

hány tagból is álljon az objektív és bármilyen rendszerű is legyen, mindig egy *egytágú gyűjtőlencsének* tekintjük. Az objektív f gyűjtőtávolsága, vagy fókusz-távolsága állandó (a változtatható gyűjtőtávolságú objektívek kivételével), ezért fényképezés előtt az objektívet a távolságtörvény szerint olyan távolságra kell a képfelvevő síkjától beállítani, hogy ezen a tárgyról éles kép keletkezzen. Az objektívet sohasem csúsztatjuk közvetlenül előre vagy hátra, mert így az élességet nem tudnánk finoman beállítani, hanem egy menetes gyűrűs szerkezet segítségével, közvetve állítjuk. Az élességállítási lehetőség az objektív szerkezeti tulajdonságainak függvénye. Általában 1 m-től végtelenig terjedhet, de a különleges objektívek ennél sokkal közelebb levő tárgyat is képesek élesen leképezni.

A korszerű fényképezőgépek, kivéve az olcsó amatőr gépeket, automatikus élességállítási lehetőséggel is rendelkeznek. Az objektív élességállító gyűrűjére fogaskereket szerelnek, amelyet egy miniatűr szervomotor mozgat. A motor meghajtását a fényképezőgépben levő mikroprocesszoros élességállító elektronikus áramköre végzi. Egy igen elterjedt élességállító rendszer azon alapszik, hogy egy éles képnek mindig nagyobb a kontrasztértéke, mint ugyanannak a képnek életlenül. Ezért szabályozáskor az automatikus rendszer a kontrasztot figyeli és ennek változása függvényében állítja az élességet. Egy másik elv ultrahangos- vagy infravörös távolságmérésen alapszik. Az automatikus élességállításnak általában két üzemmódja van: egyobjektumos és többobjektumos. Az egyobjektumos módban a kép közepén levő tárgyat állítja élesre, míg a többobjektumos módban a gép megnézi a kereső több pontján a tárgyak távolságát, majd ezeket átlagolva állítja be az élességet. Megtörténik, különösen a művészi fényképészetben, hogy az élességállítást a mélységélességi határok figyelembevételével kell végezni és nem a fényképezendő téma szerint. Ilyenkor az automatikus állítást ki kell kapcsolni és kézire kell átváltani.

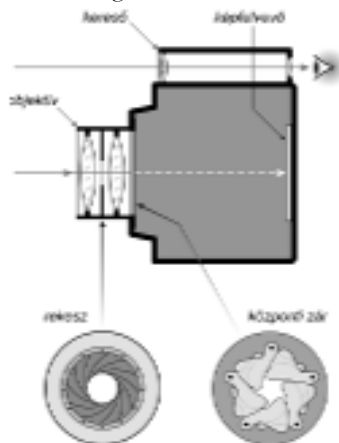
3.1. Expozíció

Expozíció alatt azt a fény mennyiséget értjük, amely fényképezéskor a fényképezőgépben levő képfelvevőt éri, legyen ez fényérzékeny film vagy elektronikus képérzékelő. Jó minőségű, kiegyensúlyozott tonalitású és a valóságot részlethűen tükröző felvételt csak akkor készíthetünk, ha a képfelvevőre bocsátott fény mennyiség értéke bizonyos határok között mozog. Ez az ún. *optimális*- vagy *helyes expozíció*hoz szükséges fény mennyiség és a képfelvevő fényérzékenységevel fordítottan arányos. Minél érzékenyebb a képfelvevő, az optimális expozíció annál kevesebb fény mennyiséget igényel. Ha a képfelvevőt érő fény mennyiség túl kevés, akkor *alulexponálás*ról beszélünk, ha pedig túl sok, akkor *túlexponálás*ról. Mivel a fény mennyiség egyenesen arányos a fényerősség és a megvilágítási idő szorzatával, ezért a helyes expozíciót a *fényerősség* és a *megvilágítási idő* (*expozíciós idő*) együttesével állíthatjuk be. A fényerősséget *fényrekesz*szel és az expozíciós időt pedig *zárszerkezettel* lehet állítani. Mielőtt a fényképezőgépeknél a helyes expozíció állítási lehetőségeit részleteznénk, a következőkben a filmek és a képérzékelők fényérzékenységevel kapcsolatos néhány alapvető fogalmat fogunk tisztázni.

3.1.1. A filmek fényérzékenysége

Ha a filmek keresztmetszetét erős nagyításban megvizsgáljuk, akkor láthatjuk, hogy több vékony rétegből áll. A film mechanikai szilárdságát a hordozó biztosítja, amelynek a vastagsága 0,1 - 0,15 mm. A normálfilmek hordozójának alapanyaga régebben nitro-cellulóz vagy acetil-cellulóz volt, újabban műanyag. A hordozóra viszik fel a film legfontosabb rétegét, a *fényérzékeny réteget* (*emulzió*). A színes filmeknél több fényérzékeny réteget találunk. A fényérzékeny réteget egy kötőréteg tartja a hordozórétgen. Felülről a fényérzékeny réteget egy

védőréteg borítja, amely a sérülésektől megóvj. A hordozó hátoldalát egy fényudvarmentesítő réteggel vonják be. Ez a réteg a hordozó hátoldaláról visszaverődő fényt nyeli el.



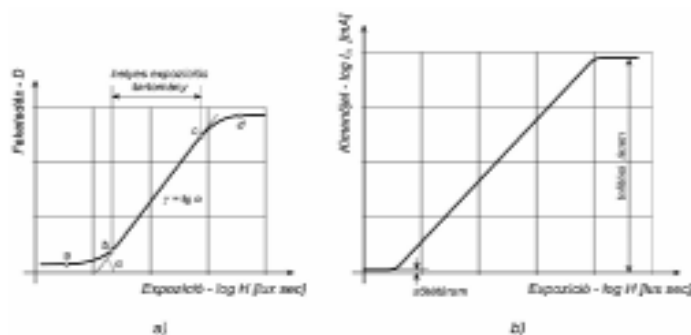
1. ábra

A fényképezőgép vázlatos keresztmetszete

A fényérzékeny réteg zselatinba ágyazott, mikroszkopikus méretű ezüsthalogén kristályszemcséket tartalmaz. Felvételkor a fény hatására a fényérzékeny rétegben láthatatlan kémiai változás jön létre. Ez a változás hordozza a filmre exponált képet és *rejtett*-, vagy *látens kép*nek nevezik. A látens képet tulajdonképpen az ezüstös kristályokból kiváló csekély, szemcsénként 5-10 atomnyi fémazüst alkotja. Előhívás után a kép láthatóvá válik. Az előhívás egy olyan kémiai folyamat, amelynek során a megvilágított ezüsthalogén szemcsékben levő ezüst katalizátorként hat és az egész szemcse tiszta ezüstté redukálódik. Az ezüst ilyen finom eloszlásban feketének látszik. A képpalkotásban részt nem vevő, nem megvilágított ezüstszemcsék, vagyis azok, amelyek előhívás után nem redukálódtak, fehéres-pirosas színükkel zavarják a filmen levő képet és ezenkívül igen könnyen el is bomlanak (nem stabilak). Ezeket a szemcséket rögzítéssel és mosással távolítják el. Az ezüstszemcsék felületi sűrűsége egyenesen arányos a fényérzékeny réteget érő fény mennyiséggel, vagyis az expozícióval. Az expozíció és a fényérzékeny réteg feketedése közötti összefüggést a feketedési, ill. *gradációs görbe* ábrázolja (2. a. ábra). Mivel a gyakorlatban nagy megvilágítási különbségek fordulhatnak elő (több ezerszeres értékek is lehetnek), ezért célszerűbb az abszcisszatengelyt az expozíció logaritmusai szerint beosztani. Az ordinátatengelyre a feketedésnek ugyancsak logaritmusos értékei kerülnek. A feketedési görbén több jellegzetes szakaszt különíthetünk el. Így, ha az *a* pontnak megfelelő fény mennyiségnél kevesebb éri a filmet, akkor azon nem okoz változást. Ebben a tartományban a feketedés csak az alapfátyolnak felel meg. Az *ab* zónában az expozíció fokozza a feketedést, de az összefüggés nem lineáris. A következő *bc* szakasz közel egyenes, a hozzá tartozó expozíciós tartomány és a megfelelő feketedési intervallum a film fontos jellemzője. A *bc* szakaszt határoló feketedési értékek hányadosából következtetni lehet az árnyalatok azon szélső értékeire, amelyeket még torzítás nélkül ad vissza a film, vagyis a legeslegvilágosabb és a legeslegsötétebb tárgyrészek megvilágítottságának arányára. Ez az arány a helyes expozíciós tartomány dinamikáját fejezi ki. A filmek dinamikája tipikusan 100:1 körül mozog. A *bc* szakasz meredekségét az α szög tangense fejezi ki, amelyet γ -val jelölnek és a fényérzékeny anyag *gradációját* jelenti. A gradáció értéke a fényérzékeny anyagok egyik jellemzője. A gradáció bizonyos mértékben függ az előhívótól, az előhívás idejétől,

valamint a hőmérsékletétől is. A feketedési görbe következő, *cd* szakaszán a növekvő fény-
mennyiséggel a feketedés alig növekszik. Végül is a *d* pont utáni telítődési szakasz mentén
már egyáltalán nem nő, mivel az összes ezüsthalogén szemcse ezüstté alakult át. Fényképe-
zésnél a fényérzékeny réteget fénymennyiségek sorozata éri. A réteg különböző felületi
részeit érő fénymennyiség a filmre vetített kép különböző fényerősségi értékeinek függvénye.
A gradációs görbéből megállapítható, hogy a kérdéses helyeken milyen feketedés jön létre. A
filmen kialakuló kép a tárgy világosabb részeinél sötétebb és a tárgy sötétebb részeinél pedig
világosabb. Ezt a fordított tónusú képet *negatív*nak nevezik. A valóságnak megfelelő képet, az
ún. *pozitív* képet a negatívnak fényérzékeny papírra való átmásolásával, vagy felnagyításával
kapjuk meg. A felvétel minőségét elsősorban az szabja meg, hogy a feketedési görbén a tárgy
fényárnyalatainak sorozata hová kerül. Helyes expozíció esetén a lényeges részek a karakte-
risztika egyenes részére kerülnek és az árnyalatok torzításmentesek. Túlexpozíciónál a tárgy
fényárnyalatai a feketedési görbe felső *cd* görbületére kerülnek, a világosabb részei pedig az
utána következő telítődési részre. Ennek következtében az egész negatív kép nagyon sötét és
a részletek feketedési szintjei alig különböznek egymástól. Alulexponálásnál a tárgy fényár-
nyalatai a feketedési görbe alsó *ab* szakaszára kerülnek és a sötétebb részei pedig az *a* pont
előtti fátolszíni szakaszra. Ezért a negatív nagyon világos, a sötétségbeli árnyalatok torzított-
tak és a sötétebb részek részletei teljesen hiányoznak a képről.

A fotokémiában az ezüsthalogén vegyületek közül az ezüstbromid (AgBr), ezüstklorid
(AgCl) és az ezüstjodid (AgI) szerepel. Az ezüstbromid legérzékenyebb a fényre, ezért ez a
filmek (negatívok) emulziójának fő hatóanyaga. Az ezüstklorid a legkisebb érzékenységgű,
ezért az előhívópapírok (pozitívok) hatóanyaga. Az ezüstbromid és az ezüstklorid együtt
szerepel a közepes és nagy érzékenységgű nagyítópapírok emulziójában. Az ezüstjodid
majdnem minden fényérzékeny emulzióban megtalálható, mert ez az emulziók érzékenysé-
gét befolyásolja és tartósságát elősegíti.



2. ábra

A fényérzékeny anyagok (a) és az elektronikus képérzékelők (b) tipikus gamma görbéje

A színes fényérzékeny anyagoknak legalább három fényérzékeny rétegük van. Ezek a vörös, a zöld és a kék alapszínre érzékenyek. A rétegek hatóanyagát ugyancsak az ezüsthalogén vegyületek képezik. Színes előhívásánál az ezüst kiválásával együtt színes festékanyag, ún. színezék is képződik. Az ezüstöt előhívás után kioldják és a képet a hátramaradt színezékek képezik. A színes negatívon az eredeti színek ellentétes, komplementer színeit kapjuk. A valóságnak megfelelő színes képet a negatívunk színes fény-
érzékeny papírra való átmásolásával, vagy felnagyításával kapjuk. A színes filmek feke-
tedési görbéinek felvételekor külön-külön értékelik ki a vörös, zöld és a kék réteg fe-
dettségét. A helyes színvisszaadást egybeeső görbék biztosítják. A helyes színvisszaadás

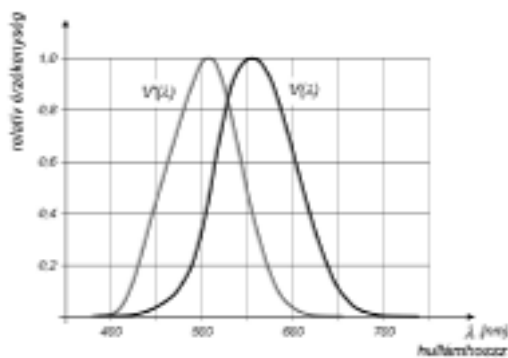
másik igen fontos paramétere a fényérzékeny anyag spektrális érzékenysége. Ez minél jobban kell illeszkedjen a szem spektrális érzékenységéhez.

A szemünk nem egyformán érzékeny az egyenlő teljesítményű, de különböző színű (hullámhosszúságú) fényre. Pontosabban a látható színek különböző tartományából származó, de azonos megvilágítást keltő fényhez tartozó fizikai inger, a hullámhossztól függően eltérő erősségű. A Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE – Commission Internationale d'Éclairage) a nappali megvilágítás, valamint a sötétségi körülményeknek megfelelő átlagos „láthatósági” függvényeket szabványosította, és ezeket a visibility szó kezdőbetűje alapján a világosban látás (fotópos látás) $V(\lambda)$ -függvénynek, ill. a sötétben látás (szkotópos látás) $V'(\lambda)$ -függvénynek nevezte (3. ábra). A két görbe eltérő, a világosban a szemünk a $\lambda=555$ nm hullámhosszúságú (sárgás-zöld színű) fényre a legérzékenyebb, míg a sötétben a maximum eltolódik a $\lambda=507$ nm hullámhosszúságú (kékes-zöld színű) fény felé.

A feketedési görbéből nemcsak a fényérzékeny anyag gradációja, hanem az *érzékenysége* is megállapítható. Az érzékenység a fényérzékeny anyagok másik igen fontos jellemzője és ennek mértékéről a helyes expozíciós tartománynak az abszcissza tengelyen levő helyzete tájékoztató. Annál érzékenyebb egy film, minél kisebb expozíciós értékek felé helyezkedik el a gradációs görbe lineáris szakasza. Az érzékenységet számszerűleg érzékenységi rendszerekben fejezik ki. Ezek közül a legelterjedtebb a német DIN (*Deutsche Industrie Norm*), az amerikai ASA (*American Standards Association*) valamint a nemzetközi ISO (*International Standard Organisation*). A DIN szabvány szerint a film érzékenysége 3 DIN fokként duplázódik meg, vagyis a helyes expozíció kétszer kevesebb fény mennyiséget igényel. Az ASA szabvány sokkal gyakorlatiasabb, itt a film érzékenysége egyenesen arányos az érzékenységi fokkal. A DIN és az ASA fokok közötti összefüggést az 1. táblázatban foglaltuk össze. Az ISO szabvány szerinti érték a DIN és az ASA szabvány értékeit is magában foglalja, így például: ISO 100/21°. Az érzékenységet jelző számértéket a filmek csomagolásán mindig feltüntetik.

Érzékenység:	←	kis	→		←	közepes	→		←	nagy	→					
DIN		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
ASA		40	50	64	80	100	125	160	200	250	320	400	500	650	800	1000

1. táblázat A filmek érzékenységét kifejező DIN és ASA fokok közötti összefüggés



3. ábra
A szem spektrális érzékenysége

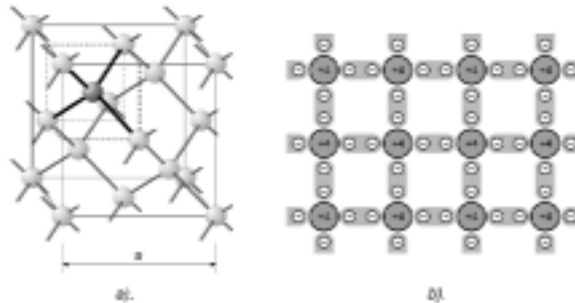
világosban – fotópos látásnál: $V(\lambda)$
 sötétben – szkotópos látásnál: $V'(\lambda)$

A film érzékenységet a felvételi cél, valamint a fényviszonyok szerint kell megválasztani. Minél gyengébb a téma megvilágítása, annál érzékenyebb filmet kell használnunk. Az érzékenységgel viszont növekszik a felvétel szemcsézettsége. Minél kevésbé érzékeny a film, annál finomabb a szemcsézettsége, nagyobb az élesség és annál jobb a színek telítettsége. Gyakorlati szempontból a filmek érzékenységet kis, közepes és nagy érzékenységi csoportba lehet sorolni. Az ISO 100/21° és ISO 200/24° közepes érzékenységű filmek többnyire megfelelnek az általános amatőr igényeknek.

3.1.2. A képérzékelők fényérzékenysége

Az elektronikus képérzékelőt nagyon sok, igen kis méretű fényérzékeny cella alkotja. A cellákat mátrix-szerűen elrendezve egy aránylag nagy méretű szilícium *félvezető* lapkára integrálják. A félvezetők elektromos vezetőképessége, amint az elnevezésük is mutatja, a vezetők (fémek) és a szigetelők között található. Az ismert félvezetők közül az áramköri elemek gyártásához a periódusos táblázat IV. főcsoportjához tartozó *germánium* (Ge) és *szilícium* (Si) bizonyult a legmegfelelőbbnek. A szilícium egyik legelterjedtebb elem a Földön, amelyet a homokban valamint a kvarcban (SiO_2 – szilícium-dioxid) is megtalálunk. A germánium sokkal ritkábban előforduló elem. Jelenleg az áramköri alkotóelemek gyártásához a szilíciumot használják.

A szilícium atom négy vegyértékelektronja minden egyes atomot négy szomszédos atommal kapcsol össze az ún. *kovalens kötéssel*. A kovalens kötést elektronpár-képzésnek is nevezik, és abban áll, hogy két szomszédos atom egymáshoz kapcsolódó vegyértékelektronjai együtt keringenek. Így az atomok egy szabályos elrendezésű atomrácsot alakítanak ki, amelyet szabályossága miatt kristályrácsnak is neveznek (4. ábra).



4. ábra

A félvezetők kristályszerkezete

a). térbeli ábrázolás
 rácsállandó

$a = 0,542$ nm szilíciumnál

$a = 0,562$ nm germániumnál

b). egyszerűsített síkbeli ábrázolás

A nagy tisztaságú félvezetőben nagyon alacsony hőmérsékleten – az abszolút nulla fok közelében – mind a négy vegyértékelektron kötött, vagyis úgy viselkedik, mint egy szigetelő. Nagyobb hőmérsékleten egyes elektronok a hőmozgás következtében akkora energiára

tesznek szert, hogy kilépnek a kovalens kötésből, szabad elektronokká válnak. Az elektronok nemcsak a hőenergia hatására válhatnak szabaddá, hanem a fényenergia hatására is. A beeső fotonok energiája révén a félvezető atomok külső elektronhájában keringő elektronok akkora energiára tesznek szert, hogy szabad elektronokká válnak – ez az ún. *belső fényelektromos hatás*. Így a fényérzékelő cella félvezetőrétegeire eső fény töltéshordozókat gerjeszt és a gerjesztett töltésmennyiség a cellát érő besugárzási energiával, vagyis a fény mennyiséggel arányos. Adott exponálási idő után a cellákban összegyűlt töltés nagyságát megmérve következtethetünk a cellát ért fényerősségre. A töltés megméréséhez az elektronok által szolgáltatott áramot el kell juttatni egy kiolvasó egységhez. Az egység kimenetén megjelenő feszültség egyenesen arányos a cellában keletkezett töltésmennyiséggel, tehát a cellát ért expozícióval. A cella árama ill. a kiolvasó egység kimeneti feszültsége az expozícióval lineárisan növekszik (2. b. ábra). Ez a görbe a filmek feketedési görbéjének a megfelelője. Az alapfátyolnak a *sötétáram* felel meg. A sötétáram megvilágítatlan cellában a hő hatására gerjesztett töltések által jön létre, értéke erősen függ a hőmérséklettől, cellánkénti eloszlása teljesen véletlenszerű. Az expozíció növekedésével a cella árama lineárisan növekszik, egészen addig, amíg eléri a telítési szintet. Ezen túl nem növekszik tovább, ugyanis a cellában véges számú töltéshordozó gerjeszthető. A képalkotásnál torzításmentesen visszaadott sötét és világos árnyalatok szélső értékeit a sötét- és a telítési áram által határolt expozíciós értékek határozzák meg. Tehát a lineáris zóna dinamikáját a telítési áram és sötétáram aránya fejezi ki. Egy közepes minőségű érzékelőnek a dinamikája 1000:1 körül mozog. A professzionális gépekben használt érzékelők még nagyobb dinamikával rendelkeznek, túlléphetik a 100000:1 értéket is.

Amint láthatjuk, a képérzékelők dinamikája a filmek dinamikájánál legalább egy nagyságrenddel nagyobb. A professzionális képérzékelőkkel igen nagy fényességkülönbségek jeleníthetők meg intenzitáshelyesen. Például, egy hegesztési eljárás, vagy egy lézeres interferenciakép esetében a fényes részek „beégés” nélkül láthatók a halványabb részekkel együtt. Az alulexponált képérzékelő celláiban gerjesztett töltésmennyiség túl kevés és a digitális kép nagyon sötét lesz. A túlexponált képérzékelő celláiban nagyon sok töltésmennyiség halmozódik fel és a kép pedig túlságosan világos lesz. Mind a két esetben részletszegény, kontraszt nélküli felvételt kapunk.

Fényképezéskor, ha csak a szemünk által látható jelenségeket akarjuk megörökíteni, kb. 10 milliószoros fényerő megvilágítás-eltéréshez kell igazodnunk. Érzékszerveink megközelítőleg logaritmikus érzékelése folytán azonban a fenti fényerőtartományt csak mintegy 16-szoros változásként észleljük. Ilyen a fényerő különbség a Hold nélküli, borult éjszaka és a nyári, déli tengerpart között. Szemünk ezt az átfogást a pupilla átmérőjének a változtatásával és a látóbíbor (rodopszin) termelés arányával valósítja meg. A felvétel készítésekor a képfelvevő érzékenységének változtatásával, vagy a megfelelő érzékenységgű film kiválasztásával, valamint a rekesznyílás és az expozíciós idő beállításával alkalmazkodunk. A képérzékelő, vagy a film érzékenysége kb. 50-szeres (ISO 25/15°-tól ISO 33/1600°-ig) változást tesz lehetővé, a rekesznyílás állítása pedig további 100-szorosot. A hiányzó 2000-szeres átfogás a képérzékelő megvilágítási idejének, vagyis az expozíciós időnek a változtatásával érhető el.

Irodalom

- 1] *Dékán I.*: Fotótechnikai alapok; Fotóvilág, <http://www.fotovilag.com>
- 2] *Etbells, D.*: Fuji announces CCD dynamic range breakthrough!; Imaging Resource, <http://www.imaging-resource.com/NEWS/>
- 3] *Holló D. – Kun M., – Vásárhelyi I.*: Amatőrfilmes zsebkönyv; Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1972

- 4] *Megyesi L.*: Hagyományos fényképezés; ELTE TTK Oktatástechnika Csoport – UNESCO Információtechnológiai Pedagógiai Központ, <http://felis.elte.hu/dept/hu>
- 5] *Pethő B. – Sümegei A.*: Digitális fényképezés; ELTE TTK Oktatástechnika Csoport – UNESCO Információtechnológiai Pedagógiai Központ, <http://felis.elte.hu/dept/hu>
- 6] *Polster A. – Lentz N.*: Száz fotórecept, 3. átdolgozott kiadás; Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1962
- 7] *Schanda J.*: Az optikai sugárzás érzékelése, Radiometria, fotometria, színmérés; University of Veszprém
- 8] *Szűlly B.*: Fizika; Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1982
- 9] *Vas A.*: Fotográfia távoktatási modul fejlesztése. III. Modultankönyv, 2000, Dunaújvárosi Főiskola; <http://indy.poliod.hu/program/fotografia/tankonyv.htm>
- 10] ***: CCD Cameras: Dynamic Range, Dark Current Noise, Saturation and Blooming; Roper Scientific GmbH, Digital Imaging and Spectroscopy, <http://www.roperscientific.de>
- 11] ***: General Curve Regions; Kodak – Student Filmmakers, <http://www.kodak.com/US/en/motion/students/handbook>
- 12] ***: Logical Approach to the Photo Quality, Typical CCD image vs Photo Quality Image, <http://www.asahi-net.or.jp>

Kaucsár Márton

Fekete lyukak

Évszázadokon át törték a fejüket a természettudósok azon a kérdésem, hogy vajon a fény is eleget tesz-e a nehézkedés törvényeinek. A tisztán látást több körülmény is hátráltatta ebben a kérdésben. Az egyik a fény igen nagy terjedési sebessége. Ennek következtében egy vonzó test közelében elhaladó fénysugár oly gyorsan távolodik el ismét, hogy az eltelt idő alatt még akkor is csak észrevehetetlen mértékben zuhan a vonzó központ felé, ha valóban érvényesek rá a tömegvonzás törvényei. A másik gondot az okozta, hogy sokáig nem sikerült eldönteni, hogy a fény részecske- vagy hullámtermészetű-e. Az utóbbi esetben nem látszott kényszerítő oknak az, hogy a fény elhajlik a testek gravitációs erőterében.

1801-ben Soldner kiszámította, hogy mekkora elhajlást szenved a fény, ha azt a newtoni mechanika törvényei alapján mozgó részecskének tekintjük. A napkorong mellett elhaladó csillagfényre mintegy fél ívmásodpercnyi értéket kapott. Ezt megelőzően, 1784-ben az angol John Michell tiszteletes már arra a meggyőződésre jutott, hogy a legnagyobb tömegű csillagok gravitációs vonzasköréből még a saját fényük sem képes kiszabadulni. Így ezek a csillagok sötétek maradnak az égbolton. A „fekete csillagokról” 1795-ben a francia Laplace is említést tesz könyvében.

Ezekre az évszázados kérdésekre csak a XX. században sikerült határozott választ adni. Ekkorra példátlan kifinomodáson mentek át mind a természettudományos ismeretek, mind pedig a megfigyelő módszerek alapját képező műszaki feltételek. Ebben a rövid összefoglalóban nem térhetünk ki annak részletes taglalására, hogy mely körülmények játszottak közre e fejlődésben. Arra szeretnék csupán rámutatni, hogy a keresztény kultúra több évszázadon át tartó erjesztő hatást fejtett ki a társadalmi fejlődésre. Ez a csekély többlet a kereskedelem és az ipar fejlődésének serkentésében egyre gyorsuló mértékben eredményezte a keresztény kultúrkörbe tartozó társadalmak kiemelkedését mind az ókori birodalmakhoz, mind pedig a kortárs, de eltérő kultúrkörbe tartozó népekhez viszonyítva.

A XX. század első negyedében vált világossá, hogy az anyag minden megjelenési formája – így a fény is – mind hullámtermészetű, mind pedig részecsketulajdonságokat mutat. Az abszolút fekete testek hősugárzásának hőmérsékletfüggése és az atomok emissziós színképvonalainak törvényszerűségei vezették el a kutatókat az új fizikai tör-