

=====

11. kapitola o CCD

Charge Coupled Device

= zařízení vázající náboj <- vlastně soustava kondenzátorů (fotodiod, PN přechodů) s potenciálovými jámami, ve kterých jsou "uvězněné" elektrony uvolněné z polovodiče (PN přechodu) FOTOELEKTRICKÝM JEVEM

fotoelektrický jev (Einstein 1905):

- pro záření s energií kvant (frekvencí) menší než určitá kritická se z kovu neuvolní ŽÁDNĚ elektrony BEZ OHLEDU NA MNOŽSTVÍ, ale po překročení je náboj přímo úměrný intenzitě záření (mikroskopicky to odpovídá kvantování energie záření a překročení ionizační energie atomů kovu).

v 80. letech 20. století zařízení způsobilo revoluci v astronomii, protože je o řád citlivější než fotografie a dnes má i vyšší rozlišení

organizovaný posun nábojů ven z matice způsobovaný změnami potenciálů na PN přechodech
-> časově proměnný elektrický proud na výstupu
-> zesilovač
-> A/D převodník
-> číselná matice A (s hodnotami ADU) odpovídající energii záření absorbované na jednotlivých pixelech

OBR struktury CCD čipu a posunu nábojů

OBR D/A převodník a komparátor => A/D převodník

ADU (Analog Digital unit) - bezrozměrná INSTRUMENTÁLNÍ jednotka odpovídající energii

signál nabývá hodnot od 0 do 2^N , kde N je počet bitů A/D převodníku (8, 12, 16) (65536 u astronomických CCD kamer, 255 nebo 4096 u digitálních fotoaparátů)

pozn. o nastavení citlivosti ISO u digitálních fotoaparátů = zesílení na zesilovači

pozn. o barevných snímcích: předřazení filtrového karuselu UBVR1 před celý čip (u digitálních fotoaparátů jsou fixní matice s filtry RGGB před každým pixelem; u některých kamer dichorický hranol rozděluje záření na trojici čipů).

ukázky zařízení s CCD prvky:

CCD kamera SBIG PixCel 255,
digitální fotoaparát Canon PowerShot A85,
počítačová myš,
atd.

OFFSET, DARK a FLAT <- základní redukce snímku

nulový proud (offset, 0):

- přidáný elektronicky kvůli zápornému šumu a A/D převodu
- co nejkratší expozice se zakrytým objektivem

temný snímek (dark frame, D):

- tepelný šum, elektrony emitované polovodičem bez vnějšího záření
- stejně dlouhá expoziční doba jako u snímku objektu, ale se zakrytým čipem
- výrazná závislost na teplotě -> chlazení čipu Peltierovým článkem, kapalným dusíkem

rovnoměrné pole (flat field, F):

- koriguje nerovnoměrnou citlivost čipu, prachová zrníčka, vinětaci dalekohledu
- snímek rovnoměrně osvětlené plochy nebo oblohy při svítání, kdy už nejsou vidět hvězdy (signál asi v polovině rozsahu ADU)

máme tedy matice A (tj. snímek) O D F -> A' (jako výsledný snímek)

operace s nimi: $A' = (A - D - O) / (F - D - O)$ (pixel po pixelu)

praktická ukázka pořízení korekčních snímků v učebně
a redukce snímku oblohy

ŠUM - Jaké jsou jeho zdroje?

- poissonovský šum (fotonový, od hvězdy, od oblohy)
- temný proud (tepelný), také poissonovský
- vyčítací šum (také tepelný), který vnáší zesilovač před A/D převodníkem; není poissonovský, ale "jednorázový" (=> druhá mocnina vvv)
- kvantizace hodnot při A/D převodu

POISSONOVSKÁ STATISTIKA dobře popisuje emisi fotonů, protože:

- jde o NÁHODNÝ proces
- STŘEDNÍ doba mezi emisemi je konstantní
- tato doba NEZÁVISÍ na předchozí emisi

Její důležitou vlastností je, že si mohu VYPOČÍTAT ŠUM (noise N) ZE SIGNÁLU (signal S) jako:

$$N \sim \sqrt{S}$$

Jednotlivé šumy se přitom sčítají jako:

$$N = \sqrt{N_{\text{star}}^2 + N_{\text{sky}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{readout}}^2}$$

takže výsledný poměr signál/šum je:

$$S/N = S_{\text{star}} / \sqrt{S_{\text{star}} + S_{\text{sky}} + S_{\text{dark}} + N_{\text{readout}}^2}$$

protože S \propto expoziční době t

=> poměr S/N roste NANEJVÝŠ jako ODMOCNINA z expoziční doby!

OBR S/N(expoziční doba t) $\sim \sqrt{t}$ při skládání snímků

PŘED pozorováním si volím, jaký chci S/N a podle toho pozorování plánuji!

přibližně: pro S = 100 je N = 10 % * S, pro S = 10000 => N = 1 % * S

součet 2x2, 3x3 nebo více pixelů (binning) => zvýšení S/N za cenu ztráty rozlišení

při operacích se snímky (odečítání, dělení) se šумы také sčítají v kvadrátech (proto je vhodné používat PRŮMĚRNÝ offset, dark a flat z několika RŮZNÝCH snímků)

ASTROMETRIE

- poloha zdroje záření na CCD čipu se sub-pixelovou přesností
 <- výpočet 2-D těžiště (CENTROIDu) v dané APERTUŘE:

$$T(x,y) = (\text{Suma_aperturu } x \cdot \text{ADU} / \text{Suma ADU}, \text{Suma } y \cdot \text{ADU} / \text{Suma ADU})$$

^^^ UKÁZKA v programu ccdview

- porovnání polohy s okolními hvězdami, jejichž polohy (RA, DE) na obloze znám <- výpočet metodou nejmenších čtverců (LSM)
- katalog USNO 2.0
- astrometrie PSF v přeplněných polích (např. kulových hvězdokupách)

Point Spread Function -> odezva atmosféry/dalekohledu/kamery na bodový zdroj záření v nekonečnu -> typický 2-D gaussovský profil o nějaké typické pološířce (třeba 1 arcsec na obloze => určitý počet pixelů na čipu, třeba 4x4).

Jaké je ZORNĚ POLE kamery při dané velikosti zobrazovacího prvku D?

$$\text{tg } \alpha/2 = D/2 / f$$

V tomto zorném poli musím mít dostatečný počet vhodně jasných srovnávacích hvězd! (Přejíždět sem-tam nemohu, to by degradovalo přesnost.)

Jaká velikost jednotlivého pixelu D' je vhodná pro astrometrii?

$$D' = 2 * f * \text{tg } \alpha'/2 \quad (\text{tj. tentýž vztah})$$

-> musím vzorkovat PSF větším počtem pixelů než 1 ("mřížka")

-> seeing je u nás typicky 2"

-> průměr hvězdy vychází několik "

-> alpha' má být méně než 2"

-> při ohnisku f = 2 m je

$$D' = 2 * 2 \text{ m} * \text{tg } 2''/2$$

$$\dot{=} 4 * 1/60 * 1/(60*60) \text{ m}$$

$$\dot{=} 20 \text{ mikronů}$$

=> při daném f mi z toho plyne ZÁROVEŇ celková velikost CCD čipu i velikost jednotlivých pixelů!

Typická přesnost astrometrických měření shromažďovaných MPC je 0.2".

FOTOMETRIE aneb "od hvězdy k ADU"

- porovnání zdroje záření s hvězdou o známé (konstantní) jasnosti
 <- součet signálů v dané APERTUŘE, odečtení oblohy, Pogsonova rce:

$$m_* - m_{\text{známá}} = -2.5 \log \left(\frac{\text{Suma_aperturu ADU}_* - \text{Suma ADU_oblohy}}{\text{Suma ADU_známé} - \text{Suma ADU_oblohy}} \right)$$

^^^ UKÁZKA v programu ccdview

Příklad typických číselných hodnot pro "známou" *:

- hvězda má zářivý výkon $1e26 \text{ W} = 1e26 \text{ J/s}$,
- emituje IZOTROPNĚ fotony, mimo jiné s $\lambda = 500 \text{ nm}$,
- $f = c/\lambda = 3e8 / 5e-7 \text{ Hz} = 1.5e16 \text{ Hz}$,
- $E = h f = 6e-34 * 1.5e16 \text{ J} = 1e-17 \text{ J}$,
- => řádově $1e43$ kvant za sekundu

Pozn.: kterých kvant je nejvíce (IR nebo V)?

Viz Planckovu fci dělenou energií $h*f$ => více je IR!

- vzdálenost hvězdy (určená podle paralaxy) je $r = 500 \text{ pc}$
 $= 500 * 2 * 1e5 * 1.5 * 1e11 \text{ m} = 1.5 * 1e19 \text{ m}$

takže odpovídající plocha sféry je: $4 \pi r^2 = 2e39 \text{ m}^2$

před "nastražený" CCD čip musím zařadit nějakou optiku,
jinak by se mi tam "míchalo" záření od jiných hvězd

- tzn. alespoň nejjednodušší dírkovou komoru;
- lepší je ale použít dalekohled s větší sběrnou plochou:

průměr zrcadla 1.0 m , tj. plocha $\pi R^2 = 0.8 \text{ m}^2$

poměr ploch $0.8/2e39 \approx 4e-40$

odhad počtu fotonů zachycených dalekohledem $1e43 * 4e-40 = 4e3 \text{ f. za sekundu}$

záření se ale po zobrazení na čipu dělí na $\sim 3 \times 3$ pixely => $\sim 4e2$ fotonu/s připadá na 1 pixel
(to je docela MÁLO kvant, a proto je TAK patrný šum!)

expoziční doba 30 s => ~ 12000 fotonu

špičková kvantová účinnost čipu může být $\sim 80 \%$ => ~ 10000 elektronů
vytvořených v pixelu

účinnost A/D převodníku bývá i 1 ADU/e^- => signál 10000 ADU

lze očekávat fotonový šum $\sim \sqrt{10000} \approx 100 \text{ ADU}$

signál oblohy (při mírném světelném znečištění :) 2000 ADU => šum oblohy 45 ADU

temný proud indukovaný za 30 s je 100 ADU => šum 10 ADU

vyčítací šum kamery je $\sim 15 \text{ ADU}$

$N = \sqrt{N_{\text{star}}^2 + N_{\text{sky}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{readout}}^2} = 110 \text{ ADU}$

=> S/N ratio ~ 100

Celou * ale pozoruji v 3×3 pixelech => tzn. menší šum!
protože signály budou ~ 10 krát větší a

=> S/N $\sim \sqrt{S} \sim 300$ (což je vcelku dobré pozorování)

Jakou má ona hvězda absolutní a zdánlivou hvězdnou velikost?

Jaká jasnost odpovídá nulté magnitudě ve V? (pův. definováno pouze relativně!)

DEF: $m = -2.5 \log (j/j_0)$, kde $j_0 \doteq 2.54e-6 \text{ lm/m}^2$

DEF: $M_{\text{bolometrická}} = 0 \text{ mag} \Leftrightarrow \text{izotropní } L_0 = 3.055e28 \text{ W}$

M_{bol} naší hvězdy je tedy dle Pogsonovy rce:

$M_* - 0 \text{ mag} = -2.5 \log L_* / L_0 = -2.5 \log 1e26/3e28 \text{ mag} = 6.2 \text{ mag}$ (OK, u Slunce vychází 4.76 mag)

modul vzdálenosti:

$m - M = -2.5 * \log (L/r^2 / L/(10 \text{ pc})^2) = 5 * \log [r]_{\text{pc}} - 5 = +14.7 \text{ mag}$

a zdánlivá * velikost $m = 20.9 \text{ mag}$ <- to je na 1 m dalekohled akorát

Jak zjistím tuto ZDÁNLIVOU JASNOST Z ADU?!

<- musím porovnávat s okolními *, u nichž m znám z nějakého katalogu!

Jaky je ZÁŘIVÝ TOK od hvězdy?

$\Phi = L/(4 \pi r^2) = 1e26 \text{ W} / 2e39 \text{ m}^2 = 5e-14 \text{ W/m}^2$

pozn. o softwaru pro CCD fotometrii: CCDOPS, Munipack, IRAF

pozn. o automatizaci fotometrie pro série snímků (matching)

převod na STANDARDNÍ FOTOMETRICKÝ SYSTÉM, aby bylo možné snadno porovnat měření z různých observatoří:

OBR propustnosti standardních filtrů

hvězdné velikosti: instrumentální (u,b,v,r,i) vs. standardní (U,B,V,R,I)
relativní (dv,dV) vs. absolutní (v,V)

příklad převodních vztahů:

$U = v + A_u * (b - v) + B_u * (u - b) - X_u * M$

$B = v + A_b * (b - v) - X_b * M$

$V = v + A_v * (v - r) - X_v * M$

$R = v + A_r * (v - r) - X_r * M$

$I = v + A_i * (v - r) + B_i * (r - i) - X_i * M$

(b-v), (v-r) ... barevné indexy, A, B ... barevné koeficienty,

X ... extinkční koeficienty, $M = \tau \sec z$... vzdušná hmota

základní princip:

- změřím uvbri pro nějaké standardní pole hvězd, u kterých znám UBVRTI
- spočtu koeficienty A,B,X (z přeurčené soustavy rovnic metodou LSM)

- ve stejné výšce nad obzorem změřím ubvri pro neznámé pole
- z rovnic vypočítám UBVRI pro neznámé srovnávací hvězdy

APLIKACE

Měření jasností proměnných hvězd a jejich interpretace:

např. zákrytové dvojhvězdy, pulsující proměnné, soustavy s akrečním diskem, ...

světelné efemeridy: $JD \text{ Min } I = JD_0 + P * E$

O-C diagram: pozorovaný O minus vypočítaný C čas události
v závislosti na pozorovaném čase O

interpretace O-C $\ll 0$:

- chybně určená perioda, základní minimum -> oprava pomocí LSM,
správné váhování dle chyb pozorovacích dat (CCD, fotoelektrických, vizuálních)

- reálné změna periody: třetí těleso, přenos hmoty

3. KZ: $a^3/P^2 = M_1 + M_2 = M$

$dM = -2 a^3/P^3 dP$

$dP/P = -1/2 dM/M$

OBR obrazovky z programu Phoebe a model XX Leo od Petra Zasche

ANIMACE dvojhvězdy s akrečním diskem a polaru EX Hya

Měření jasností planetek a inverzní problém určení tvaru:

1. odhad eliptického tvaru z amplitudy světelné křivky:

$LV = -2.5 \log (\pi a b) / (\pi b^2) = -2.5 \log a/b$

různé geometrie Slunce-planetka-pozorovatel při různých opozicích
=> možno jednoznačně rekonstruovat polohu rotační osy v prostoru
a konvexní obálku tvaru

pozn. o řídké fotometrii z teleskopu PanSTARRS a družice GAIA

ANIMACE světelné křivky Erosu od Pepy Ďurecha
