible de la température centrale du Soleil. Bien entendu, l'expérience est délicate puisque l'absorption de neutrinos dans un détecteur est tout aussi dérisoire et, sur des milliards de neutrinos de passage, il en sera détecté de temps en temps un. L'expérience mise au point par Davis(1,2), de Brookhaven, et ses collaborateurs consiste à détecter les neutrinos solaires par la réaction de capture.



Soit en Φ (i) ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) le flux à la Terre de neutrinos provenant de la désintégration du noyau i et σ (i) la section efficace de capture (en cm^2) de ces neutrinos. Le nombre de neutrinos capturés par seconde vaudra $\sum \Phi$ (i) σ (i) par atome de chlore du détecteur. Actuellement, la température centrale du Soleil, donnée par les modèles théoriques est de 15 millions de degrés. A titre d'exemple un modèle de 1973 (3) présidait Φ (H + H) = $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, Φ (${}^8\text{Be}$) = $5,4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, σ (H + H) = 0 (sous le seuil), σ (${}^8\text{Be}$) = $1,35 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$. $\sum \Phi$ (i) σ (i) = $9,0 \times 10^{-36}$. Un modèle plus récent (4) où les données physiques de base (opacité, taux de réactions nucléaires) ont été améliorées, prédit $\sum \Phi$ (i) σ (i) = $5,6 \times 10^{-36}$ proviennent de la désintégration de ${}^8\text{Be}$.

Malheureusement, les observations très soigneuses de Davis (5) donnent comme limite supérieure $\sum \Phi$ (i) σ (i) $\leq 0,8 \times 10^{-36}$. Les modèles théoriques classiques du Soleil, jusque là universellement admis, donnent apparemment une prédiction incorrecte. Ils se heurtent d'ailleurs peut-être à une autre difficulté. d'un ordre tout différent, mentionnée par Ulrich (6): dans l'évolution prédite par ces modèles, la luminosité a augmenté d'environ 30 pour cent en 4,5 milliards d'années: si la Terre a été soumise à un rayonnement solaire inférieur d'un quart à l'actuel, les océans auraient pu être gelés (7).

L'albedo de la glace étant supérieur à celui de l'eau, le dégel peut être impossible. Or, il y a des évidences de présence d'eau liquide il y a 3 milliards d'années (8). Il faudra donc confronter soigneusement la théorie astronomique et les résultats, encore incertains, de la paléoclimatologie.

.../...

.../...

II. STABILITE VIBRATIONNELLE DU SOLEIL ET MODELES MELANGES

Dans une tentative d'explication de l'absence apparente des neutrinos théoriquement émis par le Soleil, Fowler (9) a proposé que celui-ci a subi il y a environ 10 millions d'années, un mélange brusque de sa région intérieure. Les réactions nucléaires sont plus lentes dans les zones moins chaudes si bien que l'abondance d'hydrogène et d'hélium 3 augmente vers l'extérieur. (Dans les zones trop froides pour qu'il y ait des réactions, la composition chimique reste la composition initiale). Le mélange amène des réactifs frais au centre, les réactions s'emballent. La forte libération d'énergie entraîne une dilatation et un refroidissement des régions centrales, amenant une forte baisse de la luminosité et du flux de neutrinos. Il y aurait éventuellement une relation causale entre cette chute de luminosité et l'apparition d'un Âge glaciaire sur Terre. Le Soleil serait actuellement dans cet état transitoire. Il retourne progressivement vers un état d'équilibre, le flux neutrinique étant encore faible et compatible avec les mesures de Davis. Fowler ne proposait pas de cause au mélange mais Dilke et Gough (10) suggérèrent, par un modèle simple, que le Soleil au cours de son évolution normale pouvait être instable vis-à-vis des modes de gravités d'oscillation non radiale.

C'est ce que nous avons confirmé en analysant la Stabilité du Soleil à divers moments de son évolution normale (11). On procède de la façon suivante : ayant construit une séquence de modèles du Soleil, séquence le long de laquelle l'hydrogène s'épuise progressivement au fur et à mesure du vieillissement de l'étoile, on calcule, pour des modèles choisis, les modes normaux d'oscillation non radiale adiabatique dont sont exclus les apports d'énergie et les effets dissipatifs. Ces modes normaux se répartissent en un mode isolé f et en trois spectres : un spectre purement acoustique sans intérêt ici et deux spectres de gravité, dont un également sans importance ici est associé à la convection. Le dernier est le spectre g positif qui, par suite de la distribution des amplitudes, est le seul susceptible d'être instable si l'on tient compte des effets non adiabatiques. On écrit l'amplitude d'oscillation des différentes quantités physiques (température T , densité ρ , distance au centre r , etc..) sous la forme, t représentant le temps,

$$\delta a(r, t) = \delta a(r) \exp(i\sigma t) \exp(-\sigma' t)$$

où σ désigne la pulsation ($= 2\pi/\text{Période}$) et σ' le coefficient d'amortissement ou d'amplification suivant que le mode est stable ou instable. σ' a la forme

.../...

$$\sigma' \propto \int_0^M \left(\frac{\delta T}{T} \right) \left[\delta \epsilon - \delta \left(\frac{1}{\rho} \text{div. } \vec{F} \right) \right] dm \quad (1)$$

où δ est le symbole de perturbation (lagrangienne). L'intégrale porte sur toute la masse de l'étoile. $\delta \epsilon$ représente la réponse de la génération d'énergie nucléaire aux oscillations de température et de densité et $\delta \left(\frac{1}{\rho} \text{div. } \vec{F} \right)$ représente celle du transport d'énergie vers l'extérieur. Il convient de mentionner que nous avons tenu compte non seulement des oscillations du flux radiatif mais aussi du flux convectif. Le terme entre crochets est calculé à l'aide des fonctions propres du problème adiabatique, approximation excellente quand $|\sigma'|$ est beaucoup plus petit que $|\sigma|$. Voici quelques résultats pour 5 modèles, relatifs à un mode dipolaire g_1^+ . Le terme en $\delta \epsilon$ est déstabilisant et le terme de flux est globalement stabilisant (amortissant) bien que, dans le détail, il comprenne des effets stabilisants et déstabilisants.

Modèle	1	2	3	4	5
Age (en milliards d'années)	0,104	0,867	2,40	4,50	5,35
Abondance d'hydrogène au centre	0,736	0,681	0,565	0,393	0,318
Température centrale (en millions de degrés)	13,3	13,5	14,1	15,1	15,7
Luminosité (en 10^{33} ergs/s)	2,75	2,91	3,24	3,82	4,12
Période (en secondes)	6373	5983	5096	3845	3701
$ \sigma' ^{-1}$ (en milliers d'années)	91530	-18510	-7209	1006	4,182

On voit que, pendant une période allant d'un âge de $2,4 \times 10^8$ ans à $3,2 \times 10^9$ ans, le Soleil a connu une phase d'instabilité. L'instabilité provient de la forte sensibilité des réactions de l'hélium 3 à la température et à la distribution favorable au travers de l'étoile de l'amplitude de l'oscillation. Par contre, dans son état actuel représenté par le modèle 4, il est redevenu stable. Cette stabilisation est due à ce que la concentration relative (rapport de la densité centrale à la densité moyenne) augmente avec le temps, ce qui accroît l'amplitude dans les couches extérieures, là où le terme $\delta \left(\frac{1}{\rho} \text{div. } \vec{F} \right)$ est le plus important.

.../...

Nous avons alors suivi l'idée de Dilke et de Gough et avons considéré une évolution où chaque modèle trouvé vibrationnellement instable subit un mélange brusque des quatre cinquièmes de sa masse intérieure. (12). Le Soleil réagit comme Fowler l'avait prévu. Sa luminosité descend brusquement d'environ 20 pour cent puis remonte régulièrement et après $\sim 2 \times 10^7$ années, l'étoile s'est adaptée à sa nouvelle distribution de composition chimique et réévolue normalement. Elle redevient vibrationnellement instable pendant $\sim 2 \times 10^8$ années puis l'instabilité réapparaît suivie d'un nouveau mélange et ainsi de suite. Cette période de 2×10^8 ans correspond bien aux périodes interglaciaires terrestres. Nous avons fait nos calculs avec la même composition chimique initiale que dans l'évolution normale. Cette composition ne convient naturellement pas si le Soleil évolue comme nous venons de le décrire. Puisque, dans l'hypothèse de Fowler, le Soleil est pour le moment dans une phase consécutive à un mélange, nous ignorons la valeur de sa luminosité, L_s , en dehors de ce pulse. C'est pourquoi nous avons "recalibré" l'âge de nos modèles pour tenir compte du fait que nous ne connaissons pas la composition chimique initiale convenable. Pour cette recalibration, nous avons utilisé les propriétés des transformations homologues (13). Dans notre séquence d'évolution mélangée, c'est le modèle d'âge t (en années) et de luminosité L (en erg s^{-1}) tels que $L t = 4.5 \cdot 10^9 L_s$ qui correspond au modèle solaire (hors pulse) présentant la même distribution des variables non dimensionnelles $[T/T(\text{centre})], [P/P(\text{centre})]$ etc... (13). Si $L_s = 3.81 \times 10^{33}$ (luminosité solaire actuelle) $t = 4.84 \cdot 10^9$. Si $L_s = 1.2 \times 3.81 \times 10^{33}$, $t = 5.45 \cdot 10^9$. Même le modèle de cet âge présente encore une phase d'instabilité, si bien que le soleil actuel pourrait bien être dans l'état suggéré par Fowler pour autant qu'on accepte l'idée qu'un mélange de l'étoile suit l'apparition de l'instabilité vibrationnelle.

III MOUVEMENTS OSCILLATOIRES A LA SURFACE DU SOLEIL ET DISCRIMINATION ENTRE LES MODELES

Hill et al (14) ont observé à la surface du Soleil des mouvements périodiques qui, disent-ils, sont associés à des modes stationnaires. Ces mouvements ont des périodes allant de 7.2 à 47.8 minutes. S'il s'agit bien de modes stationnaires, il est nécessaire de comparer les périodes observées avec celles que prédisent les modèles théoriques "normaux" ou "mêlangés". En fait, étant donné la difficulté mentionnée au paragraphe précédent, concernant les modèles

.../...

mêlangés, la comparaison doit se faire sur la fréquence sans dimension $\omega^2 \cdot R^3 / GM$ où G est la constante de la gravitation, M la masse du Soleil et R le rayon du Soleil (ou du modèle). Nous donnons ici quelques valeurs observées et théoriques (12). Dans le tableau, S représente le modèle d'évolution normale correspondant au Soleil (modèle 4 dans le tableau précédent), M_1 un modèle instable dans l'évolution mélangée et M_4 un modèle correspondant au minimum de luminosité suivant le mélange, M_1 et M_4 étant proches du Soleil actuel, si celui-ci suit une évolution mélangée.

OBSERVATIONS		MODES RADIAUX		MODES QUADRUPOLAIRES		
Période (min)	ω^2	S	M_4	S	M_1	M_4
47,8	12,46	7,24(p_0)	6,89(p_0)	8,874(g_1)	7,616(f)	6,924(f)
		16,85(p_1)	15,19(p_1)	12,52(f)	13,29(p_1)	12,75(p_1)
30,3	30,99	29,14(p_2)	27,29(p_2)	15,14(p_1)	26,00(p_2)	25,58(p_2)
		46,48(p_3)	44,86(p_3)	26,76(p_2)	43,22(p_3)	42,92(p_3)
21	62,22	68,28(p_4)	67,13(p_4)	44,14(p_3)	64,83(p_4)	64,77(p_4)
				65,95(p_4)		

Sauf quelques-uns pour lesquels on a indiqué entre parenthèses le type, tous les modes théoriques comparables aux observations sont des modes acoustiques. Il serait naturellement nécessaire, pour une comparaison significative, de connaître le caractère radial, quadrupolaire ou autres des mouvements observés. (La méthode de Hill exclut les modes dipolaires, octupolaires, 2^5 polaires, etc). Ainsi, si les modes de Hill sont quadrupolaires, le modèle normal S prédit une fréquence $\omega^2 \approx 15$ (période de 43 min.) qui n'est pas observée. On voit là les prémisses d'une nouvelle confrontation entre observation et théorie qui permettrait de discriminer entre les divers modèles proposés pour représenter le Soleil.

Références

- (1) DAVIS R. J. Jr., Phys. Rev. Letters, 12, 303, 1964
 (2) DAVIS R. J. Jr., HARMER D.S., HOFFMAN K.C., Phys. Rev. Letters, 20, 1205, 1968

.../...

- (³) BAHCALL J.N. et ULRICH R.K., Ap. J. 160, L57, 1970; Ap. J. 170, 593, 1971
- (⁴) BAHCALL J.N., HEUBNER W.F., MAGEE N.H., MERTS A.L. et ULRICH R.K., Ap. J. 184, 1, 1973.
- (⁵) DAVIS R.J. Jr. et EVANS J.M. Proc. 13th Int. Cosmic Ray Conf., Denver, Colorado, 1973.
- (⁶) ULRICH R.K., Communications à l'American Meteorological Society et à la Division Solaire de l'American Astronomical Society (Denver, 1974 et à la "Solar Constant Workshop" (Big Bear, Californie, 1975).
- (⁷) BUDYKO M.I., Tellus, 21, 611, 1969- SELLERS W.D.-J.Appl.Meteor.,8,392,1969
- (⁸) RAMSEY G.J., Trans. Geol. Soc. S. Afr., 66, 353, 1963.
- (⁹) FOWLER W.A., Nature, 238, 24, 1972
- (¹⁰) DILKE F.W.W. et GOUGH D.O., Nature, 240, 262, 1972
- (¹¹) BOURY A., GABRIEL M., NOELS A., SCUFLAIRE R. ET LEDOUX P., sous presse à Astronomie et Astrophysique.
- (¹²) à paraître
- (¹³) SCHWARZSCHILD M., Structure and Evolution of the Stars, Princeton Univ., Press 1958.
- (¹⁴) HILL, Mc CULLEN, BROWN et STEBBINS, à paraître dans Phys. Letters.