

Néhány különleges esettől eltekintve egy csillag még a legnagyobb optikai távcsövekben is egyetlen fénypontnak látszik csupán. A csillagokról mindössze két dolgot figyelhetünk meg: égi pozíciójukat és hozzánk érkező fényüket. Az a kevéske csillagfény azonban, amelyet távcsöveinkkel felfogunk, rengeteg információt hordoz a kibocsátó égitestről. A fényesebb csillagok között szabad szemmel is megfigyelhetünk különböző színűeket, a vöröstől a fehérén át egészen a kékig, ami a csillagok színösszetétele közötti különbségeket jelzi. A szemünk három alapszín tud megkülönböztetni, s már egy hasonló elven működő csillagászati műszer is fontos paramétereket szolgáltat az égitestekről. A látszó szín például a csillagok felszíni hőmérsékletével kapcsolatos. De az asztrofizikusok nem elégszenek meg az égitestek fényességének néhány hullámhossztartományban való megméréssel. A hullámhossz szerint felbontott csillagfény tanulmányozása, a spektroszkópia az asztrofizika igen hatékony megfigyelési módszere.

Áttekintésemben a csillagok optikai spektroszkópiájának lehetőségeire koncentrálok. Optikai alatt a látható fény tartományának az infravörös (IR) és ultravioleta (UV) irányú enyhe kiterjesztését tekintjük, nagyjából 300–1000 nm között. Ez az a hullámsáv, amelyben a Föld felszínéről a légkörön keresztül, hagyományos optikai eszközökkel végezhető megfigyelés.

A spektrográf

A távcső által összegyűjtött fényt a spektrográf hullámhossz szerint felbontja és rögzíti a színeképet. A színbontás prizmával vagy optikai ráccsal történhet. A távcső fókusz síkjában összegyűjtött fény egy résen át lép a spektrográfba, amely lényegében ezt a részt képezi le a detektor felületén, hullámhossztól függően változó helyre. A rögzítés ma már szinte kizárólag digitális technikával, CCD-detektorokkal történik.

A működési hullámhossztartomány mellett a spektrográfok legfontosabb jellemzője a spektrális felbontás,

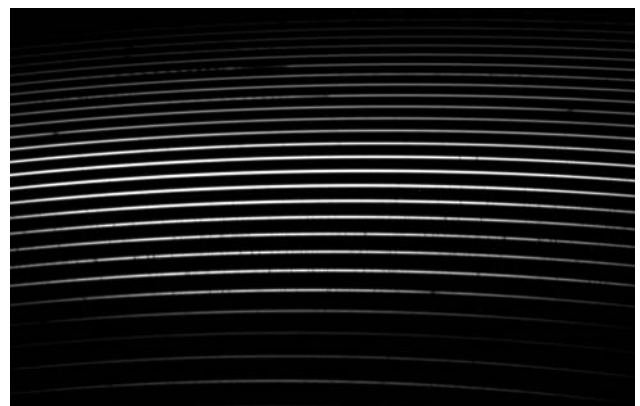
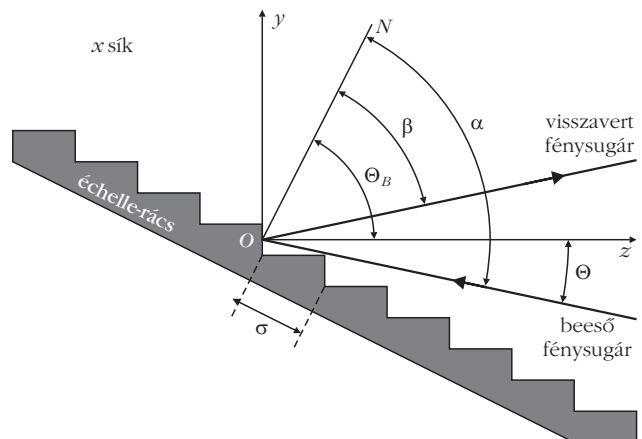
$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda},$$

ahol $\Delta\lambda$ a spektrumban még éppen megkülönböztethető két hullámhossz közötti legkisebb különbség λ hullámhossznál. Bár a nagyobb felbontás általában jobb, de gyakran nem szükséges, illetve felesleges komplikációt jelenthet. A csillagászati spektroszkópiában nagyjából a $10\,000 < R < 50\,000$ tartományt tekintjük közepes felbontásnak, míg e tartomány alatt, illetve fölött kis, illetve nagy felbontásról beszélünk.

A prizma csak kis felbontást tesz lehetővé, mivel a felbontás növeléséhez a prizma méretét is növelni kell, ami hamar kezelhetetlenné válik. Ráadásul a prizma egydimenziós spektrumot állít elő, ami nem igazán illik a modern CCD-detektorokhoz, amelyek téglalap alakúak, jellemzően nem túlságosan elnyújtott oldalarányúval. Így a CCD-chip hosszabb oldalának irányában mért pixelszám limitálja a felbontást, illetve a lefedett spektrális tartományt. További probléma, hogy a prizma az optikai tartomány kék végét sokkal jobban szét húzza, mint a vöröset, így a felbontás egyenetlen.

A prizma egy érdekes spektroszkópiai alkalmazási lehetősége az objektívprizma: a távcső bemeneti apertúrája elé helyezett kis nyílásszögű prizmával meglehetősen kis felbontású spektrumokat vehetünk fel, de azokat a látómező összes égitestjéről egyszerre. Ilyen eszköz rendelkezésre áll Magyarországon az MTA CSFK Csillagászati Intézetének Piszkes-tetői Observatóriumában a 60 cm-es Schmidt-távcsövön.

1. ábra. Felül az échelle-rács keresztmetszete (forrás: ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium – <http://www.gothard.hu/astronomy/astroteaching/instrumentation/echelle-spectroscopy/echelle-spectroscopy.php>). A lépcsőfokok dőlése felel a fény magas rendekbe való koncentrálásáért. Alul échelle-spektrum a detektoron. Minden fényes sáv egy-egy elhajlási rendnek felel meg. Az intenzitás az échelle-rács tükröző felületének köszönhetően a rendek középre koncentrálódik (forrás: <http://www.astrolight-instruments.com/echelle.php>).



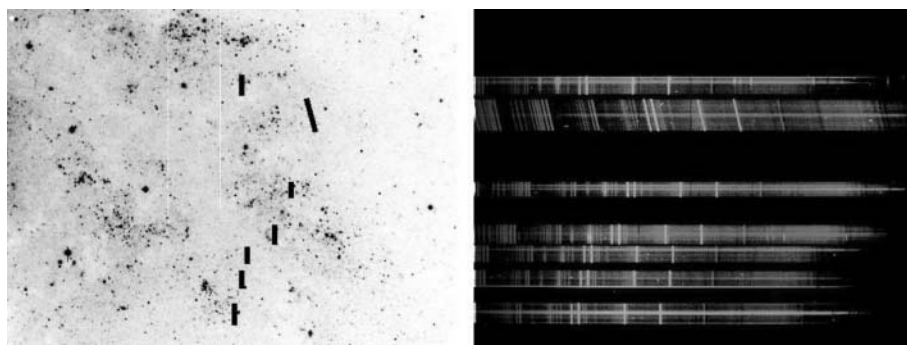
Az optikai rács, különösen annak egy speciális fajtája, az échelle-rács sok szempontból előnyösebb közepes, illetve nagy felbontású színeképek létrehozására. Az échelle-rács tulajdonképpen egy lépcső alakú tükör, nagy vonalsűrűséggel (1. ábra, felül). A lépcső egyes fokairól visszaverődő fénynyalábok interferálnak egymással, és a hullámhossztól függő elhajlás jön létre, hasonlóan más optikai rácsokhoz. Az échelle-rács előnye egy egyszerű optikai ráccsal szemben az, hogy a tükröző felületek megfelelő dőlésszöge miatt a fény jelentős hányada jut a magas rendekbe ($m > \sim 30$), vagyis olyan diffrakciós irányokba, ahol a szomszédos rácsvonalakról visszavert fénysugarak közötti optikai úthossz a hullámhossz sokszorosa. Ez nagy spektrális felbontást tesz lehetővé viszonylag alacsony fényvesztés mellett. Probléma azonban, hogy a magas diffrakciós rendek átfedik egymást. Ezek az átfedő rendek egy kereszt-diszperziós elemmel, például prizmával az échelle-rács diszperziójára merőleges irányban széthúzhatók, így a rendek már egymás mellé kerülnek. Ekkor egy téglalap alakú CCD-detektorral az egymás mellett sorakozó rendek egy-egy szakaszát tudjuk egyszerre lefedni, így a kétdimenziós detektor jól kihasználható, az egyes rendekben nagy felbontás érhető el, mégis széles hullámhossztartomány fedhető le a műszerrel (1. ábra, alul).

A spektrográf és a távcső

A távcső által fókuszált fényt el kell juttatnunk a spektrográfba. A hagyományos megoldás a távcső fókusz síkjában elhelyezett rés. Itt a távcső kimenete, a fókusz sík fizikailag egybeesik a spektrográf bemennetével. Mivel a távcső az objektumok beirányzásakor és égi mozgásuk követése során mozog, általában a fókusz sík is két szabadsági fok szerint mozoghat. Ügyes megoldásokkal a szabadsági fokok száma egyre, vagy bonyolultabb optikával akár nullára is csökkenthető, de a résspektrográf gyakran fizikailag együtt mozog a távcsőtubussal.

A mozgás több nehézséget is okoz: a műszerre ható gravitáció iránya időben változik, ami lehajláshoz vezet, aminek minimalizálása komoly mechanikai stabilitást követel a spektrográf szerkezeti és optikai elemeitől. A távcső teherbírása véges, így igazán bo-

2. ábra. Egy többobjektum-résspektrográf működése. Balra a rések vetületét látjuk az égbolton, jobbra pedig az ezekből származó spektrumokat a detektoron (forrás: Fűrész G. PhD-értekezés, SZTE).



nyolult, nagy tömegű spektrográf gyakran nem is szerelhető fel rá. A spektrográf klimatizálása nehéz vagy megoldhatatlan, ami pedig szintén fontos a stabilitás szempontjából.

Azimutális mechanikájú (függőleges és vízszintes tengelyek körül forgatható) távcsöveknél a fő- és segédtükrök után a fényútba helyezett harmadik tükörrel a fény a magassági tengely mentén kivezethető a távcsőből a Nasmyth-fókuszba, ahol a távcső mellé helyezett, a függőleges tengely körül a távcsővel együtt forgó platformra építhető a műszer. Ide nagyobb spektrográf helyezhető, mint magára a tubusra, és a műszerre ható gravitációs erő iránya is állandó, de a platform továbbra is mozog.

Ennél is bonyolultabb, több tükörből álló rendszerrel a távcső mechanikai tengelyei mentén egészen távolra elvezethető a fény, és így már a fókusz sík teljesen függetleníthető a távcsőtubus mozgásától. Ez a coudé-rendszer, amely nagyméretű, jó stabilitású spektrográf-berendezés építését teszi lehetővé egy izolált helyiségben.

A coudé-rendszert azonban az elmúlt évtizedekben teljesen kiszorította a sokkal egyszerűbb és szó szerint is rugalmasabb üvegszál-optika. Az üvegszál a spektrográf rését helyettesíti, segítségével a távcső fókusz síkjából 20-50 m hosszú vékony és flexibilis optikai szál vezet a fényt a spektrográf megfelelő mechanikai és klimatikus stabilitással kialakítható, izolált helyiségébe.

Bár a piszkés-tetői 1 m-es távcsövön is kiépítették a coudé-fókusz használatának lehetőségét, ezt az üzemmódot sosem használták. A Csillagászati Intézet jelenleg beüzemelés alatt álló új, közepes felbontású échelle-spektrográfja is üvegszállal kapcsolódik az 1 m-es távcsőhöz.

A kétdimenziós CCD-detektorok több objektum együttes spektroszkópiáját is lehetővé teszik. Ha megelégszünk objektumonként alacsonyabb spektrális felbontással, vagy nagy felbontás mellett kis hullámhossztartománnyal, akkor sok objektum spektruma rendezhető egymás mellé a detektoron. Ilyen megoldásokat már résspektrográfok esetében is kigondoltak, azonban a rések elhelyezése és a diszperziós irány kiválasztása komoly sakkozást igényel, hogy a spektrumok ne fedjenek át egymással, ami erős megszorítást jelent a megfigyelhető objektumok számára

és égi elrendeződésükre (2. ábra). A szál-optika megjelenése itt igazi áttörést hozott. A fókusz síkban elhelyezhető üvegszálvégződések bizonyos, kevésbé szigorú megszorítások mellett szinte tetszőlegesen elrendezhetőek, míg az optikai szálak spektrográfba bevezetett másik végződése egyszerűen egy vonalba rendezhetőek, tökéletesen kihasználva a CCD-chip felületét.

A csillagok színekének kialakulása

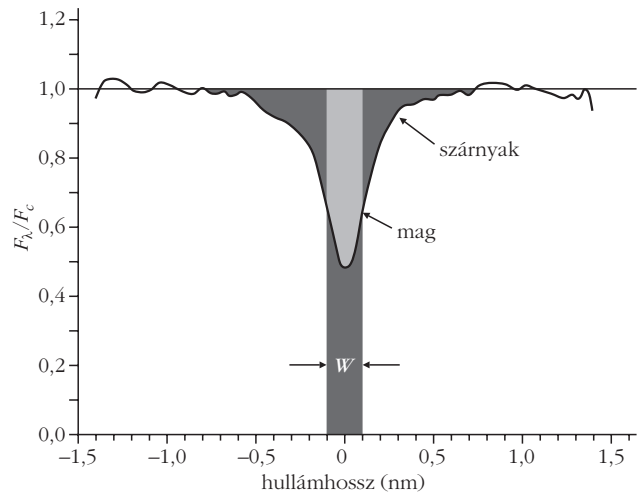
A csillagok kisugárzott fénye az égitest egy szűk külső tartományából, a csillag légköréből származik. Ez egyben a csillaglégkör definíciója is, hiszen a csillag légkörének nincsen olyan nyilvánvaló alsó határa, mint például a földi légkörnek a földfelszín. A csillagok legkülső gázrétegeitől folytonos az átmenet a belső, egyre sűrűbb és egyre forróbb tartományokba. A csillag belsejéből kifelé terjedő energiát hordozó elektromágneses sugárzás fotonjainak szabad úthossza a gáz ritkulásával egyre nő. A légkörben ez a szabad úthossz már kellően nagy ahhoz, hogy a fotonok jelentős része elnyelődés és újra kisugárzódás nélkül kijusson a világűrbe. Másképp kifejezve a csillaglégkör alsó határa ott van, ahol a gáz kívülről befelé haladva optikailag vastagga válik, ameddig beelátunk a csillagba.

Azonban a fotonok szabad úthossza erősen függ a hullámhossztól, éspedig meglehetősen bonyolult módon. Az egyes atomok kötött-kötött elektronátmenetei energiájának megfelelő hullámhosszakon a foton elnyelődésének valószínűsége megnő, így ezeken a hullámhosszakon a fotonok szabad úthossza kisebb, azaz a gáz opacitása nagyobb, mint a környező hullámhosszakon. Ha a foton elnyelődik, az atom vagy molekula gerjesztett állapotba kerül. A gerjesztett állapot megszűnésével egy hasonló hullámhosszú foton ismét kibocsátódik, de nem feltétlenül az elnyelt foton haladásának irányában. Ez a mechanizmus színeképvonalakat hoz létre a csillag spektrumában az energiaszintekre, és végső soron az adott kémiai elemre vagy molekulára jellemző hullámhosszakon.

A csillaglégkör hőmérséklete a mélységgel változik, jellemzően belülről kifelé csökken. Bizonyos körülmények között a légkör, illetve az afölötti régiók egyes tartományaiban azonban felléphet hőmérsékleti inverzió, amikor a hőmérsékleti rétegződés megfordul: a külsőbb réteg ilyenkor forróbb. A színeképvonalak hullámhosszán a fotonok már említett rövidebb szabad úthossza miatt kevésbé mélyre látunk a csillag anyagába, mint két színeképvonal közötti hullámhosszakon. Ha ez a külsőbb réteg hűvösebb, mint az alatta lévők, akkor elnyelési (abszorpciós) vonalat látunk a spektrumban: a fény intenzitása az adott hullámhosszon alacsonyabb a környezetéhez képest. Ha azonban hőmérsékleti inverzióval állunk szemben, és a spektrumvonal fénye forróbb tartományból származik, mint a környezetéé, akkor kibocsátási (emissziós) vonalat látunk: az intenzitás a környező hullámhosszoknál erősebb. Szintén emissziós vonalat figyelhetünk meg a színeképvonalakban, ha a csillagot kiterjedt gázfelhő veszi körül, amelyet a csillag fénye gerjeszt.

A csillaglégkörben jelen lévő minden kémiai elemnek, ionnak, valamint a leghűvösebb csillagokon megtalálható molekuláknak csak rájuk jellemző hullámhosszaknál vannak színeképvonalai, amelyek az emberi ujjlenyomathoz hasonlóan egyedi nyomokat hagynak a csillag spektrumán.

Néhány fontos spektroszkópiai alapfogalom ismerete szükséges a későbbiek megértéséhez:



3. ábra. Az ekvivalens szélesség (W) meghatározása normált spektrumban (forrás: <http://www.bdnyc.org/tag/eq-width>).

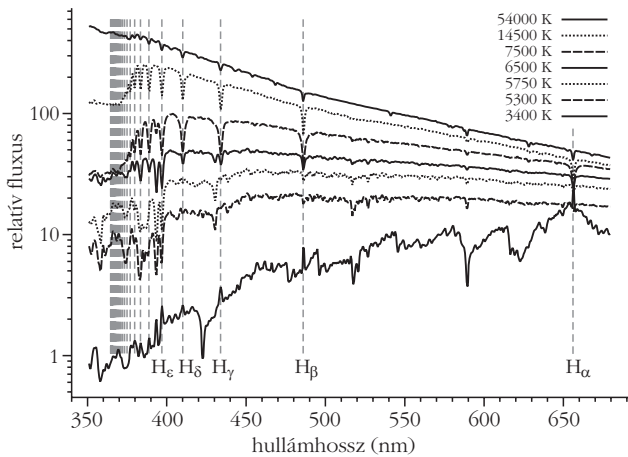
Kontinuumnak nevezzük a színeképvonalak közötti hullámhossztartományokból eredő sugárzást. Ennek alakját a kötött-szabad, illetve szabad-szabad elektron-foton kölcsönhatások, valamint a csillaglégkör hőmérséklete határozzák meg.

Fluxus szerint kalibrált és normált spektrum: a műszer által produkált nyers, instrumentális színeképet fluxus szerint kalibrálni, vagy normálni kell további elemzés előtt. Az instrumentális spektrum tartalmazza a távcső, a spektrográf és a benne lévő CCD-chip együttes hullámhossz-érzékenységi görbéjéből eredő intenzitásorzításokat. A fluxuskalibrációhoz színeképfelvételeket kell készíteni a műszerrel standard csillagokról. Ekkor lényegében a műszer hullámhossz-érzékenységét állapítjuk meg, és erre korrigáljuk a mért spektrumot. A fluxuskalibrált spektrum egymástól távoli hullámhosszain mért intenzitásviszonyok fizikailag helyes fluxusarányokat fejeznek ki. Ennél valamivel egyszerűbb a spektrum normalálása. A normált spektrumot úgy kapjuk meg, hogy az instrumentális spektrumot elosztjuk a kontinuumszinttel, vagyis a kontinuumot egységnyire normáljuk. A fluxus szerint kalibrált és normált spektrumok más-más vizsgálatok elvégzésére alkalmasak.

Ekvivalens szélesség: a spektrumvonalak erősségét a vonalprofil pontos alakjától függetlenül egyetlen értékkel jellemezhetjük. Ez az ekvivalens szélesség, amely azt jelzi, hogy a vizsgált színeképvonal mennyi intenzitást „takar ki” a kontinumból. Egy színeképvonal ekvivalens szélessége egy olyan téglalap szélessége hullámhosszban kifejezve, amelynek területe megegyezik a spektrumvonal kontinuum alatti területével (3. ábra). Definíciónk értelmében az emissziós vonalak ekvivalens szélessége negatív.

A csillagszíneképet meghatározó paraméterek

Az egyes spektrumvonalak jelenlétét, eltolódását, erősségét, a vonalprofil szélességét és pontos alakját nem csak az elemgyakoriságok határozzák meg. A csillaglégkörben uralkodó hőmérséklet és nyomás, az ott



4. ábra. A hőmérséklet hatása a fluxuskalibrált színekpre. A Balmer-sorozat hullámhosszait függőleges szaggatott vonalak jelölik, amelyek a Balmer-ugrás elméleti hullámhosszához konvergálnak 364,6 nm-nél.

végbemenő mozgások (például mikro- és makroturbulencia, csillagpulsáció), a csillag forgása, látóirányú mozgása, a felszíni inhomogenitások (hőmérsékleti, illetve kémiai összetételbeli foltok) és a mágneses tér mind befolyásolják a megfigyelt spektrumot. Ráadásul a csillag környezete (kísérő csillag jelenléte, por- és gázkorong, anyagkidobódás) is alakítja a színekpet.

Mindezek egyfelől bonyolítják a megfigyelt spektrum értelmezését, ugyanakkor rengeteg dolgot tudhatunk meg az egyes csillagokról a színekpük részletes analiziséből. A spektrumot befolyásoló legfontosabb hatásokat a következőkben részletesebben is megvizsgáljuk. A legtöbb paraméter kis vagy közepes felbontású spektrumban is tanulmányozható, a színekpívonalak alakjának (vonalprofil) részletes vizsgálatahoz azonban nem árt a nagy spektrális felbontás.

Kémiai összetétel

Egy csillagspektrum megjelenését alapvetően nem a kémiai összetétel, hanem a hőmérséklet határozza meg. Mégis a spektroszkópiáról a legtöbb embernek először a kémiai összetétel vizsgálata jut eszébe.

E látszólagos ellentmondás oka az, hogy a csillagok kémiai összetétele nagyon hasonló. A csillagok légkörre nagyjából háromnegyed részben hidrogénből, egynegyed részben héliumból áll. A csillagászok által csak „fémek” gyűjtőnéven emlegetett összes többi elem gyakorisága (bár csillagról csillagra több nagyságrenddel is eltérhet) legfeljebb csak 2%-ot tesz ki. Ugyanakkor az elemek ionizáltsági foka hőmérséklet-függő, és ez meghatározza az elnyelési vonalak megjelenését a spektrumban.

Ha azonban már jó közelítéssel meghatároztuk a spektrumból a vizsgált csillag légköri hőmérsékletét és nyomását, akkor az elnyelési vonalak erősségéből a kémiai összetételre is következtetni tudunk.

Hőmérséklet

A csillagok felszíni hőmérséklete, az egyik legalapvetőbb csillagparaméter, nagyon széles skálán mozoghat. A legkisebb tömegű, egyben leghűvösebb

felszínű, magjukban még stabil hidrogénfúziót fenntartani képes csillagok hőmérséklete nagyjából 2000 K. A legforróbb csillagok a csillagfejlődés végállapotát jelentő elfajult neutroncsillagok és fehér törpék, felszíni hőmérsékletük felső határa 200 000 K.

Bár a csillaglégkörök spektruma csak nagyon durván közelíthető feketetest-sugárzással, a csillagok sugárzási maximuma a Wien-féle eltolódási törvénnyel összhangban a hosszabbtól a rövidebb hullámhosszak felé tolódik el a hőmérséklet emelkedésével (4. ábra).

Kiemelt jelentősége van a leggyakoribb elem, a hidrogén vonalainak, azok közül is a Balmer-sorozatnak, mivel ezek esnek az optikai tartományba. A Balmer-sorozat hullámhosszai a $n \geq 3$ és $n = 2$ elektronhéjai közötti átmenetnek felelnek meg. Az $n = 3 \leftrightarrow 2$ átmenethez 656,3 nm hullámhossz tartozik, ezt $H\alpha$ -val jelöljük, az egyre magasabb energiaszintű átmenetek jelölése pedig sorban $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ stb. Az $n = \infty \leftrightarrow 2$ átmenethez tartozó hullámhossz 364,6 nm, a 2. elektronhéj ionizációját jelenti. Ilyen vagy ennél nagyobb energiájú fotonok teljesen leszakítják a hidrogénatom második elektronhéján tartózkodó elektronokat, ezek a hullámhosszak kötött-szabad elektronátmenetnek felelnek meg. Az ionizációs küszöb ugrást okoz a kontinuumszintben, ez a Balmer-ugrás.

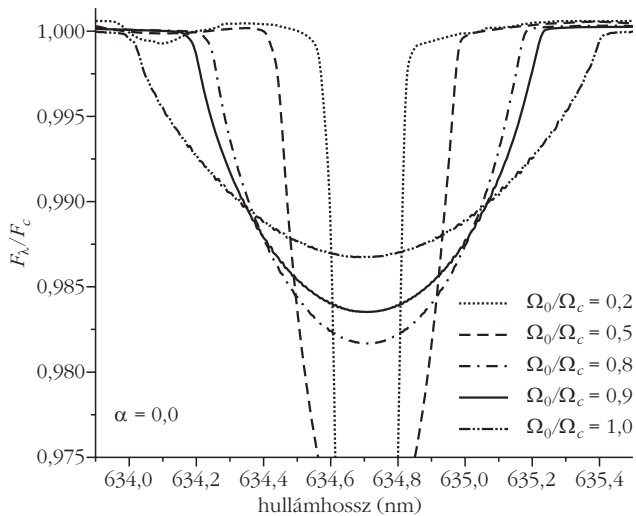
A 4. ábra példáin megfigyelhető, hogy a legforróbb csillagok légkörében a hidrogén és a fémek nagyrészt ionizált állapotban vannak, ezért nem produkálnak erős elnyelési vonalakat. Jellemző az ionizált hélium vonalainak jelenléte, Balmer-ugrás nincs, vagy nagyon kicsi: az UV-fluxus jelentős. A forrótól a hűvösebb csillagok felé haladva a Balmer-vonalak előbb erősödnek, majd ismét gyengülnek, ezzel együtt a Balmer-ugrás jelentőssé válik, majd az is gyengül. Ennek az az oka, hogy a H második elektronhéjának populáltsága 9500 K körül éri el a maximumát.

A hőmérséklet csökkenésével a He semlegessé válik majd vonalait eltűnnek, a fémek először magasabb ionizáltsági fokon jelennek meg, majd az ionizáltság csökken, és semleges fémvonalak is láthatóak lesznek. A leghűvösebb csillagok légkörében már molekulák (például TiO) is létrejöhetnek, a hőmozgás nem bontja szét ezeket, így a molekulák vibrációs és rotációs energiaszintjeire jellemző elnyelési sávok is feltűnnek.

Nyomás

A légkörben uralkodó nyomás a csillag felszíni gravitációs gyorsulásával és ezen keresztül a csillag tömegével és sugarával függ össze. Nagyobb nyomás nagyobb sűrűséget jelent, nagyobb sűrűség mellett pedig gyakoribb az atomok egymás közötti szoros megközelítése, aminek a hatására az elektronpályák energiaszintjei kissé eltolódnak egymáshoz képest. Emiatt az elektronok energiaszint-átmenetei „elmosódnak”, ami a kibocsátott, illetve elnyelt fotonok hullámhosszának hasonló elmosódását, végeredményben a spektrumvonalak kiszélesedését okozza.

Az azonos tömegű, ám eltérő fejlődési állapotú, eltérő előéletű csillagok felszíni hőmérséklete és su-



5. ábra. A csillag forgásának hatása a vonalprofilra. A rotációs sebesség (Ω_0) a kritikus, azaz a szétszakadás nélkül még lehetséges legnagyobb rotációs sebességhez (Ω_c) viszonyítva (forrás: Zorec et al. 2011, Astronomy and Astrophysics, 526, 87).

gára nagyon tág skálán változhat. Nagyobb sugárhoz alacsonyabb felszíni nyomás és alacsonyabb gravitációs gyorsulás tartozik, ami élesebb vonalakat jelent a csillag színképében.

Mikro- és makroturbulencia

A mikro- és makroturbulencia a csillaglégkör atomjainak nem termikus, de izotróp sebességeloszlású, azaz turbulens mozgását jelenti. Ilyen mozgásokat okoz a légkörben például a konvekció. A turbulens cellák méretétől függően beszélünk mikro- és makroturbulenciáról, habár az átmenet a kettő között értelemszerűen folytonos. A turbulencia által okozott sebességeloszlás látóirányú vetületét Gauss-eloszlással közelítjük. A térfogatelemek mozgása miatt a belőlük kibocsátott fotonok Doppler-eltolódást szenvednek, a megfigyelt vonalprofil kiszélesedik. A kétféle turbulencia hatása a spektrumra egy-egy sebesség dimenziójú paraméterrel, a sebességeloszlás fél-szélességével jellemezhető. Az elvi különbség a kétféle turbulencia között az, hogy míg a makroturbulencia csak a vonalprofil szélességét növeli, változatlan ekvivalens szélesség mellett, addig a mikroturbulencia a színkép-vonalak kialakulására is hatást gyakorol, tehát az egyes vonalak ekvivalens szélességét is befolyásolja.

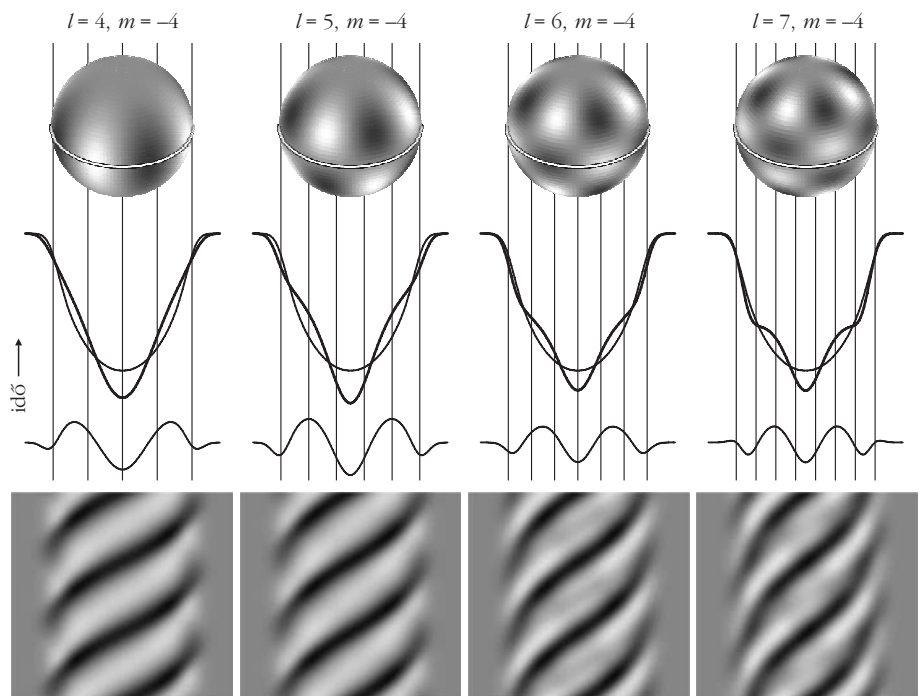
Forgási vonalkiszélesedés

A csillag forgása miatt a felszín mozog, és e mozgási sebesség látóirányú komponense Doppler-eltolódást okoz az adott felülelelemről kibocsátott fotonok hullámhosszában. A megfigyelt színkép az egyes felületelemek színképének a felénk forduló csillag-félgömbre vett integrálja, amelyben így az egyes vonalak kiszélesednek. A csillagkorong – a forgástengely vetületének megfelelő irányú – középső sávja nem mozog látóirányban, míg a legnagyobb látóirányú rotációs sebességek a korong azon két szélső pontját jellemzik, amelyek ettől a középső sávától a legtávolabb látszanak. Könnyen belátható, hogy mindez elliptikus vonalprofil-kiszélesedést okoz – legalábbis első közelítésben, a peremsötétedést és a differenciális rotációt figyelmen kívül hagyva. A kiszélesedés mértéke függ az egyenlítői forgási sebességtől (v_{eq}), valamint a forgástengely látóirányhoz viszonyított hajlásszögétől – ez az inklináció (i) – éspedig $v_{eq} \sin i$ szerint (5. ábra).

Csillagfoltok hatása

Bizonyos csillagok felszínén hőmérsékleti, illetve kémiai inhomogenitások, foltok lehetnek. A csillagfoltok hatása a rotációsan kiszélesedett vonalprofilban figyelhető meg. Ha a felszínen inhomogenitások vannak, akkor a vonalprofil adott felszínelemből eredő szegmense torzul a szabályos elliptikus alakhoz képest. Ha mért spektroszkópai idősor is a rendelkezésünkre áll, akkor megfigyelhetjük a folt átvonulását a forgó csillag látható félgömbjén. A csillagkorongra

6. ábra. Csillagpulzáció hatása a vonalprofilra. Az effektus nagyon hasonlít a csillagfoltok hatására. A pulzáció azonban jellemzően szabályosabb, mint az aktív csillagokra jellemző, rövid időskálán fejlődő, migráló csillagfoltok hatása. A hosszú élettartamú, stabil foltok, illetve a pulzáció között azonban esetenként nehéz vagy lehetetlen különbséget tenni (l a longitudinális – a csillag egyenlítője által kijelölt főkörmenti – csomóhelyek száma, m a meridionális – a csillag egyenlítőjére merőleges irányú főkör menti – csomóhelyek száma) (forrás: Telting & Schrijvers 1997, Astronomy and Astrophysics, 317, 723).



beforduló folt okozta vonalprofil-torzulás a kék oldalon jelenik meg, és onnan a vörös oldal felé mozog. Az idősor analíziséből megállapíthatjuk a rotációs periódust, és akár a felszíni foltok szélességi és hosszúsági koordinátáit is rekonstruálhatjuk. A csillagok nem merev testként forognak, az egyenlítő és a pólusok forgási periódusa gyakran eltér. Kellően kiterjedt spektrumidősorból ez a differenciális rotáció is megállapítható.

Csillagpulzáció

Sok csillag nem állandó és statikus, hanem periodikusan oszcillál, pulzál. Ez a felszínen szabályos alakzatokban megjelenő mozgások és hőmérséklet-változások formájában jelentkezik. E változások a spektrumvonalban, a forgáshoz és a foltokhoz hasonlóan Doppler-eltolódásként, illetve a rotációs vonalprofil torzulásaiként jelennek meg. A pulzáció vizsgálatához feltétlenül időszormérésekre van szükség. Sok pulzáló változócsillag egynél több, némelyik akár több száz frekvenciával is oszcillálhat egyszerre. Az egyes frekvenciáknak megfelelő vonalprofil-változások jellemzőek a csillagnak arra a rezgési módusára, amelyhez az adott frekvencia tartozik. Ez lehetőséget ad spektroszkópiai módusazonosításra, ami nagyon fontos a csillagpulzáció vizsgálatához (6. ábra).

A pulzáló csillagok tanulmányozásakor a spektroszkópiai megfigyelések általában kiegészítő jellegűek a fotometria mellett. A pulzációs frekvenciák ugyanis a szélesebb fotometriai hullámsávokban megfigyelt fényességváltozásokból is megállapíthatók, amihez egyszerűbb műszer és kisebb távcső is elegendő,

hiszen a kellően hosszú idősorokhoz sok távcső-ideig szükséges. Azonban a magasabb rendű pulzációs módusokat ($I > \sim 4$), amelyeknél a csillagfelszín sok kis szegmense ellentétes fázisban változik, a felület-elemek egymást kioltó ellentétes fényességváltozásai miatt fotometriai módszerrel szinte lehetetlen megfigyelni. A spektroszkópiai módszer ilyen módusok megfigyelését is lehetővé teszi.

Csillagászati spektroszkópia Magyarországon

A magyar csillagászok spektroszkópiai műszerellátottsága egészen a közelmúltig meglehetősen rossz volt, az utóbbi években azonban jelentős javulás indult e téren. Az első hazai échelle-spektrográf, az ELTE szombathelyi Gothard Asztrofizikai Observatóriumának eShel nevű műszere néhány éve állt működésbe. Ez a spektrográf a 420–870 nm közötti tartományt vizsgálja, $R = 11\,000$ felbontással. A távcsőhöz üveg-szállal kapcsolódó, aktatáska méretű spektrográf hordozható, így a szombathelyi távcsövek mellett az ország legnagyobb, piszkés-tetői 1 m-es optikai távcsövével is könnyen használható.

E cikk írása idején pedig éppen megkezdte működését az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete 1 m-es távcsövének saját, állandó échelle-spektrográfja is. Ez a műszer a 380–900 nm tartományban $R = 22\,000$ felbontást tud elérni.

Ez a két új magyar échelle-spektrográf várhatóan nagy lökést fog adni a hazai spektroszkópiai vonatkozású asztrofizikai kutatásoknak.

MATT FEKETE AUTÓK POLÁROS FÉNYSZENNYEZÉSE: A MATT BEVONAT SEM KÖRNYEZETBARÁT – 1. RÉSZ

Blahó Miklós, Herczeg Tamás, Száz Dénes, Czinke László, Horváth Gábor
ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

Barta András

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Egri Ádám, Farkas Alexandra, Tarjányi Nikolett

MTA Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet

Kriska György

ELTE Biológiai Szakmódszertani Csoport

MTA Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet

A sima felszínű, fényes fekete autók egyes karosszériarészei (például motorháztető, tető, csomagtartófedél, szélvédő) vízszintesen poláros fényt vernek vissza [1]. Mivel a polarotaktikus vízirovarok a vízekről tükröződő fény vízszintes polarizációja alapján ismerik fel a vízfelületeket és vonzódnak az ilyen fényhez [2], ezért a fényes fekete autókról visszaverődő vízszintesen poláros optikai inger megtévesztheti őket és pozitív polarotaxist válthat ki belőlük. A fényes

feke jarművek ezáltal tipikus poláros fényszennyező források [3]. Ennek egy látványos következménye, mikor például tömegesen rajzó kérészek az 1. ábrán is látható módon teljesen ellepnek egy fényes fekete autót, amire lepetéznek, majd a lerakott petecsomók kiszáradás miatt elpusztulnak. E veszélynek nemcsak az 1.c ábrán látható dunavirág (*Ephoron virgo*) van kitéve, hanem sok más, olykor fokozottan védett vízirovarfaj is.