TEMPERATURE ET DENSITE DES GAZ SOLAIRES

Résumé : Essai de compréhension de la température de la couronne solaire par le rôle de la gravité sur les gaz de diverses densités et sur les gaz des spicules. (Adrien Nicco)

Mots-clés : température – densité – couronne solaire – spicules – vent solaire

Observations : Depuis que le gaz à très basse densité constituant la couronne solaire a été étudié et reconnu se trouver à très haute température , plus de 10^6 Kelvin, *(GROTRIAN 1939),* les modèles étudiés pour interpréter les divers phénomènes liés à cette couronne ont été assez imprécis et discutés : répartition de la densité gazeuse et de la température avec la distance au soleil, émissions des rayonnements radio, UV et X, émission et vitesse ou accélération du vent solaire. *(ref 6).*

L'énergie provient évidemment du noyau solaire, mais sa transmission, son maintien dans la couronne, et ses transformations ne sont pas clairs *(ref 1-6)*. Récemment on a pu affirmer : « pour une raison encore mal élucidée la chromosphère et la couronne sont plus chaudes que la surface du soleil » *(juillet 2008, ref 2a, page 8)* ; « bien qu'aucune théorie n'explique encore cette différence… » *(ibid p 9)* ; « researchers still do not understand why the temperature rises so much... over such a small change in radius » (≈ 100 km). *(ref 2i).*

Quelles sont les conditions physiques possibles dans l'entourage gazeux du soleil ? Peut-on améliorer cette compréhension ? La masse du soleil détermine la gravité γ en fonction de la distance R au centre du soleil : $\gamma = 1{,}33.10^{20} / R^2$ m/s^2

Pour $R_1 = 696.10^6$ m (surface photosphère), on a : $\gamma = 274$ m/s^2

$R_2 = 698.10^6$ m (transition couronne), on a : $\gamma = 272$ m/s^2

$R_3 = 1000.10^6$ m (moyenne couronne), on a : $\gamma = 133$ m/s^2

Hypothèse : lorsque le libre parcours moyen des molécules gazeuses devient assez grand, approchant le rayon de l'astre, par suite de la baisse de la pression en s'éloignant de l'astre, la gravité retient alors les molécules moins chaudes (moins rapides), ce qui sélectionne dans l'atmosphère supérieure à très basse pression les molécules plus rapides près de la vitesse de satellisation, donc à température très élevée. Un flux de fuite dans l'espace s'établit, en relation avec le flux d'alimentation de cette zone gazeuse très basse pression en atomes très chauds, (ce qui fournit le vent solaire).

Du côté de la couronne, la faible densité en hydrogène a été évaluée autour de 10^{-9} g/m^3, ou 1g/km^3 , soit 10^{14} à 10^{16} atomes/m^3, ou 0,2 à 10.10^{-9} g/m^3 *(ref 1 ; 2a)*. Pour une température $T \approx 10^6$ K, l'hydrogène serait atomique H° et largement ionisé $H^+(+e^-)$. Si on l'assimile à un **gaz parfait** on aurait pour $R_2 = 698.10^6$m près de la transition chromosphérique une pression **p = rT/v** pour une mole H° de masse molaire 1 g dans le volume v = 10^9 m^3 à T =10^6 K :

$p_2 \approx (8{,}3$ j/mol.K$).(10^6$K$) \,/\, (10^9$ m^3/mol) = **$8{,}3.10^{-3}$** Pascal ≈ **8.10^{-8}** bar.

Du côté de la chromosphère, le même gaz à 8000 K (soit 120 fois moins) serait à pression **assez voisine**, car la transition est abrupte, sur moins de 100 km *(ref 2i),* avec une densité toujours faible , mais au moins 120 fois plus grande soit 120 g/km^3 ou **$0{,}12.10^{-6}$** kg/m^3.

v = rT / p = **$8{,}3.8000 / 8{,}3.10^{-3} = 8.10^6$** m^3 (pour 1 g d'hydrogène atomique)

Les parcours libres moyens L, près de la **transition** entre chromosphère et couronne sont alors évalués en négligeant le gaz d'électrons**. D'une part en admettant, côté couronne** (10^6 K) :

pour 1 g de H, (proton avec un rayon atomique **r** de 0,01 Å =10^{-12} m distance d'interaction notable) dans1 km^3 **: L** = 10^9/ N π **r²** = 10^9 m^3.g^{-1} / (6.10^{23}. 3,14.10^{-24} m^2.g^{-1}) m ≈ 5.10^8 m = 500 000 km suffisant pour faire des parties d'orbite de 4,4.10^6 km.

D'autre part, en admettant, côté chromosphère (moins de 8000 K), les atomes H° peu ionisés, avec un rayon admissible d'interaction de 0,5 Å = 0,5.10^{-10}m **:** pour 1 Mole **:**

L = 8.10^6 / (6.10^{23} . 3,14 . 0,25 .10^{-20}) m ≈ 1600 m répartissant l'énergie, mais étant insuffisant pour la moindre orbite autour du soleil. Or la vitesse orbitale de satellisation V au niveau de la couronne entre R=700.10^6 m et R=1000.10^6 m se situe entre 440 km/s et 360 km/s qui correspondent à des orbites de 10000 à 17000 secondes environ . Ainsi une partie des atomes H^+ qui ont des vitesses V de 600 à 360 km/s, c'est à dire une température T = M.V^2 / (6 . 8300) = 7.10^6 K à 2,6.10^6 K environ, peuvent orbiter des centaines d'heures sans retomber sur le soleil, et maintenir la haute température. Par contre ceux qui ont une vitesse supérieure à 600 km/s peuvent s'échapper et constituer le vent solaire. **Il en résulte que la gravité est assez forte pour retenir sélectivement dans la chromosphère le gaz moins chaud, et alimenter la couronne en gaz très chaud, créant une quasi discontinuité de densité et température.**

Ce flux de gaz très chaud peut être évalué supérieur au flux de vent solaire, lui-même supérieur au flux de H° probable mesuré au niveau de la terre *(ref 2h ; 3)* de 1 à 4 particules/cm^3 à 500-700 km/s qui font globalement 0,25.10^8 kg/s à 1.10^8 kg/s dont l'énergie cinétique serait <.10^{19} W auxquels on peut ajouter l'énergie potentielle depuis la chromosphère soit <10^{19} W. Le total de la puissance consommée par le vent solaire est apparemment ≈ 10^{19} W, environ, ce qui représente moins du millionième de la puissance rayonnée par le soleil P = 3,8.10^{26} W (constante solaire). En comparaison, la puissance rayonnée X et UV de longueur d'onde 1 à 100 nm atteint à peine près de la terre 1 mW/m^2 soit globalement 3.10^{20} W en fond continu, et lors des périodes de quelques minutes de forte activité 1 à 5 .10^{23} W *(ref 1 : fig 2 ; 2f)*. Ces émissions proviennent surtout de la chromosphère et de la basse couronne. Les photons X de 1 nm correspondent à 1200 eV soit T ≈ 5.10^6 K pour la température d'émission, et les UV de 100 nm d'énergie 12 eV à T ≈ 50000 K, températures compatibles avec celles évaluées. D'autre part, la concentration spatiale du vent solaire recalculée au niveau de la couronne au rayon le plus chaud vers 0,7.10^6 km serait (1 à 4 atome/cm^3).(150 / 0,7)^2 soit 60 000 à 250 000 at/cm^3 soit encore 60 à 250.10^{18} at/km^3 ou 0,0001 à 0,00025 g/km^3 ; cette densité est une petite fraction de la densité de la couronne, puisque c'est la fraction qui a l'energie de s'échapper dans l'espace .

Les pressions gazeuses dans l'atmosphère solaire peuvent être calculées en admettant un équilibre suffisant des gaz et en se basant sur la valeur de 0,008 Pascal calculée pour la basse couronne. Entre R_2 = 698.10^6 m et R_3 = 1000.10^6 m pour γ autour de 200 m/s^2 en négligeant l'hélium avec T = 2.10^6 K on aurait **dans la couronne :**

Ln (p_2 / p_3) = γ M(R_3 - R_2) / (1000.8,3.T) = 200.300.10^6 / (8300.2.10^6) ≈ 3,5 ; d'où p_2/p_3 = 33. Alors p_3= 0,008/ 33 = 2,5.10^{-4} Pa , encore notable. Ainsi la grande extension de la couronne est possible grace à la température très élevée, et donc la faible densité, malgré la forte gravité.

D'autre part, **du côté chromosphère** $R_2-R_1 = 2.10^6$ m et $\gamma = 272$ m/s^2 avec T moyenne ≈ 5000 K et M = 1,23 (compte tenu de 25 % d'hélium) :

$Ln(p_1/p_2) \approx 272 . 1,23. 2. 10^6 / (8300.5000) \approx 16$ d'où $p_1/p_2 \approx 9.10^6$. D'où $p_1 \approx 8.10^{-3}. 9.10^6 \approx 70000$ Pa $\approx$ 0,7 bar qui est déjà assez forte pour causer une opacité au delà de 10000 km. de trajet optique (surface de la.photosphère). De même, pour la transition ΔR=100km, et p''/p'<< 2,2..

La photosphère « en surface » à 5000 K environ aurait pour 1,23 g (H° et He) un volume v = 8,3 . 5000 / 70000 ≈0,6 m^3/mol c'est-à-dire 2,1 g/m^3 . Cette densité est encore faible comparée à 1,4 10^6 g/m^3 moyenne du soleil de rayon R_1 ou 100 à 150 .10^6 g/m^3 calculée dans le noyau du soleil. Cependant cette densité approchée est suffisante pour assurer une opacité optique à travers plus de 20000 km de trajet (à 100 km sous le bord du disque solaire dans le gaz à près de 5000 K,) ce qui définit le rayon R_1 de la photosphère, observable à 100 km près. En réalité la masse gazeuse présente une continuité d'état du gaz : il n'y a pas de surface définie de l'astre. Cela est aussi la cause des température et luminance plus faibles du disque solaire près des bords. En effet la zone centrale du disque comporte une part de rayonnement émis en profondeur de 100 à 10000 km par du gaz plus chaud que 6000 K ce qui explique une température moyenne apparente de 5780 K environ par soleil calme.

La question reste posée de l'alimentation en énergie du gaz de la couronne solaire. La possibilité décrite comporte une contribution mécanique et thermique du gaz de la couche convective : les granules de la photosphère montrent l'existence de colonnes de convection fluctuantes de largeur 1000 à 10 000 km , et de profondeur probable au moins 50 000 km (à 200 000 km ?) La température moyenne très hétérogène croissant de 6000 à ? 10^6 K vers R = 600.10^6 m environ, ou 2.10^6 K vers R = 400.10^6 m (*ref 2a*), tandis que la pression croîtrait de p_1 = 70 000 Pa, à plus de 10^9 Pa, la densité croissant de 0,002 kg/m^3 à 1 kg/m^3 environ. Cette forte variation de densité avec la profondeur, la pression et la température alimente la convection : elle peut être modélisée avec une fonction d'état F(p,v,T) difficile à déterminer en laboratoire, compliquée par la composition du plasma en H°, H^+, He (et autres atomes lourds ?) et le refroidissement par rayonnement près de la photosphère. Il est vraisemblable que des instabilités et turbulences dans les colonnes de convection apparaissent continuellement causant les éruptions et sursauts plus ou moins violents, et aussi en permanence sous forme de bulles de 10 à 300 km (?), de dimension peu visible, qui causent le bouillonnement de la photosphère et de la chromosphère, et alimente les **« spicules »** ***(ref 2d)*** **: leur contenu en gaz de température très élevée, grâce à leur hétérogénéité thermique, peut fournir l'énergie du gaz coronal.** Cela représente bien moins de 10^{-4} fois la puissance rayonnée globalement par le soleil (difficile à distinguer par spectroscopie).

Les « ondes de Moreton » ainsi que les manifestations électromagnétiques **« ondes d'Alfven »** leur sont sans doute liées et partagent une part du transport d'énergie dont l'évaluation reste à préciser (*ref 4 ;5*). **D'autres mécanismes hypothétiques** pourraient intervenir par l'intermédiaire de particules exotiques *(ref 1)*..

Dans le cas de l'atmosphère terrestre, entre 10 et 110 km d'altitude (M = 28,8 g/mol et T = 200 K en moyenne) la pression chute de 0,25 .10^5 Pa à 10^{-3} Pa. Au dessus de 160 km avec T autour de 600 K l'hydrogène devient important, surtout H° et H_2 , mais le libre parcours moléculaire reste limité (quelques km ?). En fait l'hydrogène provient surtout du vent solaire et les H^+ peuvent être encore présents après le piégeage magnétique terrestre : les molécules de vitesse supérieure à 7,8 km/s sont partiellement satellisables (ceinture de VanAllen); leur température serait : T = M . V^2 / (6 .8,3) soit 1200 à 2400 K. Des mesures de 600 à 700 K ont été observées au dessus de 160 km par soleil calme, mais par soleil actif le flux solaire a permis d'observer 1200 à 1800 K à grande hauteur ce qui est assez compatible avec le piégeage du gaz par la gravité.

En conclusion, le rôle de la gravité sur l'atmosphère solaire semble être essentiel pour comprendre le niveau de température de la couronne solaire, sa permanence, la densité gazeuse en altitude et l'alimentation du vent solaire. De même les températures terrestres à l'altitude de 100 à 200 km peuvent être dépendantes de ce mécanisme, qui doit affecter naturellement les hautes atmosphères des astres de gravité assez forte (Vénus, Jupiter).

NICCO . A. - Dolus – 16/08/2008 -5/08/2009.

ADDITIF- Les publications récentes de De Pontieu et al *(Science2011,DOI..10.1126/) (Science .11974738/)* ainsi que Nancy Atkinson *(ref 7)*(Previously unseen Plasma Jets ; Universe Today, Jan 6 2011) *http://www.universetoday.com/82266/previously-unseen-super-hot-plasma-jets-heat-the-suns-corona/* paraissent en accord avec les évaluations faites suivant les hypothèses présentées. De même les études spectroscopiques très nombreuses ont montré que les répartitions de rayonnements et de températures détectent difficilement la fraction de molécules très chaudes dans les jets (spicules) du bouillonnement permanent, mais paraissent cohérentes avec le mécanisme de sélection par la gravité (Klaus Wilhelm et al, Space Rev (2007)133 : 103-179 ;*(DOI 10.1007/s 11214-007-9285-0)*. Des vues du soleil prises avec la raie de l'hydrogène ,suite à des éruptions, semblent montrer des phases d'enrichissement de la couronne controlées par la gravité suivant l'hypothèse décrite qui invoque la satellisation individuelle de particules du gaz. : photographie par le satellite SOHO ? *(ref 6).***Le rôle primordial de la gravité dans la selection et la satellisation des particules très chaudes paraît bien être essentiel.** D'autre part, les champs magnetiques solaires doivent causer une organisation du mouvement des H+ et des e- ,qui retombent en continu sur le soleil, après leur projection par le bouillonnement permanent . Ainsi les pôles solaires, et les taches sombres lors des periodes plus actives, montreraient une température plus basse, par suite d'un flux retombant partiellement refroidi par rayonnement. En outre les charges electriques de ce flux retombant voient leurs trajectoires spiraler dans le sens qui accroit le champ magnétique et ralentit la chute . D'autre part il est normal que les particules qui sont à des distances croissantes de l'astre soient sélectionnées avec des énergies, des vitesses supérieures, **ce qui concorde avec les observations du vent solaire qui semble « accélèrer » en s'éloignant de l'astre** : le flux global doit diminuer avec l'éloignement du soleil par suite de la sélection énergétique.

NICCO . A --Béthune-21/5/2011. Voir aussi Ref 8 ; 2013.

(1) K. ZIOUTAS - Courier CERN juin 2008-48 (19-21) citations
http://cerncourier.com/cws/article/cern/34259

(2) Internet-WIKIPEDIA
(a) soleil ; (b) photosphère ; (c) rayonnement ; (d) chromosphère ; (e) couronne solaire ; (f) éruption solaire ; (g) sursaut solaire ; (h) vent solaire ; (i) *transition région; spicules.*

(3) http://www.swpc.noaa.gov/ace/mag_swepam_24h.html" target=?

(4) *http://solar.physics.montana.edu/nuggets/2002/O2O2O8.html*

(5) DB Jess et al 2009 Science 323 ,1582

(6) http://system.solaire.free.fr/soleil.htm

(7) http://www.universetoday.com/82266/previously-unseen-super-hot-plasma-jets-heat-the-suns-corona/

(8) Wikipedia Couronne solaire,2013,http://fr.wikipedia.org/wiki/Couronne_solaire Ref M.Vail
http://www.journaldelascience.fr/espace/articles/soleil-mystere-chauffage-coronal-passe-detre-resolu-3280 Ces travaux ont été publiés le 2 octobre 2013 dans la revue The Astrophysical Journal sous le titre « Observational Quantification of the Energy Dissipated by Alfvén Waves in a Polar Coronal Hole: Evidence that Waves Drive the Fast Solar Wind »(arXiv:1204.5809.v1..26Apr2012)

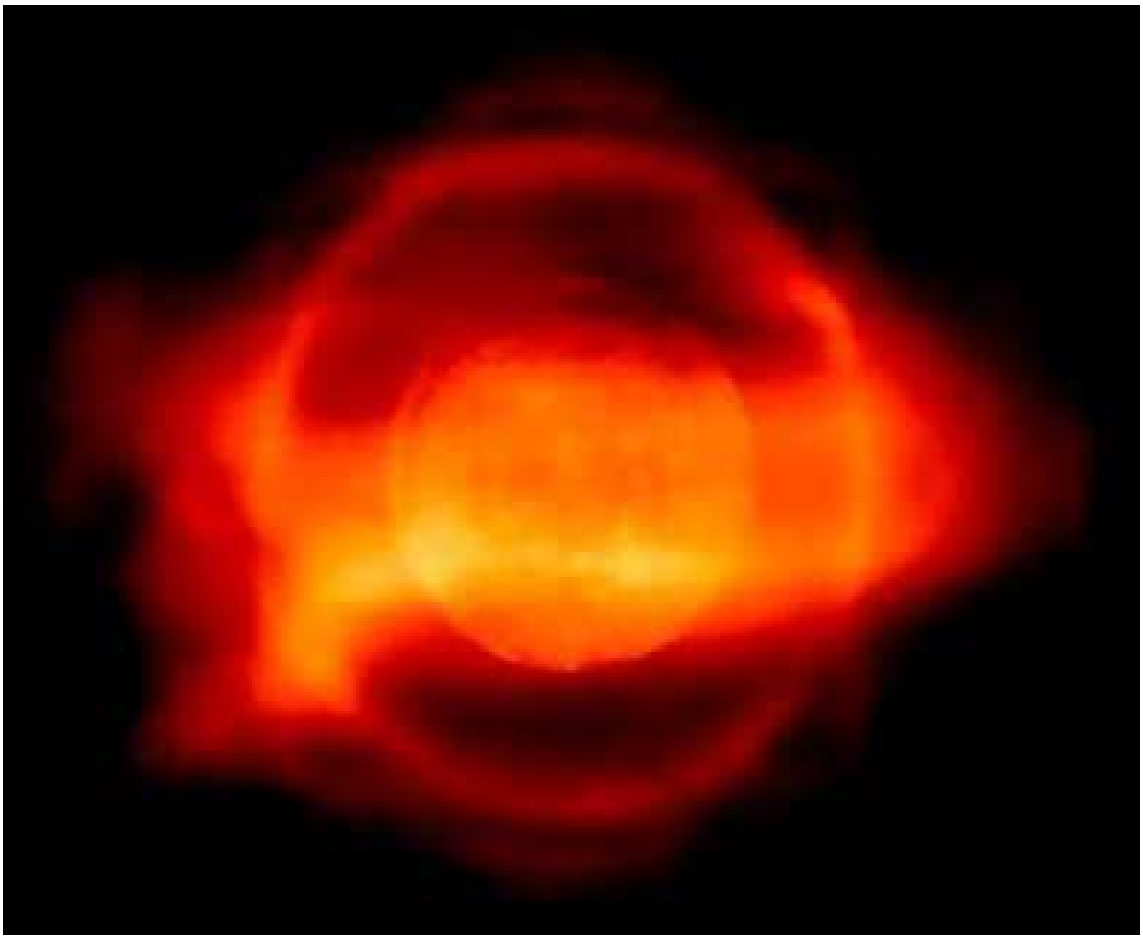

Figure 1 : Vue du satellite SOHO après une éruption violente, laissant apparaître une satellisation des gaz à haute température.

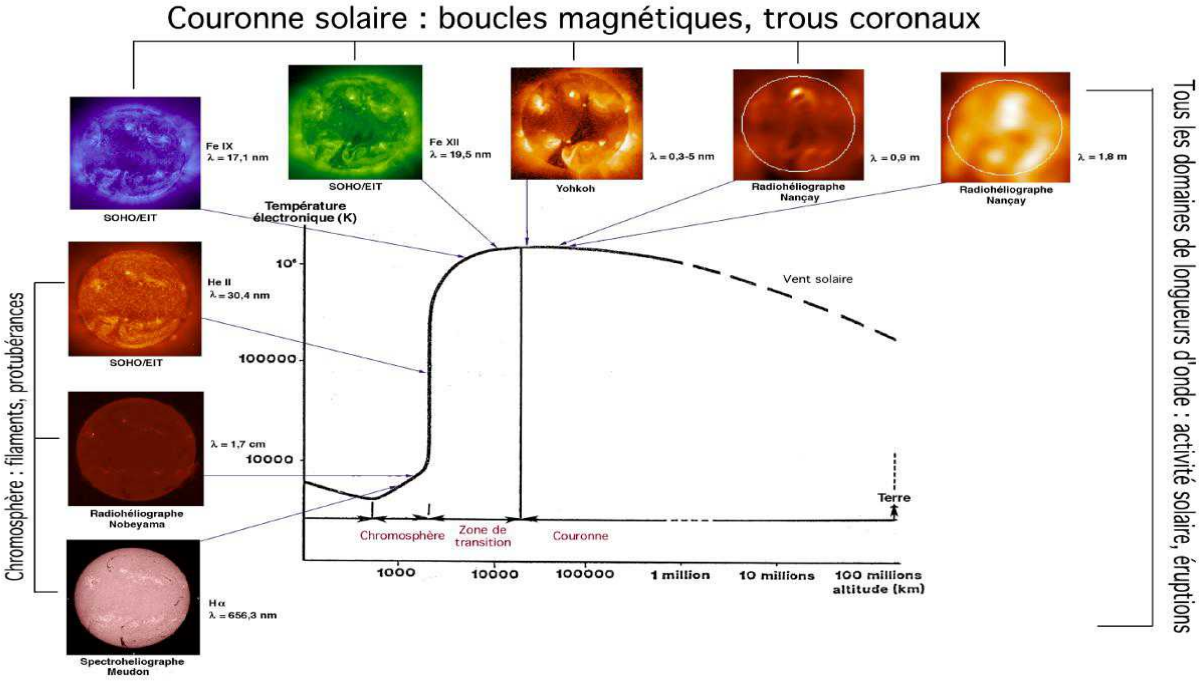

Figure 2 : Citation de Laurent Sacco,24 juin 2007 (Futura Science , crédit Lesia) : le chauffage du gaz coronal est attribué aux « ondes sonores » émises par le soleil, ce qui est hypothetique.

Références récentes

http://www.huffingtonpost.fr/2015/02/14/soleil-nasa-espace-video_n_6683040.html?utm_hp_ref=fr-science vues d'éruptions etc remarquables ; seconde video avec vue continue du soleil ; peu de commentaire !

http://www.nature.com/nature/journal/v522/n7555/full/nature14478.html Interpretation du transport d'energie à la couronne solaire par les champs magnetiques emergeant de la surface solaire. Température et densité avec la distance au soleil (en accord).

Small-scale dynamo magnetism as the driver for heating the solar atmosphere

- Tahar Amari, Jean-François Luciani & Jean-Jacques Aly
- Affiliations Contributions Corresponding author

Nature 522, 188–191 (11 June 2015) doi:10.1038/nature14478
Received 20 December 2014/ Accepted 15 April 2015/ Published online 10 June 2015

https://en.wikipedia.org/wiki/Corona description et discussion de quelques interprétations ; en fin des jets très chauds sont cités comme alimentant la couronne.

http://www.nature.com/nature/journal/v475/n7357/abs/nature10235.html Essai de comprehension de la température de la couronne solaire. Références Depontieu.

http://www.universetoday.com/82266/previously-unseen-super-hot-plasma-jets-heat-the-suns-corona/ Observations peu explicites , et discussions vagues.

De Pontieu, B. *et al.* The origin of hot coronal plasma. Science 331, 55–58 (2011)
De Pontieu, B., McIntosh, S. W., Hansteen, V. H. & Schrijver, C. J. Observing the roots of solar coronal heating—in the chromosphere. Astrophys. J. 701, L1–L6 (2009)

https://arxiv.org/pdf/1606.06132 de C Beck - 2016- · R. Rezaei 2 · K. G. Puschmann 3 · Fabbian 4,5,6D. Solar Physics. *arXiv*:*1606.06132*v1 [astro-ph.SR] 20 Jun 2016. DOI: 10.1007/•••••-Spectroscopy at the solar limb: II. Spectroscopy at the solar limb: II. Are spicules heated to coronal temperature ?

Suite aux aux remarques sur la temperature de la couronne solaire et à l'absence d'explication sur l'absorption d'energie qui procure cette temperature. L'article récent Bertolucci et al 2017 DarkUniverse **17,** 13.cité par Courrier CERN octo 2017 reprend:

"The origin of solar flares, powerful bursts of radiation appearing as sudden flashes of light, has puzzled astrophysicists for more than a century. The temperature of the Sun's corona measuring several times hotter than its surface, is also a long standing enigma."

L'article avance une raison invoquant un flux spatial anisotrope de matière noire spatiale pouvant être une cause de ces émissions solaires irrégulières. Cependant l'absorption intense de particules "wimps" ou autres par le gaz coronal n'est pas compréhensible.