

MISTERE LONGEVIVE DIN ASTROFIZICĂ: ATMOSFERA SOLARĂ, CORONIUL ȘI ÎNCĂLZIREA COROANEI SOLARE

Alin PARASCHIV*

Key Words: Sun atmosphere - photosphere, chromosphere, corona; Sun - coronal heating.

Soarele a fost ocazional privit de unii astronomi ca un inconvenient în studiul obiectelor astronomice. Dar oare putem studia obiecte astronomice fără o cunoaștere temeinică a Soarelui? Fizica solară are ca scop studierea fenomenelor și a proprietăților ce descriu modul în care stelele, soarele în particular, se manifestă. Două mari ramuri se desprind. Prima se concentrează pe studiul proceselor ce au loc în interiorul stelei: fuziune stelară, transport radiativ, procese convective, generarea și întreținerea de câmp magnetic etc. Pornind de la studiul soarelui s-au putut dezvolta majoritatea modelelor și teoriilor folosite în studiul astrofizicii moderne, și nu numai. De exemplu, formarea și evoluția stelară, prima confirmare experimentală a validității teoriei relativității restrânse etc. A doua ramură este reprezentată de studiul atmosferei solare și, prin extensie, o modelare principală a atmosferelor stelare. Pe baza unor parametri și proprietăți fizice, atmosfera soarelui a fost divizată în 4 zone distincte și relativ concentrice: Fotosfera, Cromosfera, Regiunea de Tranziție și Coroana.

Fotosfera, denumită și sfera luminoasă, este primul strat al atmosferei solare, extinzându-se până la 400-500 km deasupra suprafeței soarelui. Acest strat este definit de spectrul de radiație luminoasă de tip corp negru emisă de Soare, este caracterizat de temperaturi de aproximativ 6000 K (Kelvin; $1^{\circ}\text{C} = -273\text{K}$), și din punct de vedere vizual reprezintă suprafața soarelui și structurile caracteristice acestuia. Cele mai importante structuri fotosferice sunt binecunoscutele pete solare, discutate în numărul anterior al revistei. Pornind de la studiul curbelor de lumină fotosferică, rezultate din tranzite istorice ale planetelelor Mercur și Venus, s-au pus bazele conceptuale folosite în studiul stelelor variabile și, foarte recent, ale tranzitelor exoplanetelor.

Cromosfera, denumită și sfera colorată, este al doilea strat al atmosferei solare, având o grosime de aproximativ 1500 km. Emisia luminii din acest strat nu provine din procese continue de tip corp negru prezente în Fotosferă. Predominantă este lumina emisă de diverși atomi parțial ionizați care populează Cromosfera. În practică, fiecare tip de atom emite lumină într-o singură lungime de undă, altfel spus, într-o singură culoare. Din această cauză observarea cromosferei se poate realiza doar cu metode specifice de filtrare a luminii. Temperaturile deduse cresc ușor în cromosferă până la valori de aproximativ 20.000 K. Principalele structuri vizibile în culorile cromosferei sunt filamentele întunecate ancorate în regiuni de câmp magnetic intens. Aceste filamente erup ocazional, dând naștere marilor ejeții de masă coronale ce pot influența viața terestră. Totodată, un mare interes este concentrat în studiul oricăror fenomene de tip magnetism

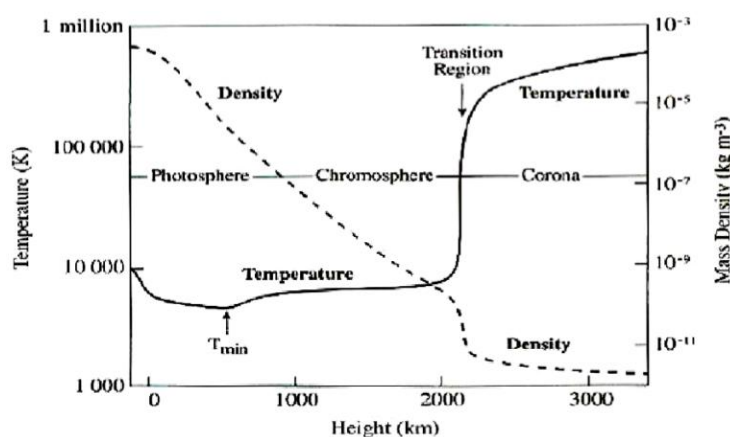


Figura nr. 1 Temperatura și densitatea plasmei din straturile atmosferei solare [Lang 2001].

* Membru, Astroclubul "Călin Popovici". Contact: alinpemail-ast@yahoo.com

solar, cu scopul de a valida și verifica principiile și viabilitatea noilor generații de reactoare cu fuziune nucleară.

Coroana Solară este pătura externă a atmosferei Soarelui, extinzându-se până în spațiul interplanetar. Este o zonă foarte puțin densă, care se evidențiază printr-un proces de emisie de lumină similar cu cel cromosferic, dar care implică atomi puternic sau chiar total ionizați ce populează acest strat. Instinctual, ne-am aștepta ca temperatura să scadă pe măsură ce ne depărtăm de Fotosferă. În schimb, măsurătorile descriu un efect cu totul neașteptat. Dacă la nivelul cromosferei, temperaturile sunt de ordinul a aproximativ 20.000 K, la nivelul Coroanei acestea ajung și la 10.000.000 K. Acest fenomen de încălzire se manifestă într-o zonă de interfață dintre Cromosferă și Coroană, denumită Regiunea de Tranziție. Această regiune este foarte neregulată și subțire, având o grosime de maxim 200-300 km. Deci, cum se poate ca temperatura atmosferei solare să crească de 1000 ori pe o distanță așa de scurtă? Mai ales în condițiile în care intuiția ne dictează opusul? Astăzi, nu știm! Există multiple idei și scenarii care au fost propuse de-a lungul timpului, dar nici unul nu a putut reproduce fenomenul în mod cantitativ. O privire de ansamblu a variației temperaturii și densității plasmei solare de-a lungul straturilor atmosferei solare este redată în Figura 1.

Istoric, singura metodă prin care s-a observat foarte puțin densa Coroană solară a fost în timpul eclipselor de Soare, când lumina fotosferică este blocată. Majoritatea descrierilor istorice ale eclipselor evidențiază "limbi de foc" sau "iluminare extinsă" în jurul Soarelui. Figura 2, porțiunea exterioară surprinde coroana în timpul unei eclipse. Totuși nu se credea că Coroana reprezintă o structură diferită față de discul solar. În timpuri mai moderne, astronomii au încercat să explice existența acestor structuri, inițial presupunându-se că Coroana este o simplă iluzie optică sau

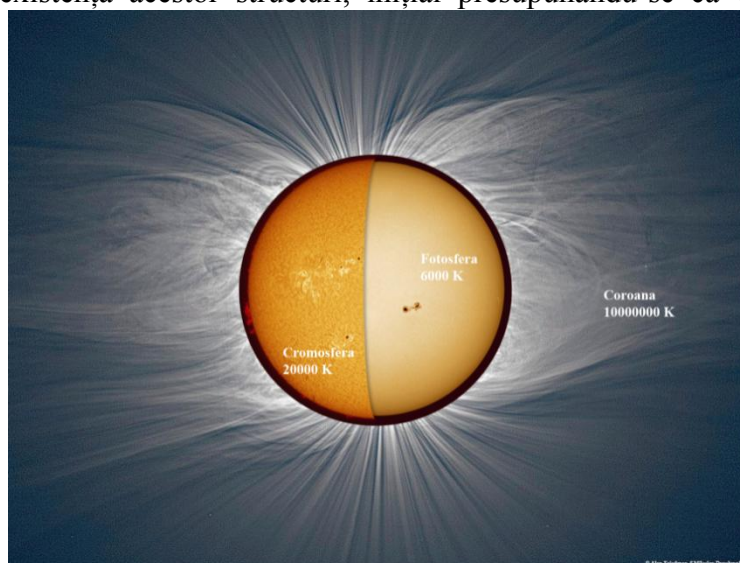


Figura nr. 2 *Straturile principale ale atmosferei solare și temperaturi tipice întâlnite. La această scală, regiunea de tranziție dintre Cromosferă și Coroană este prea subțire pentru a fi distinsă.*

observațiile acestora sunt de fapt aberații optice ale atmosferei terestre. În secolul XIX s-au dezvoltat tehnici spectroscopice care au fost aplicate observațiilor solare. S-au descoperit emisii solare Coronale și Cromosferice foarte puternice în liniile de emisie atomice ale Hidrogenului ($H\alpha$), Calciului ($Ca II$) etc. dar și o serie de emisii noi, pe care spectroscopia nu a reușit să le identifice la vremea respectivă. Aceste observații spectroscopice au dus la revizuirea interpretării, stabilindu-se bazele studiului atmosferei solare cunoscută la acea vreme doar sub denumirea de "Coroană". Astăzi cunoaștem că aceste linii de emisie aparțin atât Cromosferei cât și Coroanei. Noile linii de emisie atomică descoperite nu au putut fi asociate nici unui element chimic

cunoscut la acea vreme. Aceste observații s-au dovedit foarte problematice pentru comunitatea astronomică de la acea vreme deoarece nu se știa cum aceste linii de emisie pot exista. S-a creat o problemă care a rămas nerezolvată pentru aproape un secol. Un consens a fost, totuși, realizat, prin introducerea unui nou element chimic numit "coroniu", presupunându-se că acești ioni ar avea cel mult o temperatură fotosferică de 6000 K.

La începutul secolului XX s-a introdus un nou instrument solar, denumit coronograf, ce va fi folosit în combinație cu unelte spectroscopice. Coronograful produce o ocultație a discului solar (eclipsă artificială) ce elimină aproape în totalitate emisia fotosferică de tip corp negru, captând doar lumina provenită din straturile superioare ale atmosferei solare. S-au obținut spectre de emisie

neobișnuite pentru coroniul presupus. Deoarece încă nu se cunoștea originea și proprietățile fizice ale acestuia, aceste prime spectre coronale au rămas doar o curiozitate. Abia la mijlocul secolului al XX-lea dilema coroniului a putut fi rezolvată. S-a dovedit că aceste spectre provin de la așa-zisele tranziții atomice “interzise” ale atomilor de fier (FeX, FeXIV, etc.) din Coroană. Pentru ca aceste tranziții să existe, era necesară o temperatură a atomilor de ordinul a cel puțin 1.000.000 K.

Coroniul a dispărut, misterul a fost rezolvat... O nouă problemă mult mai complexă s-a ivit. Cum se poate încălzi Coroana până la asemenea temperaturi într-un mod atât de rapid și într-un interval spațial atât de mic? Totodată, dacă luăm în considerare totalitatea emisivității coronale, ar rezulta că aceasta ar trebui să se răcească în decursul a câtorva zile. În consecință, de unde provine energia necesară și cum se transportă aceasta? Undele Alfvén au fost propuse ca potențial răspuns. Acestea, teoretic, transportă energie dinspre straturile inferioare ale atmosferei către Coroană prin intermediul unei unde oscilatorii care se propagă prin și în direcția câmpurilor magnetice solare. În ultimele decade, descrierea analitică a acestor unde a fost foarte bine fundamentată iar numeroase semne indirecte ale existenței acestora au fost prezentate. Totuși, nici chiar cu tehnicile și cunoașterea curentă, o identificare directă a unei astfel de unde nu a putut fi realizată. În planul teoretic, modelarea scenariilor de încălzire coronală doar pe bază de unde Alfvén nu a putut oferi rezultate concludente. O teorie alternativă a încercat explicarea acestui fenomen eluziv folosind microerupții solare. Un astfel de scenariu presupune stocarea unor cantități uriașe de energie în interiorul structurilor magnetice ce se ridică de-a lungul tuturor straturilor atmosferei solare și eliberarea acestei energii în mod continuu prin procese de rearanjare la scară mică a câmpurilor magnetice solare, printr-un proces numit reconexiune magnetică. Fenomenul de reconexiune magnetică a fost descoperit experimental și, ulterior, dezvoltat teoretic tot datorită observațiilor solare. Modelarea pur teoretică a unui scenariu de încălzire coronală bazat pe microerupție a demonstrat validitatea acestei teorii. Totuși, observațional nu s-a putut contoriza o rată de manifestare a microerupțiilor suficient de mare pentru a satisface ipotezele rezultate din simulări.

În concluzie, nu putem, încă, explica în mod complet acest fenomen, nici chiar după 80 de ani de când a fost confirmat. Atât scenariul pe baza undelor Alfvén, cât și cel pe baza microerupțiilor s-au dovedit insuficiente, chiar dacă semne ale producerii acestor fenomene există. Diverse variațiuni ale celor două teorii sunt studiate astăzi. O idee propusă leagă scenariul microerupțiilor de spicule cromosferice eruptive care ar putea contribui semnificativ la transportul de energie între Cromosferă și Coroană și propune suprapunerea celor două mari modele menționate anterior, studiindu-se metodele prin care aceste două scenarii pot fi cuplate, ceea ce arată rezultate incipiente promițătoare, deși mai este drum lung până la dezvoltarea unui model coerent. Aceasta este Fizica Soarelui, o piatră de hotar esențială pentru studiul universului și, implicit, al vieții, o muză care își ascunde bine secretele, iar efortul depus pentru elucidarea acestora deschide întotdeauna noi mistere, mai complexe, mai enigmatice...

LONG LASTING MISTRIES OF ASTROPHYSICS: THE SOLAR ATMOSPHERE, CORONIUM, AND THE HEATING OF THE SOLAR CORONA

A historical overview of coronal observations and theoretical modelling of solar phenomena is presented with the aim of introducing the reader to the field of solar physics, its mysteries and its relations to other astrophysics areas of research. The concepts of solar atmosphere layers, and in particular the solar corona are explained. The historical developments on coronal observations are discussed starting from early eclipse observations, going through the estimation of coronal temperature and the discovery of coronal ion emission lines in the beginning of the 20th century, and finally ending with the most recent observations acquired by the solar missions. The coronal heating problem, one of the most outstanding and the longest lasting problem in astrophysics is described alongside with the current models and theories which try to explain it. The main two theoretical endeavours that try to explain coronal heating, namely Alfvén wave heating and micro/nano flaring and recent discoveries focusing on the science and research developed, are summarised.