

Avertissements de l'auteur

- Cet article se fonde entièrement sur une information fournie par 312_OAY : la période de rotation de Ioumma.
- Le sujet est assez technique, et j'ai essayé de ne pas noyer le lecteur avec des formules mathématiques afin de rendre la démarche compréhensible.
- J'ai dû pourtant utiliser un modèle mathématique compliqué décrit en Annexe 4, dans une tentative peut être erronée de remonter au champ magnétique et au flux magnétique de Ioumma : je n'ai pas trouvé comment faire autrement pour « sortir » une valeur haute de champ magnétique comparable à ce que les Ummites nous disent dans la lettre D 74.
- Mais le résultat obtenu mérite de s'y attarder quelques minutes !
- Le tout sera très facile à confronter à un éventuel retour des Ummites : il suffit de leur demander à quelle distance de leur étoile ils font la mesure de son champ magnétique.

Introduction

Les étoiles émettent de l'énergie dans ce qu'on appelle le spectre visible, le plus évident lorsqu'on observe la voûte céleste. Mais en vérité, la plupart des étoiles émettent de l'énergie sous forme électromagnétique dans un très large spectre.

Par exemple, le Soleil émet des rayonnements gammas, des rayonnements X, UV, visible, infrarouges et des ondes radio de manière très bien connue (voir annexe 2).

Toutes les étoiles possèdent également des champs magnétiques plus ou moins intenses (voir à ce sujet https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magnétique_stellaire).

Le Soleil n'échappe pas à cette règle, et l'annexe 3 détaille ses propriétés magnétiques en fonction de la distance par rapport à son centre: pour situer un ordre de grandeur, on estime sa valeur à 2 Gauss vers 2.5 rayons solaires.

Les étoiles qui produisent un champ magnétique sont dites « actives » : c'est-à-dire qu'elles sont le siège d'un certain nombre de phénomènes énergétiques liés à leur champ magnétique : citons la production d'une couronne, d'un vent solaire ou d'éruptions solaires. Les taches stellaires témoignent également de cette activité : la taille et le nombre de ces taches dépendent de l'activité de l'étoile, elle-même fonction de la période de rotation de l'étoile.

L'objectif de cet article est d'examiner différentes propriétés de l'étoile Ioumma et de les comparer à celles du Soleil. Voici le point de départ de cette étude.

	Soleil	Ioumma (données)
Masse (kg)	1,99E+30	1,48E+30
Rayon (km)	6,96E+05	5,17E+05
Température de surface °K	5780	4580
Luminosité absolue (10 ²⁶ W)	3,83	0,83
Rotation (jours)	27	15,4

Nous avons obtenu de 312_OAY la période de rotation sur elle-même de Ioumma (Annexe 1 et dernière ligne du tableau précédent) ; c'est une donnée très intéressante quand on s'intéresse aux propriétés magnétiques d'une étoile : nous verrons pourquoi dans cet article.

L'article 38 sur Umno-Sciences (Les aurores boréales sur Umno) se base sur un champ magnétique de l'étoile Ioumma variant entre deux extrêmes donnés par les Ummites dans la lettre D 74 : entre 3.8 Gauss et 216 Gauss.

⇒ Un des objectifs de cet article est de bâtir un lien clair entre la période de rotation de Ioumma et la valeur haute de 216 Gauss fournie par les Ummites.

De la période de rotation de Ioumma à la valeur de son champ magnétique

Le lien recherché va se construire en plusieurs étapes comme suit.

a) Détermination du nombre de Rossby de Ioumma

Le champ magnétique d'une étoile de type G, K ou M de la séquence principale dépend beaucoup de sa vitesse de rotation (ou de sa période de rotation) mais également de l'épaisseur de la zone de convection de l'étoile entraînant une rotation différentielle : ces paramètres dépendent du type de l'étoile. La zone convective (en rouge dans le diagramme ci-dessous) est de plus en plus épaisse relativement au diamètre de l'étoile, et contient de plus en plus de matière dans cette zone de convection, comme le montre la figure ci-dessous à droite. Référence : Convection and differential rotation properties of G & K stars computed with the ASH code Astron.Nachr. / AN 99, N° 88,1-11 (2011).

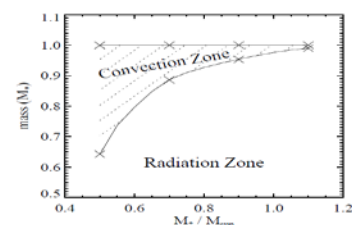
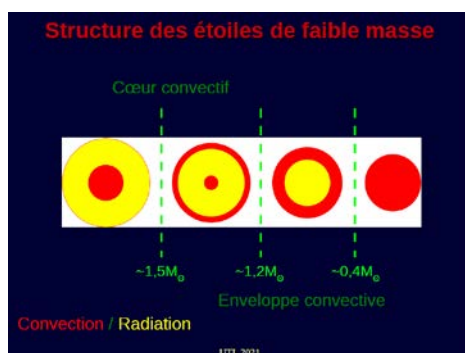
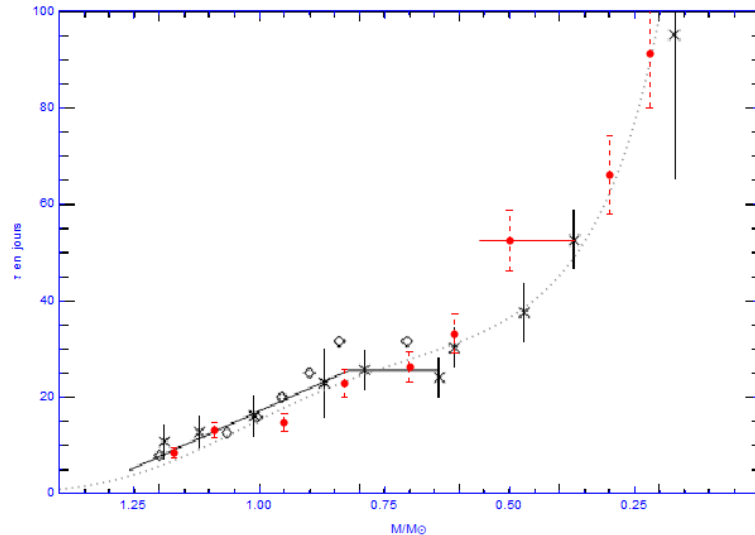


Fig. 3 Mass contained beneath the stellar surface (upper line) and location of the base of the convection zone (lower line) as a function of stellar mass, as computed by the CE-SAM stellar evolution code. The convection zone exists between these two lines, while a convectively stable radiation zone lies below. The "X" symbols indicate the upper and lower radial boundaries of the computational domain used in our ASH simulations, for the 4 cases considered.

Dans la suite, nous nous intéressons surtout aux étoiles de type G et K qui possèdent une faible zone convective, alors que les étoiles de type M sont totalement convectives : une limite entre ces deux familles se situe aux alentours de 0.4 Masses solaires comme le montre la figure ci-dessus à gauche.

Quand on s'intéresse au champ magnétique des étoiles, on constate que différents paramètres sont liés : période de rotation, zone de convection, et in fine activité magnétique. Les astrophysiciens ont défini un nombre sans dimension, le nombre de Rossby, qui fait le rapport entre la période de rotation de l'étoile, et un temps (dit de turn-over) qui dépend notamment de l'épaisseur de la zone de convection d'une manière complètement non linéaire.

La figure ci-dessous provient de différentes publications que j'ai compilées afin d'obtenir un ajustement du temps de turnover (en ordonnée en jours) en fonction de la masse relative des étoiles (référence : la masse du Soleil).



L'ajustement obtenu est en pointillés noirs, et pour une étoile comme Ioumma de 0.74 Msol, on lit comme temps de turnover : **26.40 jours**. L'incertitude sur cette valeur est de l'ordre de +/- 15%.

Les références suivantes ont été utilisées pour faire cet ajustement :

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 279:763-777, 1984 April 15
© 1984 The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

Age-Rotation-Activity Relations for M Dwarf Stars
Based on ASAS Photometric Data

ROTATION, CONVECTION, AND MAGNETIC ACTIVITY IN LOWER MAIN-SEQUENCE STARS
R. W. NOYES,¹ L. W. HARTMANN,¹ S. L. BALUNAS,¹ D. K. DUNCAN,² AND A. H. VAUGHAN³
Received 1983 June 6; accepted 1983 October 5

M. Kiraga and K. Stepień

Mon. Not. R. Astron. Soc. 000, 000-000 (0000) Printed 11 July 2018 (MN \LaTeX style file v2.2)

The stellar rotation-activity relationship in fully convective M dwarfs

Nicholas J. Wright¹, Elisabeth R. Newton², Peter K.G. Williams³,
Jeremy J. Drake³ and Rakesh K. Yadav⁴

Ces références couvrent les années 1984 à 2018 : celle de 2018 a fourni les données en rouge de la figure ci-dessus. L'ensemble s'ajuste correctement hormis une valeur dont les barres d'incertitudes horizontales sont vraiment importantes. Cette valeur n'a pas été utilisée dans l'ajustement.

Le nombre de Rossby pour Ioumma vaudrait alors : $15.34/26.40=0.58 \pm 15\%$ et sera utilisé dans la suite. Le nombre de Rossby pour le Soleil vaut selon l'ajustement précédent : $27/15.35=1.76$ ce qui est cohérent des données disponibles dans la littérature (RoSun ~ 2) et de la barre d'incertitude estimée.

b) La relation entre l'activité X d'une étoile et son flux magnétique

Il existe une relation valable sur plusieurs décades qui lie l'activité dans le domaine X d'une étoile et son flux magnétique. La publication suivante date de 2003. Les croix représentent les valeurs pour des étoiles de type G, K, et M.

THE RELATIONSHIP BETWEEN X-RAY RADIANCE AND MAGNETIC FLUX

ALEXEI A. PLYTSOV,¹ GEORGE H. FISHER,^{2,3} LOREN W. ACTON,⁴ DANA W. LONGCOPE,⁴
 CHRISTOPHER M. JOHNS-KRULL,^{2,5} CHARLES C. KANKELBORG,⁴ AND THOMAS R. METCALF⁶
Received 2002 May 18; accepted 2003 August 7

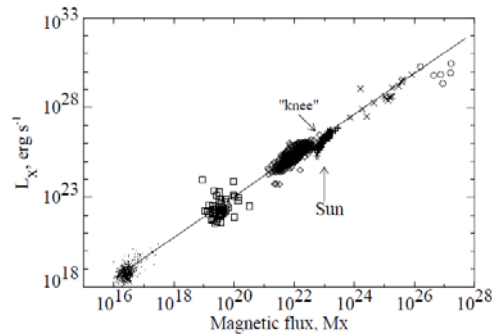


FIG. 1.—X-ray spectral radiance L_X vs. total unsigned magnetic flux for solar and stellar objects. *Dots*: Quiet Sun. *Squares*: X-ray bright points. *Diamonds*: Solar active regions. *Pluses*: Solar disk averages. *Crosses*: G, K, and M dwarfs. *Circles*: T Tauri stars. *Solid line*: Power-law approximation $L_X \propto \Phi^{1.13}$ of combined data set.

$$L_X \propto \Phi^{1.13 \pm 0.05}$$

Cette relation $L_X = f[\Phi]$ semble valable sur plus de 10 décades (!), ce qui révèle probablement un mécanisme de chauffage et en conséquence de production X via le champ magnétique de manière prédominante et valable pour de très nombreuses structures stellaires. Ainsi, en connaissant le flux X émis par une étoile de type G ou K, on devrait pouvoir remonter au flux magnétique puis au champ magnétique de l'étoile grâce à cette correspondance.

⇒ **Selon cette publication, les valeurs de flux magnétique et de puissance X pour les étoiles naines présentées sont déterminées au niveau de la surface de l'étoile (estimated surface area).** Ce point est très important et sera utilisé ultérieurement.

Les unités utilisées dans cette publication ne sont plus d'actualité (erg/s, Maxwell), mais on peut passer en unités plus récentes sans difficultés.

c) Données publiées de la puissance L_X d'une étoile en fonction de son nombre de Rossby

On peut trouver dans la littérature de nombreuses informations donnant la variation du rapport

$R_X = L_X / L_{bol}$ en fonction du nombre de Rossby Ro . (L_X représente la puissance émise dans le domaine X par l'étoile, et L_{bol} sa luminosité bolométrique).

Les figures suivantes issues des références précédentes présentent des graphiques de type $R_X = f[Ro]$.

Comme on le voit, les dispersions donnant $R_X = f[Ro]$ sont assez importantes et il convient à ce stade d'essayer d'estimer les différentes incertitudes qui découlent de toutes ces informations.

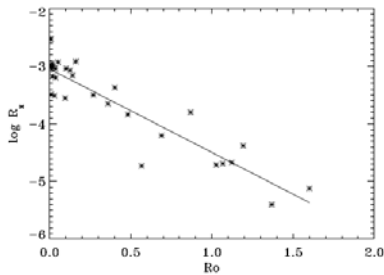


Fig. 7. X-ray to bolometric flux ratio vs. Rossby number $Ro = P_{rot}/\tau_c$, calculated at the base of empirical convective turnover times from the Table 2. The straight line gives the best fit (see text).

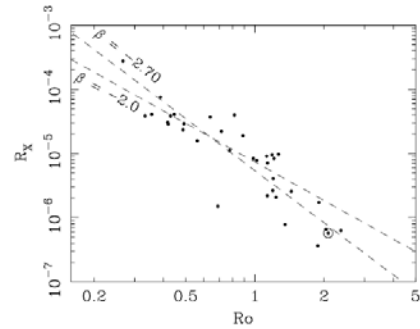


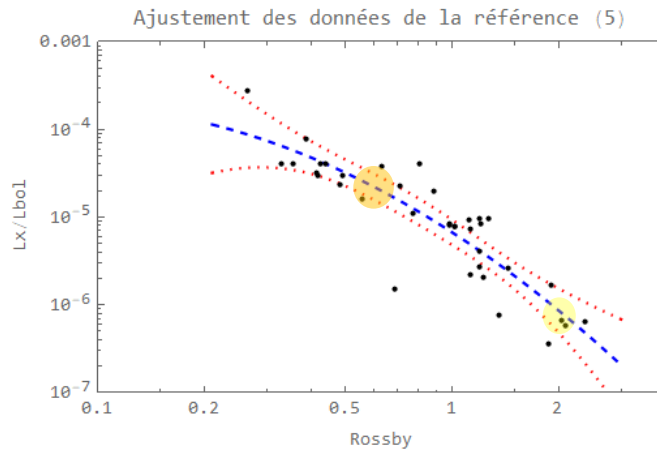
Figure 3. X-ray to bolometric luminosity ratio vs. Rossby number for our unbraced sample of 36 stars with unsaturated X-ray emission. The Sun is indicated with a solar symbol. The log-log OLS bisector fit, $\beta = -2.70$, is shown as a dashed line alongside a fit with the canonical slope of $\beta = -2.0$.

Les relations suivantes sont fournies dans les publications :

$$\text{Log}[Rx] = -(3.05 \pm 0.07) - (1.45 \pm 0.12) \text{Ro} \quad \text{et} \quad \text{Log}[Rx] = \text{log}[\text{Constante}] - (2.70 \pm 0.13) \text{Log}[\text{Ro}]$$

Nous avons toutefois repris les données de la publication de 2018 (figure ci-dessus à droite), ceci afin d'effectuer un ajustement assorti d'un écart-type.

La figure suivante présente en abscisse le nombre de Rossby de différentes étoiles, et en ordonnée leur ratio Rx, c'est à dire L_x/L_{bol} .



L'ajustement obtenu de la fonction $Rx=f[Ro]$ est porté en tirets bleus, entouré des bandes de prédiction à 95% (tirets rouges), c'est-à-dire pour 2 écarts-types. Le Soleil et Lommel sont figurés respectivement en jaune et orange. Les barres d'incertitude sur le nombre de Rossby de Lommel sont traduites par un cercle orange dont le nombre de Rossby varie entre 0.5 et 0.7.

Les valeurs Rx lues pour Lommel en se basant sur les bandes de prédiction sont :

$$R_{xLommel} = 0.0000238, \text{ dans l'intervalle } \{0.0000169, 0.0000335\} \text{ soit } \pm 40\% \text{ d'incertitude.}$$

Le Soleil se situe aux environs de $Ro \sim 2$, pour un rapport moyen $R_{xSun} = 6 \cdot 10^{-7}$.

D'après Güdel, le Rx minimum du Soleil se situerait vers $8 \cdot 10^{-8}$ et son Rx maximum vers $1.05 \cdot 10^{-6}$. (Güdel, M., 2004, "X-ray astronomy of stellar coronae", Astron. Astrophys. Rev., 12, 71–237). Ces valeurs correspondent respectivement à un soleil calme et un soleil émettant des flashes de luminosité (flares) (voir annexe 2 à ce sujet). La valeur R_{xSun} déduite du graphique précédent et pour un nombre de Rossby ~ 2 se situe bien entre ces deux valeurs extrêmes.

Remarque : on comprend mieux maintenant pourquoi il fallait connaître le nombre de Rossby R_o , car il permet de remonter à $R_x = L_x/L_{bol}$ puisque les astrophysiciens compilent leurs données dans ce système de coordonnées. R_x étant alors connu d'après les publications, on peut remonter à L_x connaissant L_{bol} , puis enfin au flux magnétique comme expliqué au paragraphe b).

d) Estimation du flux magnétique de l'étoile Ioumma et lien avec son champ magnétique

Les développements précédents sont un peu longs, mais indispensables pour arriver au résultat final.

D'après la loi expliquée au paragraphe b), on peut en déduire le flux magnétique au niveau du Soleil et de Ioumma, puisque nous pouvons estimer les luminosités en X de ces étoiles, elles-mêmes déduites de leur nombre de Rossby R_o et de leurs luminosités bolométriques.

Commençons par les valeurs estimées de luminosité X moyennes.

Pour Ioumma:

$$L_x_{Ioumma} = L_{bol_Ioumma} * R_x_{Ioumma} = 0.22 * 3.83 \cdot 10^{26} * 2.38 \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 10^{21} \text{ W.}$$

Nous utilisons dans cette application numérique $L_{bol_Ioumma} = 0.22 L_{bol_Soleil}$ pour cela avec $L_{bol_Soleil} = 3.83 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Pour le Soleil :

$$L_x_{sol} = 6 \cdot 10^{-7} * 3.83 \cdot 10^{26} = 2.3 \cdot 10^{20} \text{ W.}$$

La puissance moyenne émise dans le spectre X par Ioumma serait environ 10 fois plus forte que celle du Soleil. Ioumma serait donc beaucoup plus active que le Soleil, bien que 5 fois moins lumineuse dans le spectre visible.

Comme nous avons estimé les plages des valeurs de L_x pour Ioumma et le Soleil, on peut en déduire les plages correspondantes des flux magnétiques à l'aide de la loi fournie au chapitre b) :

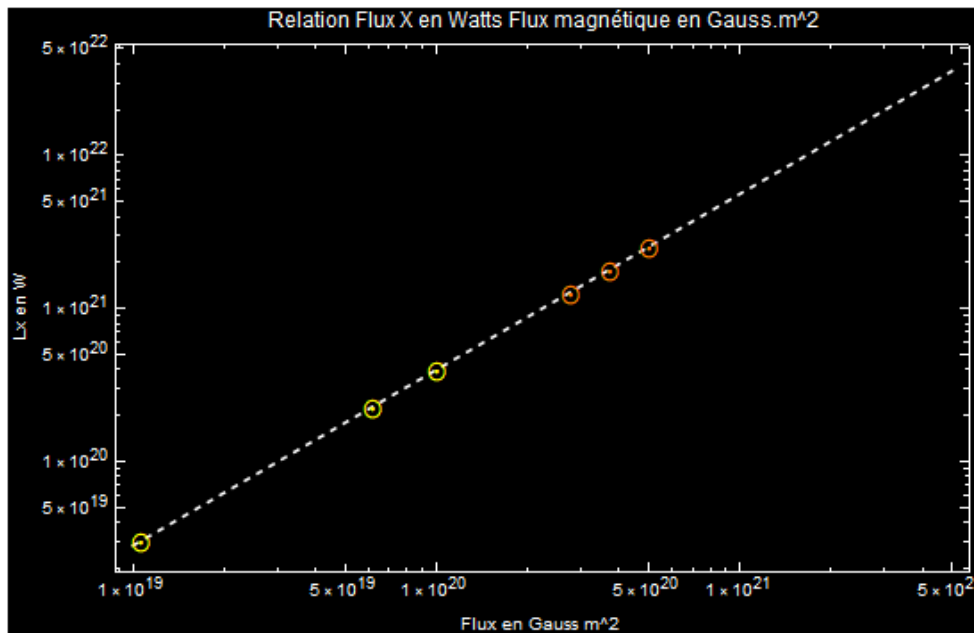
Pour Ioumma :

$\{1.24 \cdot 10^{21} \text{ W} < L_x_{Ioumma} < 2.6 \cdot 10^{21} \text{ W}\}$ conduit avec la loi b) à la plage de flux magnétiques suivante : $\{2.79 \times 10^{20}, 3.76 \times 10^{20}, 5.05 \times 10^{20}\}$ en Gauss. m^2

Pour le Soleil :

$\{3 \cdot 10^{19} \text{ W} < L_x_{Sol} < 4 \cdot 10^{20} \text{ W}\}$ conduit avec la loi b) à la plage de flux magnétiques suivante : $\{1.1 \times 10^{19}, 6.2 \times 10^{19}, 1 \times 10^{20}\}$ en Gauss. m^2 .

Ces résultats sont portés dans le graphique suivant, représentant la loi b), avec en abscisse le flux magnétique et en ordonnée la luminosité X en unités SI. Les valeurs représentées pour le Soleil sont en jaune, et celles pour Ioumma en orange. Les valeurs « moyennes » sont également représentées.



Le facteur 10 déjà observé sur le rapport des puissances X moyennes émises par Ioumma comparées à celles du Soleil se traduit aussi par un facteur 10 moyen entre le flux magnétique de Ioumma comparé à celui du Soleil.

Remarque importante à ce stade : parler du champ magnétique d'une étoile ne se résume pas à une valeur numérique ; le champ magnétique est en effet un ensemble de vecteurs chacun avec une direction, une intensité, et le tout dépend de l'endroit dont on parle par rapport au centre de l'étoile. Ceci est bien connu pour le Soleil comme le rappelle l'annexe 3. De même calculer un flux magnétique nécessite de définir une surface précise à travers laquelle on calcule le flux des vecteurs représentant le champ magnétique à cet endroit.

- ⇒ Autrement dit, le couple {Champ magnétique, Flux magnétique} doit être estimé sur une surface précise. Comme évoqué au chapitre b), cet endroit pour établir le lien entre le flux magnétique et le flux X se situe au niveau de la surface de l'étoile, soit à $R_s=1$.

1^{ère} approche pour avoir les ordres de grandeur à $R_s=2.5$

Une hypothèse très simplificatrice consiste à déclarer que le flux magnétique est conservatif, c'est-à-dire qu'à travers n'importe quelle surface sphérique à n'importe quelle distance R du centre de l'étoile, la valeur du flux $B[R] \cdot 4 \pi R^2$ est constante.

Souvent, les astrophysiciens positionnent cette surface à $2.5 R_{star}$ pour faire les calculs. C'est ce que nous avons choisi de faire lors de l'étude des aurores boréales sur Umma.

Si on admet ces hypothèses simplificatrices, on peut estimer grossièrement un champ magnétique moyen de Ioumma en utilisant le fait que :

$$\text{Flux mag Ioumma} / \text{Flux mag}_{Sol} \sim (4 \pi (2.5 R_{star})^2 B_{Ioumma}) / (4 \pi (2.5 R_{sol})^2 B_{sol})$$

Soit $10 \sim \frac{1}{2} B_{Ioumma} / B_{sol}$ d'où l'on trouve :

- ⇒ $B_{Ioumma} \sim 40 \text{ Gauss}$ à $2.5 R_{Ioumma}$ avec $B_{sol} \sim 2 \text{ Gauss}$ à $2.5 R_{sol}$.

Cette valeur obtenue avec des hypothèses très simplificatrices est cohérente de la fourchette fournie {3.8,216} Gauss. **Ce premier résultat d'ordre de grandeur est donc encourageant.**

Mais il faut calculer le couple {Champ magnétique, Flux magnétique} au niveau de l'étoile, c'est-à-dire pour $R_s=1$ comme expliqué dans la publication donnant la loi b), R_s étant le rayon de l'étoile. Ceci nécessite une approche beaucoup plus complexe, car le champ n'est plus à flux conservatif.

2^{ème} approche analytique détaillée pour calculer le couple {Champ, Flux} à $R_s=1$

Cette approche se base sur un modèle analytique qui donne le vecteur champ magnétique à différentes distances du centre de l'étoile. Ce modèle est à symétrie cylindrique et non sphérique comme supposé précédemment, et a été développé essentiellement pour le Soleil.

L'annexe 4 présente ce modèle et différents graphiques en détail pour le Soleil et pour Ioumma. Les formulations utilisées proviennent de l'article suivant.

Astron. Astrophys. 337, 940–944 (1998)

ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

An analytic solar magnetic field model

M. Banaszekiewicz¹, W.L. Axford², and J.F. McKenzie²

¹ Space Research Center, Polish Academy of Sciences, Bartycka 18a, PL-00716 Warsaw, Poland

² Max-Planck-Institut für Aeronomie, Postfach 20, D-37189 Katlenburg-Lindau, Germany

Received 23 January 1998 / Accepted 30 June 1998

Nous avons effectué l'étude de l'annexe 4 afin de restituer les valeurs hautes du champ magnétique et du flux magnétique du Soleil et de Ioumma.

Ce modèle appliqué au Soleil fournit des ordres de grandeur compatibles des observations :

- ~ 13.6 Gauss proche du rayon de l'étoile (l'annexe 3 indique 10 Gauss au niveau des « coronal heights »)
- Un flux magnétique calculé pour $R_s=1$ cohérent des observations ($3.2 \cdot 10^{19}$ Gauss.m², dans la fourchette entre $1 \cdot 10^{19}$ et $1 \cdot 10^{20}$ Gauss.m² du graphique précédent).
- Un champ magnétique de l'ordre de 1.1 à 1.9 Gauss au niveau de $2.5 R_s$, la valeur souvent utilisée étant de 2 Gauss.

La même démarche appliquée pour Ioumma donne un flux magnétique de $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m² pour $R_s=1$, ce qui situe cette valeur légèrement au-dessus de la fourchette haute du graphique précédent ($5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²). Cela reste compatible des barres d'incertitudes successives estimées à 40 % ayant conduit aux valeurs reproduites sur le graphique précédent.

Les Ummites ont fourni une valeur haute du champ magnétique de leur étoile de 216 Gauss, mais sans préciser clairement l'endroit où cette valeur avait été mesurée ou estimée : on comprend mieux à la lecture de l'annexe 4 qu'il faut être précis sur l'endroit où cette valeur est donnée, de manière à calculer un flux magnétique en cohérence avec cette valeur.

Ainsi, notre modèle analytique donne une valeur de 197 Gauss pour $R_s=1$ pour Ioumma, allant de pair avec un flux magnétique lui-aussi cohérent de nos déductions : ce couple de valeurs à $R_s=1$ pour Ioumma {197 Gauss, $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²}, est cohérent de la luminosité X estimée de Ioumma à partir de son nombre de Rossby.

Remarque : l'ensemble de ces résultats peut paraître globalement peu précis puisqu'on évoque des barres d'incertitudes de l'ordre de 40 % ; mais l'activité d'une étoile est sujette à des éruptions (flares) dues à l'énergie magnétique stockée dans son atmosphère et qui se libère de manière plus ou moins brutale : l'annexe 2 précise certaines quantités liées à ces « flares », dans le domaine des X mais aussi dans le domaine des ondes radio pour le Soleil. Les énergies libérées peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur...

Une barre d'incertitude de $\pm 40\%$ signifie que nous sommes dans le bon ordre de grandeur, ce qui en soi est un résultat satisfaisant.

Conclusion

Ioumma, étoile de type K, tournerait sur elle-même en 15.35 jours, comme l'indique 312_OAY : nous en avons déduit en premier lieu son nombre de Rossby : $R_o = 0.58 \pm 15\%$, à l'aide de données d'origine purement « terrestre ». A noter d'ailleurs que toute la démarche présentée dans cet article n'utilise que des données publiées par nos scientifiques, hormis donc cette fameuse valeur de la rotation de Ioumma sur elle-même.

Partant de là, nous avons estimé la luminosité de Ioumma dans le domaine des X, telle qu'en moyenne $L_X \text{ Ioumma} \sim 10 \text{ fois } L_X \text{ Soleil}$. Rappelons que dans le visible, Ioumma est environ 5 fois moins lumineuse que le Soleil : Ioumma serait donc très active dans le domaine X.

L'obtention du flux X de Ioumma a permis ensuite de positionner le flux magnétique de Ioumma à partir de données de la littérature scientifique : la valeur haute obtenue est de l'ordre de $5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m² (à 40 % près) : cette valeur est calculée à $R_s=1$ (à la surface de l'étoile) suivant en cela la publication scientifique concernée.

Pour passer ensuite à la valeur du champ magnétique de Ioumma au niveau $R_s=1$, il a fallu utiliser une approche analytique détaillée modélisant *simultanément* le couple {Flux magnétique, champ magnétique} de l'étoile pour $R_s=1$.

Nous avons alors obtenu un flux magnétique calculé au niveau du rayon de l'étoile ($R_s=1$) d'environ 20 fois celui du Soleil, de valeur $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m² : cette valeur est cohérente de ce que l'on pouvait attendre des déductions précédentes compte tenu des barres d'incertitude. Et elle va de pair avec un champ magnétique de l'ordre de 197 Gauss à la distance de 1 R_s .

Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus dans cette étude en les comparant à ceux du Soleil. Les barres d'incertitudes des calculs sont de l'ordre de 40% sur les valeurs signalées par le caractère ~.

	Soleil	Ioumma (fournies)	Calcul Ioumma
Masse (kg)	1,99E+30	1,48E+30	
Rayon (km)	6,96E+05	5,17E+05	
Température de surface °K	5780	4580	
Luminosité absolue (10²⁶ W)	3,83	0,83	
Rotation (jours)	27	15,4	
Nombre de Rossby	1.8+-15%		0,58+- 15%
Luminosité X (10²⁰ W)	~2		~20
Flux magnétique à $R_s=1$ (10¹⁹ Gauss m²)	~3.2		~65(*)
Champ magnétique (Gauss) à $R_s=1$	~13.6	216 (**)	~197 (*)

(*) fourchette haute calculée en annexe 4

(**) fourchette haute fournie par les Ummites mais la distance R_s n'est pas précisée.

Le couple de valeurs obtenu à la surface de l'étoile pour Ioumma {197 Gauss, $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²}, est cohérent de la luminosité X estimée de Ioumma à partir de son nombre de Rossby, sachant que ce dernier a pu être calculé à partir de la période de rotation de Ioumma fournie par 312_OAY.

Il est étonnant de trouver une valeur haute du champ magnétique de Ioumma proche de celle annoncée par les Ummites (valeurs en gras du tableau ci-dessus) : ***toutefois, ces derniers n'ont pas précisé le lieu où ils ont relevé cette valeur (ici Rs=1) ...***

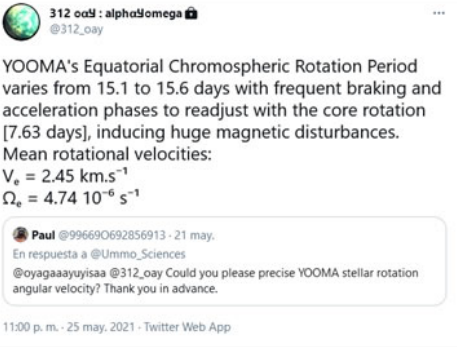
Ces quelques propriétés calculées de Ioumma et comparées à celles du Soleil pourraient être utiles dans le futur pour progresser sur d'autres sujets comme le vent solaire, l'impact de ces différents flux sur l'atmosphère d'Ummo, etc....

Dans l'immédiat, force est de constater que la valeur de la période de rotation de Ioumma conduit à des estimations cohérentes de la valeur haute de son champ magnétique estimé au niveau de sa photosphère, à condition que la valeur de 216 Gauss donnée dans la lettre D 74 ait été mesurée dans la photosphère de Ioumma.

Annexe 1

Le rayon de Ioumma et sa période de rotation

La période de rotation est déduite du tweet suivant.

312-69	<p>@oyagaayuyisaa @312_oay Could you please precise YOOMA stellar rotation angular velocity? Thank you in advance.</p>	<p>@312_oay 25 may 2021 - 23:00 YOOMA's Equatorial Chromospheric Rotation Period varies from 15.1 to 15.6 days with frequent braking and acceleration phases to readjust with the core rotation [7.63 days], inducing huge magnetic disturbances. Mean rotational velocities: $V_e = 2.45 \text{ km.s}^{-1}$ $\Omega_e = 4.74 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$</p>  <p>312 oay : alphaOmega @312_oay</p> <p>YOOMA's Equatorial Chromospheric Rotation Period varies from 15.1 to 15.6 days with frequent braking and acceleration phases to readjust with the core rotation [7.63 days], inducing huge magnetic disturbances. Mean rotational velocities: $V_e = 2.45 \text{ km.s}^{-1}$ $\Omega_e = 4.74 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$</p> <p>Paul @996690692856913 · 21 may. En respuesta a @Ummo_Sciences @oyagaayuyisaa @312_oay Could you please precise YOOMA stellar rotation angular velocity? Thank you in advance.</p> <p>11:00 p. m. · 25 may. 2021 · Twitter Web App</p>	<p>@oyagaayuyisaa @312_oay ¿Podrían precisar la velocidad angular de rotación estelar de YOOMA? Gracias de antemano.</p> <p><i>El período de rotación cromosférica ecuatorial de YOOMA varía de 15,1 a 15,6 días con frecuentes fases de frenado y aceleración para reajustarse con la rotación del núcleo [7,63 días], lo que induce enormes perturbaciones magnéticas. Velocidades medias de rotación:</i> $V_e = 2,45 \text{ km.s}^{-1}$ $\Omega_e = 4,74 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.</p>
--------	--	--	---

La période moyenne de rotation de Ioumma à l'équateur est de 15.35 jours.

Annexe 2 Irradiance spectrale du soleil et champ magnétique.

D'après Encyclopedia of the solar system by T Spohn Doris Breuer T V Johnson

Les valeurs du texte correspondent dans le domaine des X à un soleil sans flashes de luminosité (non flare conditions), et avec des flashes importants (2B Flare).

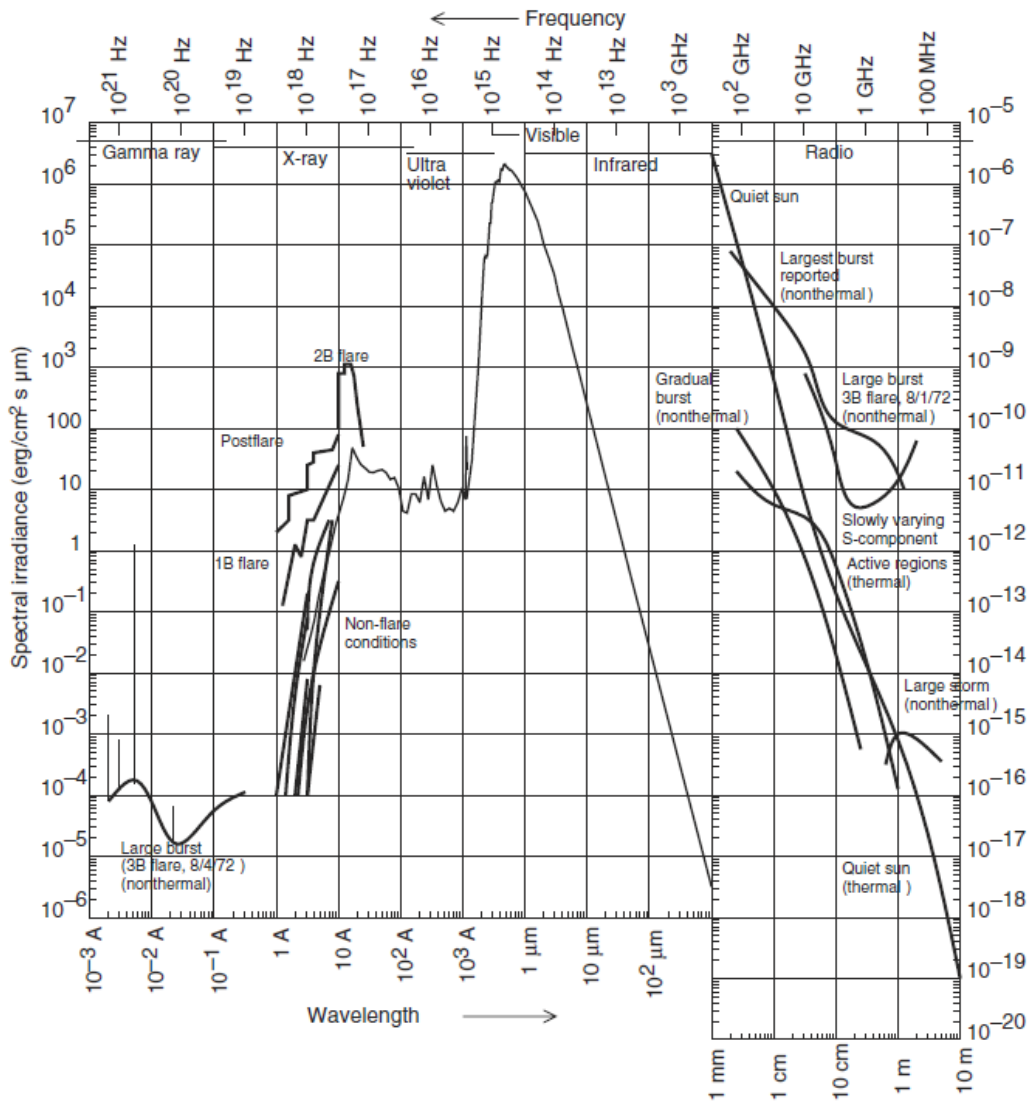


FIGURE 11.2 The solar irradiance spectrum from gamma rays to radio waves. The spectrum is shifted by 12 orders of magnitude in the vertical axis at $\lambda = 1$ mm to accommodate for the large dynamic range in spectral irradiance. *Courtesy of H. Malitson and NASA/NSDC.*

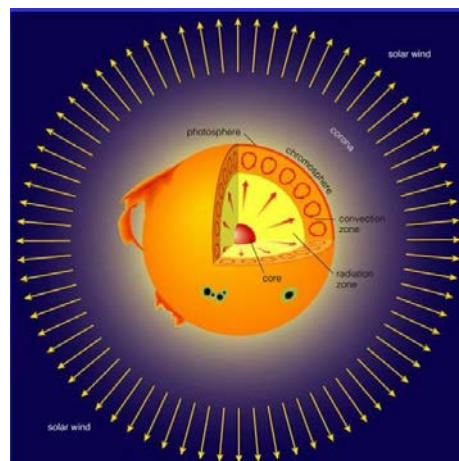
Annexe 3 Ordre de grandeur des champs magnétiques observés au niveau du Soleil

Le paragraphe suivant permet de situer les ordres de grandeur de champ magnétique observés au niveau du Soleil. La figure illustre les zones pour lesquelles des valeurs sont données.

2.5. Solar Dynamo

The Sun is governed by a strong magnetic field (much stronger than those on planets), which is generated with a magnetic field strength of $B \approx 10^5$ G in the tachocline, the thin shear layer sandwiched between the radiative and

the convective zone. Buoyant magnetic flux tubes rise through the convection zone (due to the convective instability obeying the Schwarzschild criterion) and emerge at the solar surface in active regions, where they form sunspots with magnetic field strengths of $B \approx 10^3$ G and coronal loops with field strengths of $B \approx 10^2$ G at the photospheric footpoints, and $B \approx 10$ G in larger coronal heights. The differential rotation on the solar surface is thought to wind up the surface magnetic field, which then fragments under the magnetic stress, circulates meridionally to the poles, and reorients from the toroidally stressed state (with field lines oriented in the east–west direction) at solar maximum into a poloidal dipole field (connecting the North with the South Pole) in the solar minimum. This process is called the solar dynamo, which flips the magnetic polarity of the Sun every ~ 11 years (the solar cycle), or returns to the same magnetic configuration every ~ 22 years (the Hale cycle). The solar cycle controls the occurrence rate of all solar activity phenomena—from sunspot numbers, active regions, to flares, and coronal mass ejections (CMEs).



Ces valeurs sont cohérentes avec un champ radial de l'ordre de 2 Gauss situé à 2.5 Rayons solaires (zone représentée par les flèches « solar wind »).

Annexe 4

Modèle analytique du champ magnétique d'une étoile permettant de faire le calcul du flux magnétique.

Astron. Astrophys. 337, 940–944 (1998)

ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

An analytic solar magnetic field model

M. Banaszkiewicz¹, W.I. Axford², and J.F. McKenzie²

¹ Space Research Center, Polish Academy of Sciences, Bartycka 18a, PL-00716 Warsaw, Poland

² Max-Planck-Institut für Aeronomie, Postfach 20, D-37189 Katlenburg-Lindau, Germany

Received 23 January 1998 / Accepted 30 June 1998

L'article précité indique que le champ magnétique d'une étoile comme le Soleil peut être décrit par deux composantes et s'exprime selon la formulation suivante :

2. The dipole plus quadrupole plus current sheet (DQCS) model

The DCS model can be improved by the inclusion of a quadrupole component of the internal field of the Sun, as suggested for example by Brueckner et al. (1996). The corresponding components of the magnetic field in this case (the DQCS model) are given analytically (in gauss) in cylindrical polar coordinates (ρ, z in solar radii) as follows:

$$\frac{B_\rho}{M} = \frac{3\rho z}{r^5} + \frac{15Q}{8} \frac{\rho z}{r^7} \frac{(4z^2 - 3\rho^2)}{r^2} + \frac{K}{a_1} \frac{\rho}{[(|z| + a_1)^2 + \rho^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

$$\frac{B_z}{M} = \frac{2z^2 - \rho^2}{r^5} + \frac{3Q}{8} \frac{(8z^4 + 3\rho^4 - 24\rho^2 z^2)}{r^9} + \frac{K}{a_1} \frac{|z| + a_1}{[(|z| + a_1)^2 + \rho^2]^{3/2}}, \quad (2)$$

where $r^2 = \rho^2 + z^2$ and $Q = 0$ corresponds to the DCS model. In order to make the last closed field line (which extends to large distances) intersect the Sun at 60 degrees latitude, and to have $B_r \sim 3.1 \cdot nT$ at 1 a.u., it is necessary to choose $K = 1.0$, $M = 1.789$ and $a_1 = 1.538$ in the limiting case $Q = 1.5$ where all field lines still connect with the Sun. (As before we make an allowance for the magnetic flux contained in the slow wind belt.) The evolution of the field configuration as Q is increased

Le jeu de paramètre utilisé pour effectuer les calculs est celui de l'auteur pour le Soleil, hormis le paramètre K qui sera ajusté pour restituer le module du champ magnétique désiré de l'étoile au niveau de la planète considérée.

Les ajustements choisis pour K sont ceux qui vont donner les mêmes valeurs de champ magnétique au niveau d'Umho que celles utilisées dans l'étude 38 « Les aurores boréales sur Umho ».

Les paramètres utilisés pour le Soleil sont :

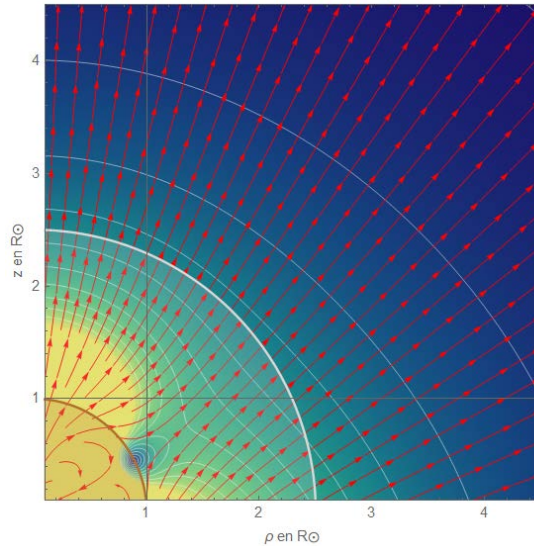
$$\{M \rightarrow 1.789, a_1 \rightarrow 1.538, K \rightarrow 11., Q \rightarrow 1.5\}$$

Et pour l'oumma :

$$\{M \rightarrow 1.789, a_1 \rightarrow 1.538, K \rightarrow 1025., Q \rightarrow 1.5\}$$

Il s'agit à chaque fois des valeurs de la fourchette haute du champ magnétique de ces étoiles.

A titre d'illustration, voici une cartographie du champ magnétique calculée pour le Soleil.



Les lignes de champ magnétique sont en rouge, les iso valeurs de champ sont en blanc (lignes fines).

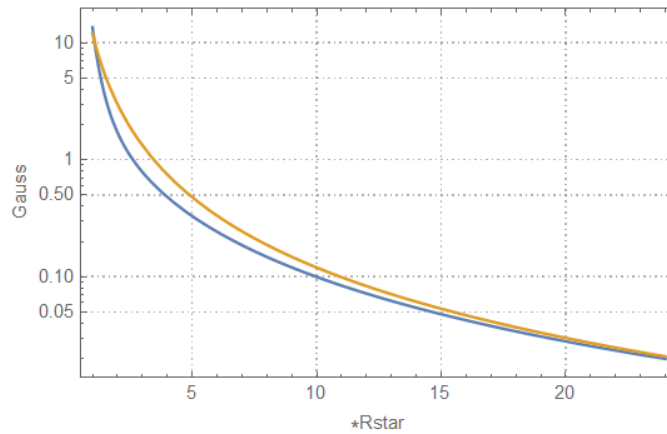
Le disque orange transparent représente le Soleil, et le disque blanc transparent représente le disque de 2.5 Rayon solaire.

Comme on s'y attendait, les lignes d'iso valeurs ne sont pas sphériques.

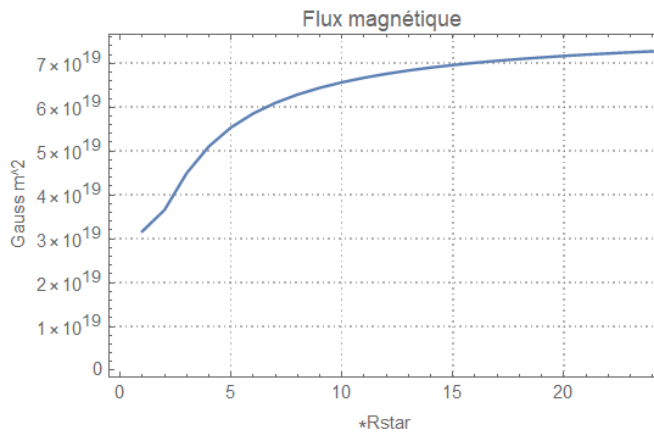
Par ailleurs, le champ radial varie comme suit d'après l'auteur, sachant que cette formule fournie dans l'article n'est valide que loin de l'étoile.

$$\frac{B}{M} = \frac{2}{r^3} + \frac{3Q}{r^5} + \frac{K}{a_1(r + a_1)^2}$$

Comme prévu, le flux magnétique n'est pas conservatif près de l'étoile : c'est-à-dire que le champ radial ne varie plus en $1/r^2$ quand on s'approche de l'étoile. C'est ce que montre le graphique suivant pour le Soleil : en bleu, le modèle analytique, en orange, le modèle à flux conservatif en $1/r^2$.



Si maintenant on calcule le flux magnétique à partir du modèle analytique ajusté, on obtient le tracé suivant pour le Soleil :



Ce résultat pour le Soleil est instructif :

- Il montre bien que le champ n'est pas conservatif près de l'étoile et que le flux tend vers une constante loin de l'étoile et devient alors conservatif. Ce flux diminue quand on se rapproche de l'étoile.
- Pour $R_s=1$, on obtient une valeur de 3×10^{19} Gauss. m^2 tout à fait compatible des flux magnétiques estimés pour le Soleil dans le texte.

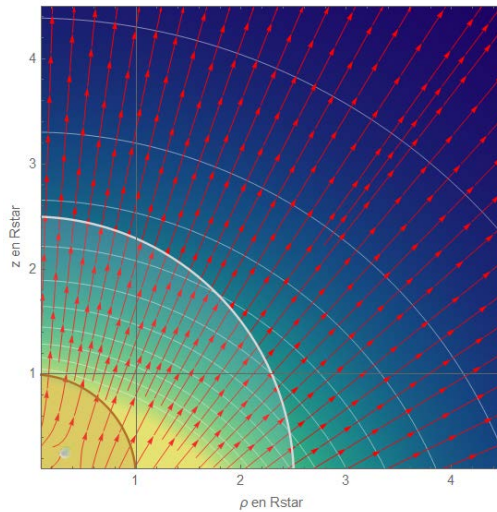
Rappelons ici que la valeur $R_s=1$ est celle à laquelle les auteurs de la publication suivante ont estimé les flux magnétiques des étoiles naines. C'est donc bien pour $R_s=1$ qu'il fallait calculer le flux magnétique.

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 598:1387-1391, 2003 December 1
© 2003. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

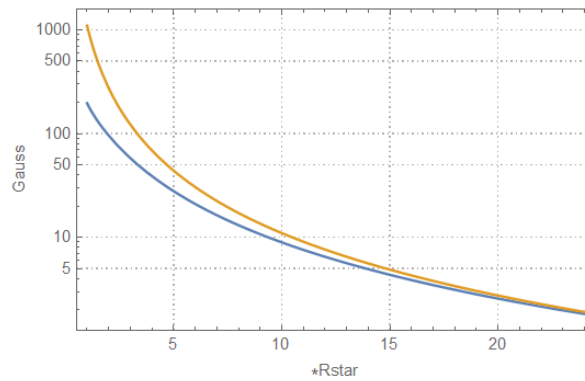
THE RELATIONSHIP BETWEEN X-RAY RADIANCE AND MAGNETIC FLUX

ALEXEI A. PEVTSOV,¹ GEORGE H. FISHER,^{2,3} LOREN W. ACTON,⁴ DANA W. LONGCOPE,⁴
CHRISTOPHER M. JOHNS-KRULL,^{2,5} CHARLES C. KANKELBORG,⁴ AND THOMAS R. METCALF⁶
Received 2002 May 18; accepted 2003 August 7

La même procédure appliquée à Ioumma donne les graphiques suivants.



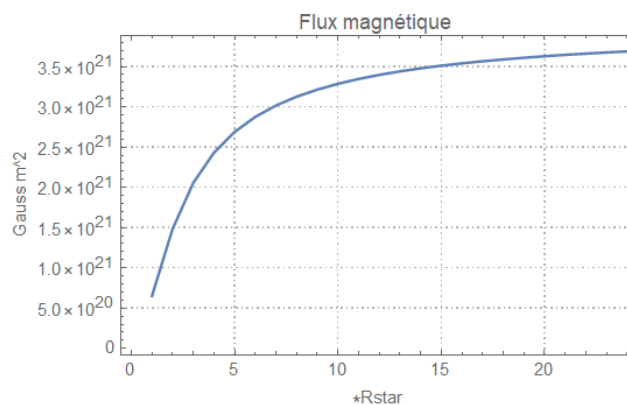
Comme pour le Soleil, le champ n'est pas à symétrie sphérique et n'est pas à flux conservatif près de l'étoile (flux conservatif en orange dans le graphique suivant).



On remarque que le champ magnétique analytique (en bleu) pour $R_s=1$ vaut environ 197 Gauss, alors qu'il vaut environ 176 Gauss pour le champ à flux conservatif pour $R_s=2.5$.

Ces valeurs sont à comparer à la fourchette haute du champ magnétique de 216 Gauss donnée par les Ummites. Cette valeur utilisée à 2.5 Rstar donne à peu près le même champ magnétique au niveau de Umma que si on utilise la formule analytique à $R_s=1$...

On obtient ensuite ci-après le flux magnétique pour Ioumma (formule analytique) :



On note que pour $R_s=1$, le flux magnétique vaut environ $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m², valeur tout à fait cohérente de la fourchette haute déduite pour Ioumma dans le texte ($5.05 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²), ce qui signifie compte tenu des barres d'incertitude (+- 40%) une bonne cohérence entre la luminosité X de Ioumma et son flux magnétique estimé à $R_s=1$.

L'ensemble de ces résultats est présenté dans le tableau suivant à la fois pour le Soleil et pour Ioumma.

	Soleil $R_s=1$	Ioumma $R_s=1$	Soleil $R_s=2,5$	Ioumma $R_s=2,5$
Champ magnétique analytique (Gauss)	13,6	197	1,1	73
Flux magnétique déduit (Gauss .m²)	3,2 E+19	6,5 E20		
Champ conservatif (Gauss) en $1/r^2$			1,9	176

Nous avons choisi de présenter dans ce tableau les valeurs à chaque fois pour les rayons suivants :

- Pour $R_s=1$, pour les raisons déjà exposées,
- Pour $R_s=2.5$, rayon choisi en général par les astrophysiciens.

Nous avons également indiqué la valeur du champ magnétique selon un modèle très simple à flux conservatif à la distance de 2.5 R_s pour chaque étoile.

Conclusion de l'annexe 4

Ce modèle appliqué au Soleil fournit des ordres de grandeur compatibles des observations :

- ~ 13.6 Gauss proche du rayon de l'étoile (10 Gauss au niveau des « coronal heights » de l'annexe 3)
- Un flux magnétique calculé pour $R_s=1$ cohérent des observations ($3.2 \cdot 10^{19}$ Gauss.m², dans la fourchette entre $1 \cdot 10^{19}$ et $1 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²).
- Un champ magnétique de l'ordre de 1.1 à 1.9 Gauss au niveau de 2.5 R_s .

Si on applique la même démarche pour Ioumma, on calcule un flux magnétique de $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m² pour $R_s=1$, au niveau de la fourchette haute estimée dans le texte ($5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²). Ceci est compatible des barres d'incertitudes de l'ordre de 40 % ayant conduit aux valeurs du texte.

Les Ummites ont fourni une valeur du champ magnétique de Ioumma de 216 Gauss, mais sans préciser clairement ou cette valeur avait été mesurée ou estimée : on comprend mieux à la lecture de cette annexe qu'il faut être plus précis sur l'endroit où cette valeur est donnée.

Ainsi, notre modèle analytique donne une valeur de 197 Gauss (+-40 %) pour $R_s=1$, allant de pair avec un flux magnétique lui-aussi cohérent.

$R_s=1$ est-il l'endroit de la mesure faite par les Ummites ?

En tout cas, ce couple de valeurs à $R_s=1$ {197 Gauss, $6.5 \cdot 10^{20}$ Gauss.m²}, est parfaitement cohérent de la luminosité X estimée de Ioumma à partir de son nombre de Rossby.