

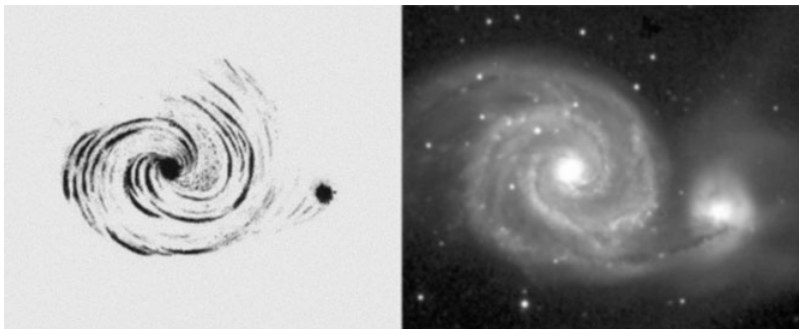
Fűrész Gábor

CCD-kamerák a csillagászatban

Egy letűnt korszak, a fotográfia

A bevezetőnek szánt fejezet címe korántsem a fotografikus technika érdemeit akarja kisebbíteni, pusztán arra utal, hogy a XXI. század csillagászati megfigyeléseinek eszköztárából immár majdnem kiszorultak a fotolemezek. Ennek a csillagászatban több mint 150 éve megjelent technikának megszámlálhatatlan sok felfedezést köszönhetünk, s ezt nem feledtetheti a fejlődés sem. Túllépve a fotográfián a CCD-kamerák korszakába lépett a megfigyelő csillagászat. A cikk a CCD eszközöket próbálja meg kissé közelebbről megismertetni az Olvasóval. Annak érdekében, hogy meg tudjuk ítélni a modern kor digitális technikájának előnyeit, ismerkedjünk meg röviden a csillagászati fényképezés történetével és jellemzőivel!

A csillagászati megfigyelések nagyon sokáig csak leírások, egyszerűbb rajzok formájában maradtak fent, többé-kevésbé magukon viselve a megfigyelő képességeinek és ismereteinek korlátait. Érdemes összevetni a távcső történetének korai szakaszában készített rajzokat a későbbi fényképekkel, hogy lássuk, sokszor igen szubjektívek voltak ezek a megfigyelések. Az első csillagászati fénykép, a John W. Draper által 1840 márciusában elkészített holdfotó, minőségi változást hozott: teljesen kizárta az emberi szem és agy esetleges tévedéseit, a megfigyelők kezűgyességének fogyatékoságaiból eredő hibákat. Mivel az akkoriban alkalmazott dagerrotípiák igen érzéketlenek voltak, egy évtizedig még csak a Holdat és a Napot örökítették meg. A Nap képét elsőként Foucault és Fizeau rögzítette 1845 áprilisában. 1850 júliusában elkészült az első igazi asztrofotográfia, melyen 100 másodperces expozícióval a Vega képét sikerült rögzíteni.



4.1 Az M51 galaxis Lord Rosse rajzán és egy CCD-felvételen

Ettől kezdve azonban rohamosan fejlődött a fényképezés, egyre érzékenyebbek lettek a fotolemezek, s hamarosan olyan halvány objektumok képe is kirajzolódott az ezüsthálogenid kristályokkal borított üveglemezeken, amelyeket szemmel soha nem pillanthattak meg a csillagászok. A csillagászati fényképezés segítségével rengeteg felfedezés történt, ezek közül nekünk, magyaroknak talán az egyik legszebb a Lyra-gyűrűsköd központi csillagának lefényképezése, mely Gothard Jenő nevéhez fűződik. A nagy látómezejű Schmidt-távcsövekbe helyezett - akár 40 cm-es méretű - fotolemezek segítségével egyetlen képen, nagy határfényességgel és felbontással, hatalmas égbolterületeket lehetett rögzíteni, ami lehetővé tette az égbolt fotografikus feltérképezését. A CCD-technika e tekintetben lemarad a fotográfia mögött, ugyanis a CCD-detektorok képérzékelő felülete ma még alig éri el a 10 X 10 cm-t.

Röviden tekintsük át, milyen okok vezettek ahhoz, hogy a csillagászati fényképezés helyett ma már más eszközöket használnak [A CCD-k valójában nem a fotográfiát váltották fel. A csillagászati adatok jelentős része (pl. a fotometriában) fotoelektromos mérések eredménye, tehát lineáris, de nem képképző detektorral keletkezett. Az utolsó néhány évtizedben a fotografikus megfigyeléseket nagy látómezejű távcsövekkel végezték, statisztikus célokkal, érdekes objektumok kiválogatására. (a szerkesztő megjegyzése).]

Az emberi szem minden száz beérkezett fotonból átlagosan egyet tud hasznosítani, a fotolemezek ezzel szemben 3-4-et. Emellett a fotolemezekre lehet órákon át exponálni, sőt, akár több egymást követő napon is gyűjthetjük ugyanarra a lemezre a fotonokat. Ennek a technikának azonban van egy igen hátrányos

tulajdonsága, amit reciprocitási törvényként ismerünk. Ez röviden annyit jelent, hogy a fotolemezen létrehozott változás, a feketedés nem egyenesen arányos a megvilágítási idővel, vagyis a felvétel határfényessége nem lineárisan nő az expozíciós idővel. Átlagos fotoemulzióknál alig néhány másodperc vagy perc az az időtartomány, amelyben az egyenes arányosság még teljesül, s utána már egyre hosszabb expozíció kell egységnyi határfényesség-növeléshez. Hiába épültek olyan óriástávcsövek, mint a Palomar-hegyi 508 cm tükörátmérőjű Hale-teleszkóp, több órás expozícióval is csak 22-23^m fényességhatárt lehetett elérni.

Emellett a legtöbb fotoemulzió a látható fénynek inkább a 300-500 nm közötti kék tartományára érzékeny, az 500-650 nm közötti vörösre már kevésbé, a közeli infravörös tartományban pedig egyáltalán nem. Holott pl. a hatalmas hidrogénfelhők igen erősen sugároznak a hidrogén Balmer-alfa vonalának hullámhosszán, 656 nm-en, és az infravörös tartomány is igen érdekes és értékes megfigyelésekre ad lehetőséget. A fotografikus korszakból erre jó példa a Palomar Observatory Sky Survey vörösérzékeny lemezre készített égboltfelmérése, amelynek digitalizálásából született a DSS (Digitized Sky Survey) elektronikus csillagtérkép.

Az elkészült fotókat még elő kellett hívni, ki kellett értékelni, és el kellett raktározni későbbi feldolgozás céljából. Ez majdnem akkora, vagy talán még nagyobb munka volt, mint a felvételek elkészítése! Érdeemes beleolvasni A sötétség bolygója című könyvbe, amit a Plútó felfedezője, Clyde W. Tombaugh írt. Ebben személyes élményei alapján tárja az olvasó elé, mit is jelent több ezer fotolemezt egy mikroszkóp segítségével, szemmel, négyzetmilliméterenként átvizsgálni.

A fotográfia hanyatlásában és az új technikák térhódításában nagy szerepe volt az űrkutatásnak is. Egy Holdra küldött szonda ugyanis hiába készít fényképeket, azokat nem tudja visszajuttatni a Földre. Az első orosz holdszondákon még elhelyeztek egy kisebb fotólabort, a szonda által készített fotókat előhívták, majd egy feketedésmérővel pontról pontra letapogatták a kész fényképet, és az így nyert adatokat rádióon továbbították a Földre. Nyilvánvalóan ez a technika igen bonyolult, egyáltalán nem hatékony és a mozgó alkatrészek miatt nagyon sok a hibalehetőség. Egy bolygószondánál pedig teljesen elképzelhetetlen ezeknek az eszközöknek az esetleges javítása vagy pótlása.



4.2 Az első CCD-kamera és megalkotói

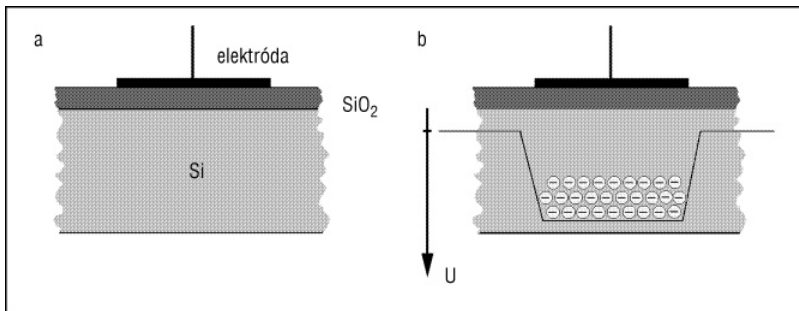
A hold- és bolygószondák számára kínálkozott egy jó megoldás: az elegendően fényes objektumok a XX. század második felében már megörökíthetők voltak a tévékamerák segítségével, az elektromos jelekké alakított képet pedig könnyen lehetett rádióhullámok útján továbbítani. (Pl. a NASA Voyager (1977.) szondáin is tévékamerák működtek.) Ezek a vidikon képcsőre alapult technikák erős megvilágítást igényelnek, ezért a halványabb objektumok megfigyelésére teljesen alkalmatlanok. A hetvenes évek elején azonban már javában dolgoztak a Bell Laboratóriumok munkatársai egy olyan eszközön, amelyről akkor még ők maguk sem sejtették, hogy forradalmat indít el a képrögzítés technikájában, és lassan kiszorítja a fotográfiát a tudományos életből.

Elérkeztünk hát a három betű által fémjelzett technikához, a CCD-hez. Annak érdekében, hogy megértsük, mit is takar pontosan a Charge Coupled Device (töltéscsatolt eszköz) angol szavak kezdőbetűjéből

összeállított rövidítés, ismerkedjünk meg a CCD-chipek felépítésével, működési elvével!

Hogyan működik a CCD?

Először vizsgáljuk meg, hogyan lehet csapdába ejteni az elektronokat egy szilíciumlapkában (4.3a ábra). Egy szilíciumlapka (hordozóréteg) egyik oldalán hozzunk létre egy néhányszor tíz mikrométer vastagságú szilícium-dioxid réteget. Ennek az a feladata, hogy a hordozóréteget elektromosan elszigetelje a fölötte lévő vékony elektródától. A hordozóréteget érő fény hatására elektronok lökődnek ki a szilícium kristályrácsból (ez a fényelektromos hatás vagy fotoeffektus). Amennyiben az elektródára pozitív feszültséget kapcsolunk, ezek a fotoelektronok felgyülemlelenek a szigetelőrétegnek az elektródával átellenes oldalán. Elképzelhetjük ezt úgy, mintha a pozitív elektróda hatására egy potenciálgödör alakulna ki, amibe „beleesnek” az elektronok (4.3b ábra).

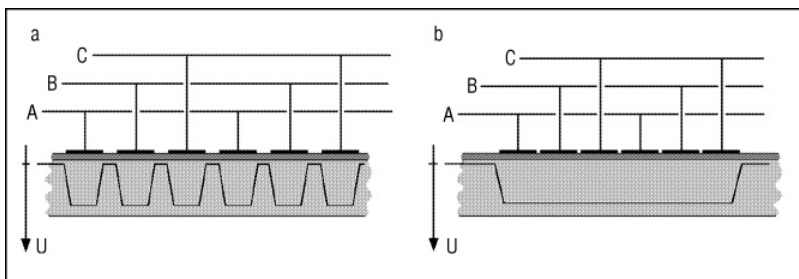


4.3 Egy CCD keresztmetszete (a) és a töltések tárolása potenciálgödörben (b)

A megvilágítás ideje alatt (amit expozíciós vagy integrációs időnek nevezünk) a beérkező fotonok számával egyenesen arányos mennyiségű elektron gyűlik össze az elektródákkal szemben. Sajnos azonban nemcsak a megvilágító fény hatására jelennek meg elektronok, hanem a kristálybeli hőmozgások eredményeként is. Ezen zavaró hatás (a sötétáram) csökkentése érdekében az expozíció alatt hűteni szokták a CCD-detektorokat.

Helyezzünk el képzeletben több elektródát egymás mellett a hordozórétegen. Amennyiben ezek az elektródák elég messze vannak egymástól, a velük szemben kialakult potenciálgödörök is különállóak lesznek (4.4a ábra), ha viszont közel vannak egymáshoz, egyetlen közös potenciálgödör alakul ki, ez a bizonyos töltéscsatolás, amiről az eszköz a nevét kapta (4.4b ábra). Az első esetben, ha egy elektron az A jelű elektróda közelében keletkezik, akkor az A-nál lévő potenciálgödör ejti csapdába. Ha az egyes elektródák alatti területeket különböző erősségű megvilágítás éri, a hozzájuk tartozó potenciálgödörben összegyűlt töltéscsomagok is különböző nagyságúak lesznek. Megmérve ezek nagyságát meg tudjuk határozni, hogy mely pontban milyen erős fényhatás érte a detektort.

Ahhoz, hogy a töltéscsomagokat meg tudjuk mérni, ki kell hozni azokat a félvezetőből a mérőműszerbe.

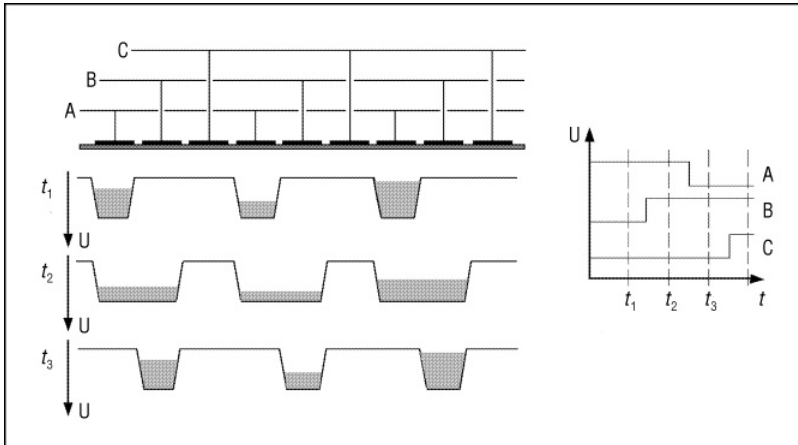


4.4 Az elektródák egymástól mért távolsága határozza meg, hogy különálló (a) vagy egybefüggő (b) potenciálgödör alakul ki

Ha az elektródákra nem egyenlő nagyságú feszültséget kapcsolunk, hanem minden harmadikra (4.5. ábra, A jelű elektródák) magasabb pozitív értéket, a közbülsőkre (B, C) pedig alacsonyabbat, akkor a kialakuló potenciálgödörök egymástól jól elkülönülve helyezkednek el (t_1 -gyel jelölt sor). A megvilágítás alatt keltett fotoelektronok ezekben gyűlnek össze. Az expozíció befejeztével ezeket a töltéscsomagokat úgy tudjuk mozgatni a félvezető belsejében, hogy nem folynak össze egymással. Lassan emeljük a B elektródák feszültségét is az A jelűekével egyező szintre. Ekkor a potenciálgödörök kiszélesednek, de az egyes

töltéscsomagokat még mindig elválasztja a C elektródák alatt lévő gát (t_2 -vel jelölt sor). Ezután csökkentjük az A elektródák feszültségét C-ével egyező mértékűre, így a kiinduló állapothoz teljesen hasonló töltéselrendezést kapunk, csak minden egyes elektroncsomag egy elektródányival arrébb helyezkedik el (t_3 sor). A leírt műveletet a B és C elektródákkal megismételve a töltéscsomagok egy újabb lépéssel mozdulnak el.

A töltéscsatolás jelenségét kihasználva, az egyes elektródák feszültségét a 4.5. ábra jobb oldalán lévő feszültség-idő grafikon szerint változtatva léptetni tudjuk a töltéseket.

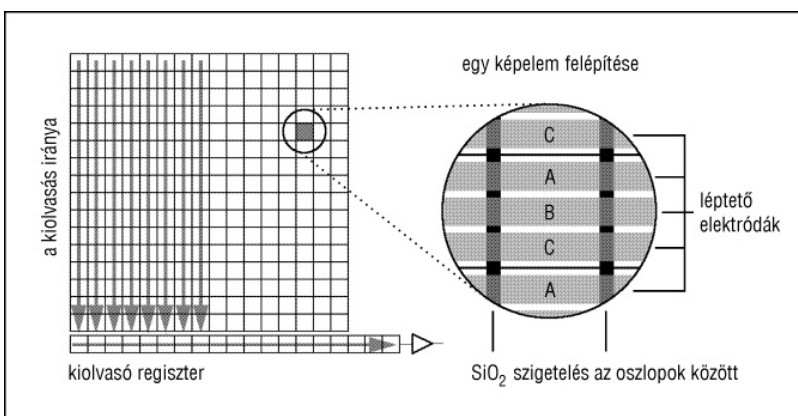


4.5 Töltéscsomagok léptetése háromfázisú elektródasor esetén

Képzeljünk most el ilyen lineáris töltésléptető elemekből többet, szorosan egymás mellé helyezve. A 4.6. ábrán ezek függőlegesen helyezkednek el, nevezzük ezeket oszlopoknak. A léptetés irányát a szürke nyilak mutatják, ebben az irányban a különböző feszültségre kapcsolt elektródák gondoskodnak a töltéscsomagok elkülönítéséről, illetve továbbításáról. A töltéscsatolás azonban vízszintes irányban, az egyes oszlopok között is felléphet. Ennek elkerülésére hozunk létre vékony szilícium-dioxid szigetelőréteget az egyes oszlopok között. Az így kapott mátrix elrendezés egy elemi egységét nevezzük képelemnek, vagy pixelnek (az angol picture element szavak összevonásából).

Helyezzünk el az érzékelő felület szélére egy olyan sort, amelynek a felépítése megegyezik az oszlopokéval. Ebben a töltésléptetés nem függőlegesen, hanem vízszintes irányban történik. E speciális sor, a kiolvasó regiszter végén történik a töltéscsomagok nagyságának megmérése.

A méréshez a kiolvasó regiszter végén helyezzünk el egy kondenzátort, amit minden léptetés előtt feltöltünk egy pontosan ismert nagyságú töltéssel egy referenciafeszültségre. Léptessük a következő töltéscsomagot a kondenzátor pozitív sarkára, ezáltal töltéscsomag elektronjai részben kisütik a kondenzátort. A kisütés után mérjük meg a feszültséget, és hasonlítsuk össze az eredeti referenciaszinttel. Ebből megkapható a mérendő töltéscsomag nagysága. Ezzel el is készült a CCD-detektorunk.



4.6 Egy CCD-képzékelő felépítése és egy képelemének szerkezete

Vetítsünk valamilyen optikai rendszerrel egy képet a detektor felületére! A megvilágítás után a függőleges oszlopokban az összes töltéscsomagot egyszerre egy pixelnyit lejjebb léptetjük, ezáltal a detektor legalsó sorának elektroncsomagjai a kiolvasó regiszterbe kerülnek. Ezután kis időre leállítjuk a töltések függőleges

irányú mozgását, és csak a kiolvasó regiszterben folytatjuk a léptetést a kondenzátor felé. Miután minden egyes elektroncsomagot megmértünk és kiürült a kiolvasó regiszter, ismét az oszlopokban léptetjük lefelé a töltéseket egy képelemmel. Így az eredetileg második sorban lévő töltések kerülnek a kiolvasó regiszterbe, majd a mérőkondenzátorra. Ezt a folyamatot ismételtetjük addig, amíg a teljes detektorfelületből ki nem olvastuk a töltéseket, így minden egyes képelemben összegyűlt töltés megmérhető. Az elektroncsomagoknak a kiolvasás alatti sorszámából egyértelműen meghatározható, melyik képelemben gyűltek össze az integráció alatt.

A CCD-chipek tulajdonképpen az elektronikában ma használt legnagyobb méretű integrált áramkörök (integrated circuit, IC). A kisebb CCD-k első ránézésre ugyanolyanok, mint bármely más, kerámiatokba foglalt „százalábú”. Az áramkör tetején a megvilágításhoz egy kvarcleméből készült ablak található, akárcsak az újraírható memóriachipeken, az EPROM-okon. A nagyobb képelemszámú chipek viszont speciális kialakításúak, szinte a teljes IC-t kitölti az érzékelő-felület (12. és 13. színes kép a mellékletben).

A CCD-ből kilépő jel igen gyenge, így azt egy erősítőbe vezetik, majd az erősített analóg jelet digitalizálják, hogy a kiolvasott kép számítógéppel megjeleníthető és kezelhető legyen. Ez az egység, az analóg-digitális átalakító (Analog-Digital Converter, ADC) határozza meg, hogy a CCD egy képelemének megfelelő képpont fényessége hány különböző digitális értéket vehet fel, mekkora lesz a kép színmélysége a számítógépben. Egy 8 bites ADC esetén $2^8 = 256$ árnyalatot lehet megkülönböztetni, míg 16 bites konverter esetén $2^{16} = 65\,536$ árnyalatot. A 256 árnyalat a digitális képfeldolgozáshoz nem elegendő, így a csillagászati kamerák esetén általános a 16 bites ADC-k használata. Ez azt jelenti, hogy egy képelem intenzitásértéke két byte-on tárolható, és egy 1024 X 1024 pixeles CCD-detektorból kiolvasott kép 2 megabyte méretű.

Egy komplett CCD-detektor tehát a következő elemekből épül fel: CCD-chip, előerősítő, analóg-digitális átalakító, csatolóegység (interfész), számítógép. Az első kettő általában egy fizikailag is különálló egységben, a kamerafejen található, ami a már említett sötétáram miatt szükséges hűtőrendszert is magában foglalja. A hűtésre többféle megoldást alkalmaznak, egyszerűbb kamerák esetén termoelemeket (Peltier-elemeket), professzionális csillagászati detektorok esetében pedig szárazjéggel vagy folyékony nitrogénnel működő hűtőrendszereket használnak. Mintegy -110°C -os hőmérsékleten a sötétáram már elhanyagolható, de ennél hidegebb detektorokban nem működik a töltésléptetés mechanizmusa.

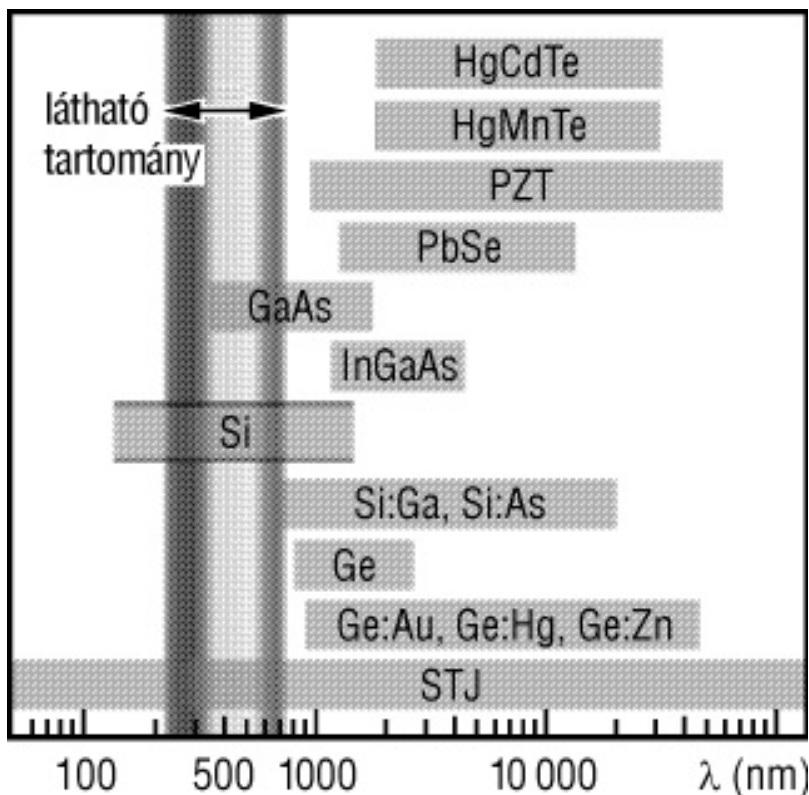
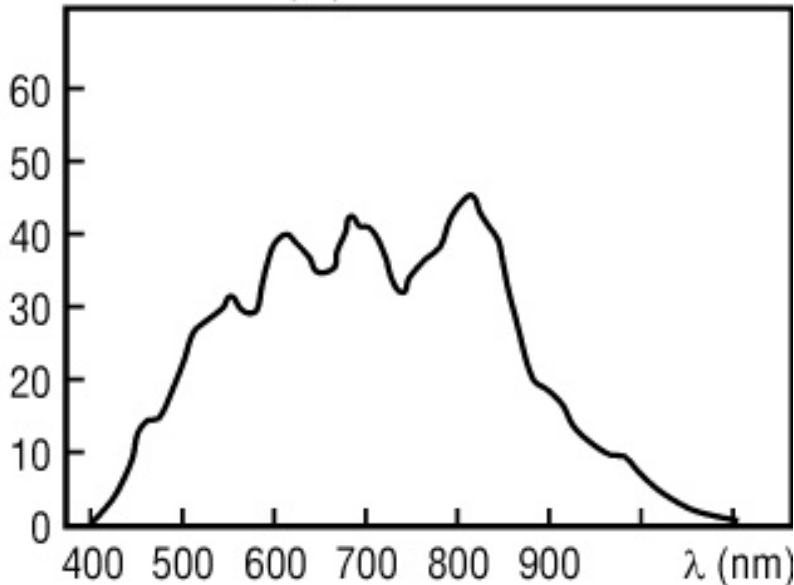
Az analóg-digitális átalakító és a számítógép felé a jelet továbbító csatolóegység általában külön dobozban kap helyet, ezt nevezzük kiolvasó elektronikának. A harmadik fő egység, a számítógép akár több méterre is lehet a kamerafejtől, ám a kiolvasó elektronikának a kamerafejhez minél közelebb kell elhelyezkednie. A CCD-chipből a csatolóegységbe menő jelhez a vezetékben és az áramköri elemekben különféle elektromos zajok adódnak hozzá. Ezeket a zavarokat együttesen kiolvasási zajnak nevezzük, amit elektron/képelem értékben fejezhetünk ki. Minél kisebb a kiolvasási zaj, annál tökéletesebb a kamera. Ezt a zajt a CCD és a csatolóegység közötti kábel hosszának optimalizálásával lehet csökkenteni.

A 4.7. ábrán a különböző technológiával készített CCD-chipek spektrális érzékenységi tartománya látható. Az, hogy milyen hullámhossztartományban működik a CCD-detektor, elsősorban a hordozóréteg anyagától függ. A 4.7. ábrán a különböző anyagból készült CCD érzékelőkre vonatkozó sávok igen széles spektrális tartományt fognak át. Látható, hogy a legáltalánosabban elterjedt, szilícium alapú CCD-k sokkal szélesebb hullámhossztartományban, 300-1100 nm között használhatók, és sokkal érzékenyebbek is, mint a fotoemulziók.

A CCD-detektor a teljes működési tartományában lineáris, vagyis a vizsgált objektum képének intenzitása egyenesen arányos a CCD-chip megvilágításának idejével. Mivel a linearitás igen széles megvilágítási tartományban fennáll, a CCD-kép az igen eltérő fényességű objektumokat is egymáshoz képest intenzitáshelyesen rögzíti. A fotolemezeken két csillagot akkor lehetett egymással megbízhatóan összehasonlítani, ha legfeljebb 5^m volt fényességük különbsége, ami 100-szoros intenzitásaránynak felel meg. CCD-k esetén ez a dinamikai tartomány jóval szélesebb, akár $10\text{--}12^m$ is lehet.

Amiben ezek az elektronikus képrögzítő eszközök ma még elmaradnak a fotográfiától, az az érzékelőfelület nagysága és a felbontóképesség. A felbontóképesség a képelemek méretétől függ, és ez a csillagászatban is használt detektorok esetében 25-10 mikrométer, vagyis a feloldás 40-100 vonal/mm, a fotografikus emulziók feloldóképessége pedig 100-300 vonal/mm.

kvantumhatásfok (%)



4.7 Különböző anyagokból készített CCD-k spektrális érzékenysége (a „Si:Ga” jelentése galliummal szennyezett szilícium)

Tagadhatatlan hátrány a detektorok kis hasznos felülete is. Ma még egyetlen CCD-kamera sem képes felvenni a versenyt a 40 X 40 cm-es méretben is elkészíthető fotolemezekkel. De 10 mikrométer-es képelemméret esetén egy 10 X 10 cm-es detektor 10 000 X 10 000 képpontból áll, és a kép kiolvasása is igen időigényes. Másrészt a töltésléptetés hatásfoka nem pontosan 100%, hanem mindig egy kicsit kisebb. Ha ez az érték csak 99.999%, vagyis lépésenként az elektronoknak átlagosan 0.00001 része - 100 000 elektronból egy - vész el. 10 000 X 10 000 képpont esetén a kiolvasáshoz legközelebbi sarok képelemei néhány léptetéssel kiolvashatók, itt veszteség alig lesz. A legtávolabbi képelemek töltéscsomagja viszont 20 000 lépést tesznek és eközben az elektronoknak akár az ötöde is elveszhet. A technika fejlődése azonban mindig újabb és újabb utakat nyit, s ma már használnak a csillagászok százmillió képpontból álló detektorokat.

CCD-kamerák tegnap, ma, holnap

A töltéscsatolás technikai eljárását Willard S. Boyle és George E. Smith fejlesztette ki a Bell Laboratóriumokban. Elsősorban új, nem mágneses elven működő memóriák és videotelefonokban

használható kamerák készítése céljából született meg 1969. október 17-én a töltéscsatolt eszköz alapötlete. Egy évvel később a Bell Laboratóriumokban elkészítették az első CCD-chippel működő videokamerát (4.2. ábra), ennek képminősége azonban még jelentősen elmaradt az akkoriban használt vidikon képcsöves felvevőkétől. Az első CCD-detektor, amely képalkotásban felvette a versenyt a kor tévékameráival, 100 X 100 képelemes volt, és a Fairchild Electronics készítette 1974-ben. Egy 20 cm-es távcsőre szerelve ezzel a kamerával rögzítették az első csillagászati CCD-felvételt.

Akkoriban az egyik fő cél az volt, hogy megnöveljék a töltéscsomagok továbbításának hatékonyságát. Az előző részben láttuk, hogy ennek nagyon közel kell lennie a 100%-hoz. A hatékonyabb töltéstovábbítás érdekében a szilícium hordozó- és a SiO₂ szigetelőréteg közé elhelyeztek egy negatívan szennyezett réteget, ami az elektronokra gyakorolt taszító hatása miatt segíti a töltések mozgását. Ezek az rejtett csatornás CCD-k tették lehetővé a mintegy 99.9999%-os töltésléptetési hatásfok elérését.

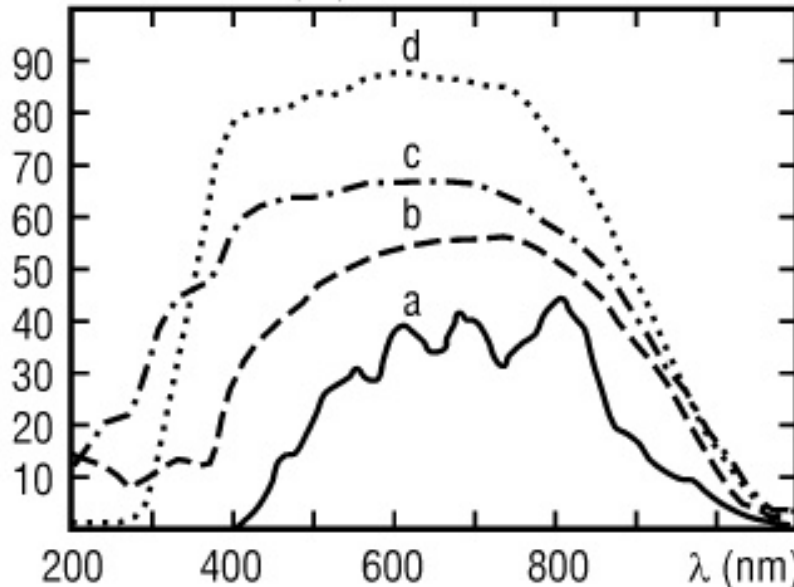
A fotonok érzékelésének hatékonyságát a töltések gyűjtését és kiolvasását lehetővé tévő elektródák rontották. Amennyiben ugyanis ezen elektródák oldaláról világítjuk meg a CCD-t, két probléma is adódik. Az egyik, hogy a fénynek át kell hatolnia az elektródákon. A nagyon vékony alumíniumrétegből vagy poliszilikátból készített elektródák elektromosan vezetők és emellett még átlátszóak, de nem teljesen. Fényelnyelésük a kék tartomány felé haladva egyre nagyobb, és a 400 nm-nél rövidebb hullámokat szinte egyáltalán nem engedik át. Emiatt a megvilágító fény egy része elvész az elektródákban, vagyis csökken a fényhasznosítás hatásfoka. Bizonyos mértékben növelhető az érzékenység, ha tükröződésgátló (antireflexiós) réteg segítségével csökkentjük a képérzékelő felület határán fellépő fényvisszaverődést.

A másik probléma az, hogy a különböző hullámhosszú fotonok a szilícium detektoranyagban különböző mélységben nyelődnek el. Ez az átlagos úthossz a hordozó hőmérsékletétől is függ. Szobahőmérsékleten egy 400 nm-es, kék foton kevesebb mint 1 mikrométer megtétele után, egy 1000 nm-es, közeli infravörös foton pedig több mint 100 mikrométer megtétele után 90%-os valószínűséggel elnyelődik. (Az 1100 nm-nél nagyobb hullámhosszú fotonoknak már nem elegendő az energiájuk, hogy fotoelektronokat váltsanak ki a szilíciumkristályban.) Közvetlenül az elektródák alatti régióban a felgyülemlett fotoelektronok elektromos teret keltenek, ami néhányszor tíz mikrométer vastag zónában megakadályozza további fotoelektronok keltését. A később érkező fotonok tehát már csak mélyebben tudnak elektront kiváltani. De láttuk, hogy a kék fotonok egy mikrométer mélységig nagy valószínűséggel elnyelődnek, anélkül, hogy fotoelektront tudtak volna keltetni, így ezeket nem érzékeli a detektor.

Az sem jó, ha túlságosan mélyen keletkeznek a fotoelektronok. Néhány száz mikrométer mélységben ugyanis olyan gyenge már az elektróda elektromos tere, hogy csak kis eséllyel képes az elektronokat rekombinálódás vagy másik elektródához történő diffúzió előtt magához vonzani.

Mit lehet tenni? Fordítsuk meg a CCD-t, és világítsuk meg a hordozóréteg felől, ezáltal az első problémát biztosan megoldjuk. Csakhogy a kék fényre való érzékenységet így sem tudjuk növelni, hiszen a hordozóréteg vastagsága - mechanikai és gyártástechnológiai követelmények miatt - több száz mikrométer. Vagyis ebben az esetben túl messze lesz a kék fotonok elnyelődése az elektródáktól, és a keltett elektronok többsége elvész a képalkotás számára. Ha el lehetne vékonyítani a hordozóréteget, akkor a kék tartománybeli érzékenységet is lehetne növelni. Technikai nehézségek miatt egészen az 1990-es évek elejéig nem készítettek ilyen hátulról, az elektródákkal szemközti oldalról megvilágított (backside) vagy más néven vékonyított CCD-eket. Ezek a detektorok az említett okok miatt sokkal érzékenyebbek a kék tartományban és a kvantumhatásfokuk is nagyobb, mint az elektródák felől megvilágított (frontside) vagy más néven vastag érzékelőknek. A kvantumhatásfok azt adja meg, hogy a beérkező fotonok hány százalékát képes érzékelni a detektor (4.8. ábra).

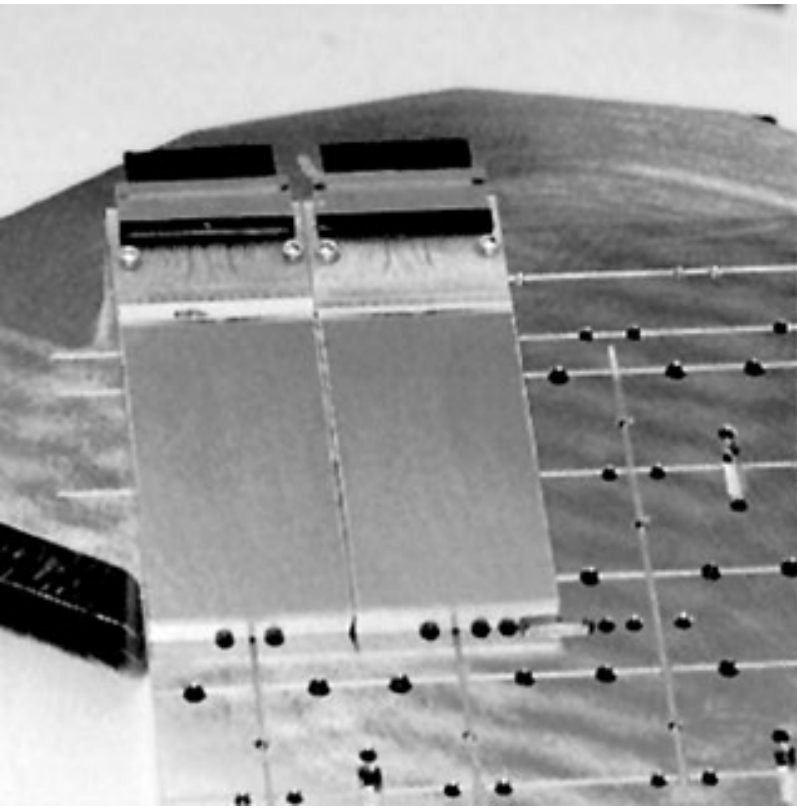
kvantumhatásfok (%)



4.8 Különböző CCD-detektorok spektrális érzékenysége: a) előlő megvilágítás, b) hátsó megvilágítás, c) hátsó megvilágítás a szövegben leírt fluoreszcens bevonattal, d) hátsó megvilágítás vizuális tartományban működő antireflexió (VISAR) réteggel

Egy másik megoldás, hogy az előlről megvilágított CCD elektródáit valamilyen fluoreszcens anyaggal fedik be, amiben a rövid, 100-300 nm hullámhosszúságú fotonok elnyelődnek és energiájuk nagyobb hullámhosszon sugárzódik ki. Ha ez a bevonat a hosszabb hullámhosszokra átlátszó, és az elnyelt rövidebb hullámhosszakat a detektor számára optimálisan hasznosítható tartományban (pl. 500 nm környékén) sugározza ki, akkor elérhető bizonyos mértékű érzékenység a kék tartományban is. Az első ilyen CCD-t 1980-ban készítették, amikor is egy sokgyűrűs aromás szénhidrogénnek ($C_{24}H_{12}$) köszönhetően a közeli ultraibolya (UV) tartomány fotonjai 550 nm-es fotonokként érték el a hordozóréteget. (A Hubble-űrtávcső CCD-detektorait is ez a szerves anyag teszi érzékennyé az UV tartományban.) A 4.8. ábrán jól látható, hogy a fenti technikák miként változtatják meg a CCD spektrális érzékenységét.

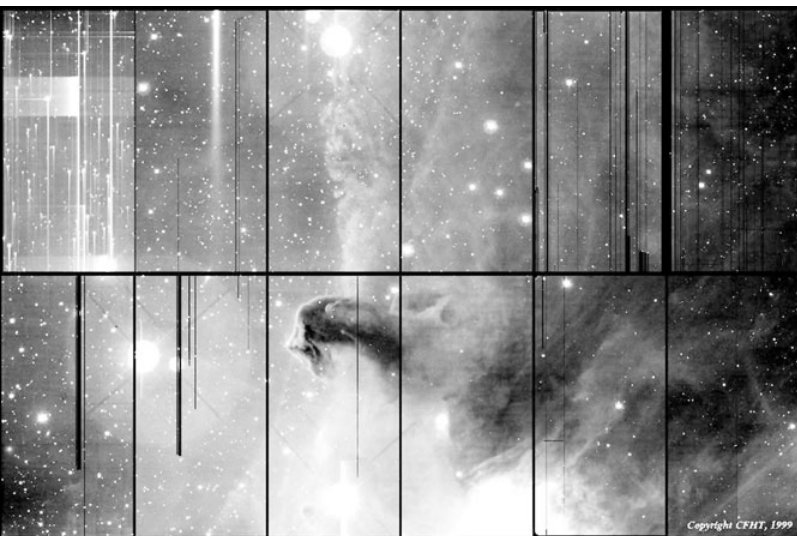
Problémát jelent az is, hogy a CCD gyártása során egyes képelemek hibásak lehetnek (pl. nem kívánt szennyeződés miatt). Jobb esetben csak néhány pixel válik részben vagy teljesen érzéketlenné, de ha a képelemhez tartozó elektródák sérülnek, akkor akár egy egész oszlop kiolvasása is lehetetlenné válhat, ugyanis hibás pixelen nem lehet átléptetni a töltéseket. Ha a kiolvasó regiszter sérül meg, akkor az egész CCD-chip használhatatlan. Egy hibátlan 1000 X 1000 képelemes detektor készítéséhez esetleg több tucatot kell legyártani, mire azok közt akad egy tökéletes. A CCD méretének növelésével hatványozottan nő a hibalehetőség és így a selejt valószínűsége, ezért a nagy méretű eszközök ára igen magas.



4.9 Három oldalán szabadon hagyott CCD-chipekből felépülő mozaik kamera két detektora egymás mellé építve

2001 tavaszán a technika színvonala a 4096×4096 képelemszámú, 20 mikrométer körüli pixelméretű detektorok gazdaságos gyártását teszi lehetővé. Az eddig készített legnagyobb, összefüggő CCD-chipet a Philips cég állította elő, 7186×9216 db 12 mikrométer-es képelemből áll, képalkotó területe 86×110 mm. Egy ilyen érzékelő ára azonban rendkívül magas, s ha csak egyetlen kiolvasó regiszterrel látják el, a kiolvasási idő is igen hosszú.

Ezek a nehézségek azonban csökkenthetők, ha nem egyetlen nagy chipet, hanem több kisebbet építünk egymás mellé a kamerába. Az ilyen mozaik kamerák elkészítéséhez viszont az szükséges, hogy a CCD-chipeket egymáshoz igen közel lehessen elhelyezni. Ebben az esetben a hagyományos IC-tokozás nem alkalmazható, speciális kialakításra van szükség. Ma már sorozatban gyártanak 2048×4096 képelemszámú, három oldalán szabadon hagyott, hátsó megvilágítású detektorokat (4.9. ábra).



4.10 A CFHT 12 288×8192 képelemes detektorának egy korrigálatlan, nyers felvétele a Lófej-ködről

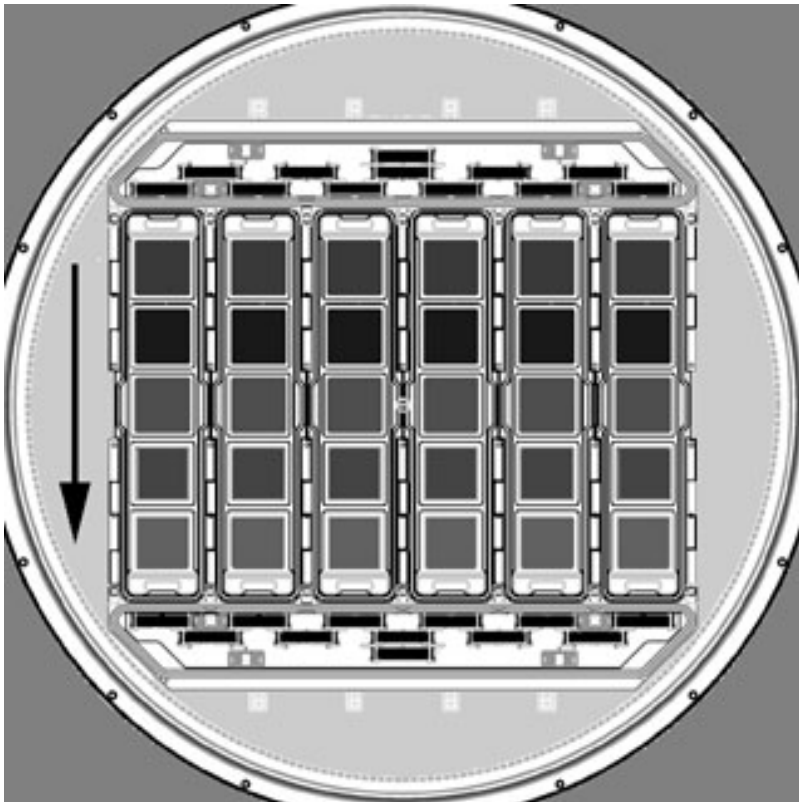
12 db ilyen CCD felhasználásával készült a jelenlegi legnagyobb mozaik kamera, a Mauna Keán lévő 3.6 m-s CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope) 12 288×8192 képelemes, 15×15 mikrométer pixelméretű, 184×123 mm felületű detektora. A Lófej-ködről készített felvételen (4.10. ábra) jól látszik, hogy bizony igen sok a hibás oszlop az egyes chipekben, és az egyes CCD-knek az érzékenysége is eltérő. Ezeket a

hibákat, eltéréseket, valamint az egyes chippek közötti elválasztó sávokat úgy lehet kijavítani, információval feltölteni, hogy a távcsövet egy kissé arrébb mozdítják, és egy újabb felvételt készítenek, majd a két kép alapján létrehoznak egy korrigált képet.

Ilyen mozaik kamerákat először a Hubble-űrtávcső nagylátószögű és bolygókamerája (Wide Field and Planetary Camera 1, WFPC-1) és a már befejeződött MACHO program [Csillagászati évkönyv 1995, 154. o.] használt. 2001 tavaszán a méret-rangsor a már említett CFHT detektor vezeti, második a Kitt Peak National Observatory (KPNO) 8192 X 8192 képelemes mozaikja [Címlapképünk ezzel a detektorral készült], amely 8 db 2048 X 4096-os CCD-ből épül fel, a pixelméret 15 mikrométer, a teljes detektorfelület 124 X 126 mm. Az 1997-ben beszerelt, elülső megvilágítású chippeket egy évvel később lecserélték hátsó megvilágításúakra. A sikeres tesztek és a kedvező tapasztalatok alapján egy teljesen hasonló kamera készült 1999-ben a Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) 4 m-es Blanco-teleszkópjához is.

A közeljövőben bizonyosan sokat fogunk hallani a Sloan Digitális Égboltfelmérésről [Lásd Az Univerzum digitális térképe című hírt, valamint a 16. és 17. színes képet a mellékletben.] (Sloan Digital Sky Survey, SDSS), így talán nem haszontalan pár szót ejteni az abban alkalmazott kameráról. Már csak azért sem, mert így megismerkedhetünk egy olyan trükkel, amit a töltésléptetés tesz lehetővé. Ez a késleltetett kiolvasás (Time Delay and Integrate, TDI) üzemmód.

Ha egy távcsővel nem követjük az égbolt forgását, akkor az objektumok képe egyenletes sebességgel elmozdul a fókusz síkban. Állítsuk be úgy a CCD-detektort, hogy a töltések léptetésének iránya megegyezzen a kép elmozdulásának irányával. Ha a töltéseket pontosan akkora sebességgel léptetjük, amilyen gyorsan a kép mozog, akkor minden töltéscsomag éppen követi az őt létrehozó képrészletet, és haladás közben természetesen gyarapodik is a folyamatosan beérkező fotonok hatására. Ez az eljárás helyettesítheti a vezetést, az órágép használatát. A TDI tehát egy igen lassú kiolvasás, a megvilágítás pedig mindaddig folyamatosan történik, amíg az exponált képrészlet a CCD egyik szélétől eléri a másikat (a kiolvasás felőli) széléhez.



4.11 Az egyes chippek és szűrők elhelyezkedése az SDSS 30 CCD-ből álló mozaikkamerájában (lásd még a 14. színes képet a mellékletben)

Késleltetett kiolvasással működik az SDSS kamerája is. Ennek képalkotó felülete 5 sorban és 6 oszlopban 30 db 2048 X 2048 méretű CCD-ből áll (4.11. ábra). Az 5 sor mindegyikét más színszűrővel látták el. Az égbolt mozgása során az objektumok képe végighalad az öt különböző színszűrővel fedett detektoron. Így egymáshoz képest kis időeltolódással öt különböző színben készül el az égbolt 6 darab 14' széles sávjának

képe. Az egyes chippek - és emiatt a leképezett égi sávok viszonylag távol vannak egymástól. A sávok között kimaradt területekről a távcső kismértékű elmozdításával másik felvételt kell készíteni.

Ha például egy CCD-kamera látómezeje fél fok, akkor ezen egy csillag képe két perc alatt vonul át, vagyis ennyi lesz az expozíciós idő egy objektumra. Mivel a kép kiolvasása folyamatos, azt „tetszőleges ideig” folytathatjuk, és így az előző példánál maradva egy deklinációban fél fok széles, rektaszcenzióban tetszőleges hosszúságú képet kaphatunk. A TDI mód egyik előnye, hogy a megvilágítás alatt nem kell követni az égbolt forgását, ezért jóval egyszerűbb távcsőmechanikák is használhatók. A Földet megközelítő kisbolygók keresésére használt 0.9 m-es Űrfürkész (Spacewatch) I teleszkóp [Csillagászati évkönyv 2000, 207. o.] is TDI technikát használ. Tubusa hajókéményből készült és mechanikája is csak az iránybeállítást teszi lehetővé, követésre nem is alkalmas. A távcsőre szerelt 2048 X 2048-as CCD átlagosan két és fél perces integrációval dolgozik és így $21.^m5$ határfényességet tud elérni.

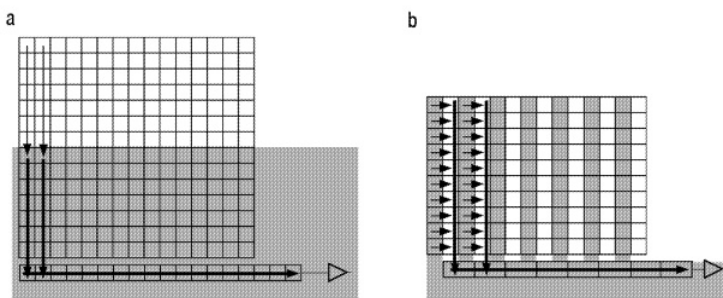
2001 nyarán már készült a CFHT számára a 40 db, egyenként 2000 X 4500 képelemből álló, 13.5 mikrométer pixelméretű CCD-t tartalmazó MegaCam. A mátrix 20 000 X 18 000 képelemes és 331 X 261 mm kiterjedésű, ennek azonban csak 93%-a képalkotó felület. A 3.6 m-es távcső primer fókuszában, fókuszreduktort is alkalmazva ez $1.^{\circ}4 \times 1.^{\circ}4$ látómezőnek felel meg. A kamerafej mintegy 120 kg-os. A detektormátrixból 20 másodperc alatt lehet kiolvasni a 720 MB méretű képet.

Ha vezetett felvétel készül, akkor komoly gondot jelent a nagy CCD-chipeknél szükséges hosszú kiolvasási idő. Vannak olyan mérési feladatok, ahol a kiolvasással járó - akár több perces - holtidő megengedhetetlen. Másrészt, ha a detektor felületét a kiolvasás alatt is éri a fény, akkor a fényes objektumok csíkot húznak a képen, mert az objektum képe a detektoron helyben marad, és a folyamatosan továbbléptetett képnek mindig újabb képelemében növeli a jel nagyságát.

Ennek a „szellemképnek” a kiküszöbölésére többféle megoldás is használatos. Az egyik a fotográfiából is jól ismert zár, ami a kiolvasás időtartama alatt megakadályozza, hogy a fény a detektorra jusson. A kiolvasási idő több kiolvasási pont alkalmazásával is csökkenthető, az elektródák megfelelő kialakításával akár a chip mind a négy sarkában egyidejűleg is folyhat a kiolvasás. Ezt a megoldást a fényzárral kombinálva a nagyobb méretű CCD-k esetén alkalmazzák.

A kisebb detektoroknál egyszerre is megoldható a két probléma. A detektor egyik felét letakarjuk egy átlátszatlan alumíniumréteggel. A kép a fedetlen részen keletkezik, majd a megvilágítás végeztével a kapott képet átléptetjük a lefedett tárfelületre. Ez nagyon gyors folyamat, hiszen például egy 1024 X 1024 képelemes fedetlen terület esetében egy teljes kép 1024 lépéssel áttölthető a tárfelületre, míg a kép kiolvasásához 1024 X 1024, vagyis több mint egymillió léptetési ciklus szükséges. Mialatt a tárfelületről kiolvassuk a képet, a fedetlen részen már folyhat a következő expozíció. Az ilyen megoldást alkalmazó eszközöket egészkép-továbbító (frame transfer) CCD-nek nevezik (4.12. ábra). Mivel itt a teljes CCD a képérzékelő felület kétszerese, egy 1024 X 1024 pixel méretű kép készítéséhez 2048 X 1024 méretű detektor kell. Ennél nagyobb egészkép-továbbító CCD-eket általában nem is készítenek.

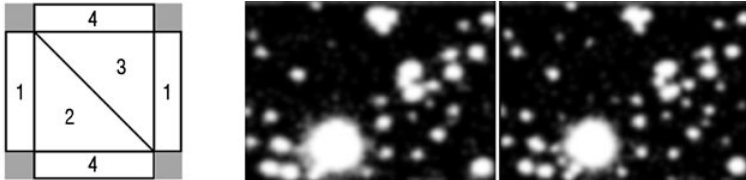
Videokamerákban, ahol még gyorsabb kiolvasásra van szükség, a sorközi továbbítás (interline transfer) megoldást használják. Itt minden második pixelsor tárolóként működik, így a kész kép egyetlen léptetési ciklusban a tárolóterületre továbbítható. Ez a megoldás azonban csökkenti a detektor fizikai felbontását, ezért a csillagászatban nem alkalmazzák.



4.12 Az egészkép-továbbító és a sorközi továbbítással működő CCD felépítése. A fénytől elzárt tárolóterületet szürke szín jelzi

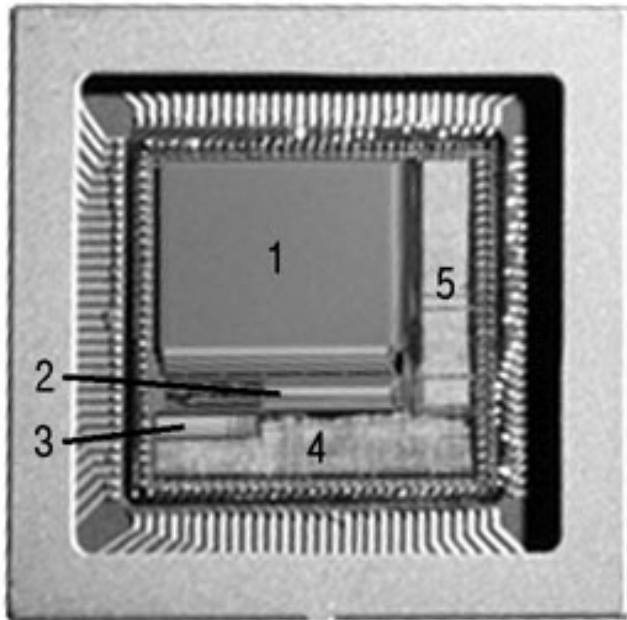
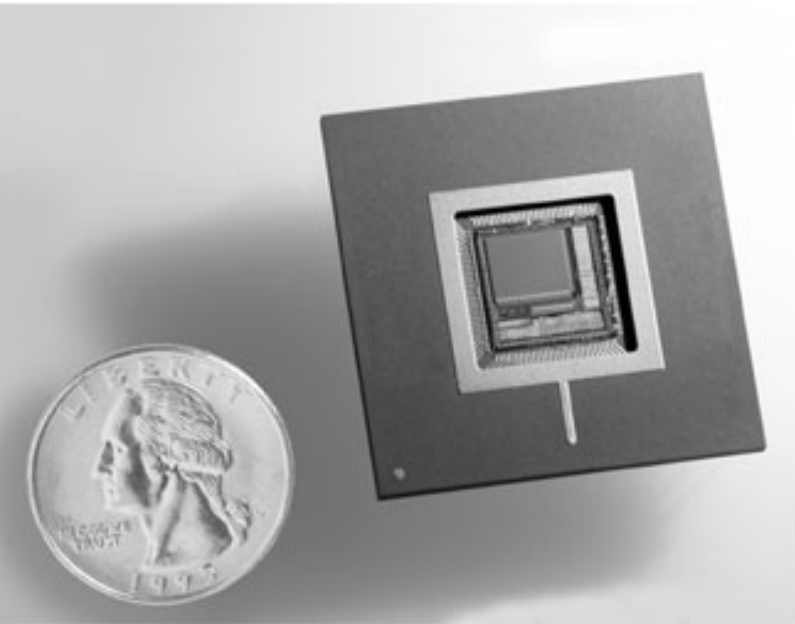
Mit várhatunk a jövőben? Három eszközt érdemes megemlíteni, ezek a merőleges továbbítású CCD (Orthogonal Transfer CCD, OTCCD), a komplementens fémoxid félvezető (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) technológiával készült érzékelők és a szupravezető alagútcsatolt (Superconductive Tunnel Junction, STJ) detektorok.

A hagyományos CCD-kben a töltések csak egy irányban léptethetők, az 4.5. ábrán bemutatott módon. Ha azonban egyes oszlopok között nem alkalmazunk fizikai elválasztást, s az elektródákat sem a 4.6. ábra szerinti elrendezésben készítjük, hanem úgy, ahogy azt a 4.13. ábra bal oldala szemlélteti, akkor a töltések tetszőleges irányba mozgathatók. A merőleges továbbítású CCD esetében a balra történő töltésmozgathoz a következő sorrend szerint kell az egyes elektródák alatt kialakítani a potenciálgödröket: 213213..., a fölfelé mozgathoz pedig 234234... stb. Ezáltal a töltések tetszőleges út mentén, akár körbe-körbe is mozgathatók.



4.13 Az OTCCD egy képelemének szerkezete (balra) és az OTCCD-vel elérhető jobb felbontást demonstráló képpár

Így a töltések megfelelő mozgásával helyettesíthetjük például az adaptív optikák egyik mozgó elemét. A légköri torzulásokat korrigáló rendszereknek ugyanis két fő feladatuk van: a kép ugrálásának, illetve a hullámfront torzulásának csökkentése. A képnek a légköri turbulenciák miatt fellépő ugrálását egy dönthető-billenthető tükör segítségével korrigálják. Ezt a tükröt úgy kell mozgatni, hogy a képet mindig ugyanabban a helyzetben vetítse a detektorra. Ha az integráció alatt mozgathatjuk a készülő képet, akkor ezzel tudjuk követni a beérkező fény irányváltozásait, és a billenthető tükör elhagyható. Elvében hasonlít az eljárás a TDI üzemmódhoz, csak itt nem a Föld forgása miatt mozdul el a kép, hanem a légkör nyugtalansága következtében, és ezt követjük a töltéscsomagok mozgásával. Már ezáltal is jelentősen javítható a felbontás (4.13. ábra). Optikai hullámfront-korrekcióval persze még további minőségjavulás érhető el.



4.14 Egyetlen chipben felépített CMOS kamera 1 - képérzékelő, 2 - ADC, 3 - memória, 4 - csatoló, 5 - szín- és hibakorrekciót végző elektronika

A komplementis fémoxid félvezető detektorok nagy előnye, hogy ugyanazzal a CMOS technológiával gyárthatók, mint a manapság használt félvezető eszközök döntő többsége. (A CCD-ket MOS technológiával gyártják, ami sokkal kevésbé elterjedt, részben ez okozza az ilyen detektorok magasabb árát.) Itt is képelemek gyűjtik az információt, azonban minden egyes pixel címezhető, vagyis tetszőleges képpont tartalma közvetlenül kiolvasható. Mindegyik képelem tartalmaz egy kiolvasóegységet is, és mivel az érzékelőfelület is CMOS technikával készül, ezért rögtön a pixelmátrix mellett, egyazon chipen belül kialakítható az erősítő, AD átalakító és minden más szükséges áramköri elem (4.14. ábra). Így egyetlen kis szilíciumlapkán elfér mindaz, ami a CCD-k esetében a kamerafejben és több különálló egységben kap helyet.

Egy egész kamera elkészíthető tehát néhány köbcentiméterben, s egy ilyen eszköz áramfelvétele töredéke a CCD-k áramigényének. Nagyobb a dinamikai tartományuk is, azaz nagyobb megvilágítástartományban lineáris a fényérzékenységük. A zajszintjük nagyobb, így néhány másodpercnél hosszabb expozíciós idő nem alkalmazható. A kvantumhatásfokuk viszont igen magas, a 80%-ot is meghaladja, így ez az eszköz ha a csillagászatban nem is fogja átvenni a vezető szerepet, az űrkutatásban, videokamerákban, digitális fényképezőgépekben, szkennerekben és a hétköznapi élet sok más területén máris az élre tört.

A szupravezető alagútsatolt detektor (STJ) közel ideális fotonszámláló eszköz. A röntgensugárzástól a szubmilliméteres mikrohullámokig terjedő, széles hullámhossztartományban, 60%-ot meghaladó kvantumhatásfokkal, majdnem minden egyes beérkező fotont detektál, sőt ezek hullámhosszát is képes meghatározni.

A detektor lelke két vékony, szupravezető (nióbium, hafnium, tantál vagy molibdén) filmből áll, melyeket egy vékony szigetelőréteg választ el. Egy kritikus hőmérséklet alatt, ami általában néhány Kelvin, az elektronok már igen kis energia hatására is képesek kvantummechanikai alagúthatással átjutni a szigetelőréteg túlfelületére. Az alapállapot a gerjesztett állapot közötti energiakülönbség jóval kisebb, mint egy foton energiája. Ezért egyetlen foton beérkezése több (akár ezer) elektront is kivált, és ezeknek az elektronoknak a száma arányos a beérkezett foton energiájával, vagyis a frekvenciájával. (A CCD-k esetében egy elektron gerjesztéséhez nagyjából egy foton energiája szükséges.)

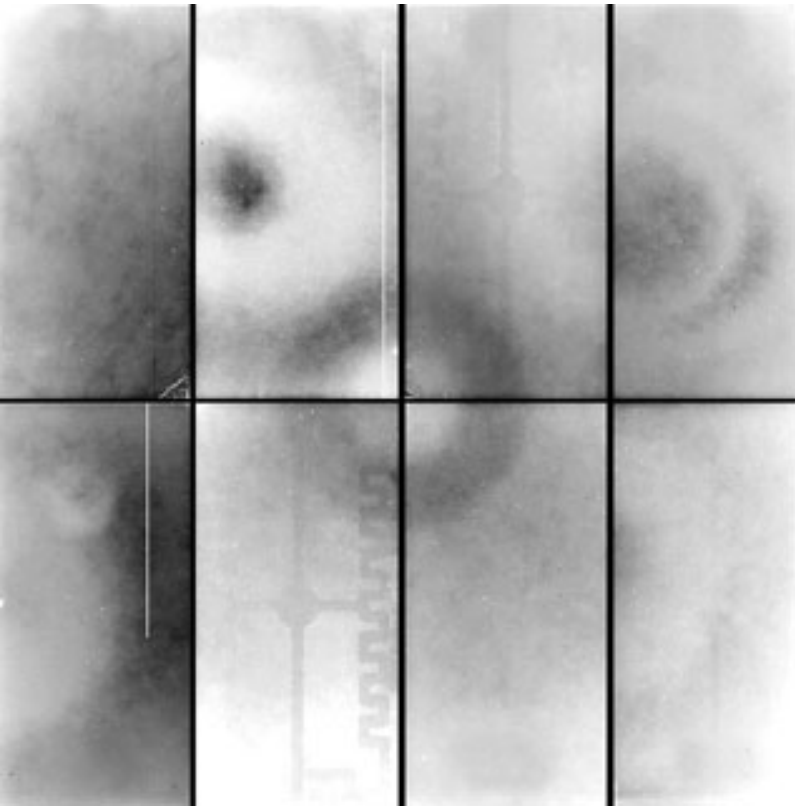
Kétdimenziós mátrix szerkezetet létrehozva tehát tér-idő-spektrális felbontást adó detektort kapunk. A spektrális felbontás - az alkalmazott szupravezetőtől függően - az UV tartományban 0.01-1 nm közötti; infravörösben, 1000 nm környékén azonban már csak 10-100 nm. Ezek a detektorok igen „gyorsak”, egy foton érzékelése egy mikroszekundumnál kevesebb időt igényel.

Kedvező tulajdonságai alapján ígéretes jövő vár az STJ-re például a halvány objektumok spektroszkópiájában, vagy az adaptív optikák hullámfront-érzékelőjében. Az első, 6 X 6 képelemes prototípust 1999 óta sikeresen alkalmazzák, és már készül egy detektor a HST számára - HSTJ néven.

A digitális képfeldolgozás

A CCD-kamerák által előállított képek a digitális formának köszönhetően könnyen kiértékelhetők, és a kamera esetleges hibái (hibás képelemek, sötétáram) is korrigálhatók számítógép segítségével. Ezek a módszerek a digitális képfeldolgozás témakörébe tartoznak, amit a tudomány és a technika számos területén alkalmaznak. A csillagászati felvételek esetén használt speciális eljárások részletes ismertetése meghaladná nemcsak e cikk, hanem akár egy egész könyv terjedelmét is, így most csak az alapok áttekintésére van lehetőségünk.

A csillagászati fényképfelvételeken gyakran jelennek meg olyan részletek, amelyek nem csillagászati objektumoktól származnak. A fotolemez gyártása vagy későbbi kezelése során keletkezett hiba gyakran eredményez olyan látványt, ami összetéveszthető egy valóságos objektum képével. Ezek a hibák fotolemezről fotolemezre változnak, és az előhívásig nem is derülnek ki, ezért utólag nagyon nehéz, olykor lehetetlen a felismerésük és helyes értelmezésük.



4.15 Egy 8000 X 8000 képelemes mozaikkamerával készített világoskép

Mint láttuk, a CCD-kamerák esetében is sok olyan hiba lehet a detektorban, ami jelentkezik a képen is (4.10. ábra). A kamerafejet lezáró ablakon vagy a detektor elé helyezett szűrőkön lévő porszemek, szennyeződések is hamis struktúrákat visznek a képbe. Az optikai rendszerben lévő esetleges takarások (vignettálás) pedig a kép intenzitásvizonyait torzítják. Ezek együttes hatását jól mutatja egy egyenletesen megvilágított felületről, pl. a szürkületi égboltról készített felvétel. A Kitt Peaken használt 8000 X 8000 képelemes detektorral felvett világosképen (flat field kép) jól látszik, hogy a mozaikkamerák esetében az egyes chippek érzékenysége mennyire eltérő lehet: ahol a világoskép sötétebb, ott a detektor valamilyen oknál fogva érzéketlenebb (4.15. ábra).

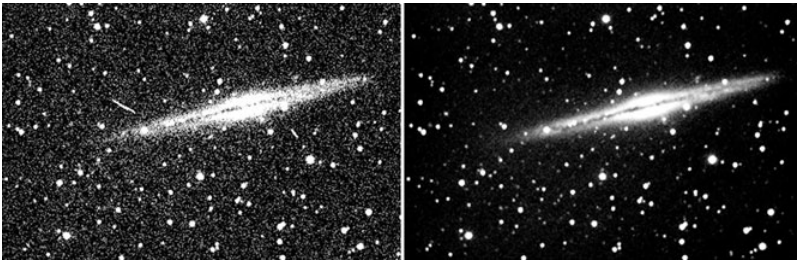
A világosképen látható hibák nagy részét úgy lehet korrigálni, hogy a számítógépen tároljuk az egyes képelemeknek a világosképen megjelenő relatív érzékenységet, a normált világosképet. A normálás azt jelenti, hogy a teljes detektor legérzékenyebb képelemének fényességét 1-nek választjuk, és a többi képelemen mért fényességet ehhez arányítjuk, így azokhoz rendre egynél kisebb érték fog tartozni. A normált világoskép megmondja, hogy az egyes képelemek mennyivel „látnak rosszabbul”, mint a legérzékenyebb pixel. Készítsünk most egy felvételt az éjszakai égbolton a kiválasztott objektumról, s ezt a képet osszuk el a normált világosképpel! Azokon a helyeken, ahol a kamera érzéketlenebb, és emiatt a valódinál halványabb az objektumok képe, a normált világoskép intenzitásértéke is egynél kisebb. Ha az adott képpont intenzitását elosztjuk ezzel az egynél kisebb számmal, megkapjuk, hogy milyen fényesnek látta volna azt a képpontot a legérzékenyebb pixel. Ezáltal eltüntethetők a detektor egyes területei, képelemei közötti érzékenységekülönbségek, a porszemek és a vignettálás hatása. Mivel minden szűrő más-más struktúrárt visz bele a képbe, így a világosképet minden szűrővel el kell készíteni. Természetesen a teljesen érzéketlen vagy kiolvashatalan képelemek ezzel a módszerrel nem javíthatók.

A másik alapvető korrekció a sötétkép levonása. Mint említettük, nemcsak a beérkező fotonok, hanem a hőmérséklet hatására is keletkezik jel a detektorban, ami hozzáadódik az adott objektumról készített képhez. Állandó hőmérsékleten a sötétáram nagysága időben nem változik, minden egyes képpont csaknem ugyanannyi töltést produkál adott idő alatt. A sötétáram következtében összegyűlt töltések mennyiségét tehát csak az integrációs idő határozza meg. A sötétáram hatásának korrigálásához készíteni kell egy olyan felvételt, amelyik nem kap megvilágítást, és így csak a sötétáramból származó jelet tartalmazza, de integrációs ideje ugyanannyi, mint a tényleges felvételé. Ezt a sötétképet egyszerűen le kell vonni a korrigálandó képből, így eltüntethető a sötétáram hatása.

Professzionális kamerák esetében, ahol megfelelő mértékű hűtés hatására a sötétáram mértéke elhanyagolható (pixelenként néhány elektron/óra), a sötétkép készítésének és levonásának nincs jelentősége.

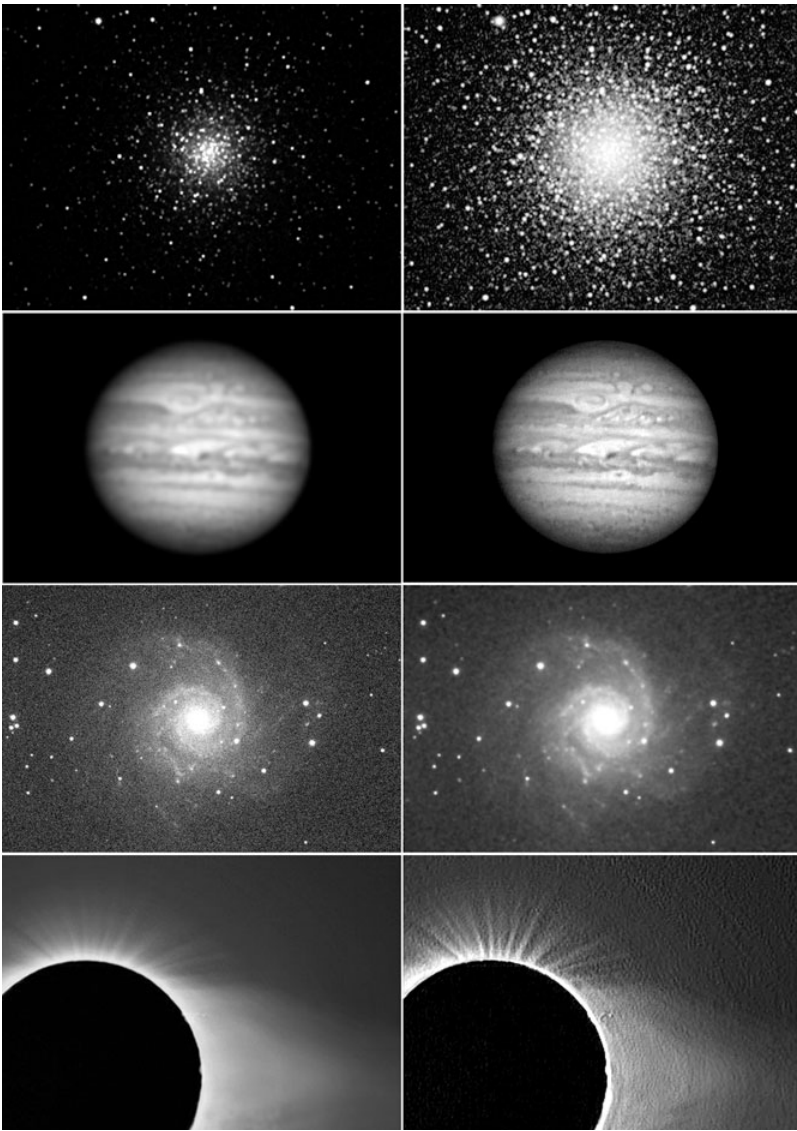
Ezeknél a kameráknál viszont alapkép korrekcióra van szükség. Ha ugyanis kiolvassuk egy képet egy CCD-ből, és közvetlenül ezután, gyakorlatilag nulla integrációs időt alkalmazva, azonnal kiolvassuk a következő képet, annak képpontjai nem nulla intenzitásúak lesznek. Időben nagyjából állandó - néhány tucat elektronnak megfelelő - jelszint mutatkozik minden képelemben, ez az alapjelszint. Az ilyen kamerák esetében tehát nem az objektumról készített integrációs idővel egyező expozíciójú sötétképet, hanem a szintén fénytől elzárt detektorfelület mellett készült null-expozíciós képet kell elkészíteni és ezt kell levonni a korrigálandó képekből.

Az eddig leírt korrekciókkal csak a CCD-chip és az optikai rendszer hibáiból származó képromlást lehet javítani, az egyes képelemek intenzitásértékét azonban a már említett kiolvasási zaj is torzítja. A kiolvasási zaj véletlenszerű, több felvétel átlagolásával csökkenthető. Ezért nem egy korrekciós képet készítenek, hanem többet, s ezeket átlagolják. Az átlagolás csökkenti a zaj torzító hatását, és pontosabban meghatározott lesz az egyes képpontok intenzitása. Az átlagolás nemcsak a korrekciós képekre alkalmazható: a csillagászati objektumokról is érdemes több felvételt készíteni, s ezek átlagát képezni. Ezáltal nemcsak a zaj csökken, hanem az egyszeri, véletlenszerű zavaró hatások is kiszűrhetők. Ilyen esetleges hatások közül a legfontosab a kozmikus sugárzás, de gyakoriak a kiolvasás során fellépő elektronikai zavarok, vagy a látómezőn átvonuló műhold. A kozmikus sugárzás nagy energiájú részecskéi a világűrben érkezve szinte akadálytalanul jutnak el a detektorig, és akár több ezer elektront is kelthetnek azokban a képelemben, amelyeken átszáguldanak. Hatásuk teljesen véletlenszerűen megjelenő, sokszor igen nagy intenzitású, általában néhány pixelre kiterjedő, de néha akár egész hosszú csíkok formájában jelenik meg a képen. Több felvétel készítésével ezek a hibák szintén kiszűrhetők (4.16. ábra).



4.16 Az NGC 891 galaxisról készült egyetlen felvétel (balra) és tíz hasonló kép átlaga (jobbra)

Ezek az eljárások számítógép segítségével nagyon egyszerűen megvalósíthatók, sőt részben vagy akár teljesen automatizálhatók is. Erre ma már a lehetőségek széles tárházát kínáló programcsomagok állnak rendelkezésre. A képek megjelenítésében különféle skálázások alkalmazhatók, ezek segítségével bizonyos intenzitástartományok tetszőlegesen kiemelhetők vagy elnyomhatók, kiélesíthető egy kép vagy elmosható a magas zajszint miatti szemcséség. Általános például a nemlineáris intenzitásskála használata (4.17. ábra felső képpár), hiszen az emberi szem sem lineáris detektor. Az égitestek fényességének megadására szolgáló magnitúdóskála is azért logaritmikus, mert az emberi szem így érzékeli a fényességkülönbségeket.



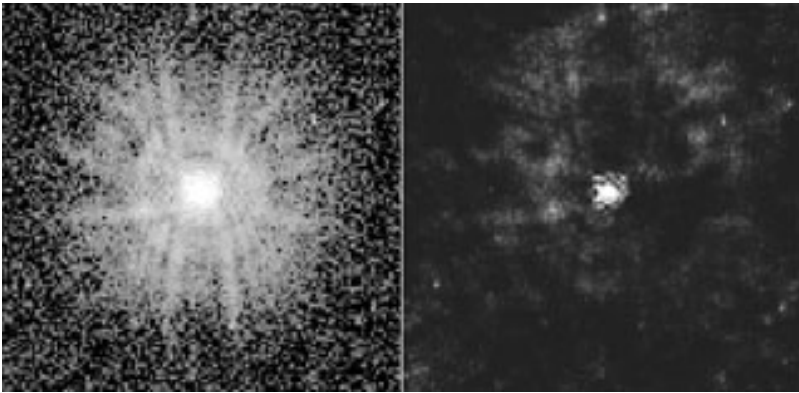
4.17 Különböző skálázások és szűrések hatása a csillagászati felvételekre (részletes magyarázat a szövegben)

Egy bolygóról készült felvétel részleteinek kiemelésében sokat segíthetnek a konvolúciós szűrések és maszkolási eljárások. A technikai részletek ismertetése nélkül mutatjuk itt most be ezek hatását a 4.17. ábra második sorában. A harmadik sorban egy halvány galaxisról készült képen a zaj csökkentése érdekében kismértékű elmosást alkalmaztunk. A legalsó képpár azt szemlélteti, hogy akár mesterséges árnyékolást is létrehozhatunk, aminek segítségével a finom részletek sokkal szembetűnőbbé válhatnak. A skálázások, szűrések azonban megváltoztatják, torzítják a kép eredeti intenzitásviszonyait, s ezáltal információtartalmát, így kizárólag a megjelenítésben, a könnyebb vizuális értékelésben alkalmazandók.

Rengeteg olyan módszer van, ami az információ kinyerését, számszerűsítését teszi lehetővé. Két fontos eszköz a fényességmérés és pozíciómeghatározás (fotometria és asztrometria). Egy csillag képéhez tartozó képelemek intenzitásértékeit egyszerűen összeadva annak fényességével arányos értéket kapunk, s a legfényesebb képpont kijelöli a csillag pozícióját. Pontosabb értéket kaphatunk a fényességre és pozícióra, ha a csillag intenzitáseloszlását kétdimenziós függvényként, térbeli felületként kezeljük. A képpontok fényességértékeire illesztett felület jól közelíthető egy megforgatott haranggörbével, vagyis matematikailag meghatározhatók a paraméterei: a felület csúcspontja adja meg a csillag koordinátáját, a függvény által lefedett térfogat nagysága pedig arányos a csillag fényességével.

A légkör állapota, vagy a távcső leképezési hibája nagyban befolyásolja a kép minőségét. Az utóbbira jó példa a Hubble-űrtávcső esete, amelynek főtükkrét nem a megfelelő alakúra csiszolták, így igen rossz képet adott. Később ezt egy javítás során korrekciós optikai elemekkel jelentősen sikerült javítani, kezdetben azonban csak digitális képjavításra volt lehetőség. Az itt használt, igen bonyolult matematikai eljárást dekonvolúciónak nevezik. Ennek lényege a következő: ha pontosan ismerjük, és matematikailag le tudjuk írni egy optikai rendszer leképezési hibáit, akkor azt is ki tudjuk számolni, hogy milyen képet adna egy pontszerű fényforrásról. Ha egy kiterjedt objektum képét akarjuk kiszámolni, akkor ezt a forrást gondolatban

felosztjuk kis területekre, az előbbi számítást minden ilyen területre elvégezzük, majd az eredményeket - a területek fényességével arányosan súlyozva - összeadjuk. A számítás azonban fordítva is elvégezhető: ha ismerjük a kép intenzitáseloszlását, akkor abból meg tudjuk határozni, milyen lehetett a forrás fényességeloszlása, amiből az ismert optikai hibákkal terhelt rendszer a „torzított” képet létrehozta. Ez a dekonvolúciós eljárás nemcsak az optikai rendszer hibáinak javítására, hanem a légkör elmosó hatásának csökkentésére is alkalmazható. A módszer hatékonyságát jól szemlélteti egy csillag képét mutató részlet, amit a HST javítás előtti állapotában készítettek, majd dekonvolúcióval javítottak (4.18. ábra).



4.18 A HST optikai rendszerének javítása előtt egy csillagról készített kép (balra) és annak dekonvolúcióval javított változata (jobbra)

Sok eszköz áll tehát rendelkezésre ahhoz, hogy a képekből kinyerjük a szükséges információt, vagy kijavítsuk a kép készítése során fellépett hibákat. Ezek mind megoldhatók szoftver segítségével, tehát „csupán” a megfelelő programot, algoritmust kell kidolgozni, s ezután egy számítógép elvégzi a munkát. A digitális képfeldolgozás különösen előnyös olyan esetekben, amikor teljesen azonos műveleteket kell végrehajtani képek ezerein.

CCD-kamerákkal színes képek is készíthetők, de ehhez speciális technikára van szükség. A CCD-detektorok ugyanis a fény színét nem érzékelik. Egy színes kép létrehozásához az adott objektumról három felvételt kell készíteni különböző színszűrővel. A használt három alapszín a vörös, a zöld és a kék, ezekből ugyanis additív színkeveréssel minden szín kikeverhető. Így három szürkeárnyaltos képet kapunk, amelyeket a számítógépes képfeldolgozó programban a megfelelő alapszínnel megszínezve nagyon pontosan egymásra kell illeszteni, és össze kell másolni (15. színes kép a mellékletben).

Csillagászati képek esetében általában nem a valósághű színek visszaadása a cél, vagyis nem az emberi szem érzékelősejtjeinek érzékenységéhez igazított szűrőket használnak, hanem valamilyen speciális és gyakran igen szűk hullámhossztartományban áteresztő szűrőt alkalmaznak. A HST csodálatos képeit nézegetve ne felejtjük tehát el, hogy szabad szemmel valószínűleg nem is olyannak látnánk egy-egy objektumot, mint a felvételeken. Például elképzelhető, hogy a nátrium, a hidrogén és a kalcium eloszlását vizsgálták a kutatók egy gázfelhőben. Ezekhez rendre a sárga, a vörös és az infravörös tartományban áteresztő szűrőket használtak, s a színes felvételen ezek rendre kék, zöld és vörös színnel jelennek meg. A képen a kék tehát nem az igazi kék színt jelöli, hanem azt, hogy ahol kék a felhő, ott főleg a nátrium bocsát ki fényt. Ezt a tudományban elterjedten használt eljárást „hamisszínes” technikának nevezik.

CCD-k az (amatőr)csillagászatban

A fotográfiától elindulva láthattuk, miért szükséges és milyen követelményeket támaszt a csillagászati képrögzítés, s hogy e szempontoknak kevésbé megfelelő fotográfiát miként és miért váltotta fel a CCD-technika, a digitális képrögzítés. Megismerve e három betű jelentését, a CCD-kamerák tulajdonságait s a képfeldolgozásban rejlő lehetőségeket, egy pillanatra gondolkodjunk el, mit is ad ez a technika a csillagászoknak és amatőröknek. Talán egy egyszerű példa jól megvilágítja a technikai fejlődést, s megindíthatja fantáziánkat az imént feltett kérdésre adandó válaszok keresésére.

Néhány évtizeddel ezelőtt senki sem gondolta, hogy egy csillagászat iránt érdeklődő egy 20-40 cm körüli tükrőrtérőjű távcsővel a kertje végéből meg tudja határozni egy kvazár távolságát, vagy olyan 24 magnitúdós csillagokról készíthet felvételt, amelyeket halványságuk miatt a Palomar-hegyi 5 méteres óriástávcsővel nem lehet fotolemezen rögzíteni. Pedig amatőr csillagászok a CCD-technika lehetőségeit

kihasználva elérték ezeket a hihetetlen eredményeket. Igaz, hogy kitartó munka, sok türelem és elszántság kellett a sikerhez - a megdöbbentő határfényesség eléréséhez több száz képet átlagoltak, amik együttesen 42 órás expozíciót jelentenek; a kvazár fényét pedig egy egyszerű spektroszkóp segítségével vizsgálva a vöröseltolódás alapján határozták meg a távolságát. Olyan dolgokat valósíthattak meg amatőrök 2001-ben, amik 20-30 évvel korábban az óriástávcsöveket használó hivatásos csillagászok kiváltságai voltak.

Ha a mai amatőrök a képrögzítés terén elérhetik az akkori tudomány élvonalának szintjét, elképzelhető, hol tarthat ma a professzionális észleléstechnika... Mint láttuk, máris újabb detektorok jelentek meg a láthatáron, és néhány év múlva talán már csak egy bevezető fejezetben emlékeznek meg a ma szinte kizárólagosan alkalmazott, de akkora elavulttá váló CCD-detektorokról.

Irodalom

- [1.] Buil, C.: CCD Astronomy, 1991, Willmann-Bell Inc.
- [2.] CCD Astronomy, 1994-1996 évfolyamok, Sky Publishing Corporation,
<http://www.skypub.com/imaging/ccd/ccdback.html>
- [3.] CCD Detektor Laboratórium: http://www.mssl.ucl.ac.uk/www_detector/ccdgroup/ccd.html
- [4.] CCD University (Apogee): <http://www.apogee-ccd.com/ccdu.html>
- [5.] CCD World: <http://www.not.iac.es/CCD-world/>
- [6.] Imaging Technology Lab: <http://www.itl.arizona.edu/>
- [7.] Kun Mária: Búcsú a csillagászati fényképezéstől, Természet Világa, 2000. 2.
- [8.] Magyar Csillagászati Egyesület, CCD szakcsoport honlapja: <http://ccd.mcse.hu>
- [9.] Martinez, P.: Astrophotography II., 1987, Willmann-Bell Inc.
- [11.] Meteor, CCD rovat cikkei.
- [12.] Wallis, B. D.-Prowin, W. P.: A manual of advanced celestial photography, 1988, Cambridge University Press.