

Vincze István

A LIMB-EFFEKTUS KUTATÁSÁNAK EGY ÉVTIZEDE

1. Bevezetés

Ebben az írásban a limb-effektussal kapcsolatos kutatásaim tízéves periódusát szeretném röviden bemutatni.

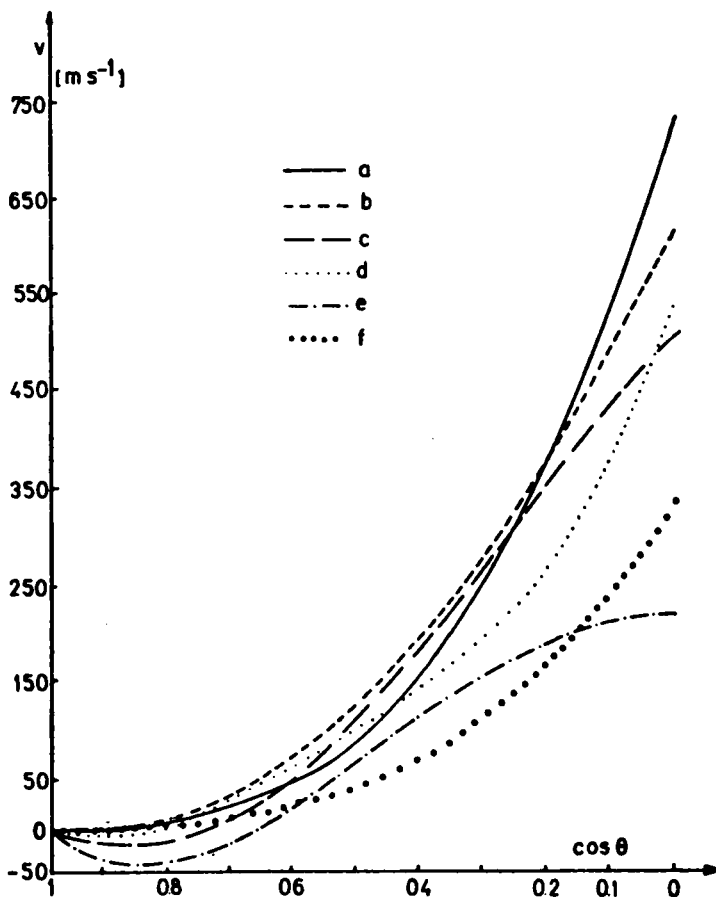
Véletlenül, vagy belső megsejtésemnek köszönve a limb-effektus kutatásának legutóbbi reneszánsza kezdetén a Nap légköréből származó színeképvonalak hullámhosszúságára és profiljára kiható atomi szinten történő részecskeütközések problémáját kezdtem kutatni. Így a frissen kapott eredményeimmel, azonnal, másokat megelőzve, be tudtam kapcsolódni a limb-effektus kutatásában felmerülő problémákba.

A limb-effektus történetéből

A limb-effektusról először 1907-ben Halm jelentetett meg cikket az *Astronomische Nachrichten* című folyóirat 173. számában. Halm már 1901-ben megkezdte nagyszabású megfigyelési programját, amelyben a napkorong különböző pontjaiban mért színeképvonalak Doppler-eltolódásából a Nap tengely körüli forgásának sebességét tervezte követni egy napcikluson (kb. 11 év) keresztül. A forgási sebesség meghatározásához két, vasatomoktól származó, színeképvonal hullámhosszúságának változását mérte. A mérési eredmények elemzésekor észrevette, hogy a napkorong peremén (limb) a színeképvonalak hullámhosszúsága átlagban 1.2 pm-mel nagyobb (vöröseltolódás) a napkorong középpontjában mért értékektől. Ez az eredmény nagyon meglephette Halmot, mert az 1907-es cikkében „a Fraunhofer-vonalak egy ismeretlen tulajdonságáról” ír. Halm azt is észrevette, hogy a színeképvonalak hullámhosszúsága fokozatosan nő a napkorong pereme felé haladva. A kutatók e jelenséget később limb-effektusnak nevezték el, utalva az elnevezéssel is arra, hogy a napkorong peremén figyelték meg először.

Halm e jelenség magyarázatára két hipotézist is felállított. Az első szerint a színeképvonal hullámhosszúságának változását a Napból radiáli-

san kiáramló gázból származó fény Doppler-effektusa okozza. Ez a hipotézis nem volt összeegyeztethető azzal a mérési eredménnyel, amely szerint a napkorong peremén mért hullámhosszúság a laboratóriumi értékhez képest vöröseltolódást mutat. Itt ugyanis a radiális sebesség látóirányú komponense nulla, tehát nincs Doppler-hatás. A második hipotézis szerint a limb-effektust a napkorong pereme felé növekvő effektív gáznyomás okozza. Halm erre vonatkozó elméleti számításai megegyeztek a mért értékekkel, így ezt a hipotézist vélte helyesnek. Hamarosan kiderült, hogy ez a megegyezés teljesen véletlenszerű volt. Halm számításaiban, ugyanis, jóval túlbecsülte a Napon uralkodó nyomás értékét.



1. ábra. Az egyes kutatók által mért különböző színekvonalak limb-effektusai:

- a - Howard és társai (1980), Fe I 525.0 nm
- b - Plaskett (1973), több Fe I vonal 630 nm
- c - Bruning (1981), Fe I 525.0 nm
- d - Kubičela és társai (1985), Fe I 630.25 nm
- e - Bruning (1981), Fe I 557.6 nm
- f - Howard és Harvey (1970), Fe I 525.0 nm

Einstein általános relativitáselmélete új fordulatot hozott a limb-effektus értelmezésében. Az elmélet szerint, ha egy fényforrás gravitációs térben van, akkor az innen származó foton energiát veszít, ami frekvenciacsökkenésben nyilvánul meg, azaz a színképvonal a vörös felé tolódik el. Ha a napkorong középpontjában mért színképvonalak hullámhosszúságát a gravitációs vöröseltolódás értékével korrigáljuk, azt kapjuk, hogy a színképvonalak a színkép kék tartománya felé tolódnak el, nem pedig a vörös felé, ahogy addig hitték. Tehát a limb-effektus lényegében abból áll, hogy a napkorong középpontjától a pereme felé a kékeltolódás csökken és a korong peremén nulla lesz. Ennek alapján St. John 1928-ban a limb-effektust, Halm első hipotézisének részletesebb kidolgozása után a naplégkör alsó rétegeiben történő radiális irányú anyagkiáramlással magyarázta. Hamarosan kiderült, hogy ez az elmélet sem tudja a mérési eredményeket teljesen megmagyarázni.

A 30-as évektől kezdve a limb-effektus körüli megoldatlan problémák nagyon megszorodtak. A kutatók megállapították, hogy a Nap színképvonalainak fotometrikus görbéje (vonalprofil) aszimmetrikus, és, hogy ez az aszimmetria a napkorong pereme felé változik akárcsak a vöröseltolódás. Ettől kezdve egyes kutatók a limb-effektus fogalmába a vonalprofil változását is beleértik.

Kiderült az is, hogy a limb-effektus mértéke függ a színképvonal erősségétől (Burns-effektus). A napkorong középpontjában az erősebb színképvonalak kékeltolódása kisebb, a nagyon erős színképvonalak esetében nulla is lehet, sőt átválthat vöröseltolódásba is. Egyes színképvonalak esetében nagyobb vöröseltolódást is mértek mint amit az általános relativitáselmélet előrelátott (szupergravitációs effektus). Vannak olyan színképvonalak is, amelyeknél a limb-effektus nem monoton növekvő függvénye a napkorong középpontjától mért távolságnak, hanem a 30–40 fok heliocentrikus szélegeknél minimuma van (1. ábra).

Hasonló változatosságot mutat a vonalprofil asszimmetriája is.

Ahogy gyűltek a limb-effektussal kapcsolatos adatok, mind több és több elmélet jelent meg annak magyarázatára. Egyes kutatók elméleteikben olyan messzire is elmentek, hogy a limb-effektusban addig ismeretlen, új fizikai folyamatok megnyilvánulási formáját vélték felfedezni.

A limb-effektus reneszánsza

Az 1980-as években, köszönve a számítástechnika óriási lehetőségeinek a limb-effektust elfogadható pontossággal lehetett szimulálni a Nap felszíne közelében történő konvektív energiaátvitel többparaméteres modellje alapján. Ez a modell a vonalprofil aszimmetriájának változásait is képes volt reprodukálni. És ekkor, nagyon logikusan, a tudományos kutatás minden szabálya szerint, a limb-effektust a Nap konvektív zónájának tanulmányozására kezdték használni. Más szóval elfogadták mint diagnosztikai metódust. A limb-effektus és a vonalprofil pontosabb megfigyelé-

sének és a modellezés finomításának alapján sok új adatot lehet megtudni a konvektív zónáról.

Hogy helyesen fel tudjuk mérni ennek jelentőségét, röviden összefoglalom a konvektív energiaátvitel szerepét a Napon, ill. a csillagokban.

A Nap magjában termelt termonukleáris energia nagy részét az elektromágneses hullámok, azaz a fotonok szállítják az égítést felszíne felé. Az energia csak egy kis hányadát viszik el a magban keletkezett neutrínók. Mivel a neutrínók majdnem akadálymentesen kijutnak a Nap felszínére, nincs semmilyen kihatásuk a Nap magfeletti rétegeire. A fotonok, amelyek a magot nagyenergiájú γ -sugárzás alakjában hagyják el, belépnek a mag felett elhelyezkedő, ún. sugárzási zónába. Itt az anyagi részecskék és a fotonok interakciójának köszönve az energiaszállítás hosszan tartó folyamata játszódik le. E folyamatban a fotonok lassan elvesztik energiájukat és a Nap felszíne felé haladva a γ -sugárzás helyett a röntgensugárzás, majd az ibolyántúli sugárzás veszi át az energiaszállítás fő szerepét.

A Napban kb. 200 Mm mélységben, az anyag állapotjelzői úgy alakulnak, hogy a kétszeresen, majd felszínhez közelebb az egyszeresen ionizált hélium atomok rekombinálnak, miközben fotonok alakjában energia szabadul fel, amelyet a sugárzás már nem tud teljesen elszállítani. Energiafelhalmozódás helyett egy másik energiasszállító mechanizmus lép színre: a konvekció. A Nap rétegét, amelyben a konvekció is szerepel mint energiaszállító, konvektív zónának nevezik.

A konvektív zónában lejátszódó fizikai folyamatok döntő hatással vannak a Nap külső rétegeire: a fotoszférára, a kromoszféra és a koronára, és részt vesznek a naptevékenység minden formájának kialakításában. A konvekció, mint energiaszállító, nagy mértékben kihat a Nap fejlődésére is. Nem csoda tehát, hogy a Nap konvektív zónájának kutatása évtizedek óta intenzíven folyik.

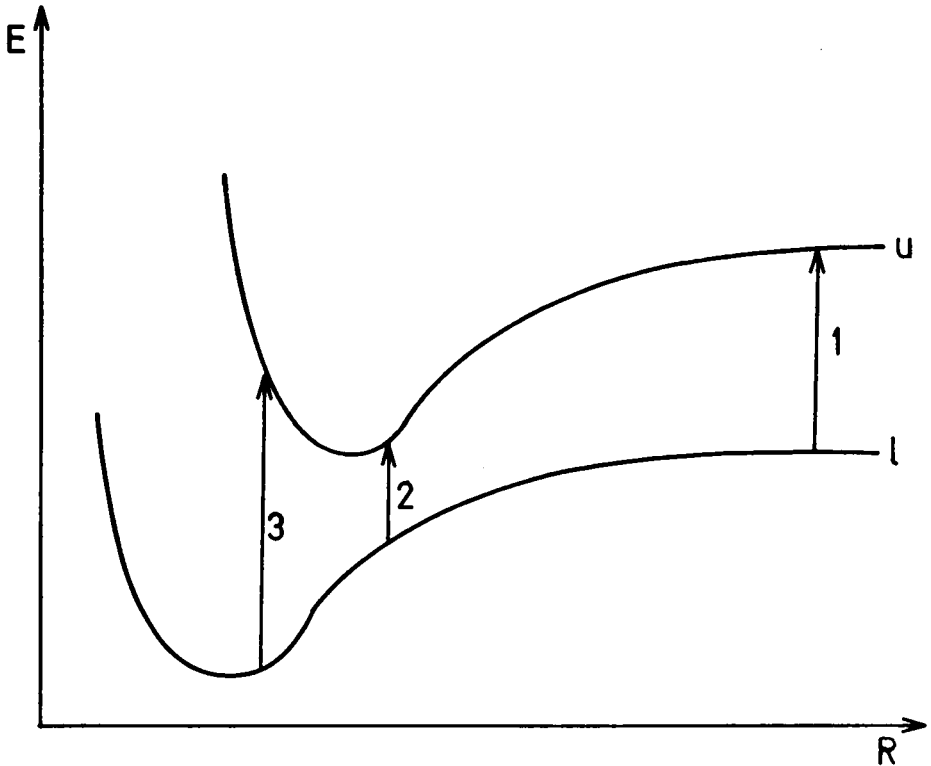
A limb-effektusra és a vonalprofilra támaszkodó diagnosztikai módszer első alkalommal nyújtott lehetőséget, hogy a Nap ill. a csillagok olyan rétegeiről kapjunk adatokat, amely az addigi megfigyelési módszerekkel hozzáférhetetlen volt számunkra, és csak elméleti megfontolások alapján tudtunk létezéséről.

A Nap- és csillagkonvekció tanulmányozásában tehát, az 1980-as években egy kisebb forradalom tört ki.

A kutatásba való bekapcsolódásom

Éppen e forradalom kezdetén, inkább véletlenül, kíváncsiságból, mintsem tudatosan, vizsgálni kezdtem az atomok egymás közötti ütközésének hatását a Nap színképvonalaira. T.i. a Nap és a csillagok légkörében a fényt elnyelő atomok (abszorberek) állandó kölcsönhatásban vannak a környező atomokkal, ionokkal, elektronokkal és molekulákkal (perturberek). A kölcsönhatás eredményeként megváltozik a színképvonal profilja és hullámhosszága. Nagyvonalakban ez úgy magyarázható meg, hogy a

környező részecskék hatására megváltoznak az abszorber energiaszintjei, aminek eredményeként az egyébként λ hullámhosszúságú fényt abszorbaló részecske, a Bohr-féle frekvenciafeltéll összhangban, egy bizonyos $\Delta\lambda$ értékkel eltolódott hullámhosszúságú fényt nyel el.



2. ábra. Az energiaszintek változása a távolság függvényében

A 2. ábrán, vázlatosan, az abszorber alsó (l) és felső (u) energiaszintjeinek változása látható a perturbor távolságától (R) függően. Az ábrán három különböző perturbortávolságnak megfelelő energiaátmenet van nyilakkal megjelölve. Mivel a megfelelő átmenethez tartozó hullámhosszúság fordítva arányos az energiaszintek távolságával, nyilvánvaló, hogy az elnyelt fény hullámhosszúsága az abszorber-perturbor közötti távolságtól függ.

Az abszorber energiaszintjeinek változását az abszorber-perturbor rendszer potenciális energiájának segítségével lehet meghatározni. A színkép-vonal hullámhosszúságának és profiljának változása végeredményben az abszorber és a perturbor közötti potenciális energiától és a perturborok

abszorber körüli térbeli eloszlásától, ill. az abszorber és környezetének fizikai tulajdonságától függ.

A színképvonalak a Nap és a csillagok légkörének széles tartományában formálódnak. Ebben a tartományban a hőmérséklet, a sűrűség, a nyomás és a plazma más állapotváltozói nagy mértékben változnak a helytől és időtől függően. E változásoknak köszönve az abszorberekre ható erők is változnak. Éppen ezért a Nap és a csillagok színképvonalainak eltolódása és asszimetriája többszöri integrációs folyamatá végeredményeként állnak elő. Mindezt matematikailag a numerikus integrálás módszerével végig lehet követni, és ki lehet számítani a színképvonal hullámhosszúságának eltolódását és a vonalprofil alakját a napkorong ill. a csillagkorong bármely pontjában (lásd a Függeléket).

A számítás legkritikusabb része az abszorber-perturber interakció potenciális energiájának meghatározása.

Kezdetben nagyon egyszerű számításokat végeztem a nátriumatom színképvonalaira vonatkozóan. Két nyomás okom volt arra, hogy a nátriumot válasszam. Először: a nátriumatomnak csak egy vegyértékelektronja van, amely egy kompakt atomtörzs elektromos terében, attól viszonylag távol mozog. Ilyen esetben az energianívókra vonatkozó számítások egyszerűbbek és pontosabbak. Másodsor: a nátriumatom színképvonalairól jó minőségű megfigyelésekkel rendelkezem. A számítási eredményeket tehát, viszonylag pontos megfigyelési adatokkal hasonlíthattam össze. Már az első eredmények is alátámasztották azt a feltételezésemet, hogy a részecskeütközések mérhető nagyságú hullámhosszúság-változást és vonalprofil-asszimetriát váltanak ki.

1982-ben Nordlund, egyike a modern konvektív elmélet megteremtőjének, nagy jövőt jósolt az akkoriban kialakuló konvektív modell felhasználását illetően a konvektív zóna diagnosztikájában. A diagnózis a megfigyelt és a modell alapján számított limb-effektus és vonalprofil összevetésén alapul. A modell paramétereit addig kell változtatni, míg a modell alapján számított limb-effektus és vonalprofil nem egyezik meg a megfigyelt értékekkel.

Attanulmányoztam a témával foglalkozó tudományos cikkeket, és meglepve vettem észre, hogy egy kutató sem említi az abszorber-perturber közötti ütközések hatását a limb-effektusra és a vonalprofilra.

Márpedig, ha ezek a hatások nem elhanyagolhatók, mint ahogy első közelítő számításaim mutatták, akkor téves diagnózist állítunk fel a Nap konvektív zónájáról. Meg kell tehát határozni a részecskeütközésektől származó limb-effektust és a vonalprofil asszimetriáját, és összevetni az így kapott értékeket a megfigyelési eredményekkel. Így fogalmaztam meg a feladatot, és öt évig dolgoztam nem csak a közvetlen megoldásán, hanem azon is, hogy eredményeim bekerüljenek a tudományos eszmecsere nemzetközi folyamába, ahol az érvek és ellenérvek alapján a tudományos megismerés részévé válhatnak.

Ahhoz, hogy a kutatásban biztos előrelépést tegyünk, nélkülözhetetlen, hogy részletesen megismerkedjünk a legújabb releváns tudományos ered-

ményekkel, amelyek a kiválasztott probléma megoldásának ismeretalapját képezik. Ezzel kapcsolatban egy részletre szeretnék kitérni, amely a kutatómunka jellemző velejárója.

Már említettem, hogy az abszorber-perturber interakció kiszámítása kutatásom legkritikusabb pontja volt. Tehát ezt a feladatot kellett minél pontosabban megoldani. A nátriumatom, mint abszorber, energianívóit a legnagyobb mértékben, a Nap és a csillagok atmoszférájában levő nagyszámú gerjesztetlen állapotú hidrogénatomok perturbálják. A nátrium- és hidrogénatom ütközésekor létrejött energiaváltozásokat pontosan nem lehet kiszámítani, hiszen a nátriumatom 11 elektronja és atommagja a hidrogénatom atommagjával és egy elektronjával együtt 14 tagú egymásra ható részecskekerendszert alkot. Szerencsére a lefontosabb részecske, amely feladatunk tárgyát képezi, a nátriumatom vegyérték elektronja, jó közelítésben, köszönve a nagy távolságának az atomtörzstől, kvázi-szabad részecskének tekinthető a kisméretű hidrogénatommal való ütközéskor. Így a feladat megoldására alkalmazható a Roueff által kifejlesztett elmélet. Az elméletet leíró képletek alapján megírtam a megfelelő komputer-programokat, amelynek egyik kimenő adata az egy atomra eső abszorpciós együtttható hullámhosszúságának, sűrűségtől és hőmérséklettől függő változása volt. Ennek abszolút értékére helyes megoldást kaptam, de az előjelet a Roueff által megadott elméleti levezetés alapján nem lehetett egyöntetűen meghatározni. Márpedig egyáltalán nem mindegy, hogy az abszorpciós együtttható alapján számolt színképvonal kék-, vagy vöröselölődést szenved-e az ütközések miatt.

A probléma többhónapi sikertelen megoldása után határoztam el, hogy Párizsba utazom, és Roueffal, az elmélet megalkotójával, személyesen találkozva megpróbálok választ kapni erre a kérdésre. A Csillagvizsgáló Tudományos Tanácsa helyesnek találta elhatározásomat, csak éppen pénzt nem tudott biztosítani erre az útra. A köztársasági kasszából sem kaptam pénzt, mert ahhoz egy jugoszláv-francia tudományos együttműködés keretén belül elfogadott projektumot kellett volna kifejlesztenem. Erre akkor nem volt időm. (Később több évi fáradozásomba került egy ilyen projektum megszervezése). Végül a „házitanács” úgy döntött, hogy turistaként Párizsba utazunk. Míg a feleségem Párizs gazdag kultúrtörténeti nevezetességeinek megtekintésében élvezett, addig én a meudoni csillagvizsgálóban a nátriumatom gerjesztett állapotban levő elektronjának a hidrogénatommal való ütközése közben történt energiavesztességéről vagy energiatöbbletéről igyekeztem minél többet megtudni. Az egyhetes párizsi tartózkodásunkkal mindketten nagyon elégedettek voltunk.

Hazatérve Párizsból a számításokat kb. egy év alatt befejeztem. Most már nyugodtan hozzáláthattam a Napon megfigyelhető nátrium-színképvonalak hullámhosszúságának és vonalprofiljának kiszámításához.

Első számítási eredményeimet a Spectral Line Shapes nemzetközi konferencián Aussoisban (Franciaország) mutattam be 1984 júniusában. Nem nagy érdeklődést keltettek eredményeim az összegyűltekek körében. Igaz, negatív kritikát sem kaptam, ami nagyon fontos volt számomra,

mert elűzte azt a mindig megjelenő kételyt, hogy valami fontosat nem vettem figyelembe számításaimban. Összegezve a benyomásokat leszögeztem, hogy kemény harcot kell még vívnom, hogy másokat is meggyőzzek az általam felvetett probléma fontosságáról.

Időközben eredményeim egyre szaporodtak, és 1984 szeptemberében a Progress in Stellar Spectral Line Formation Theory elnevezésű nemzetközi konferencián részletes előadást tartottam az abszorber-perturber interakció hatásáról a limb-effektusra. A konferencián a modern konvektív modell megalapítója, Nordlund, is jelen volt. Mivel számításaiban az abszorber-perturber hatást elhanyagolta, gondoltam, hogy érdekelní fogják eredményeim. Előadásom után csak pár szót váltottunk, amikor közölte velem, hogy Beckers (ismert amerikai napfizikus) szerint ezek a hatások elhanyagolhatók.

Itthon aztán gyorsan utánanézttem a dolgoknak és rájöttem, hogy Beckers egyáltalán nem végzett számításokat, tehát állítása nem megalapozott, inkább csak egy bizonyítatlan hipotézis. Más szóval, az a körülmény, hogy valamely állítást nagy tekintéllyel bíró tudós terjeszt elő, nem mentesíthet bennünket annak felülvizsgálásától. Ez egy tipikus példája volt annak, hogy milyen tévedésbe eshetünk, ha nem tiszteljük az érvelés racionalitásának fontos követelményét a tudományos közélet teljes demokratizmusát, amely arra hivatott, hogy kizárja a tudományos érvelésből a pusztán tekintélyi érvelést.

Ezek után több cikkben és konferencián újabb és újabb számítási eredményeket közöltem. Eredményeim lassan kiharcolták a megfelelő helyet a tudományos közvéleményben. A Solar and Stellar Granulation elnevezésű konferencián 1988 júniusában Capriban (Olaszország) a számításaimhoz szükséges atomfizikai paraméterek hiányát felmérve a konferenciáról rezolúcióban értesítettük a Nemzetközi Csillagászati Egyesületet az ilyenemű adatok szükségességéről és fontosságáról a nap- és csillagfizika további sikeres kutatásában.

1990-ben felkért előadást tartottam a XV International Symposium on the Physics of Ionized Gases szimpóziumon az atomi ütközések hatásáról a limb-effektusra. Ezzel az előadásommal lezártam a részecskeütközések hatásával kapcsolatos kutatásomnak egy évtizedét.

Függelék

A Nap ill. a csillagok abszorpció színeképvonalprofilját az áramlási egyenlet megoldása alapján lehet megkapni:

$$I_{\lambda}(\Phi, \mu) = \int_0^{\infty} S(\tau_{\lambda}) e^{-\tau_{\lambda} / \mu} d\tau_{\lambda} / \mu \quad (1)$$

ahol $I_{\lambda}(\Phi, \mu)$ a csillagot ill. Napot elhagyó elektromágneses sugárzás intenzitása, λ a hullámhosszúság, $\mu = \cos \Theta$ (Θ a felületelem normálisa és a sugárzás iránya közötti szög), $S(\tau_{\lambda})$ a forrásfüggvény, τ_{λ} a teljes optikai mélység.

A teljes optika mélység két komponensből tevődik össze: a folytonos sugárzás optikai mélységéből (τ_{λ}^c) és a spektrum vonalon belül érvényes szelektív optikai mélységéből τ_{λ}^i .

A szelektív optikai mélységet a következő egyenlet határozza meg:

$$\tau_{\lambda}^i(z) = \int_0^{\infty} N_{\alpha}(z') \alpha_{\alpha} V dz' \quad (2)$$

ahol z és z' a geometrikus mélység, N_{α} az egységnyi térfogatba eső abszorberék száma, α_{α} az egy atomra jutó abszorpció. Az egységnyi térfogatra jutó abszorpciók együttható ($N_{\alpha} \alpha_{\alpha}$), a Doppler-effektus (termikus, turbulens és más kaotikus mozgások) és különböző csillapodási szélesedések (sugárzási és ütközési) hatására egy bizonyos hullámhosszúság intervallumon belül szétkenődik és eltolódik, amit a V függvény ír le.

Az eltolódás nagyságát a közeg paraméterei (nyomás, sűrűség, hőmérséklet stb.) határozzák meg, amelyek nagy mértékben változnak az optikai mélységtől függően. Következésképpen az (1) egyenlet alapján számított színeképvonal profilja (az integrálás miatt) eltolódik és aszimmetrikus lesz.

A Nap és a hozzá hasonló csillagok fotoszférájában uralkodó nyomás és hőmérsékleti viszonyok mellett az ütközési csillapodás kiszámítására jól alkalmazható az egyszeri ütközésekre érvényes elmélet.

A különböző Doppler- és ütközési szélesedések közös hatását a Voigt-függvénnyel lehet megadni:

$$V(a, v) = (1/2)^{-1/2} / (\Delta \lambda_D) H(a, v) \quad (3)$$

$$H(a, v) = a / \pi \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2} / (a^2 + (v - y)^2) dy \quad (4)$$

$$y = \Delta \lambda / \Delta \lambda_D \quad a = w / \Delta \lambda_D \quad \text{és} \quad v = (\Delta \lambda + d) / \Delta \lambda_D$$

ahol w az ütközésektől eredő vonalprofil félértékszélessége, d pedig az eltolódása és $\Delta \lambda_D$ a Doppler-szélesedés értéke.

A csillapodási szélesedés (w) és eltolódás (d) három additív tagból tevődik össze:

$$w = w_s + w_n + w_e \quad \text{és} \quad d = d_s + d_n + d_e$$

ahol s a sugárzási, n a neutrális részecskéktől, e viszont az elektromosan töltött részecskéktől származó csillapodástényezőt, illetve eltolódást jelöli.

A sugárzási csillapodási tényező az elektronok a megfelelő energiaszinten való tartózkodási idejéből származtatható le, ami a más energianívókra való átmenetek valószínűségének súlyozott összegéből számolható ki.

Az elektromosan töltött részecskék és az abszorber közötti ütközéséből származó csillapodási tényezőt és eltolódást a Stark-effektus figyelembevételével lehet meghatározni.

A Nap és a csillagok fotoszférájában (a színképvonalak legnagyobb része itt jön létre) a neutrális részecskék ütközéséből eredő csillapodási tényező a legnagyobb. Értékét az abszorber-perturber rendszer potenciális energiavölgyében mozgó elektronra alkalmazott kvantummechanikai számításokkal lehet legpontosabban megkapni.

A nátrium (abszorber) és hidrogén (perturber) ütközése esetén jól alkalmazható a Roueff által kidolgozott elmélet, amelynek alapján a csillapodási paraméterekre a következő komplex számot nyerjük:

$$w_n + id_n = 2\pi N \langle v \rangle \int_{-\infty}^{+\infty} \Pi(b) b db \quad (4)$$

ahol $\Pi(b)$ a nátrium és hidrogénatomok ütközésekor kialakuló potenciális energia alapján számított, az ütközési paramétertől (b) függő függvény, N az egységnyi térfogatban lévő perturberek száma, $\langle v \rangle$ pedig a perturberek átlagsebessége.

Így például a nátrium első gerjesztett $3p$ állapotból a magasabb ns ($n > 3$) állapotba való átmenetkor a

$$\Pi(b) = 1 - 1/4 e^{-\int_{-\infty}^{+\infty} V_1(t) dt} - 3/4 e^{-\int_{-\infty}^{+\infty} V_3(t) dt} \quad (5)$$

ahol V_1 és V_3 az ütközés idején kialakult NaH kvázimolekula szingulett és triplett állapotai által meghatározott potenciális energiák. Az integrálást az idő (t) szerint kell elvégezni. A kvázimolekulát az s állapotba gerjesztett hidrogénatom képezik.

Irodalom

- J. Halm, *Astron. Nachr.* 173 (1907)
 R. Howard, J. E. Boyden, and B. J. La Bonte, *Solar Physics* 66 (1980), 167.
 H. H. Plaskett, *Monthly Notices RAS* 163 (1973), 183.
 D. H. Bruning, *Solar Physics* 71 (1981), 233.
 A. Kubičela, I. Vince, and Z. Ivanović, *Bull. Obs. Astron. Belgrade* 135 (1985), 21.
 R. Howard and J. Harwey, *Solar Physics* 12 (1970), 23.
 E. Roueff, *Astron. Astrophys.* 38 (1975), 41.
 D. Dravins, L. Lindgren, and A. Nordlund, *Astron. Astrophys.* 96 (1981), 345.

Rezime

Jedna decenija istraživanja limb-efekta

1907. godine Halm je otkrio da je talasna dužina spektralnih linija veća na ivici sunčevog diska nego u njegovom centru. Ova razlika talasnih dužina je nazvana limb-efektom.

Oko osam decenija astronomi su uložili veliki napor da objasne limb-efekt.

Pojavom izuzetno moćnih računara nastao je jedan novi period u istraživanju limb-efekta. Oko 1980-te godine Nordlund sa svojim saradnicima izuzetno je unapredio istraživanje izračunajući uticaj konvektivnog kretanja na pomak i asimetriju spektralnih linija. Njihova metoda je postala značajna u određivanju fizičkih karakteristika konvektivnog sloja Sunca i zvezda.

Autor ovog članka je pokazao da ta metoda može znatno unaprediti uzimajući u obzir uticaj sudarnih procesa između absorbera i perturbera.

U ovom članku je prikazan autorov rad na ovom problemu između 1980. i 1990. godine.

Summary

Onde Decade of Research on the Limb-Effect

In 1907 Halm discovered that the wavelength of spectral lines at the sun's limb are systematically greater than similar values at the sun's center. This difference has been called the limb-effect.

During the past eight decades astronomers have been working with feverish activity to explain the limb-effect.

A new epoch of limb-effect research came with the using of the powerful computers. Nordlund and his co-workers did a splendid job in 1980-es by computing the effects of convective motion on the spectral line shift and asymmetry. Their method became a powerful tool for determination of physical characteristics of the convective layer of the Sun and of the stars too.

The author of this paper shows that an important improvement in this method can be made by taking into account the influence of collisional effects between the absorbers and perturbbers.

This paper deals with author's work in this field of research from 1980 to 1990.