

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,

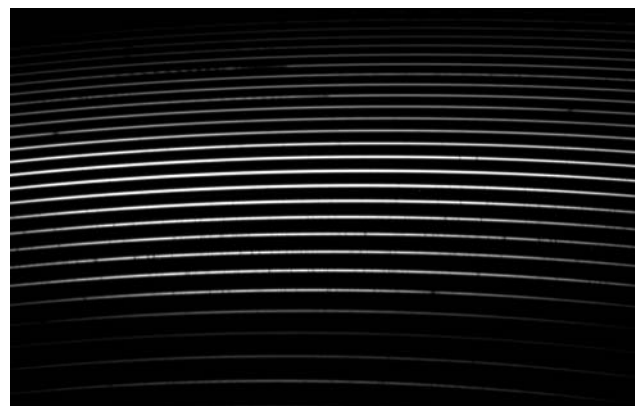
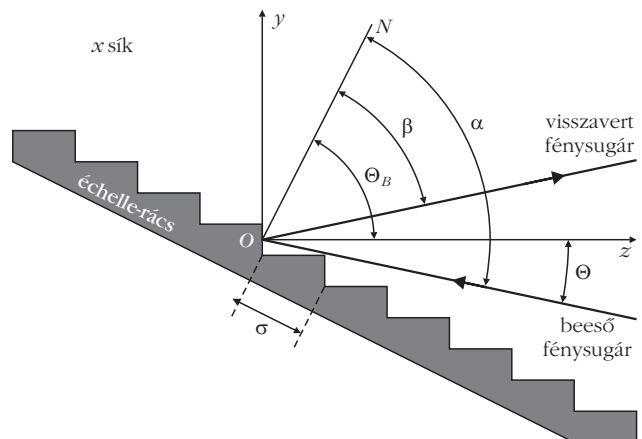
$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda},$$

ahol  $\Delta\lambda$  a spektrumban még éppen megkülönböztethető két hullámhossz közötti legkisebb különbség  $\lambda$  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>).



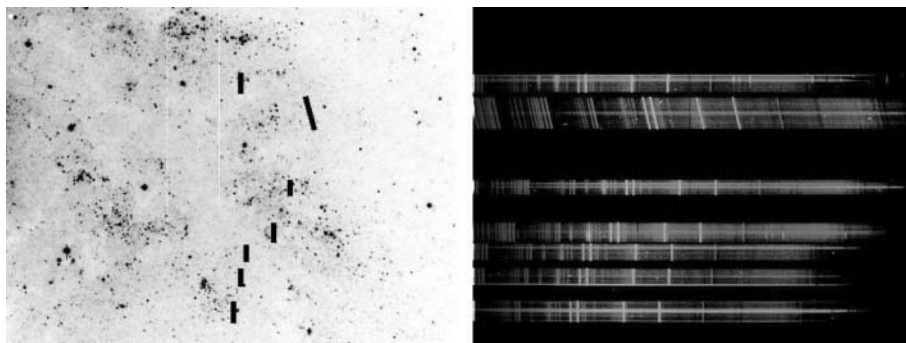
Az optikai rács, különösen annak egy speciális fajtája, az échelle-rács sok szempontból előnyösebb közepes, illetve nagy felbontású színeképek létrehozására. Az échelle-rács tulajdonképpen egy lépcső alakú tükör, nagy vonalsűrűséggel (1. ábra, felül). A lépcső egyes fokairól visszaverődő fénynyalábok 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 segéd-tükör 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 részét 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 színképének kialakulása

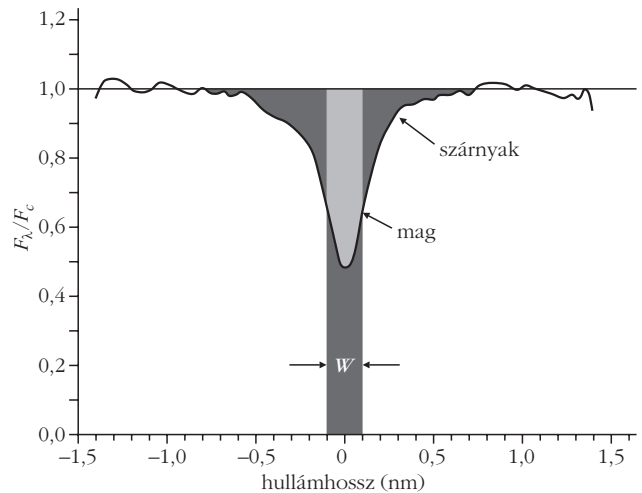
A csillagok kisugárzott fénye az égitest egy szűk külső tartományából, a csillag légköréből származik. Ez egyben a csillaglégkör definíciója is, hiszen a csillag légkörének nincsen olyan nyilvánvaló alsó határa, mint például a földi légkörnek a földfelszín. A csillagok legkülső gázrétegeitől folytonos 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 színképvonalakat 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 színképvonalak hullámhosszán a fotonok már említett rövidebb szabad úthossza miatt kevésbé mélyre látunk a csillag anyagába, mint két színképvonal 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 színképben, 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 színképvonalai, 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.bdnyrc.org/tag/eq-width>).

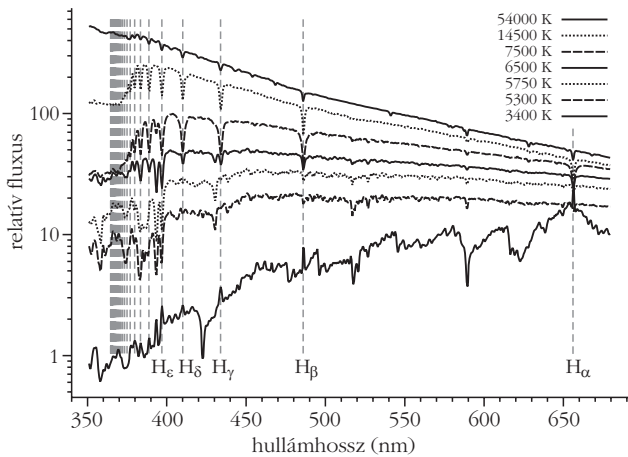
*Kontinuumnak* nevezzük a színképvonalak közötti hullámhossztartományokból eredő sugárzást. Ennek alakját a kötött-szabad, illetve szabad-szabad elektron-foton kölcsönhatások, valamint a csillaglégkör hőmérséklete határozzák meg.

*Fluxus szerint kalibrált és normált spektrum:* a műszer által produkált nyers, instrumentális színképet 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 színképfelvételeket 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 színképvonal mennyi intenzitást „takar ki” a kontinumból. Egy színképvonal 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 csillagszínképet 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 színeképet.

Mindezek egyfelől bonyolítják a megfigyelt spektrum értelmezését, ugyanakkor rengeteg dolgot tudhatunk meg az egyes csillagokról a színeképük részletes analiziséből. A spektrumot befolyásoló legfontosabb hatásokat a következőkben részletesebben is megvizsgáljuk. A legtöbb paraméter kis vagy közepes felbontású spektrumban is tanulmányozható, a színeképvonalak 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 légköre 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.

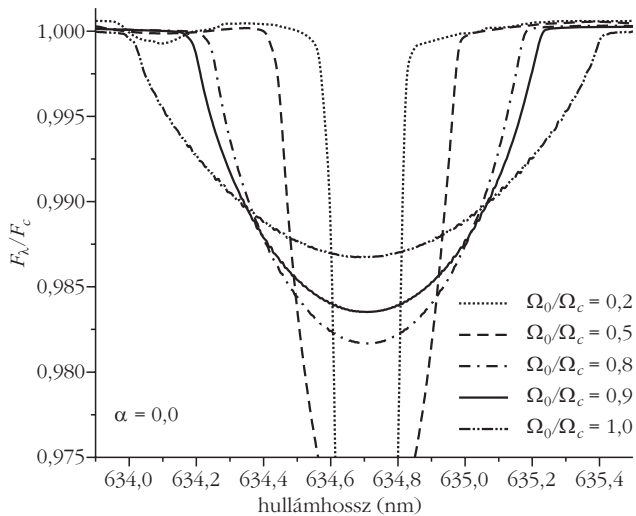
A 4. ábra példáin megfigyelhető, hogy a legforróbb csillagok légkörében a hidrogén és a fémek nagyrészt ionizált állapotban vannak, ezért nem produkálnak erős elnyelési vonalakat. Jellemző az ionizált hélium vonalainak jelenléte, Balmer-ugrás nincs, vagy nagyon kicsi: az UV-fluxus jelentős. A forrótól 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 vonalai 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 ( $\Omega_0$ ) a kritikus, azaz a szétszakadás nélkül még lehetséges legnagyobb rotációs sebességhez ( $\Omega_c$ ) 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 félszélességével 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.

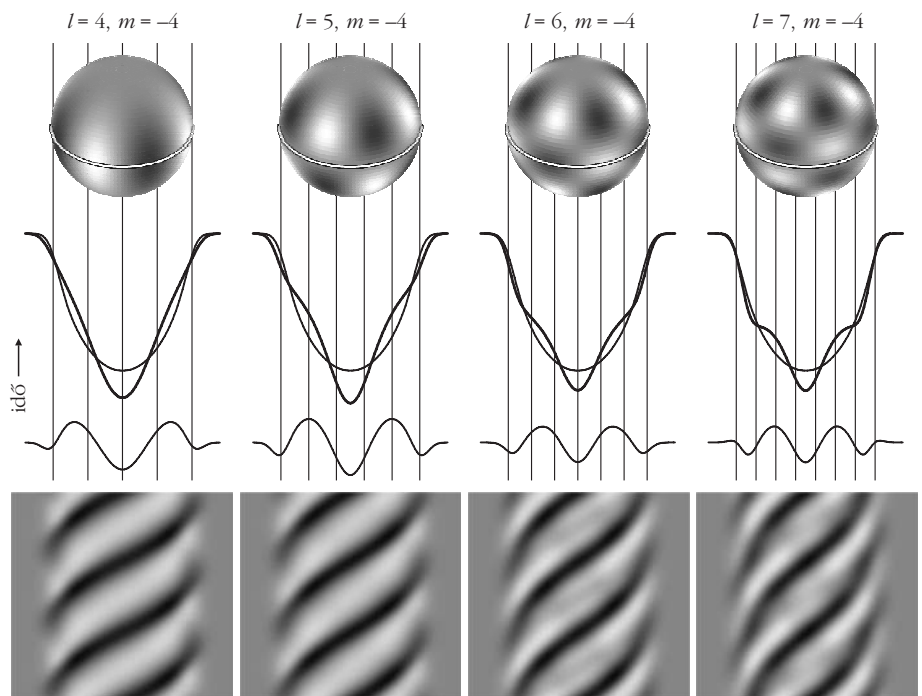
#### Forgási vonalkiszélesedés

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 felülelelemek 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 sávtól 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 idősmérésekre 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-idő szükséges. Azonban a magasabb rendű pulzációs módusokat ( $l > \sim 4$ ), amelyeknél a csillagfelszín sok kis szegmense ellentétes fázisban változik, a felületelemek 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 üvegszállal 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.