

Fűrész Gábor

A csillagászati spektroszkópia eszközei

Ma már tudjuk, hogy miből vannak a csillagok. De még mintegy 300 évvel ezelőtt sem volt egyértelmű, hogy valaha is választ kaphatunk erre a kérdésre. Akkor már sejtették, hogy a csillagok olyan messzeségben vannak, amely lehetetlenné teszi a közvetlen vizsgálatukat, sőt központi csillagunk, a Nap is elérhetetlenül távolinak tűnt. A XVII. század utolsó harmadában azonban többen (I. NEWTON, R. DESCARTES és R. HOOK) is leírták, hogy a napfény prizma segítségével színekre bontható. 1802-ben WILLIAM WOLLASTON rést is alkalmazott kísérleteinél, és felfedezte a Nap színekének abszorpciós vonalait, jelentőségüket azonban nem ismerte fel. JOSEPH FRAUNHOFER 1814-ben már távcsőhöz csatolta a színeképet létrehozó optikai rést, és a Nap spektrumában mintegy 600 vonalat írt le tudományos alaposággal. Ezzel kezdetét vette a csillagászati spektroszkópia. J. B. L. FOUCAULT és G. KIRCHHOFF munkássága, valamint R. W. BUNSEN felismerése, miszerint a Napon ugyanazok a kémiai elemek találhatók, mint a Földön, elvezetett az asztrofizika megszületéséhez.

Nyugodtan kijelenthetjük, hogy az asztrofizika spektroszkópia nélkül nem létezne. A színeképelemzés csillagászati alkalmazásairól az 1998-as Csillagászati évkönyvben már olvashattunk¹. E cikk inkább a műszertechnika szemszögéből próbálja bemutatni a csillagászatnak ezt az igen gyorsan fejlődő területét.

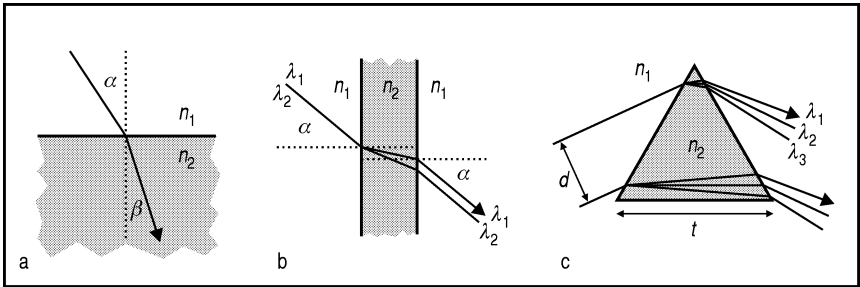
Bontsuk színekre a fényt!

Prizmák és rácsok

A fénytörés két optikailag átlátszó közeg határfelületén történik, és a jól ismert *Snellius–Descartes-törvény* írja le a beeső és megtört fénysugár viszonyát:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

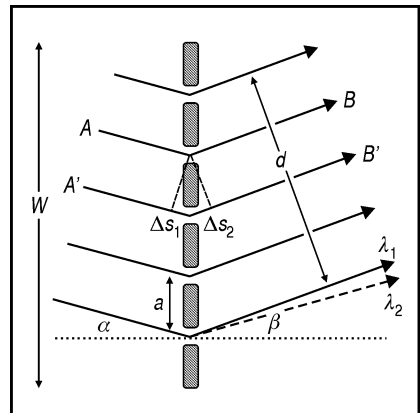
1. VINKÓ J. – SZATMÁRY K. – KASZÁS G. – KISS L.: A csillagok színeképe. *Csillagászati évkönyv 1998*, 204. o.



3.1. ábra. a) Fénytörés két közeg határfelületén. b) Fény áthaladása síkpárhuzamos üveglapon. c) Színbontás prizmaival

ahol α és β a beeső illetve megtört fénysugár és a felület merőlegese közötti szög; n_1 és n_2 pedig a határfelület két oldalán lévő közegek törésmutatója (3.1a ábra). A törésmutató értéke az anyagra jellemző: vákuumban 1, levegőben kicsit nagyobb 1-nél, vízben mintegy 1.3, üvegyanyagokban 1.5 körüli, a gyémántban pedig 2.4. A törésmutató pontos értéke azonban függ a fény hullámhosszától, színétől is. Ezt a jelenséget nevezzük *díszperzió*nak. Egy párhuzamos üveglapon áthaladó fény nem színeződik el, mivel két határfelületen szimmetrikusan történik a törés (3.1b ábra). Ha azonban egy háromszög keresztmetszetű üvegdarabot, egy prizmat tekintünk, annál már nem áll fenn a szimmetria, és a fény az áthaladás után színeire bomlik (3.1c ábra).

Hasonló jelenség figyelhető meg a fényelhajlás (diffrakció) és a fényinterferenciáján alapuló *optikai rács* esetében. Ha a fény egy keskeny résen halad át, fényelhajlás történik, és az α szög alatt beeső nyaláb különféle β irányokban haladhat tovább. Egymástól egyenlő távolságra lévő részek sorozatán – egy optikai rácson – a szomszédos résekből kiinduló, azonos mértékben elhajlott sugarak között úthosszkülönbség keletkezik, amely a részek távolságától és az elhajlás szögétől függ (3.2. ábra – úgy tekintjük, hogy a rács előtt és utána is ugyanolyan törésmutatójú közegben halad a fény). A továbbhaladó sugarak között az úthosszkülönb-



3.2. ábra. Fény áthaladása optikai rácson (részletes magyarázat a szövegben)

ségnek ($\Delta s_1 + \Delta s_2$) megfelelő interferencia lép fel. Amelyik elhajlási szögek-nél az úthosszkülönbség egy adott hullámhossz egész számú többszöröse, ott azon a hullámhosszon erősítés történik, amit a rácsegyenlet ír le:

$$\begin{aligned} m \lambda &= a \sin \alpha + a \sin \beta, \\ \varrho m \lambda &= \sin \alpha + \sin \beta, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol $\varrho = 1/a$ a rács vonalainak sűrűsége, λ a hullámhossz, m pedig egy egész szám, a *spektrális rend*, ami azt adja meg, hány hullámhossznyi a különbség a szomszédos résekből érkező fénysugarak között. A rácsegyenletből látszik, hogy különböző β elhajlási szög esetén más λ hullámhosszra, azaz más színre lép fel az erősítés, vagyis a beeső fehér fény összetevőire bomlik. A rácsegyenlet bal oldala ugyanakkora számértéket ad, ha m -et és λ -t úgy változtatjuk meg, hogy a szorzatuk ugyanaz marad, vagyis a különböző spektrális rendek különböző hullámhosszai ugyanabba az irányba haladva adhatnak erősítést.

Azt, hogy egy adott renden belül két különböző, egymáshoz közeli hullámhosszúságú fénynyaláb ($\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda$) eltérülési szöge között mekkora a különbség ($\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta$), az optikai elem (*szög*)*dísperziója* adja meg:

$$\text{prizma: } \frac{\Delta\lambda}{\Delta\beta} = \frac{d}{t} \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \quad (3)$$

$$\text{rács: } \frac{\Delta\lambda}{\Delta\beta} = \frac{\cos \beta}{m \varrho}, \quad (4)$$

ahol Δn a törésmutató különbség a két hullámhosszra, d a beeső nyaláb átmérője, t a prizma alapjának hossza (3.1c ábra).

Ezeknek az összefüggéseknek a felhasználásával egy optikai elem elméleti feloldóképessége (R^*):

$$\text{prizma: } R^* = t \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}, \quad (5)$$

$$\text{rács: } R^* = d \frac{m \varrho}{\cos \beta} = W m \varrho, \quad (6)$$

ahol t a prizma és W a rács karakterisztikus mérete (a 3.2. ábra alapján $d/\cos \beta = W$). Nagyobb R^* jobb feloldást, azaz a spektrumban finomabb részletek elkülönítését jelenti.

A prizmák és rácsok spektroszkópiai alkalmazásánál a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- prizmát sokkal egyszerűbb készíteni, bár az üvegyanyag nagy tisztaságáról, hibamentességéről gondoskodni kell. Ez mégis könnyebb, mint milliméterenként több száz szabályos karcolatot felvinni egy üveglemezre;
- a prizma előnye továbbá, hogy egy színeképet hoz létre, míg a rács esetében a több spektrális rend részben átfedi egymást;
- a prizma egyenletesen és nagymértékben átlátszó különféle hullámhosszakra, míg rácsoknál (különösen nagy ρ esetén) a karcolatok árnyékhatása miatt fényvesztés lép fel, a színek között pedig intenzitáskülönbség figyelhető meg;
- azonos optikai méret ($t \approx W$) esetén ráccsal könnyebb nagy feloldást elérni, mivel a prizmák üvegyanyagaira $\Delta n/\Delta\lambda$ általában kicsi;
- prizma esetében $\Delta n/\Delta\lambda$ jelentősen és nem lineárisan változik a spektrum vörös és kék szélé között, azaz a feloldóképesség a színek mentén nem állandó.

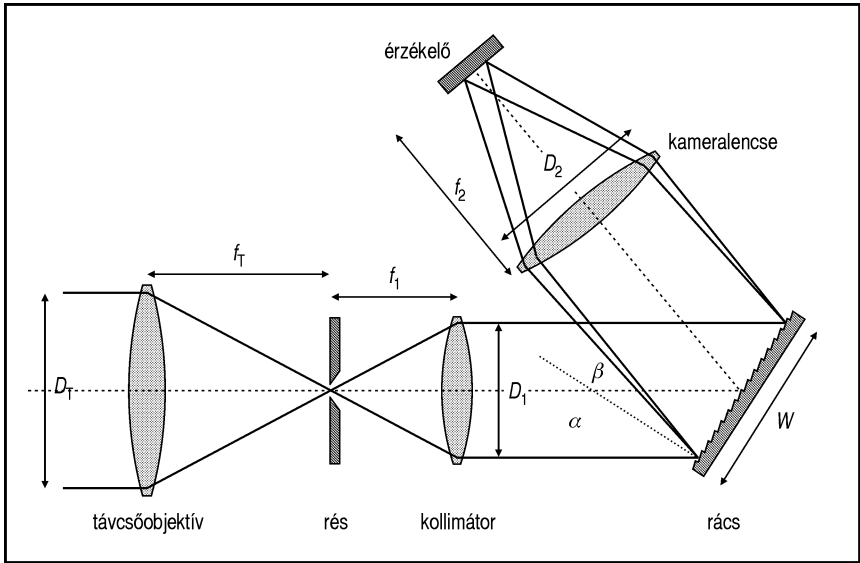
A spektrográf alkotórészei

Az imént felsorolt okok miatt a spektrográfok történetének korai szakaszában szinte kizárólag prizmás műszereket használtak, amikben több prizma egymás utáni alkalmazásával próbálták növelni a feloldóképességet. A modern, nagy felbontású műszerekben azonban alapvetően rácsokat alkalmaznak, a prizmák legfeljebb másodlagos szerepet töltenek be.

Az optikai rácsoknak két fő típusa van: az *áteresztő* (*transzmissziós*, 3.2. ábra) és *tükröző* (*reflexiós*, 3.3. ábra). A rácsok már említett hátránya, hogy a beeső nyaláb intenzitása elhajlás után számos spektrális rendbe oszlik el. A magasabb rendekben a (6) képlet szerint nagyobb az elérhető felbontás, viszont a színeképek már említett átfedése mellett ezekbe a beeső fényintenzitásnak már csak kis hányada jut, vagyis a rács hatásfoka igen alacsony lehet.

Egy korszerű rácsos spektrográf vázlatos felépítését szemlélteti a 3.3. ábra. A D_T átmérőjű, f_T fókusz távolságú távcsőobjektív által összegyűjtött fény az s szélességű résen keresztül lép be a spektrográfba. A rés a látómezőben lévő egyéb objektumok, az égi háttér és egyéb nem kívánatos fényforrások kiszűrésére szolgál. A résnek az égboltra vetített, látszó szögátmérőjét χ jelöli. A réstől f_1 (fókusz) távolságban lévő kollimátor feladata a fénynyaláb párhuzamosítása. A D_1 átmérőjű nyaláb α beesési szög alatt érkezik a rácsra, azon színeire bomlik, és a hullámhossztól függő $\beta(\lambda)$ szög alatt, D_2 átmérőjű nyalábban távozik. A fényt ezután a kamera képezi le az érzékelőre, ami általában egy CCD².

2. A CCD-érzékelőkről bővebben: FÜRÉSZ GÁBOR: CCD-kamerák a csillagászatban. *Csillagászati évkönyv 2002*, 266. o.



3.3. ábra. Egy korszerű rácsos spektrográf vázlatos felépítése

Figyeljük meg, hogy a távcső fényereje ($F_T = f_T/D_T$) egyezik a kollimátor fényerejével ($F_1 = f_1/D_1$). Ha $F_1 > F_2$, akkor fényt veszítünk, mert a réstől f_1 távolságban a nyaláb átmérője nagyobb, mint a kollimátor átmérője. Ellenkező esetben nincs fényvesztés, de feleslegesen nagy a kollimátor, ami annak előállítási költségeit növeli.

A rács jellemző méretét, W -t meghatározza a beesési szög (α), valamint a párhuzamosított nyaláb átmérője. Adott α , ρ és m esetén a rács elméleti feloldóképességét megadó (6) képlet alapján azt várjuk, hogy nagy felbontású műszerhez nagy W , vagyis nagy kollimátorátmérő szükséges. A mai csillagászati távcsövek fényereje 8 körüli, vagyis a spektrográf jellemző hossza a kollimátor méretének kb. nyolcszorosa. Kétszer akkora elméleti feloldóképesség eléréséhez pedig kétszer akkora spektrográfra lenne szükség.

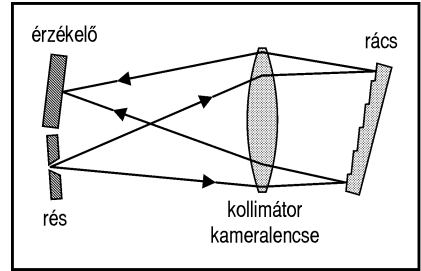
A 3.3. ábrán látható, hogy az elhajlott nyaláb a diszperzió miatt a ráctól távolodva egyre szélesebb, ezért a kamerát a rács közelében célszerű elhelyezni, különben egyre nagyobb méretű optika kell a spektrum leképezéséhez. Ez az elrendezés természetesen csak egy a számos lehetséges konfiguráció közül. Egy speciális megoldás a reflexiós rácsot használó *Littrow-elrendezés*, amelyben a beesési és elhajlási szög egyenlő ($\alpha = \beta$). Ekkor a kollimátor egyben kameralencseként is felhasználható (3.4. ábra), és minimális az elhajlott nya-

láb keresztmetszet-torzulása. A rácsegyenet is egyszerűbb alakot ölt:

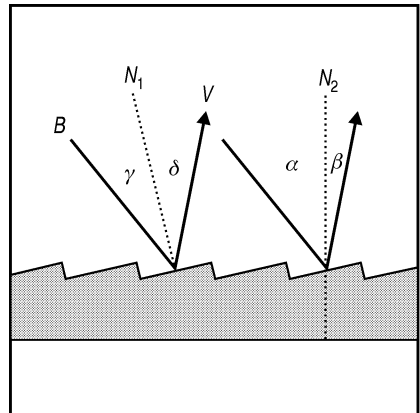
$$m \varrho \lambda = 2 \sin \alpha, \quad (7)$$

A kamera tulajdonképpen a rés különböző hullámhosszakon alkotott képeit vetíti egymás mellé az érzékelőre. A szokásos résszélesség a néhány száz μm nagyságrendjébe esik, míg a CCD-kamerák képpontmérete 10 μm körüli. A mintavételezési tétel értelmében már két képpont elegendő a megfelelő képalkotáshoz, ezért a kollimátor–kamera optikai rendszerünk kicsinyíthet, a 3.3. ábra jelöléseit használva $f_2 : f_1$ arányban. Ezáltal a megfigyelhető spektrális tartományt is kiszélesítjük, hiszen így az adott méretű detektorra nagyobb hullámhossztartományt tudunk leképezni. Nagyon fényerős, ugyanakkor optikai hibáktól mentes kamerát ($f_2 \ll f_1$) azonban igen nehéz készíteni.

A reflexiós rácsok előnye, hogy az egyszerű karcolatok helyett olyan tükröző felület is készíthető, aminek segítségével megnövelhető egy kiválasztott spektrális rendbe jutó fény mennyisége: ezek az *alakított karcolatú rácsok*³. Itt a ferde lépcsők adják az erősítő interferenciához szükséges úthosszkülönbséget. A 3.5. ábrán a beeső B és visszavert V sugarak a kis tükörsáv merőlegeséhez képest szimmetrikusan haladnak ($\gamma = \delta$), míg α beesési és β elhajlási szöveget a rács egészének N normálisához viszonyítva mérjük. A kis lépcsők mérete és állásszöge által meghatározott m spektrális rend és λ hullámhossz esetében szinte az összes, adott hullámhosszon beérkező fény a kiválasztott rendbe jut, és ezáltal a rács határfoka ott jelentősen felerősíthető.



3.4. ábra. Littrow-elrendezésű rácsos spektrográf vázolata



3.5. ábra. Alakított karcolatú reflexiós rács

3. Az angol szaknyelv a *blazed* (ragyogó, tündöklő) *grating* kifejezést használja.

A felbontóképességről

Egy spektrográf tényleges R feloldóképességét a rács elméleti R^* feloldóképessége (6) mellett a műszer egyéb elemei is befolyásolják. Az R azt adja meg, hogy adott λ hullámhosszon mekkora a legkisebb megkülönböztethető $\Delta\lambda$ részlet egy spektrumban:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (8)$$

Egy színképvonal alakja (a vonalat létrehozó intenzitásváltozás a hullámhossz függvényében, a spektrum folytonos részéhez viszonyítva) általában Gauss-görbéhez hasonló. A vonal a *félérték szélességgel* jellemezhető, ami a kontinuumhoz viszonyított minimális (vagy emissziós vonal esetében a maximális) intenzitásnak a felénél vett vonalszélesség. Egy színképvonal azonban valójában a rés képe a detektoron, ezért $\Delta\lambda$ függ:

- a rés képének méretétől, amit a rés fizikai mérete valamint a kamera és a kollimátor fókusz távolságának aránya határoz meg;
- a rés képének szélességére eső hullámhossztartomány nagyságától, amit a szögdiszperzió mértéke és a kamera fókusz távolsága befolyásol.

Tehát a feloldóképesség a 3.3. ábrán látható jelöléseket használva:

$$R = \frac{m \varrho \lambda F_1 W}{s}. \quad (9)$$

Csillagászati szempontból nem a rés s fizikai mérete, hanem χ látszó szög-mérete a lényeges. Mivel kis szögről van szó, $\chi = s/f_T$. Egy csillag képe a fókusz síkban első közelítésben az elméleti Airy-féle elhajlási kép, ami azonban a gyakorlatban légköri hatások miatt egy $0''.3-3''$ sugarú foltban kenődik szét. Adaptív optika nélkül egy 8 m-es távcsőben ugyanúgy $1''$ lehet egy csillag látszó képe, mint egy 1 m átmérőjű műszerben. Azonos fényerőt feltételezve az $1''$ -es folt lineáris mérete azonban már nagyon eltérő a két távcső fókusz síkjában. A rést úgy érdemes méretezni, hogy a lehető legtöbb csillagfényt és a lehető legkevesebb égi háttérfényt engedje be a spektrográfba. A feloldóképesség kifejezésében tehát célszerű a rés látszó szélességét használni:

$$R = \frac{m \varrho \lambda W}{\chi D_T}. \quad (10)$$

Hogyan lehet egy adott D_T objektív méretű távcsőhöz csatlakozó spektrográf felbontóképességét növelni? Láttuk, hogy a rés χ méretének csökkenésével elveszítjük az értékes csillagfényt egy részét. Megoldás lehet a rács W

méretének növelése, ez azonban növeli az egész spektrográf méretét, és a rácsok gyártási technológiája sem képes 400 mm-nél lényegesen nagyobb hagyományos rács előállítására. Technológiai okok miatt ϱ rácssűrűség sem növelhető sokkal 1200 vonal/mm fölé.

Marad tehát a spektrális rend növelése, hiszen m értékét akár a 100-nak is választhatnánk. Ekkor azonban fellép a színképek már említett átfedése, vagyis eltérő hullámhosszúságú fénysugarak az elhajlás után ugyanott képeződnek le a detektoron. Miként lehet őket megkülönböztetni?

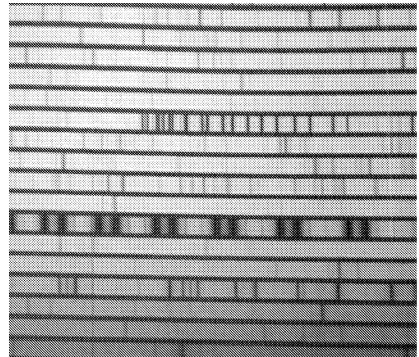
Két lehetőség is kínálkozik. Az egyik a *szabad spektrális tartomány* (FSR, *free spectral range*) használata. Mivel m csak egész szám lehet, ezért két szomszédos rendre felírva a (2) egyenlet bal oldalát:

$$(m + 1) \lambda \varrho = m \lambda_1 \varrho \quad (11)$$

$$\frac{\lambda}{m} = \lambda_1 - \lambda,$$

vagyis egy adott m renchez tartozó, és a rács egyenletet kielégítő λ hullámhossznak λ/m széles környezetében nincs átfedés, egyértelmű a vonalak azonosítása. Ezt nevezzük szabad spektrális tartománynak. Színszűrő segítségével biztosítható, hogy a spektrográfba csak ebben a tartományban jusson be fény. Az ilyen rend-megkülönböztető szűrők azonban csak egy igen keskeny szeletét engedik vizsgálni a spektrumnak, és előállításuk sem egyszerű.

Sokkal előnyösebb megoldás az *echelle spektrográf*, amelyben egy *másodlagos diszperziós elemet* alkalmaznak az eredeti színkép diszperziójára merőleges irányban. Ekkor a szomszédos rendek azonos helyre eső, de eltérő hullámhosszúságú fénysugarai ebben az irányban szétválnak. Ezáltal kétdimenziós spektrumot kapunk (3.8. ábra), ahol minden hullámhossz egyértelműen azonosítható. A spektrumvonalak elkülönítéséhez kis mértékű kereszt-diszperzió is elegendő, ezért másodlagos diszperzív elemként többnyire prizmat alkalmaznak.



3.6. ábra. Kétdimenziós echelle spektrum

A $\varrho = 900\text{--}1200$ vonal/mm-es rácsok karcolatainak apró szabálytalanságai miatt szellemkép és zavaró szórt fény jelentkezhet a spektrumban. 40–80 vonal/mm sűrűséggel azonban jó minőségű, szabályos, hibamentes rácsot lehet készíteni. A magas rendben működő spektrográfok rácsa nagy szöget zár be a

beeső és az elhajló nyalábbal. Ekkor a rés felől nézve a vetületi hatás miatt egy ilyen – valójában alacsony – rácssűrűség is nagynek látszik. A nagy beesési szög miatt viszont a teljes rács vetületi felülete is kicsi, vagyis adott nyalábát-mérő esetén igen hosszú, elnyúlt, téglalap alakú rácsokra van szükség. Ezeket nevezzük *lépcsős*, vagy *echelle rácsoknak*.

A felbontóképesség (10) egyenletéből még egy fontos következtetés is levonható. Ha a spektrográf-konfiguráció adott, akkor nagyobb távcsőátmérő esetén ugyanolyan felbontás eléréséhez nagyobb rácsot kell alkalmazni. Vagyis a jelenlegi 8–10 m-es távcsövek hatalmas spektrográfjainak méretét a jövő 20–30, esetleg 50 m-es távcsöveihez a távcsőátmérővel együtt kell növelni. Pedig már a mai távcsőóriások számára készített echelle spektrográfok is nagyobb rácsokat igényelnek, mint amiket egy darabban el lehet készíteni. A megoldás a régi mozaik-elrendezés illetve a modern lézer-alapú technika lehet.

A gyémánt szerszámmal üveg hordozóra karcolt, illetve a rácsmásoló (replica) technikával létrehozott rácsok felső mérethatára 400 mm körül van. Amennyiben nagyobb rácsra van szükség, több rács mozaikszerű összeillesztése jelentheti a megoldást. A rácsok egymáshoz viszonyított beállítása azonban akár több hetes munka is lehet, és a beállított helyzet tartós megőrzése sem kis feladat.

A hagyományos holografikus rácsok esetében a hordozón egy felületi mintát hoznak létre, és azon történik elhajlás. Több laboratóriumban is sikeres kísérleteket végeztek *térfogati holografikus rácsok* (VPHG, *Volume Phase Holographic Grating*) előállítására. A mind transzmissziós, mind reflexiós elrendezésben, akár méteres méretben is gyártható rácsok lényege, hogy egy, a látható fény hullámhosszához képest vastag (4–30 μm) zselatinrétegben lézertény segítségével holografikus mintát hoznak létre. A fényelhajlás a periodikusan változó törésmutatójú zselatin teljes térfogatában következik be. Az ilyen rácsok mind hőmérsékletre, mind páratartalomra érzékenyek, ezért egy második üveglemezzel zárják le a zselatinréteget, ami így a becslések szerint 10–20 évig őrzi meg minőségét.

A gyártási technika fejlődése várhatóan egyre nagyobb méretű és szélesebb hőmérséklet-tartományban használható rácsok készítését teszi lehetővé, és akár 6000 vonal/mm-es rácssűrűség is elérhető lesz. A térfogati rácsok további kedvező tulajdonságai, hogy a szendvicsszerkezet miatt a külső felületek tisztíthatók; tetszőleges hullámhosszra hangolva magas diffrakciós határfok érhető el; nincs szellemkép és szórt fény; a gyártás során könnyen számításba vehetők és előre kiegyenlíthetők a spektrográf egyéb optikai elemeinek hibái.

Műszerek és módszerek

Kozmikus traffipax

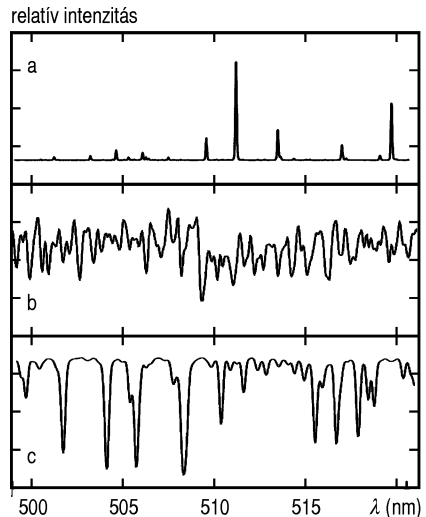
Egy színekép rengeteg információt hordoz: például árulkodik a forrás kémiai összetételéről, esetleges mágneses teréről, vagy mozgásának látóirányba eső összetevőjéről, a *radiális sebességről*, aminek mérése a távoli csillagrendszerek dinamikai vizsgálatainak alapja. Miként lehetséges megmérni egy csillag sebességét? A Doppler-effektus szerint ha az objektum közeledik a megfigyelőhöz a színeképvonalak a kék felé tolnak el, ha távolodik, akkor pedig a vörös felé. Az eltolódás mértéke pedig ($v \ll c$ esetén) a sebességgel arányos:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (12)$$

ahol λ színeképvonal álló rendszerben megfigyelhető hullámhossza, $\Delta\lambda$ a vonal eltolódása, v az objektumnak a megfigyelőhöz viszonyított radiális sebessége, c pedig a fénysebesség. Az eltolódás mértékét azonban valamihez képest mérni kell, szükség van a színeképvonal eredeti (laboratóriumi) hullámhosszát szolgáltató referencia fényforrásra.

A referencia fényforrás színeképének lehetőleg a teljes vizsgálni kívánt spektrális tartományban éles, jól elkülönülő vonalakat kell tartalmaznia. Alacsonyabb felbontóképességű műszerekben ($R < 5000$) például hélium-neon-argon gázkeverékkel töltött kisülési lámpákat alkalmaznak. Nagyobb felbontású spektrográfok esetében pedig argonnal töltött, tórium tartalmú katóddal felszerelt (ThAr) lámpákat használnak referenciaként, mivel ezek színeképe szűk hullámhossztartományon belül is számos vonalat tartalmaz (3.7a ábra).

A megfigyelt csillagászati objektum spektrumának (3.7c ábra) hullámhossz-kalibrációja során a távcsövet először az objektum pozíciójába állítják, a spektrográf részét megvilágítják



3.7. ábra. Tórium-argon spektrállámpa (a), jódcella (b) és egy mérendő csillagászati objektum színeképe (c)

a spektrállampa fényével, és néhány másodpercig rögzítik az első referencia spektrumot. Ezután a csillagfényt engedik a részre, halvány objektumok esetén akár több órás expozíciós idővel. A megfigyelés végén pedig ismét referencia színeképet készítenek. Erre azért van szükség, mert a hosszú mérési folyamat alatt a hőmérséklet változása miatt, vagy a távcső mozgásából adódó kis mechanikus deformációk, elmozdulások következtében a spektrográfban is történhetnek olyan változások, amelyek a vonalak elmozdulását okozhatják.

Ezek a hőmérsékleti és mechanikai hibaforrások nagyrészt kiküszöbölhetőek, ha a spektrográfot nem a távcsőre szerelik, hanem egy állandó hőmérsékletű helyiségben, rögzített helyzetben állítják fel. Erre például Coudé-szerelésű távcsöveknél van lehetőség. A Coudé-rendszerek több segédoptikája viszont nagyobb fényvesztéséget jelent, és a kis fényerő nagyobb spektrográf méretet igényel.

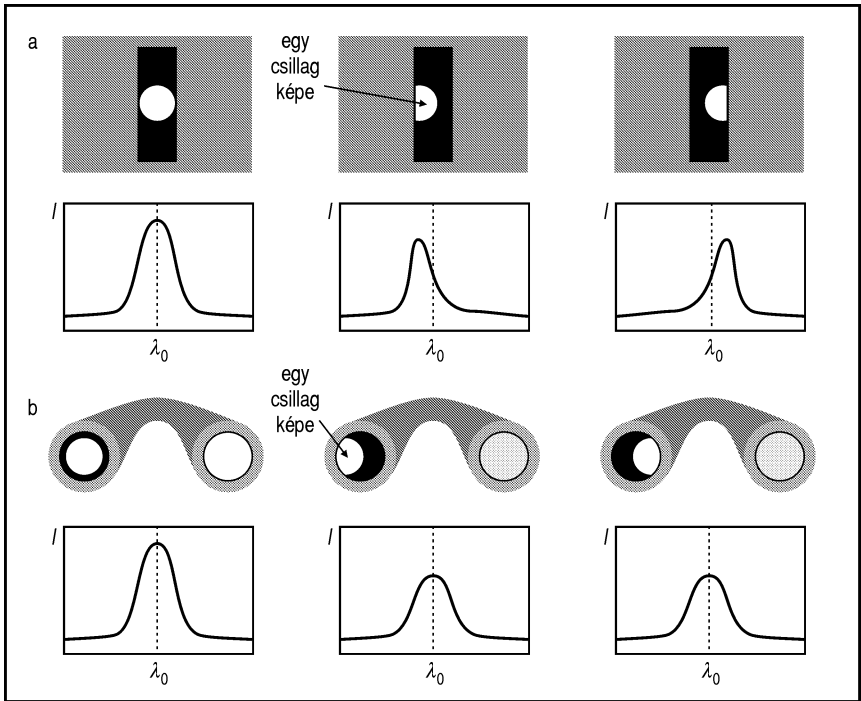
A spektrállampáknál természetesebb, közvetlen összehasonlításra lehetőséget adó módszer, ha egy ismert sebességű csillag abszorpciós spektrumát használjuk referenciaként, hiszen ekkor két hasonló jellegű színeképet lehet összevetni. A rögzített színeképeket általában szoftverrel, *keresztkorrelációs módszert* alkalmazva hasonlítják össze. A két spektrumot apró lépésekben addig tolják el egymáshoz képest, amíg a legjobb egyezést mutatják, a fő színeképvonalak pontosan fedik egymást. A szükséges hullámhosszeltolás adja meg a két objektum radiális sebességének különbségét.

A legnagyobb felbontású csillagászati spektrográfoknál $R \approx 100\,000$, ami (10) és (12) alapján 3 km/s pontosságú sebességmérést tenne lehetővé. A *Keck-teleszkóp HIRES* elnevezésű műszere mégis 2–5 m/s pontosságot ér el. Hogyan lehetséges ez? Először is a vonalak középpontjának helyét a vonalprofilra illesztett analitikus függvény segítségével a vonal félértékszélességénél kisebb hibával is meg lehet határozni. Másrészt sok vonalra elvégzett mérések átlagolásával még pontosabb eredményhez jutunk. Tovább növelheti a pontosságot, ha az objektum színeképével egy időben rögzítjük a referenciát, így a műszerben végbemenő minden esetleges változást ki tudunk szűrni.

Ezen szempontok alapján született meg a jódcellás sebességmérési technika. Alacsony nyomású jódgőzzel telt, 10–15 cm méretű üvegcellán átvezetve a csillag fényét abban ezerszámra jelennek meg a jód keskeny spektrumvonalai (3.7b ábra), ideális referenciát szolgáltatva. Az exobolygók kereséséhez ma ez az egyik legnagyobb pontosságot szolgáltató sebességmérési eljárás.

Csőbe húzott fény

Ahogy nőtt az igény a nagyobb felbontóképesség iránt, úgy nőtt a színeképelemző műszerek mérete is. Az egyre nagyobb méretű spektrográfokat azon-



3.8. ábra. Beállítási vagy vezetési pontatlanság hatása a vonalprofilra rés (a) illetve üvegszál (b) használatakor

ban már nem lehetett a távcsőre szerelni. A Coudé-elrendezés esetén már láttuk a megoldást. A többi optikai rendszernél pedig az üvegszálás fényvezetők jelentették a továbblépést. Ezáltal a Coudé-fókusszal nem ellátott teleszkópokhoz is csatolhatók a rögzített elhelyezésű színekélemező műszerek.

A korszerű optikai szálak a teljes optikai tartományban használhatók, és akár 20–30 m-es hosszúság mellett is jó hatásfokkal továbbítják a fényt a távcsőtől a spektrográfba. Az infravörös spektroszkópia azonban kénytelen mellőzni az alkalmazásukat, mert maguk az üvegszálak a hőmérsékletükből adódóan erős „háttérintenzitást” adnak a hasznos jelhez. A hosszú, vékony és mozgó szálak hűtése pedig egyelőre nem megoldott.

Az üvegszálás fényvezetők használata esetén a sebességmérés hibáinak csökkentéséhez szinte csak a spektrográf közvetlen környezetének állandó állapotban tartásáról kell gondoskodni. Ennek érdekében a spektrográfot gyakran többszörösen szigetelt, állandó hőmérsékleten tartott, zárt helyiségben,

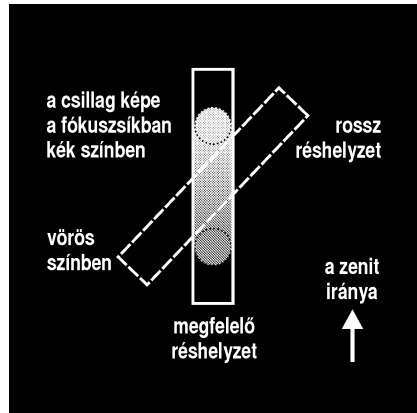
esetleg az épület és a távcsőmechanika rezgéseit csillapító és a légkör apró nyomásváltozásait kiküszöbölő vákuumtartályban helyezik el.

Az üvegszál belsejében haladó fény a sok teljes visszaverődés miatt „homonizálódik”, így a fényvezető használata kiküszöböli azt a hibát is, ami közvetlen leképezésénél a távcső vezetési pontatlanságaiból, a rés nem egyenletes kivilágításából ered (3.8. ábra). Sőt tulajdonképpen résre sincs szükség, hiszen ezeknél a műszereknél a vékony üvegszál kis belépő felülete szolgál „résként”. A rés elhagyása azonban két következménnyel is jár: kevésbé pontos az égi háttér mintavételezése, valamint az légköri diszperzió miatt fényvesztéség lép fel.

Rés használatakor annak általában csak egy részét tölti ki a vizsgált objektum, közvetlenül „alatta” és „felette” az égi háttér világítja meg a rést. Ennek eredményeként az objektum színekének két oldalán az égi háttér spektrumát is rögzítjük, így annak levonása igen egyszerű feladat. Az üvegszálban azonban a sok visszaverődés során „összekeveredik” az elején belépett fény. Az égi háttér méréséhez tehát további üvegszálra van szükség. A két szálát viszont az üvegmagot körülvevő köpenyük, védőburkolatuk és esetleges mechanikai szerelvényeik miatt nem lehet kellően helyezni egymáshoz. Márpedig bizonyos esetekben akár néhány ívmásodperces távolságon belül is eltérő lehet az égi háttér, aminek zavaró spektrumát így nem lehet egyértelműen levonni.

Komoly problémát jelent a légkör színfelbontó hatása. A levegő törésmutatójának színtfüggése miatt a légköri refrakció nagysága kis mértékben a hullámhossztól is függ, azaz egy csillag különböző hullámhosszakon kissé más helyen látszik az égen. A csillag képe tehát kis „szívárvánnyá” húzódik szét a fókusz síkban. A vörös és a kék tartományban alkotott kép között az eltérés a zenitben lévő csillagra nulla, de a horizonthoz közeledve egyre nő, 30° magasságban például már elérheti a $3''$ -et. A rés megfelelő irányba állításával elkerülhető a fényvesztéség, míg rossz réspozíció vagy optikai szál használata esetén bizonyos hullámhosszak nem jutnak be a spektrográfba (3.9. ábra).

A probléma *légköri diszperziót kiegyenlítő prizma* (ADC, *Atmospheric Dispersion Corrector*) alkalmazásával küszöbölhető ki. A távcső fókusz síkja előtt két alacsony diszperziójú, egyenes áthaladású prizmat helyeznek el, amelyek az



3.9. ábra. A légköri diszperzió hatása

optikai tengely körül elforgathatók. Az egyenes áthaladású prizma valójában két eltérő törésmutatójú üvegyanagból összeillesztett optikai eszköz, amin egy kiválasztott hullámhossz elhajlás nélkül halad keresztül, a többi szín viszont ehhez képest a diszperzió tengelye mentén egyik vagy másik irányba eltérül.

Két ilyen eszközt egymás mögé helyezve, és diszperziós tengelyüket párhuzamosan, de a diszperzió irányát ellentétesen beállítva semmiféle színező hatást nem tapasztalunk. A prizmapár ilyen beállítását a zenitben látszó, légköri színbontástól mentes objektumok megfigyelésekor alkalmazzák. A prizákat elforgatva az eredő diszperzió mértéke és iránya változtatható, ezáltal tetszőleges égi pozícióban lehetséges a légköri színbontás irányának és mértékének korrigálása.

Több objektum egyidejű spektroszkópiája

Órás expozíciójú színekfelvételekkel csillagról csillagra haladva csak igen hosszú idő alatt lehet például egy halmaz statisztikusan kezelhető számú tagjáról spektrumot rögzíteni. Ezért már régen felmerült több objektum egyidejű spektroszkópiájának ötlete. Alacsony felbontású színekpek tömeges előállítására már régóta beváltak az objektívprizmás felvételek. E technika során egy kis ($1-5^\circ$) törésszögű prizmat helyeznek a távcső objektívje elé. Nincs szükség résre és kollimátorra, a pontszerű csillagok töltik be a rés szerepét, a beérkező fénysugarak pedig a csillagok hatalmas távolsága miatt eleve párhuzamosak. A színbontó elem után elhelyezett távcső a kamera, és máris százával rögzíthetők a spektrumok (**. *kép a színes mellékletben*).

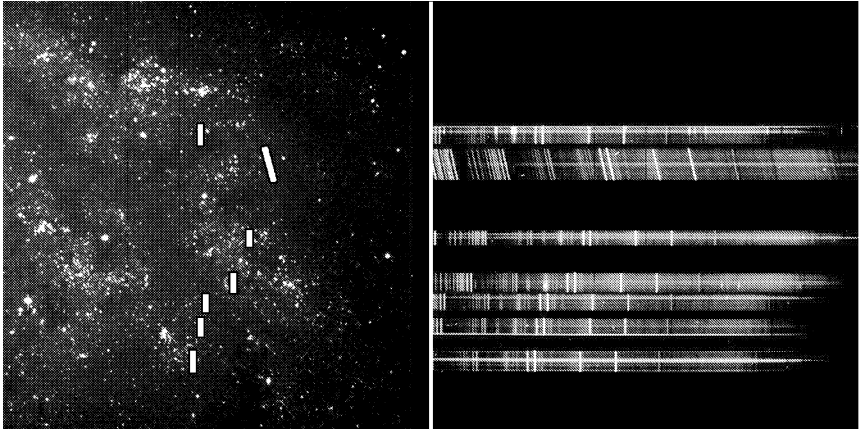
A színekpek átfedése okozta információvesztés csökkentésére két vagy több képet készíthetnek, közben elforgatva az objektívprizmat. Korlátai ellenére például emissziós vonalakat mutató objektumok keresésére még a 90-es évek végén is alkalmazták, illetve képkötő spektrográfokban még ma is használják az ilyen, rés nélküli színekpekészítést.

A rés előnye, hogy segítségével kizárható a spektrumok átfedése. De több objektum egyidejű vizsgálatához miért ne lehetne több apró rést, vagy éppen több üvegszálát elhelyezni a fókuszsíkbán?

A *többréses (multislit) spektroszkópia* eszközeiben a fény a távcsőből egy résmaszkon keresztül jut a spektrográfba. A rések, és ezáltal a spektrumok elhelyezkedése megfelel az objektumok égi helyzetének (3.10. ábra). Ha el akarjuk kerülni az átfedő színekpeket, akkor a réseket persze nem lehet teljesen szabadon elhelyezni.

A *többréses spektroszkópia* előnye, hogy:

- nagy a hatékonysága halvány objektumok esetén, mivel a fény a távcsőből közvetlenül, veszteség nélkül jut a spektrográfba;



3.10. ábra. Többréses spektroszkópia réseinek helye a vizsgált égtérület képére rajzolva (a), és a keletkezett színeképek (b)

- közvetlenül az objektumok mellett megjelenik az égi háttér spektruma, ami lehetővé teszi annak pontos kivonását;
- egyszerű, kézenfekvő a hullámhossz-kalibráció;
- a rés mérete gyártása során beállítható, akár $0''.1$ résszélesség is elérhető, ami nagy feloldást tesz lehetővé.

A módszer hátránya, hogy:

- a spektrográfot a távcsőre kell szerelni, ezért a stabilitási feltételek korlátozzák a műszer méreteit;
- a rések csak viszonylag kis területen belül helyezhetők el (ami távcsőtől, műszertől függően kb. $5' \times 5'$, $10' \times 10'$ -nek felel meg), mivel a spektrográf kollimátora csak kis fizikai távolságon belül lévő résekből érkező fényt képes optikai hibáktól mentesen párhuzamosítani;
- korlátozott a rések száma;
- az egyenetlen réskivilágítás sebességmérési pontatlansághoz vezethet;
- infravörös spektroszkópia esetén a résmaszkot is hűteni kell;
- a légköri refrakció miatt a távcső fókuszsjkájában keletkező kép kis mértékben változik az objektum látóhatár feletti magasságával, így az elkészített résmaszk csak a megfigyelés tervezett időpontjában használható optimális eredménnyel.

A réseket tartalmazó maszkokat minden egyes látómezőhöz egyenként le kell gyártani, és azokat cserélgetni kell a megfigyelés során. A maszk anyaga lehet fém, vagy szénszálas műanyag lemez. A réseket általában lézerrel alakítják ki, amivel elérhető a megkívánt μm -es pontosság.

Csúszóréses maszkkal (3.11. ábra) elkerülhető az egyedi rés-maszkok gyártása. Ezeket a maszkokat egymással párhuzamosan elrendezett, mozgatható rések alkotják. Egy rés két szára a látómező két átellenes oldaláról tolható be. Az objektum jellegének és légköri nyugodtságnak megfelelően állítható a rés szélessége is. A szomszédos elemeket azonos pozícióra állítva pedig hosszú rések képezhetők.

Egy másik megoldásnál nagyon sok apró, négyzet alakú mikrorést vagy mikrotükröt helyeznek el mátrix elrendezésben egymás mellé. Az egyes rések nyitása-zárása, illetve a tükrök billentése elektromos impulzusokkal történik (3.12. ábra). E szerkezetek előnye, hogy szinte tetszőleges elrendezésű réskombinációk alakíthatók ki. Több szomszédos mikrorés egyidejű megnyitásával létrehozott nagyobb résekben viszont a tartószerkezet kítakarását, illetve fényelhajlást okoz, ami csökkenti a spektrumvonalak kontrasztját. Szintén problémát jelenthet az ajtócskák rugalmasságát biztosító szerkezeti elemek között át-szűrődő fény. Több mikrorés-mátrix mozaikszerű összekapcsolásával akár 1000×1000 elemű, 100×100 mm méretű maszkot is lehet készíteni.

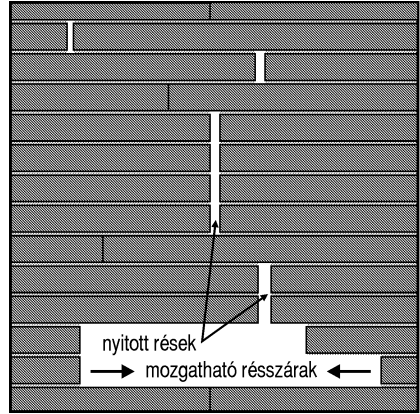
Nemcsak résekből, hanem üvegszálakból is lehet többet elhelyezni a távcső fókuszfelületén. Ennek legfontosabb előnye, hogy a spektrográf részét az egy sorban elrendezett üvegszálak helyettesítik, vagyis az objektumok látómezőbeli elhelyezésétől függetlenül, állandó és átfedések nélküli elrendezésben rögzíthetők a spektrumok.

További előnyt jelent, hogy:

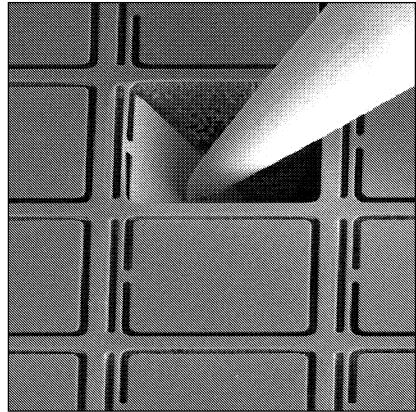
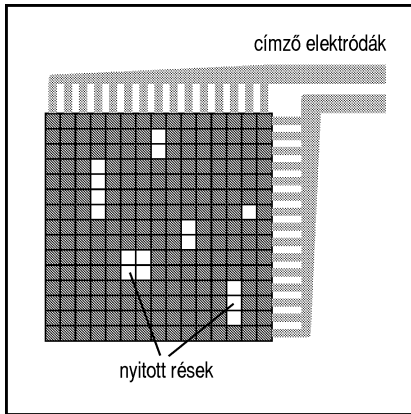
- a szálak nagy (akár 3° -os) látómezőben helyezhetők el;
- nagy pontosság érhető el, mivel az optikai szálak érzéketlenek a vezetési hibákra;
- a spektrográf a távcsőtől elkülönítve, ellenőrzött környezetben helyezhető el, és így nagy feloldás és nagy stabilitás érhető el.

Hátrányos azonban, hogy:

- égi háttér mintavételezése és levonása nehézkes;
- a szálba történő belépéskor és szálban haladva fényvesztés lép fel;
- nehézkes a kalibráció, mivel az üvegszálak egyenletes kivilágítása nem egyértelmű.



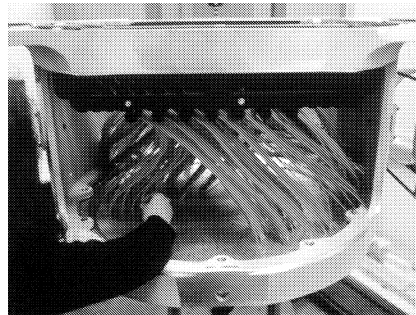
3.11. ábra. A csúszóréses maszk működésének elve



3.12. ábra. Mikrorés mátrix vázlata (balra). A jobb oldali kinagyított fényképrészleten egy tű hegyével megnyitott rés látható

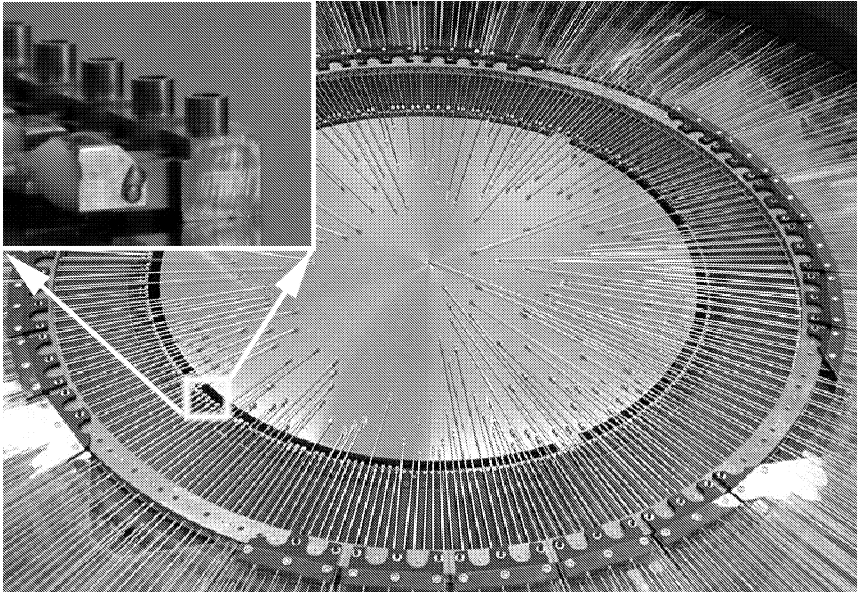
Az optikai szálaknak a mérés alatti rögzítésére és mérések közötti átrendezésére több módszer is használatos. A *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) spektrográfjainak 640 optikai szálát kézzel helyezték el az objektumok pozíciója alapján előre kifúrt alumínium lemezekbe (3.13. ábra). Ez a megoldás olcsó, hiszen gyakorlott munkatársak egy óra alatt akár 600 szálát is el tudnak helyezni, igen kis hibaszázalékkal.

A robotokkal végzett pozicionálás alapfeltétele, hogy a szálak oldható kötéssel legyenek a fókuszfelülethez rögzítve. Ezt jelenleg kis mágnesekkel oldják meg. A látómezőbe sugár irányban befutó szálak (3.14. ábra) végén egy kis, fémből készült gomb van, aminek alján található a mágnes, belsejében pedig egy kis prizma, ami a távcsőből érkező fényt a szálba vetíti. Az első pozicionáló robotok számára 400 szál elhelyezése egy órát vett igénybe, a legújabbnak egy hasonló feladat elvégzéséhez már csak néhány percre van szükségük.



3.13. ábra. Az üvegszálak behelyezése az egyik SDSS spektrográf lyukmaszkjába

A hangyászsün angol neve után elkeresztelt *Echidna* pozicionálóban a szálak nem sugárirányban, oldalról lépnek be, hanem – a kézi pozicionáláshoz hasonlóan – a fókuszfelület mögött, a távcső optikai tengelyével párhuzamo-

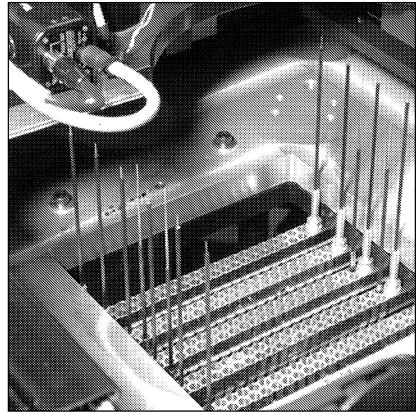
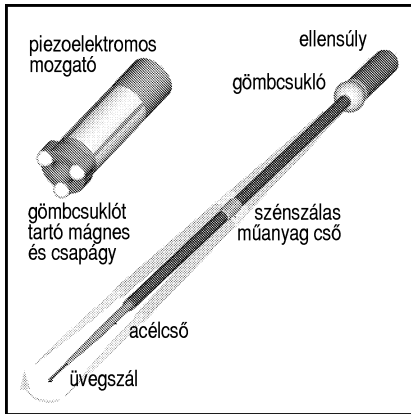


3.14. ábra. Pozícionáló robot segítségével sugár irányban mozgatott üvegszálak

san futnak. Ennek köszönhetően egyenletesen lehet kitölteni a látómezőt. A 3.15 ábrán látható egy kinagyított túske, aminek „tövében” három piezoelektromos mozgató található. Ezek képesek kis szögben megdőnteni a mágneses gömbcsuklóra erősített és megfelelően ellensúlyozott tuskét. Az autóantenna-szerűen egyre vékonyodó túske belsejében fut az optikai szál. Mindegyik túske vége egy 15 mm-es kör területén belül mozgatható, és $10\ \mu\text{m}$ -es pontossággal állítható egy tetszőleges pontra. Mivel az optikai szálak vége szabadon van, nincs egy kiterjedt szerkezetbe ágyazva, a szomszédos szálak szinte egymás mellé is állíthatók, így közeli objektumokról is egyszerre készíthető színekép. Ezekkel az eszközökkel akár több száz objektum egyidejű spektrális vizsgálata is lehetővé válik.

Képkalkuló spektroszkópia

Egy spektrográf távcsőre szerelése több órát, de akár egy napot is igénybe vehet. Ezért a távcsőtervezők arra törekszenek, hogy minimálisra csökkentsék a műszerek cseréje okozta holtidőt, és egy éjszaka során többféle műszert is lehessen használni. A hatékonyság növelésének egy módja, hogy a képkalkoló érzékelőt és a spektrográfot egy műszerbe építik össze: ez a *képkalkoló spekt-*



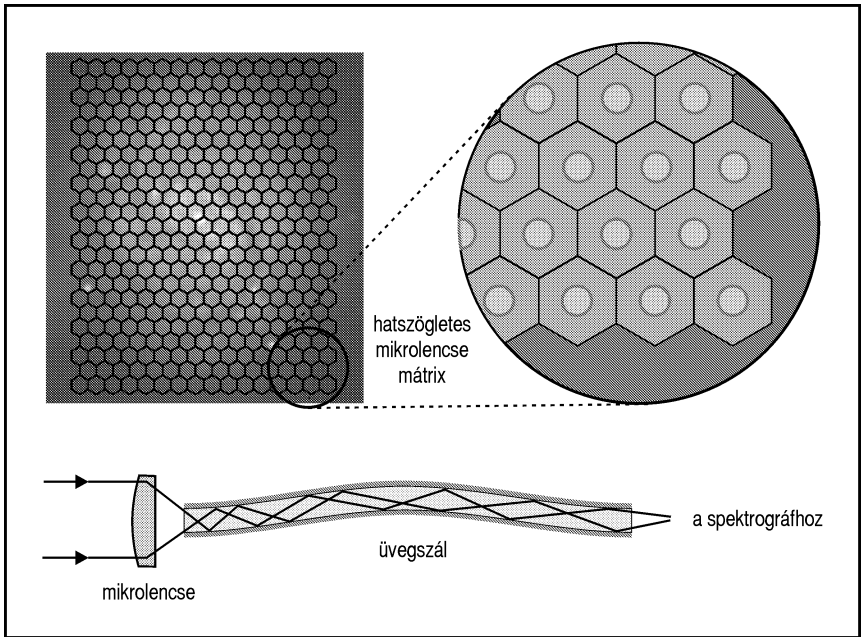
3.15. ábra. A hangyászűn-pozicionáló egy tuskéje (balra), és egy 200 szálal pozicionáló berendezés összeszerelés közben (jobbra)

rográf. Ezekben a műszerekben a reflexió rács síktükörré cserélhető, és így a kollimátor által párhuzamosított nyalábot a kamera optikája színbontás nélkül képezi le az érzékelőre. Áteresztő rács használatakor egyszerűen csak el kell távolítani a fényútból a színbontó elemet.

A szokásos megoldás szerint a spektrográf kollimátora és kameralencséje közé egy vagy több forgatható tárcsát tesznek. Az első tárcsa segítségével különféle egyenes áthaladású színbontó elemeket lehet beforgatni a fényútba. Egy pozíció azonban üresen marad a képképző üzemmóddhoz. Az esetleges második tárcsával pedig fotometriai, vagy a spektrális rendeket elkülönítő szűrőket lehet kiválasztani. A tárcsák számának, illetve a tárcsákon belüli pozíciók számának a növelésével sokféle üzemmód használatára nyílik lehetőség, amelyek között nagyon gyorsan lehet váltani.

Igazi képképző spektroszkópiának azonban inkább egy másik eljárás nevezhető, amikor egy objektum – például egy galaxis – képének minden egyes pontjáról színeképet készítünk. Ezt nevezhetnénk „három dimenziós képképzőnek” (két égi koordináta valamint hullámhossz), vagy „kétdimenziós spektroszkópiának” is. A spektrumokból aztán tetszőleges hullámhosszra – hullámhossztartományra – elkészíthető az objektumnak az adott színben látszó képe. Azt is megvizsgálhatjuk, hogy egy kiválasztott színeképvonal mekkora eltolódást mutat az alaphelyzetétől az egyes képpontok spektrumaiban. Ebből a vizsgált hullámhosszon előállíthatjuk az objektum radiális sebesség-térképét (**. kép a színes mellékletben).

Az összevont látómező (integral field) spektroszkópia lelke egy üvegszálakból álló köteg, a távcső fókuszfelületén összegyűjti az égbolt egy kis, kétdimen-



3.16. ábra. Az összevont látómező spektroszkópia

ziós területéről fényt. Az üvegszálak belépő felülete igen kicsi, és az egyes üvegszálak a köpeny és védőburok miatt nem is tudnak pontosan egymás mellé kerülni, ami fényvesztéssel járna. Az optimális fényhasznosítás érdekében tehát a szálak elé hatszög alakú, méhsejtszerűen elrendezett mikrolencse rendszert illesztnek (3.16. ábra). Ez gondoskodik arról, hogy a vizsgált területről minden foton szinte veszteség nélkül a szálak magjába jusson. Az üvegszálak másik végét – a színeképek átfedésének elkerülése érdekében – egy vonalban rendezve csatlakoztatják a spektrográfhoz, vagy esetleg szétosztják több spektrográf között.

A képszeletelő (*image slicing*) spektroszkópia a többréses megoldáshoz hasonlít, azonban nem egymástól elkülönült objektumok hanem egy kétdimenziós kis égtérület képét vetíti – felszeletelve – a spektrográfba. Így egy kétdimenziós égtérület mindegyik részterületéről kapunk spektrális információt, de a már említett átfedések elkerülésére az egyes részterületek színeképeit tükrök segítségével a diszperzió irányára merőlegesen szétcsúsztatják.

A távcső fókuszsíkjaiban elhelyezett képszeletelő tükör apró, elnyúlt, téglalap alakú tükröző felületei egymáshoz képest el vannak forgatva, így a látómező egy-egy szeletét más irányokba vetítik. Egy második tükörrendszer ezeket a

képszeleteket egy hagyományos spektrográfhoz kapcsolódó kis résekre vetíti, melyek egymás alá helyezve gyakorlatilag egy hosszú rést alkotnak. A speciális tükröket általában egyetlen fém anyagú hordozón, finom gyémántszerszámmal alakítják ki. A megmunkált fémfelület azonban a látható tartományban nem kielégítő minőségű, ezért a képszeletelő spektroszkópia elsősorban a közeli infravörös tartományban alkalmazható.

Mind az összevont látómező, mind a képszeletelő spektroszkópia előnye (a háromdimenziós képalkotás mellett), hogy a látómező-elemek egyetlen kivilágítása nem okoz sebességmérési pontatlanságot, hiszen a szomszédos elemek alapján egyértelműen rekonstruálható az egyes alkotóelemek megvilágítottága. Továbbá a rossz légköri nyugodtság sem zavaró, hiszen nem kell a fényvesztés elkerülése érdekében nagyobb résszélességet választani, s ezzel lerontani a felbontóképességet. A kétdimenziós látómezőrészlet minden fotonja hasznosul, még akkor is, ha az egyes alkotóelemek látómezeje csak tízed másodperces méretű.

Több objektum egyidejű spektroszkópiájának a következő lépése, amikor nem egyes optikai szálakat, hanem optikai szálak kötegeit, összevont látómező egységeket lehet egy látómezőn belül tetszőlegesen elhelyezni, csoportba, mozaikba rendezni. A lehetőségek határai tehát a megfigyelhető Univerzum messzeségébe tolnak, csak arról kell gondoskodni, hogy a jövő távcsőóriáinak fókuszfelületéből ezerszámra kigyózó optikai szálak végére jusson elegendő spektrográf.

Interferometrikus módszerek

A teljesség érdekében szót kell ejtenünk három olyan spektrográftípusról, amelyek az interferencia elvén alapulnak. Ezek közül két módszer azonban csak fényes objektumok vizsgálatára használható.

A *Fourier-transzformációs spektrográf (FTS)* tulajdonképpen egy *Michelson-interferométer*, ami csillagfényel működik. Monokromatikus fényforrást (például lézerefényt) használva, és az egyik kar tükrét mozgatva az érzékelő periodikusan erősítést jelez, amikor a két kar úthosszkülönbsége a műszert kivilágító fény hullámhosszának egész számú többszörösével egyenlő. Csillagfényt használva az intenzitás változása bonyolult, hiszen a fényben jelen lévő összes hullámhossz részt vesz az interferenciában, és minden tükrőhelyzetnél más és más hullámhosszra lép fel erősítés vagy kioltás. Az intenzitást a tükrő helyzetének függvényében megadó adatsorból azonban inverz Fourier-transzformációval visszaállítható a spektrum. A feloldóképesség a tükrő mozgási úthosszának növelésével javítható, és akár $R > 500\,000$ is elérhető. A módszer hátránya, hogy a pontos méréshez az optikai elemek nagyfokú stabili-

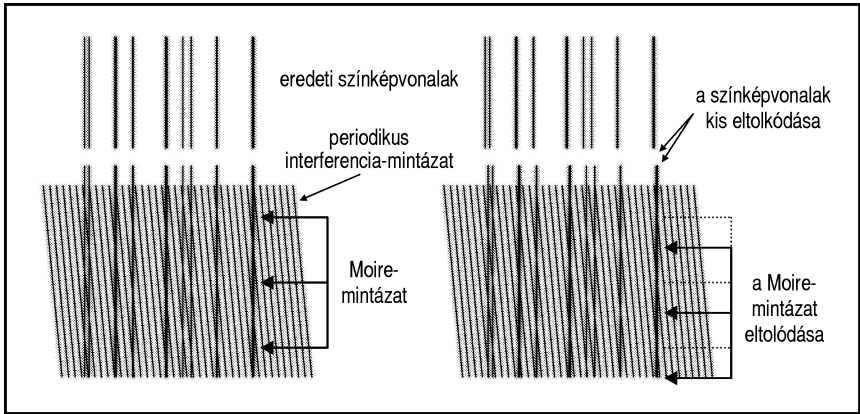
tására és a tükrök igen finom mozgására van szükség, és csak fényes objektumok esetében kapunk megfelelő jel/zaj viszonyú spektrumot. Spektrállámpák abszolút kalibrációjára és vonalaik feltérképezésére azonban kiválóan használható, így közvetve mégis több megfigyelésben alkalmazzák.

A Fabry – Perot-spektrográf két egymással szembe fordított, nagymértékben tükröző, de kicsit mégis áteresztő üveglemezből áll. A tükröző felületek között a fény „csapdába esik”, sokszoros visszaverődést szenved. A két tükröző felület távolsága piezoelektromos elven működő távtartókkal finoman állítható. Ha ez a távolság a beérkező fény hullámhosszának egész számú többszöröse, akkor erősítő interferencia jön létre és az adott hullámhosszú fény áthalad az optikai elemen. A spektrum készítéséhez az áthaladó fény intenzitását kell mérni a tükrök távolságának függvényében. A módszer korláta, hogy a lemezek távolsága csak szűk tartományban állítható, és a 99%-ot is meghaladó reflexiós bevonatok miatt még erősítő interferencia esetében is nagy a fényvesztés. Ezért a Fabry – Perot-spektrográfokat szinte kizárólag emissziós vonalprofilok tanulmányozására használják. Mivel kiterjedt forrásokra is működik, korlátozottan használható képalkotó spektroszkópiai eljárásként is.

A harmadik módszer, a *külsőleg színbontott interferencia* (*Externally Dispersed Interferometry, EDI*) halványabb objektumokra is működik, azonban elsősorban radiálissebesség-információt szolgáltat. Hagyományos értelemben vett színekép készítéséhez több felvétel kombinálása szükséges. Előnye viszont, hogy egy közepes feloldóképességű spektrográfot egy Michelson-interferométerrel együtt alkalmazva a sebességmérés pontosságát 2–6-szorosára növelhetjük.

Az eljárás lényege, hogy a csillagról érkező fény a spektrográfba lépés előtt áthalad egy interferométeren, ami egy periodikus mintázatot vetít a színeképvonalakra a spektrográf detektorán. Ezt a sűrű, szabályos rácsotat kis szögben megdöntik a spektrumvonalakhoz képest, úgy, hogy azzal Moire-mintázatot adjon (3.17. ábra). Ez a mintázat akkor is jól érzékelhető, ha a hagyományos spektroszkóp kisebb feloldóképessége miatt egy spektrumvonal elmosódott, vagy nem feloldott szoros kettős vonal. Ha a vizsgált színeképvonalak a Doppler-effektus miatt kis mértékben eltolódnak a diszperzió irányában, a Moire-mintázat megváltozik. Ez azonban a diszperzióra merőleges irányban, és a spektrumvonalak eltolódásánál jóval nagyobb mértékben mozdul el. Ezáltal felnagyítja a Doppler-effektus hatását, vagyis virtuálisan növeli a spektrográf felbontóképességét.

Természetesen e módszernél is szükség van referencia fényforrásra (ThAr lámpa vagy jódcella), mivel az interferenciával létrehozott sűrű mintázatot egy mérés folyamán pontosan egy helyben kell tartani. A módszer korláta, hogy a vizsgált színeképvonalakat a diszperzióra merőleges irányban (például egy hengerlencsével) szét kell húzni, hogy a Moire-mintázat jól megfigyelhető legyen.



3.17. ábra. A külsőleg színbontott interferometria módszer

Ez pedig csökkenti a jel/zaj viszonyt, mivel ugyanazt a csillagfényt az érzékelő több képelemére húzzuk szét, így adott beérkező jelhez több képelem kioldásai zajt adódnak hozzá. Moiré-mintázattól mentes, hagyományos spektrum pedig csak úgy kapható, hogy a sűrű interferencia-rácsot kis mértékben eltolva több színeképet készítünk, és ezeket egymással összekombináljuk.

1998-ban egy $R = 20\,000$ feloldóképességű spektrográft használva ilyen EDI módszerrel mutatták ki a Nap színeképeiben a Holdnak a Földre gyakorolt, 12 m/s-os gravitációs hatását. Néhány évvel ezelőtt pedig már közepes felbontású színeképelemzőkkel használva is m/s-os sebességmérés pontosságot értek el. Többobjektum-spektrográfokat is használtak már EDI-vel együtt.

Már volt szó arról, hogy amennyiben el akarunk érni egy adott felbontást, a távcsövek átmérőjével arányosan kell növelni a spektrográfok méretét. A jövő 20–50 méteres távcsöveinek így talán nem lesz más választásuk az $R = 100\,000$ körüli felbontás elérésére, mint kisebb feloldóképességű műszerekkel alkalmazni az EDI módszert.

Szín(kör)kép – spektrográfok ma és holnap

Ebben a részben a teljesség igénye nélkül megpróbálunk körképet adni a színeképelemzés mai és holnapi eszközeiről, röviden bemutatva néhány nagyobb obszervatórium spektrográfját, illetve valamilyen oknál fogva egyedinek, különlegesnek tekinthető műszerét.

A Keck Obszervatórium 10 m-es, szegmenstükrös teleszkópjait a XX. század utolsó éveiben vették használatba, és 2006-ban még ezek voltak a világ leg-

nagyobb optikai távcsövei. A Keck I. *HIRES* (*High Resolution Echelle Spectrograph*) műszere $R = 30\,000\text{--}80\,000$ feloldású. A 2004-es korszerűsítése óta jódcellás technikával – bizonyos csillagokra – 1.5 m/s pontossággal tud radiális sebességet mérni. Ez elképesztő teljesítmény, hiszen fényévek százaira lévő objektumokban olyan mozgásokat is képes kimutatni, amelyek nem haladják meg egy gyalogos sebességét!

A Keck II. távcső Nasmyth-fókuszában működik a *DEIMOS* (*DEep Imaging Multi-Object Spectrograph*). A 4×2 CCD-ből álló 8000×8000 képpontos mozaik kamera képalkotó módban $17'\times 5'$ -es látómezőt ad. Előre legyártott maszkok segítségével, közepes feloldás ($R \sim 10\,000$) mellett pedig egyszerre akár 130 spektrumot is rögzíthet.

A *VLT* 8 méteres teleszkópjai egy egész sor kiváló műszert látnak el csillagfényvel. A *VIMOS* (*Visible Imaging Multi-Object Spectrograph*) képalkotó módban $14'\times 14'$ látómezőt ad, amit a 4 db független, egyenként $7'\times 7'$ -es területet lefedő optikai rendszer szolgáltat. Spektroszkópiai módban $R = 300$ feloldásnál 750, míg $R = 2000$ felbontásnál 150 rés helyezhető el a 4 maszkon, amelyekből egy éjszaka 8 látómezőre valót lehet elhelyezni az automatikus maszkváltóban. A 4 db, egyenként 2000×4000 képpontos CCD detektor $24\text{--}25^m$ -s objektumok színeképét is képes rögzíteni. Egy üvegszálköteg is rendelkezésre áll, mely 6400 (80×80) üvegszál segítségével a használt felbontástól függően $54'\times 54'\text{--}13'\times 13'$ égterületet fed le, a mikrolencsés fénybecsatolás segítségével kevesebb, mint 10% fényvesztés mellett.

A *FORS* (*FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph*) műszerek a cserélhető maszkok mellett állítható réseket is tartalmaznak. A 19 rés mindössze 25 s alatt pozicionálható a $7'\times 7'$ -es látómezőben.

A *FLAMES* (*Fibre Large Array Multi Element Spectrograph*) műszer három egységből áll: az üvegszálakat pozicionáló *OzPoz* robotból, valamint a közepes feloldású *GIRAFFE* és a nagy felbontású *UVES* spektrográfokból. Az *OzPoz* a Nasmyth-fókuszban működik, és négy lemeznek is helyet ad bár jelenleg csak kettőre helyeznek el szálakat. A holtidő a látómezők váltása között alig 15 perc. Egy lemez legfeljebb 560 optikai szálát tud fogadni, ezek közül 132 egyedi, a többi kisebb kötegekbe rendezve kerül elhelyezésre. Az *UVES* nagyfelbontású spektrográf ($R = 47\,000$) mindössze $7+1$ szálát használ, de képszeletelővel is ellátták. Maximális feloldása $R = 110\,000$.

Egy másik „szeletelő” a *SINFONI* (*Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared*), mely 32 csíkra vágja a választhatóan $8''\times 8''$, $3''\times 3''$ vagy $0''.8\times 0''.8$ nagyságú égterületet. Minden egyes szeletből 64 egyedi spektrum készül, összesen 32×64 képpontra (spektrumra) bontva a vizsgált égterületet.

A VLT jelenlegi színképelemző-palettáján mindezek mellett a közeli infravörösben, adaptív optikával működő Fabry – Perot-spektrográf is található (*NAOS – CONICA*).

Számos további műszer áll fejlesztés alatt. Ezek közül érdekes az *X-Shooter* elnevezésű, amely három spektrográfot foglal magában, és így egy objektumról egyidejűleg lesz képes az ultraibolyától az infravörösig terjedő színképet létrehozni. Az ESO azért szánta rá magát a visszafejlődésnek tűnő, egyszerű műszer megépítésére, mert tapasztalataik szerint a többfunkciós eszközök csökkentették ugyan a tudományos berendezések cseréjére szánt időt, de a bonyolult műszerek kalibrálása, karbantartása, beüzemelése sokkal több holt-időt eredményezett.

Másik említésre érdemes program a *MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer)*, amely a VLT-re tervezett, második generációs műszerek egyike. Az $1' \times 1'$ -es látómezőt optikai úton 24 „kisebb” spektrográf között osztják fel, és minden egyes spektrográf képszeletelő segítségével állít elő spektrumokat az egyes rész-látómezők részleteiről, összesen 300×300 színképet készítve a teljes látómezőről.

Úgy tűnik, a közeljövőben pénzügyi megfontolásokból egy-egy hatalmas spektrográf helyett inkább több kicsit építenek. Egy kisebb eszköz kevesebb objektum színképét képes rögzíteni, és több műszeren elosztva ugyanazt a kutatási feladatot elvégzi az egy műszerből adódó homogenitás, az ilyen berendezés azonban gazdasági szempontból mégis előnyös. Egy óriásspektrográf megtervezése ugyanis több tízmillió dolláros ráfordítást is jelenthet, hiszen gyakorlatilag egyetlen példányban készülő prototípus kifejlesztéséről van szó. A gyártási költségek pedig az optikák átmérőjével hatványozottan növekednek. Egy nagy spektrográf költsége tehát tucatnyi kisebbre elegendő.

A 8 méteres *Gemini teleszkóp* adott otthont az első összevont látómezejű spektrográfnak. A *GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph)* szintén többfunkciós berendezés: képalkotásra, cserélhető maszkos, többréses spektroszkópiára, valamint üvegszálás mérésekre is alkalmas. A *bHROS (bench Mounted High Resolution Optical Spectrograph)* műszert 35 m hosszú üvegszálak kapcsolják a távcsőhöz. A $0''.14$ -es „rés” mellett $R = 150\,000$ -es feloldást ad. A színképelemző működése közben a képalkotó módba állított GMOS végzi a vizsgált objektum követését.

A Gemini képszeletelő spektrográfja, a *GNIFS (Gemini's Near-infrared Integral Field Spectrometer)* közeli infravörös tartományban működik. Detektora 29 K-en üzemel, a teljes berendezést pedig 65 K-re kell lehűteni, ami 4–5 nap alatt érhető el. Az efféle, közeli-infravörösben történő, spektroszkópiai méréseket tehát jó előre meg kell tervezni.

A *RITMOS (Rochester Institute of Technology Multi-Object Spectrometer)* műszer lelke egy mikrotükör mátrix, ami 848×600 db $16 \times 16 \mu\text{m}$ -es tükröcskét

tartalmaz. Ezeket a vezérlő elektronika akár másodpercenként több ezerszer is képes lenne átbillenteni a két szélső helyzetük között. Az egyik állásban egy képpalkotó rendszer felé, a másikban pedig egy színeképelemző optikai ágba továbbítják a távcsőből érkező fényt. A képpalkotó ágba vetítve a fényt, ki lehet választani a spektroszkópiai mérés objektumait, területeit. Ezután a megfelelő tükröket átbillentik a spektroszkóp felé. A változatlan helyzetben maradt többi tükör segítségével pedig a színeképek készítése alatt is folyamatosan megfigyelhető a látómezőnek a spektroszkópiához nem használt része, így a pontos követés könnyedén megoldható.

Az Angol–Ausztrál Obszervatórium (AAT) műszerfejlesztői a már említett Echidna pozicionáló utódjaként hamarosan üzembe állítják az *AAOmega* berendezést, amely 392 különálló objektum, vagy egy 512 elemű, $11'' \times 22''$ látómezőjű üvegszál köteg színeképeinek rögzítésére lesz alkalmas, 21%-os fényhasznosítással.

Az 1.2/1.8/3.1 m-es UK-Schmidt teleszkóp az AAT-nél is nagyobb, 6° -os látómezőt kínál a többobjektum-spektroszkópiához. A *6 degree Field (6dF)* pozicionáló robotot az optikai elrendezés miatt a fényútban helyezték el, ezért lényeges volt, hogy minél kisebb legyen a mérete. A robotkar nem a szokásos módon, két egymásra merőleges tengely mentén mozog, hanem a fókuszfelületnek megfelelően görbült karon sugár–szög irányban forog és csúszkál. Jelenleg 150 üvegszálat kezel, de a tervekben szerepel egy olyan szerkezet, amely akár egy perc alatt pozicionálna 2250 üvegszálat a 300 mm átmérőjű fókuszfelületen.

A jövőbe mutató tervekben persze nem akad hiány. A Gemini teleszkópra tervezett *KAOS (Kilo-Aperture Optical Spectrograph)* tuskék segítségével mozgathatna 5000 optikai szálat. A spektrográf négy tagú korrektorának legnagyobb lencséje 1.2 m átmérőjű lenne, ami a jelenlegi összes megcsiszolt lencsénél nagyobb. A 60 méter hosszan futó üvegszálak pedig 12 spektrográfot látnának el csillagfényvel.

A legek persze nem csak a 8–10 m-es távcsövekhez kapcsolhatók, a kisebb műszerek között is találunk különlegeseket. A legnagyobb éterületet lefedő, összevont látómező egység például a 3.5 m-es Calar Alto-i Zeiss-távcsövön található. Ez a 330 szálból álló üvegszál köteg $74' \times 65'$ éterületet mintavételez.

A radiális sebességek mérésének pontosságát tekintve az ESO 3.6 m-es La Sillán található távcsöve és *HARPS* spektrográfja a *HIRES*-nél is pontosabb, rövid időintervallumban 0.2 m/s, éves távlatban pedig 1 m/s pontosságú méréseket szolgáltat. A rendkívüli pontosságnak több összetevője van. A műszer feloldása $R = 115\,000$, egyidejűleg rögzítenek 72 spektrális rendet és egy ThAr referencia színeképet. A berendezést vákuumtartályban helyezték el és a hőmérsékletet órás időskálán 0.001 K, éves szinten pedig 0.01 K pontossággal állandó értéken tartják. A műszer teljesítőképességét és az elért tudományos

eredményeket dicséri, hogy több kutatócsoport exobolygó-kereső programjához a HARPS-on alapuló spektrográfot tervez. A *Harvard egyetem* például a HARPS majdnem pontos (kissé továbbfejlesztett) mását építi, melyet a 4.2 m-es *William Herschel-teleszkóphoz* csatolva kutatnak exobolygók után az északi égbolton.

A 6.5 méteres MMT pozicionáló robotjának, valamint két spektrográfiájának (*Hectospec* és *Hectochelle*) építésében és használatában személyesen is részt vettem. A pozicionáló az 1° -os látómezőben alig 5 perc alatt képes elhelyezni 300 optikai szálát (3.14. ábra). A 30 m hosszú fényvezetők egy külön szobába futnak, ahol a két spektrográf áll, s egyikről a másikra alig 15 perc alatt átszerelhetők a hosszú résként egymás mellé rendezett optikai szálak. A *Hectospec* akár a teljes vizuális tartományt is képes lefedni alacsony illetve közepes feloldás mellett, míg a *Hectochelle* $R = 34\,000$ -es felbontóképességével km/s alatti sebességek mérésére is alkalmas.

Zárszó

A csillagászati spektroszkópia és annak műszerei töretlenül fejlődnek, hatalmas mennyiségű információt szolgáltatva az Univerzum igen távoli részeiről is. Ma már rutinszerűen működnek egyszerre több száz objektumról szinképet rögzítő spektrográfok, és a holnap műszerei már egy időben több ezer célponttól készülő spektrumot ígérnek. A háromdimenziós, az összevont látómezejű vagy a képszeletelő spektroszkópia kiterjedt objektumokban lezajló mozgásokat tesz láthatóvá a csillagászok számára. A jelenleg fejlesztés alatt álló, illetve tervezett műszerek segítségével már nem csak galaxishalmazok dinamikája, az egyes galaxisok sebessége, hanem egy galaxison belüli mozgások is feltérképezhetők lesznek. Néhány éjszaka alatt korábban elképzelhetetlen mennyiségű információt gyűjthetünk, ami új kutatási területeket nyithat meg korunk csillagászai számára.