

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Band:** 32 (1974)  
**Heft:** 142

**Artikel:** Un modele simple d'atmosphère stellaire  
**Autor:** Heck, A. / Manfroid, J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-899650>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 08.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Un modèle simple d'atmosphère stellaire

A. HECK et J. MANFROID\*),  
Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège

Calculer un modèle d'atmosphère stellaire qui soit très proche de la réalité est un problème extrêmement compliqué. Le nombre des variables et des équations qu'il faut traiter est si grand que ce calcul ne peut se faire qu'avec l'aide de puissants ordinateurs.

Néanmoins, quelques hypothèses simplificatrices permettent d'obtenir simplement une représentation assez exacte de l'atmosphère d'une étoile de la séquence principale ( $T_e = 10.000^\circ\text{K}$  p. ex.) et de la lumière qu'elle émet. Ces hypothèses seront introduites au fur et à mesure de leur utilisation.

D'autre part, nous nous intéresserons ici seulement au spectre continu, i. e. nous ne calculerons pas les raies d'absorptions dues aux différents éléments constituant l'atmosphère stellaire. Un tel modèle permet néanmoins des comparaisons qualitative et quantitative avec les spectres observés. D'ailleurs, il peut constituer une première étape vers l'élaboration d'un modèle plus réaliste, tenant compte des raies. Le calcul de celles-ci est complexe car de nombreux effets doivent être considérés (p. ex. élargissement des profils par effet STARK, par la température, par les micro- et macroturbulences, par la rotation de l'étoile, ...), et ceux-ci sortent du cadre élémentaire de cet article.

### Equation de l'équilibre hydrostatique

On suppose que l'atmosphère est en équilibre et qu'elle est constituée d'une superposition de couches gazeuses d'épaisseur  $dx$  ( $x$  étant la distance au centre de l'étoile) et de masse volumique  $\rho(x)$ .

Chaque couche supporte le poids des couches supérieures. Le poids d'une couche est donc équilibré par la différence des pressions gazeuses ( $P_g$ ) sur ses faces intérieure et extérieure. C'est ce qu'exprime la relation:

$$-dP_g = P_g(x) - P_g(x + dx) = g(x) \rho(x) dx \quad (1a)$$

où  $P_g$  est la pression totale, somme de la pression des ions  $P_i$  et des électrons  $P_e$ ;

$g(x)$  est l'accélération de la pesanteur qui dépend de la distance au centre de l'étoile. Nous supposons que l'atmosphère est de faible épaisseur par rapport au rayon de l'étoile. On peut donc la considérer plane localement et y supposer  $g$  constant.

La relation (1a) peut donc s'écrire:

$$\frac{dP_g}{dx} = -g \rho(x) \quad (1b)$$

\* Aspirant du F.N.R.S.

### Equation de transfert

Un rayon lumineux de longueur d'onde  $\lambda$  traversant la couche  $dx$  est absorbé partiellement. Cette absorption est exprimée par le facteur  $\exp(-d\tau_\lambda)$ .

$d\tau_\lambda$  est proportionnel à la quantité de matière absorbante et on écrit

$$d\tau_\lambda = -\kappa_\lambda \rho(x) dx \quad (2a)$$

où  $\kappa_\lambda$ , le coefficient d'absorption dépend de la composition de la matière, de sa pression électronique, de sa température et de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Les  $d\tau_\lambda$  sont additifs pour des couches successives et on appelle

$$\tau_\lambda = \int_{x_1}^{x_2} \kappa_\lambda \rho(x) dx$$

l'épaisseur optique — à la longueur d'onde  $\lambda$  — de la couche s'étendant de  $x_1$  à  $x_2$ .

On définit des valeurs moyennes  $\bar{\tau}$  et  $\bar{\kappa}$ , indépendantes de  $\lambda$  et telles que

$$d\bar{\tau} = -\bar{\kappa} \rho(x) dx \quad (2b)$$

Des tables de  $\kappa$  en fonction de la température et de la pression électronique existent pour des compositions chimiques normales de la matière interstellaire (BODE, 1963), par exemple celle du soleil que nous adoptons une fois pour toutes

$$\bar{\kappa} = \bar{\kappa}(P_e, T) \quad (3)$$

En combinant (1b) et (2b), on obtient:

$$\frac{dP_g}{d\bar{\tau}} = + \frac{g}{\bar{\kappa}(\tau)} \quad (4)$$

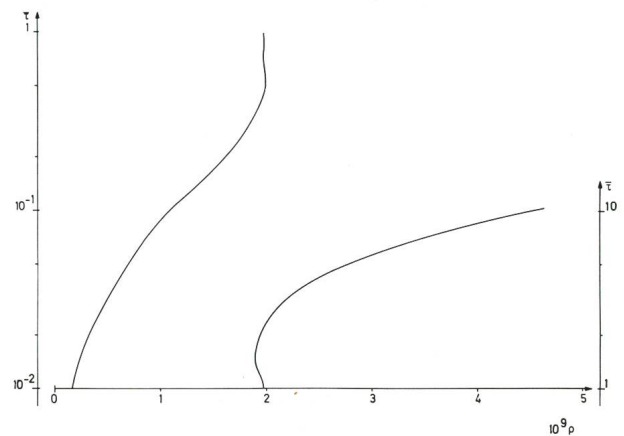


Fig. 1: Variation de  $\kappa$  en fonction de  $\bar{\tau}$ .

$\tau$ , au lieu de  $x$ , devient notre variable indépendante, en fonction de laquelle pourront être exprimées les autres variables physiques ( $T$ ,  $P_g$ ,  $P_e$ , ...). Il est compté vers le bas dans le sens inverse des  $x$ , à partir du sommet de l'atmosphère.

*Distributions de T et de  $P_e$*

La distribution de la température  $T$  dans l'atmosphère en fonction de  $\bar{\tau}$  est donnée par une relation simple dans un cas particulier de modèle d'atmosphère, dit «cas gris». Nous n'entrerons pas dans les détails des calculs qui sont assez compliqués. Cette relation s'écrit:

$$T^4(\bar{\tau}) = 3/4 T_e^4[\bar{\tau} + q(\bar{\tau})]. \quad (5)$$

$T_e$  est la température effective c.-à-d. la température d'un corps noir qui rayonnerait la même énergie que l'étoile. On la détermine à partir du spectre  $\odot q(\bar{\tau})$  est une fonction tabulée dans différents ouvrages (KOURGANOFF, 1952, BARBIER, 1958).

La pression électronique est quant à elle déterminée par la température, la pression totale et la composition chimique du milieu (BODE, 1963)

$$P_e = P_e(P_g, T) \quad (6)$$

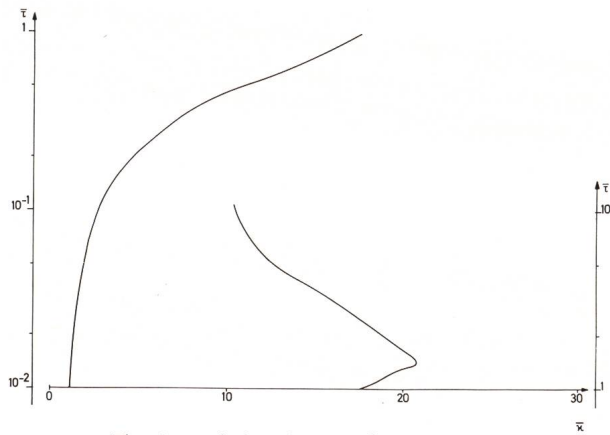


Fig. 2: Variation de  $\bar{x}$  en fonction de  $\bar{\tau}$ .

*Processus d'intégration du modèle*

Nous avons donc trois équations (3, 4, 6) reliant trois variables dépendantes ( $x$ ,  $P_e$ ,  $P_g$ ). L'une des relations est une équation différentielle (4). Par conséquent, il faut trouver un premier point d'où partira l'intégration.

On va choisir celui-ci au sommet de l'atmosphère, ou  $\bar{\tau} = 0$  (par définition) et  $P_g = 0$ . On admet en outre que, pour les faibles pressions (i. e. près de la surface),  $\bar{x}$  a une forme analytique simple et ne dépend pas de  $T$ :

$$\log \bar{x} = A + B \log P_g \quad (7)$$

avec  $A \approx -0,20$

$B \approx 0,18$

L'intégration de (4) donne alors

$$\frac{P^{B+1}}{B+1} = \frac{g}{10A} \bar{\tau} \quad (8)$$

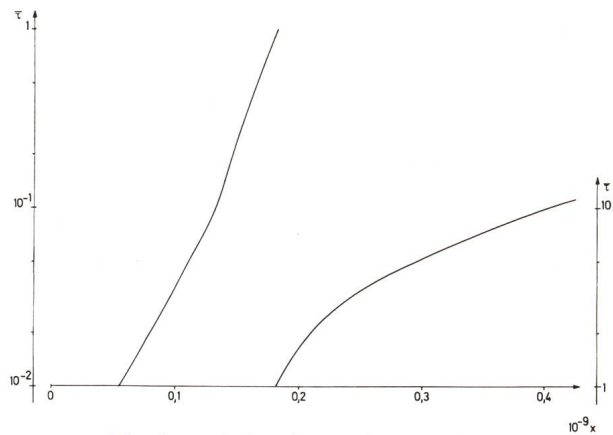


Fig. 3: Variation de  $x$  en fonction de  $\bar{\tau}$ .

La prise en compte de la condition limite à  $\bar{\tau} = 0$  nous permet ainsi d'obtenir une valeur  $P_{g1}$  pour une profondeur optique  $\bar{\tau}_1$ , choisie de telle façon que l'on se trouve bien dans le domaine de validité des tables. On peut alors par itération poursuivre l'élaboration du modèle en se servant des tables et non plus de la relation approchée (8):

$\bar{\tau}_1$  donne  $T_1$  par (5);

$T_1$  et  $P_{g1}$  donnent  $P_{e1}$  par (6);

$T_1$  et  $P_{e1}$  donnent  $\bar{x}_1$  par (3);

L'intégration de (4) fournit le point suivant  $P_{g2}$  et le processus peut recommencer. Les  $d\bar{\tau}$  sont choisis suffisamment petits, pour que l'intégration soit précise.

Ce calcul peut se faire rapidement, le point le plus délicat étant l'interpolation dans des tableaux à double entrée.

On obtient ainsi les distributions en fonction de  $\bar{\tau}$  des variables physiques  $P_g$ ,  $P_e$ ,  $T$ ,  $\bar{x}$ , et ce sont celles-ci qui caractérisent le modèle. Les expressions en fonction de  $x$  peuvent s'obtenir par l'intermédiaire de la relation (2a). La densité s'obtient à partir d'une équation d'état:

$$P_g = P_g(\varrho, T, P_e).$$

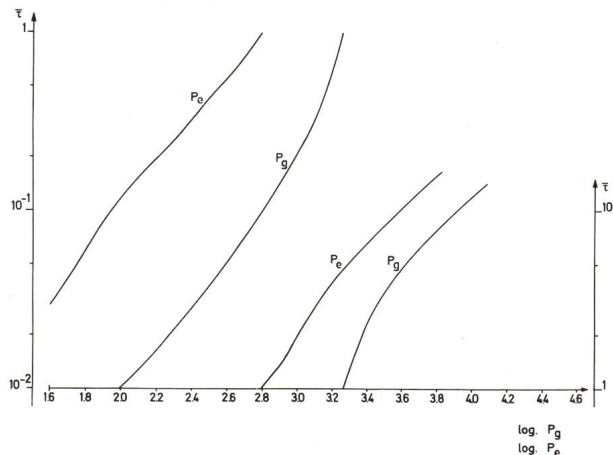


Fig. 4: Variation de  $\log P_g$  et  $\log P_e$  en fonction de  $\bar{\tau}$ .



Les figures 1 à 4 reprennent les variations en fonction de  $\bar{\tau}$  de  $\varrho$ ,  $\bar{\kappa}$ ,  $x$ ,  $\log P_e$  et  $\log P_g$ , pour une étoile de  $T_e = 10.000^\circ\text{K}$  et  $\log g = 4$ .

#### Calcul du spectre continu

En plus des variables physiques habituelles, on calcule le rayonnement qui traverse l'atmosphère stellaire, sa distribution en fonction de la profondeur optique moyenne et sa répartition en fréquence, i. e. son spectre.

Ce spectre est en réalité un fond continu coupé de très nombreuses raies d'absorption et parfois d'émission dans les étoiles particulières. Comme nous l'avons dit plus haut, nous ne nous intéresserons ici qu'au continu.

Considérons le rayonnement  $F_\lambda(\bar{\tau})$  traversant, par seconde et par unité de longueur d'onde, une aire de  $1 \text{ cm}^2$  à la profondeur optique moyenne  $\bar{\tau}$  et à la longueur d'onde  $\lambda$ . Pour avoir une description assez précise du spectre, on choisit un nombre suffisamment grand de longueurs d'onde.

On sait qu'une étoile du type envisagé plus haut présente certaines discontinuités dans son rayonnement, correspondant à des limites de séries bien connues de raies importantes (série de LYMAN, de BALMER, ...). Pour tenir compte de ces variations brusques de  $F_\lambda$  (sans faire le calcul des raies), nous analyserons le flux de chaque côté de ces discontinuités et nous interpolerons entre celles-ci.

Prenons, par exemple, les longueurs d'onde suivantes: 0, 911-, 911+, 1800, 3647-, 3647+, 5130, 8205+,  $\infty$

Les signes + et - signifient que l'on se trouve d'un côté ou de l'autre d'une discontinuité. En 0 et à l' $\infty$ ,  $F_\lambda = 0$ . Outre la présence des discontinuités, le choix des longueurs d'onde est aussi guidé par l'existence de tables du coefficient d'absorption  $\kappa_\lambda$  (BODE, 1963) en fonction de  $T$  et  $P_e$ .

Les relations (2a) et (2b) peuvent se combiner en

$$\frac{d\tau_\lambda}{d\bar{\tau}} = \frac{\kappa_\lambda}{\bar{\kappa}} \quad (7)$$

dont l'intégration est immédiate et donné par la relation

$$\tau_\lambda = \tau_\lambda(\bar{\tau}) \quad (8)$$

A cet effet, il suffit de chercher, dans les tables de BODE, la valeur du coefficient d'absorption  $\kappa_\lambda$  cor-

respondant aux conditions physiques régnant dans l'atmosphère à la profondeur  $\bar{\tau}$ , conditions caractérisées essentiellement par  $P_e$  et  $T$  (pour une composition chimique donnée).

A partir de (8), il est alors facile de trouver le flux traversant chaque couche et, en particulier, le flux émergeant de l'étoile ( $\bar{\tau} = 0$ ).

A la profondeur  $\tau_\lambda = \tau_\lambda(\bar{\tau})$ , nous avons

$$F_\lambda(\bar{\tau}) = 2 \int_{\tau_\lambda}^{\infty} S_\lambda E_2(t - \tau_\lambda) dt - 2 \int_0^{\tau_\lambda} S_\lambda E_2(\tau_\lambda - t) dt$$

où  $S_\lambda$  peut être approximé à la fonction de PLANCK donnant l'émissivité d'un corps noir à la température  $T(\bar{\tau})$ . L'intégration numérique ne se fait pas jusqu'à l'infini. Il suffit de s'arrêter pour une valeur de  $\bar{\tau}$  de l'ordre de 10, au-delà de laquelle la contribution de l'intégrale est négligeable.

$E_2$  est la fonction intégréo-exponentielle d'ordre 2:

$$E_2(t) = \int_1^{\infty} e^{-xt} \frac{dx}{x^2}$$

Le calcul de ces intégrales est évidemment assez long et pénible. R. CAYREL (1960) donne un procédé numérique d'intégration permettant d'épargner beaucoup de temps.

Le flux émergeant de l'étoile s'obtient donc pour  $\bar{\tau} = 0$ . On a alors le profil du spectre continu de l'étoile (v. fig. 5 et tableau 1 pour l'exemple considéré).

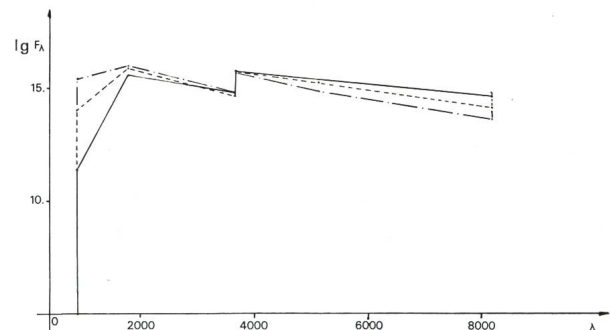


Fig. 5: Le flux en fonction de la longueur d'onde aux profondeurs optiques 0.1 (trait plein), 1.0 (trait interrompu) et 3.0 (trait d'axe).

Suite: page 98

## Berichtigung

Im Titelbild von ORION 140 ist der Pferdekopf-Nebel irrümlicherweise falsch bezeichnet worden. Die richtige Bezeichnung ist: BARNARD 33 oder IC 434, M 78 ist auf dieser Aufnahme nicht sichtbar. Die Redaktion entschuldigt sich für den Irrtum des Bildautors.

### Vérification

Le calcul décrit ci-dessus permet une vérification du modèle. En effet, le flux total par unité de surface doit être constant en raison de notre hypothèse d'atmosphère plane et parce que nous supposons en outre qu'il n'y a pas de génération d'énergie dans l'atmosphère et que tout le transfert d'énergie se fait par rayonnement.

Nous avons ainsi calculé pour trois profondeurs optiques différentes ( $\bar{\tau} = 0.1, 1., 3.$ ) les flux  $F_{\lambda}(\bar{\tau})$  et intégré sur toutes les longueurs d'onde

$$F(\bar{\tau}) = \int_0^{\infty} F_{\lambda}(\bar{\tau}) d\lambda$$

Le flux est pratiquement nul au-delà de 8205 Å (pour en tenir compte, on peut l'approximer à une fonction de Planck) et en deçà de 911 Å (le coefficient d'absorption étant très grand).

La dernière colonne du tableau I montre les résultats obtenus. L'accord est remarquable si l'on songe aux simplifications que notre modèle utilise.

Table 1

$\bar{\tau}$	$F_{\lambda}(\bar{\tau})$								$F(\bar{\tau})$
	911,76—	911,76+	1800,00	3647,04—	3647,04+	5130,00	8205,84—	8205,84+	
0,1	0,0	0,2653 10 <sup>12</sup>	0,4175 10 <sup>16</sup>	0,5964 10 <sup>15</sup>	0,5560 10 <sup>16</sup>	0,2120 10 <sup>16</sup>	0,3860 10 <sup>15</sup>	0,5978 10 <sup>15</sup>	.1714 10 <sup>12</sup>
1,0	0,0	0,1130 10 <sup>15</sup>	0,7136 10 <sup>16</sup>	0,4256 10 <sup>15</sup>	0,5739 10 <sup>16</sup>	0,1554 10 <sup>16</sup>	0,1255 10 <sup>15</sup>	0,3791 10 <sup>15</sup>	.1814 10 <sup>12</sup>
3,0	0,0	0,2755 10 <sup>16</sup>	0,9136 10 <sup>16</sup>	0,5525 10 <sup>15</sup>	0,4647 10 <sup>16</sup>	0,7192 10 <sup>15</sup>	0,3931 10 <sup>14</sup>	0,8745 10 <sup>14</sup>	.1811 10 <sup>12</sup>

### Bibliographie:

BARBIER D., (1958), Théorie générale des atmosphères stellaires, in Handb. der Physik 50, 274.  
BODE G., 1963, Die kontinuierliche Absorption stellarer Plasmen, Kiel.

CAYREL R., 1960, Ann. Astrophys. 23, 245.  
KOURGANOFF, V., BUSBRIDGE I. W., 1952, Basic Methods in Transfer Problems, Oxford.

### Adresse des auteurs:

A. HECK et J. MAUFROID, Institut d'Astrophysique, Avenue de Cointe 5, B 4200 Cointe-Ougrée.

## Frühe Spektralanalyse von Fraunhofer bis Kirchhoff

von H.-U. FUCHS, Zürich

### Einleitung

Die Entwicklung der modernen Astronomie ist gekennzeichnet durch das Entstehen eines völlig neuen Zweiges dieser Wissenschaft im letzten Jahrhundert. Während man vorher die Aufgabe der Astronomie in der Beobachtung von Stern- und Planetenörtern und der Ableitung von Bewegungsgesetzen (in Zusammenhang mit NEWTONS Gravitationstheorie) sah, so trat neu die Erforschung des physikalischen Aufbaues der Himmelskörper hinzu. Seither hat dieser Zweig, die *Astrophysik*, ständig an Bedeutung gewonnen und bestimmt nun wesentlich das Bild der neuen Astronomie.

Ausschlaggebend und verantwortlich für diesen Aufschwung ist wohl die Entdeckung der *Spektralanalyse*. Die Tatsache, dass das Sonnenlicht durch ein Prisma in einen «Regenbogen» zerlegt werden kann, war schon seit der Zeit NEWTONS bekannt (um 1672; Vorarbeiten von DOMINIS, MARCI<sup>1)</sup>). Die Entdeckung der FRAUNHOFER'schen Linien im Sonnenspektrum (1814) und andere Erforschungen führten manchen Naturwissenschaftler auf den Gedanken, dass uns mit der Spektroskopie ein Mittel zur chemischen Untersuchung von Himmelskörpern in die Hand gegeben sei. Doch blieben das Vermutungen und Wunschträume, bis in den Jahren 1859–60 BUNSEN und KIRCHHOFF die Spektralanalyse auf eine sichere

Grundlage stellten. KIRCHHOFF hatte kurz zuvor die Natur der FRAUNHOFER'schen Linien erkannt. In der Folge führte die Anwendung der Spektralanalyse zu dem ungeheuren Fortschritt der Astrophysik.

### Die Entdeckung der FRAUNHOFER'schen Linien

I. NEWTON und seine Nachfolger hatten das Sonnenlicht, das sie prismatisch zerlegen wollten, jeweils durch ein rundes Loch auf die Optik fallen lassen. Im Jahre 1802 ersetzte W. H. WOLLASTON (1766–1828) dieses Loch durch einen schmalen Spalt. Dabei entdeckte er mehrere schwarze Linien, die das Spektrum senkrecht durchzogen. Mit der Erklärung, diese kennzeichneten die Grenzen der verschiedenen Regenbogenfarben, gab er sich zufrieden<sup>2)</sup>.

Etwa 12 Jahre später wurde der entscheidende Schritt gemacht. JOSEPH FRAUNHOFER (1787–1826) war seit 1806 Optiker in einem kleinen Betrieb, der durch seine Fähigkeiten bald zu Weltruf kam. Neue handwerkliche Methoden und genaue Formeln zur Linsenberechnung waren FRAUNHOFERS erste Arbeiten. Bald beschäftigte ihn die Herstellung achromatischer Fernrohre, mit denen er den leidigen Farbfehler alter Instrumente beheben wollte. Im Laufe dieser Untersuchungen entdeckte er die nach ihm benannten schwarzen Linien im Sonnenspektrum. In seiner Abhandlung «Bestimmung des Brechungs- und