

A megvalósult CCD

Napjaink csillagászai az 1930-as években elérhetőknél százszor vagy akár ezerszer halványabb objektumokat is képesek vizsgálni, pedig a jelenleg használt távcsövek nem nagyobbak a két generációval korábbiaknál! A magyarázat egyszerű: az utóbbi néhány évtizedben a fénydetektorok érzékenységében azelőtt példátlan növekedés következett be. Ez a változás legalább olyan jelentőségű, mint a 17. században a távcső felfedezése, vagy a 19. században a fotografikus technika kifejlesztése.

A csillagászati fénydetektorok közül egy különösen kiemelkedik, mivel csaknem tökéletes! Ez a CCD (Charge Coupled Device, azaz Töltéscsatolt Érzékelő). Története az 1960-as évek végén kezdődik, amikor a Bell Telefon Laboratóriumok két munkatársa Willard S. Boyle és George E. Smith új típusú számítógép-memória kifejlesztésén dolgozott. Elsősorban a mágneses buborékok elektronikus analógiáját akarták megvalósítani. Miután Boyle és Smith kifejlesztette a CCD-t mint memóriaelemet (1970-ben mutatták be először), hamarosan nyilvánvalóvá vált, hogy ennek a vékony félvezető morzsának még nagyon sok alkalmazási lehetősége van, pl. a jel- és képfeldolgozás területén. A későbbiek során a CCD mint ígéretes memóriaelem, elvesztette jelentőségét.

A csillagászok az elsők között ismerték fel a CCD-k különleges képfeldolgozási lehetőségeit. 1972-ben a JPL (Jet Propulsion Laboratory, Sugárhajtási Laboratórium) kutatói felállítottak egy programot CCD kifejlesztésére a világűrbeli csillagászat számára. Három évvel később ez a csoport az Arizonai Egyetem tudósaival együttműködve elkészítette az első csillagászati CCD-felvételet, mely az Uránuszt ábrázolja déli pólusa irányából 890 nm hullámhosszon. A felvétel az egyetem 155 cm-es távcsövével készült.

A tudományos-műszaki alkalmazások számára a CCD lett az első számú képkalkoló eszköz. Ma már elterjedőben van pl. a kis súlyú videokamerákban és az autofókuszos kamerákban is. A CCD-kamerát ott találjuk a világ nagy távcsöveinek érzékelő-arszenáljában. Egy ilyen készülék felhasználható akár direkt képfelvevőként, akár más berendezés részeként is. CCD-k szerepeltek több Halley-szonda (VEGA-1, -2, Giotto, Svisei képkalkotójaként, és sok jövőbeli program (Hubble Ūrteleszkóp, Galileo szonda és az Advanced X-ray Astrophysical Facility, azaz Kiterjesztett Érzékenységű Röntgen Asztrofizikai Berendezés nevű csillagászati műhold) is rendelkezni fog kamerarendszere szívében CCD-vel.

Hogy megértsük, miért rendkívüli a CCD, lássuk, mit kell tudnia egy jó csillagászati érzékelőnek. A legfontosabb kívánalmak:

NAGY FELBONTÁS

Mínél finomabb részleteket kell meglátnunk a vizsgált objektumon. Egy CCD felbontását elsősorban képelemeinek (pixeleinek) száma határozza meg. Adott területen több pixel jobb felbontást jelent, amint ez a hagyományos fényképek példáján is érthető. Az első nagy képformáló CCD-k a Fairchild Félvezető Művekből kerültek ki. Ezek 10000 pixelt tartalmaztak, 100 sorba és 100 oszlopba elrendezve. Röviddel később az RCA már olyan változatot

készített, amely elérte a standard televíziós felbontást (512 sor x 320 oszlop, azaz 163840 pixel). Ilyen CCD detektorokat ma már általánosan használnak a világ nagy obszervatóriumaiban. Napjaink legnagyobb CCD-jét a Tektronix cég készítette, és több mint 4 millió (2048x2048) pixelből áll. Ez utóbbi aktív képterülete csaknem 64 mm², s ezzel jelenleg a világ legnagyobb integrált áramköre! Ezeket a számokat hallva érdemes egy kis összehasonlítást tenni a fotografikus emulziókkal. Még a legdurvább szemcsézetű 35 mm-es film is egy kb. 25 millió pixeles CCD-vel megegyező felbontást ad. A finomabb szemcsézetű csillagászati lemezek ennél sokkal jobb felbontásúak is lehetnek! Azonban más jellemzők azok, melyek a CCD-t a fényképezés fölé emelik.

NAGY KVANTUMHATÁSFOK

Egy tipikus CCD minden más, csillagászok által használt detektor kvantumhatásfokát felülmúlja. A szem, a legelső csillagászati "detektor" kb. 1%-os kvantumhatásfokú. Ez más szóval azt jelenti, hogy a pupillán belépő minden 100 fotonból várhatóan csak egyet érzékel! Az eddigi legérzékenyebb csillagászati fotoemulziók a beeső fénynek kb. 2-3%-át rögzítették. Ezzel szemben a CCD-t elérő minden 100 fotonból - típusától függően - 50-70, vagy még több regisztrálható! Ehhez még vegyük hozzá, hogy a szem vagy a fotoemulzió által egyáltalán érzékelhető spektrumtartomány jóval szűkebb, mint a CCD-é. Mindezek a megállapítások vonatkoznak a fotokatódokra és a vidicon-rendszerű televíziós detektorokra is.

SZÉLES SPEKTRÁLIS ÉRZÉKENYSÉG

A CCD-k következő generációja a lágy röntgen sugaraktól (0,1 nm) az 1000 nm-nél is nagyobb hullámhosszú infravörös tartományig lesz használható. Ez a hatalmas hullámhossztartomány messze nagyobb minden más, eddig ismert detektorénál. Ám egy magas kvantumhatásfokú, széles spektrumtartományt átfogó detektor is használhatatlan lenne, ha az eszköz által keltett zajok "elárasztanák" a halvány csillagászati forrásokból érkező jeleket.

ALACSONY ZAJ

Minden hamis, zavaró jelnek sokkal gyengébbnek kell lenni a mérni próbált hasznos jelnél. A CCD egyes pixeleiben létrejött elektronokat egy egyszerű tranzisztor számolja össze, melyet a chip kimenő körébe építettek be. A számlálás pontosságát a tranzisztor által okozott zaj határozza meg. Napjaink CCD-érzékelői meglepően alacsony zajúak, és képesek megbízhatóan detektálni akár 10 elektronból álló törtéscsomagot is (ezek 15-20 foton becsapódása során keletkeznek!). Ez a számlálási hiba összehasonlítható egy kb. 1,5 m-es távcsővel megfigyelt 24 magnitúdós csillag másodpercenkénti fotonszámával. A csillagászat lehetőség szerint még ennél is nagyobb érzékenységet követel meg. A legnagyobb erőfeszítések jelenleg arra irányulnak, hogy a CCD-t képessé tegyék kevesebb mint 4 elektronból álló töltéscsomagok számlálására.

NAGY DINAMIKUS TARTOMÁNY

A nagy dinamikus tartomány azt jelenti, hogy az egyidejűleg detektálható legfényesebb és leghalványabb objektum fényességkülönbsége minél nagyobb legyen. A CCD egyik legjelentősebb előnye más érzékelőkkel szemben, hogy nagyon nagy a dinamikai tartománya. A CCD-nél ez a fontos jellemző jól definiálható: egyenlő a legnagyobb és a legkisebb még mérhető töltéscsomag hányadosával. Minél nagyobb a pixel mérete, annál több elektront tud túlszűrni anélkül, megtartani. Például a Texas Instruments 800x800-as CCD-jében egy $15 \mu\text{m}^2$ -es pixel 75000 elektront képes eltárolni. Kétszer szélesebb képelem kapacitása már közel kétmillió elektron. Ezekből az adatokból már következik, hogy a jelenlegi CCD-k dinamikus tartománya 1000000-ig terjedhet (egymillió elektron egy teli pixelben - osztva tíz zajelektronnal). A nagy dinamikai tartomány különösen fontos a csillagászati érzékelőknel, mert sok esetben nagy fényességkülönbségek találhatók egymás mellett a vizsgált objektumoknál (pl. galaxisok halvány peremrészei és igen fényes magjuk). Ezzel szemben pl. a fotolemezek csak maximum 100-szoros dinamikus tartományban képesek az objektumokat jól reprodukálni.

Még a legérzékenyebb detektor is használhatatlan a csillagászok számára, ha nem tudja megbízhatóan meghatározni az észlelt égitest fényességét valamilyen abszolút egységben, pl. csillagászati fényrendben, magnitúdóban. Ezt fejezi ki az a követelmény, hogy a detektor legyen hosszú időtartamon belül stabil, azaz mindig ugyanazt a kimenő jelet adja egy adott bemenő jelre!

FOTOMETRIAI PONTOSSÁG (stabilitás)

Mint ahogy a CCD szilárdtest érzékelő, lényegéből fakadóan stabil. Ha egyszer egy ilyen chipet kellően kalibráltak standard csillagokkal, akkor egy éjszaka során végzett fotometriai mérések kb. 0,5%-os pontosság körül tarthatók (ez egyenlő kb. 0,005 magnitúdós bizonytalansággal).

LINEARITÁS (kétszer fényesebb objektum képjele is kétszer erősebb)

A CCD-k figyelemreméltó linearitást mutatnak. Más szóval, az egy pixelben összegyűlt elektronok száma pontosan arányos a beeső fotonok számával. Ez éles ellentétben áll a fotografikus lemezekkel, filmekkel és a vidicon-típusú televíziós detektorokkal. Az előbbiekből adataiból igen nehéz kihámozni a fényforrás paramétereit, és a legjobb esetben is csak kb. 5%-os fotometriai pontosságot érhetnek el (ezt is csak eleve szűkebb dinamikus tartományuknak egy kisebb részén). A vidiconok szintén messze nem lineárisak. A bemenet és kimenet közötti kapcsolat bonyolult matematikai kifejezéssel közelíthető, amely a detektor minden pontjára különböző. Emiatt a fotometriai információ megszerzése igen nehéz, időigényes. Még ha a szükséges eljárást is követjük, az elérhető fotometriai pontosság legfeljebb kb. 2%.

Ezzel szemben a CCD-k dinamikai tartományuk legnagyobb részén 0,1%-ig lineárisak, minden más berendezés között messze a legjobb. Ez teszi lehetővé - és viszonylag egyszerűvé -, hogy korrigálják az érzékenység pixelről pixelre történő változását.

A fotolemezek, vidiconok és más hasonló detektorok egyéb komoly hibákkal is rendelkeznek, amelyek korlátozzák csillagászati felhasználhatóságukat: az emulziók egyenlőtlen hőtágulása, nedvesség okozta deformációi, vagy a vidiconok mágneses tér okozta torzításai és a leképező elektronnyaláb pozíció-bizonytalansága mind-mind lerontja a leképezés minőségét. Így esik meg, hogy a képen a pontok relatív pozíciói nem pontosan ott vannak, ahol a valóságban. Ezek a problémák nem lépnek fel a CCD-nél. Minden pixel helye szilárdan rögzül a chip elkészítésekor!

A legutóbbi évtizedben egyre több csillagász fordította figyelmét az elektromágneses spektrum azon része felé, amely szemünk számára nem látható. Egyre szaporodnak a megfigyelések elsősorban az ultraibolya (120-350 nm), az extrém ultraibolya (12-120 nm) és a lágy röntgen (0,12-12 nm) hullámhossz-tartományokban. Az elektromágneses szinképek ezen a részén található fotonok energiája sokkal nagyobb, mint a látható tartományba esőké. Mikor ezek a nagyenergiájú fotonok elnyelődnek a CCD szilíciumrácsán, több elektront hoznak létre (ezek száma az elnyelt sugárzás hullámhosszától függ). Például egy 0,21 nm-es röntgen-foton átlagosan 1620 db. elektront hoz létre. 10 nm-nél kisebb hullámhosszaknál ezért lehetséges egyetlen foton érzékelése is, továbbá az energia (avagy a hullámhossz) a generált töltésmennyiség közvetlen mérésével meghatározható, ami érdekes lehetőséget csillant fel: egy egyszerű képen (mely a gyakorlatban sok, nagyon rövid expozíció összerakásával készül el) a CCD egy röntgen csillagász számára egyidejűleg adhat információt térbeli és spektrális intenzitáseloszlásról. Nincs még egy detektor, amely ezt meg tudná valósítani!

Még ha a CCD-k a jelenlegi legtokéletesebb detektorok is, mégsem felelnek meg minden csillagász igényeinek. Először is azért, mert nagyon drágák. Egy 2048x2048 pixeles chip jelenleg 80000 dollárba kerül... A standard televíziós felbontást adó CCD-k is 2000-10000 dollár körül mozognak, minőségüktől függően. Egyes japán gyártók kb. 200 dolláros áron is kínálnak CCD-eket. De még ezek az olcsónak mondható chipek is messze drágábbak, mint a fotografikus filmek, lemezek.

A legkényelmetlenebb körülmény az, hogy a CCD-k üzemeltetéséhez kiterjedt kiszolgáló elektronikára van szükség. A kiegészítő berendezések között egy nagyteljesítményű számítógép a legfontosabb, amely a parányi szilíciumlapka által szolgáltatott roppant nagy adatmennyiséget tárolni és analizálni tudja. Egy 2048x2048-as CCD-vel készült kép 10 Mbyte információt jelent. Egy kisebb észlelési sorozatnál begyűjtendő adatmennyiség eléri, sőt, meghaladja a billió byte-ot. Ezt az adattömeget tárolni, kalibrálni és analizálni kell. Ez teszi az egészet nagyon drága vállalkozássá. Egy CCD-berendezés végtére is olyan, mint egy versenyautó: egy teljes munkaidőben foglalkoztatott üzemeltető csoportot kíván meg, ha csúcsformában kívánjuk működtetni! Mindazonáltal egyre növekvő számban alkalmazzák ezeket az új típusú érzékelőket, és ez a tendencia bizonyára folytatódik, amint a CCD-k és a számítógépek olcsóbbá és emellett nagyobb teljesítményűvé válnak. Úgy tűnik, a CCD valóban egy "megvalósult álom", a "tokéletes" detektor! A további folyamatos tökéletesítést is tekintve nehéz igazán képet alkotni, milyen fantasztikus hatással lesz ez az új eszköz a következő évtized csillagászatára...

J. JANESICK (Caltech) és M. BLOUKE (Tektronix)

(Sky and Telescope, 1987. szeptember, ford. Hegedűs Tibor)

ÜSTÖKÖSÖK

● P/Kohoutek (1986k)

Vizuális fénybecslések: okt. 29,12 UT 12^m,9 (J. D. Shanklin, Cambridge, Anglia, 33 T); nov. 17,42 13,6 (A. Hale, Las Cruces, USA, 41 T).

● Wilson (1986l)

Vizuális fényességbecslések: nov. 22,46 UT 10^m,8 (R. Keen, Mt. Thorodin, USA, 32 T); 25,44 11,3 (A. Hale, Las Cruces, USA, 41 T); 27,23 10,4 (J. D. Shanklin, Cambridge, Anglia, 33T).

● Sorrels (1986n)

J. Kobayashi (Kumamoto, Japán) 31 cm-es reflektorral végzett vizuális fénybecslése: szept. 18,47 UT 13^m,3.

● P/Longmore (1987c₁)

Az üstökös J. Gibson és J. Scotti fedezte fel újra nov. 19-én, a Palomar 1,5 m-es távcsövével ill. a Kitt Peak SPACEWATCH kamerájával. Ezzel megerősítést nyertek J. Scotti 1986 decemberében tett megfigyelései. Fényessége 19^m, amatőr szempontból érdektelen objektum.

● Ichimura (1987d₁)

November 22,512 UT-kor fedezte fel Yoshimi Ichimura japán amatőr, 12 cm-es binokulárral, 9^m-s fényességnél, a RA=3^h57^m,7, D=-19°12' (1950) pozíciójánál. Gyorsan mozgott dél felé, dec. közepére -60°-s deklinációt ért el. perihélium-átmenetére január 10,100 ET-kor kerül sor, 2^m-s fényesség körül, de

alig több mint 10⁰-ra a Naptól. Később sem kerül megfigyelésre kedvező helyzetbe.

● P/Tempel 1 (1987e₁)

J. V. Scotti fedezte fel újra az üstökösöt okt. 27-i és nov. 24-i felvételeken, melyek a Kitt Peak 91 cm-es SPACEWATCH kamerájával készültek. Az utóbbi időpontban 20^m-s volt az objektum.

● Furuyama (1987f₁)

November 22,67361 UT-kor készült felvételen fedezte fel a japán Sigeru Furuyama, 12^m-s fotografikus fényességnél. Érdekes, hogy E. és C. Shoemaker nov. 22,41111 UT-kor a Palomar 46 cm-es Schmidt-kamerájával készült felvételein 8^m-s volt. D. Levy nov. 25-i, 40 cm-es reflektorral készült vizuális megfigyelése szerint az objektum összfényessége 10^m,2, kómaátmérője 3', csóvahossza 10', irányítottsága PA 110°. A három közül ez a reális érték, mert az előrejelzések is ezzel a fényességgel számolnak. Az üstökös deklinációja december folyamán +20 és -7 fok között változott. Fényessége valamivel 10^m felett alakult.

● Jensen-Shoemaker (1987g₁)

Eugen és Carolyn Shoemaker nov. 24-én 26-án és 27-én a Palomar 46 cm-es Schmidt-teleszkópjával készült felvételeken fedezték fel ezt a 17^m-s üstökösöt. Képe diffúz és kondenzáció nélküli volt, északnyugatra gyenge csóvával. Az objektumot Poul Jensen (Koppenhágai Observatórium) Karl Augustensen egy okt. 25-i, 45 cm-es Schmidt-teleszkóppal készült felvételén azonosította.

(Az IAU Circular számai alapján: Mizser A.)