

L'uso dei CCD in astronomia

testo e foto: Enrico Prosperi

È trascorso ormai quasi un decennio da quando iniziai ad usare camere CCD per le mie riprese astronomiche. Agli esordi, agli inizi degli anni Novanta erano pochi gli astrofili che conoscevano perfino l'esistenza di questi magnifici apparati elettronici di ripresa ed ancora meno erano quelli che avevano provato a cimentarsi con essi. Rispetto a molti di loro partivo però con un notevole vantaggio: mi ero infatti laureato da tempo in ingegneria elettronica e comprendevo bene le problematiche inerenti il funzionamento di questi nuovi sensori. Inoltre, fin dalla loro introduzione, avevo familiarità con i personal computer. Infine mi ero occupato a lungo, prima da studente e poi nella mia attività professionale, dell'elaborazione di immagini digitali.

Pertanto, gli ingredienti per iniziare ad utilizzare le prime camere CCD in commercio per astrofili c'erano tutti: rispolverai la mia vecchia passione per l'astronomia ed iniziai a riprendere immagini di oggetti celesti. Devo confessare che, nonostante il retroterra culturale, incontrai in principio notevoli difficoltà legate, soprattutto, alla piccola area sensibile del sensore (un Texas Instruments TC211) montato sulla mia prima telecamera: quanto era difficile centrare su quella minuscola superficie di silicio l'oggetto che si voleva riprendere! La qualità era poi limitata dalle scarse prestazioni elettroniche della camera e dalla limitata dinamica delle immagini (solo 8 bit). Perciò ben presto, a metà del 1994, decisi di acquisire una camera seria. I risultati, fin dalle prime uscite, furono subito entusiasmanti.

Da allora i progressi fatti, gli accorgimenti via via introdotti, hanno fatto diventare la ripresa elettronica di immagini di profondo cielo una pratica corrente i cui risultati vengono, di volta in volta, migliorati: a volte mi diverto a confrontare l'immagine di un oggetto appena ripreso con quella dello stesso oggetto ripreso tempo prima. Sempre, con orgoglio, nonostante l'inarrestabile e crescente inquinamento luminoso del mio sito di osservazione, posso constatare che l'ultima immagine è qualitativamente migliore della precedente.

Oggigiorno l'uso dei CCD in astronomia è divenuta una pratica comune tra gli astrofili. Alcuni usano camere astronomiche, ma sono parecchi quelli che utilizzano modelli non appositamente stu-

diati per l'impiego astronomico: le web-cam e le camere fotografiche digitali. Purtroppo non è la stessa cosa. Queste ultime presentano, infatti, problemi di progettazione tali da consentire la ripresa, con vari limiti, solo di oggetti celesti molto brillanti, la Luna e i pianeti in primo luogo e pochi altri oggetti di profondo cielo. Tale attività può tuttavia rappresentare una buona palestra di raccolta di esperienze per intraprendere, in seguito, un lavoro serio con camere appositamente concepite per l'impiego in astronomia.

Cercherò qui di descrivere brevemente l'uso delle camere CCD e la tecnica di ripresa e di elaborazione che sto attualmente impiegando, dal terrazzo della mia abitazione, con una strumentazione non eccessivamente costosa e comune tra molti astrofili: un telescopio Schmidt-Cassegrain di 25 cm con puntamento computerizzato e una camera astronomica CCD non eccessivamente dispendiosa.

I concetti fondamentali sui CCD

I sensori CCD presentano le migliori caratteristiche di sensibilità, fino a dieci volte quella delle più sensibili pellicole fotografiche. Tanto da guadagnarsi il nomignolo di contafotoni.

Le caratteristiche al riguardo sono definite, soprattutto da tre parametri: l'Efficienza Quantica (QE), la saturazione del pixel (FWC=Full Well Capacity) e il rumore di lettura (Readout Noise).

● L'efficienza quantica (QE): viene in genere determinata da un grafico in cui si rappresenta, in funzione della lunghezza d'onda, la frazione di fotoni che viene catturata e che contribuisce al segnale del sensore. Definisce quindi la sensibilità. I CCD più comuni sono del tipo front-illuminated e raggiungono un picco di efficienza di circa 0,5. Una variante

cosiddetta back-illuminated, di più difficile realizzazione tecnologica e pertanto più costosa, presenta caratteristiche assai migliori, con una QE quasi doppia.

● Saturazione del pixel (FWC): indica il massimo numero di elettroni che possono essere catturati da un elettrodo in corrispondenza di ciascun pixel. Entro l'80% - 90% di tale valore il funzionamento è pressoché perfettamente lineare. A parità di esposizione, quanto più è elevato, tanto più è difficile che una stella di campo saturi. Per evitare l'effetto di traboccamento (blooming) degli elettroni, che si ha oltre il limite di saturazione, le ditte costruttrici rendono disponibili versioni cosiddette antiblooming dei loro chip. Purtroppo, in questo caso, la sensibilità risulta minore e la risposta non è lineare, per questo motivo sono poco adatte per le applicazioni scientifiche.

● Rumore di lettura (RN): espresso in elettroni per pixel, indica la variazione casuale che si ha nella conversione in segnale elettrico degli elettroni catturati in corrispondenza di ciascun pixel. È una caratteristica del sensore e rappresenta il rumore minimo insopprimibile che sarà comunque presente nel segnale. Dato che la sua entità assoluta è costante, il suo peso diminuisce con l'aumentare del numero di elettroni che costituiscono il segnale e quindi con la durata della posa.

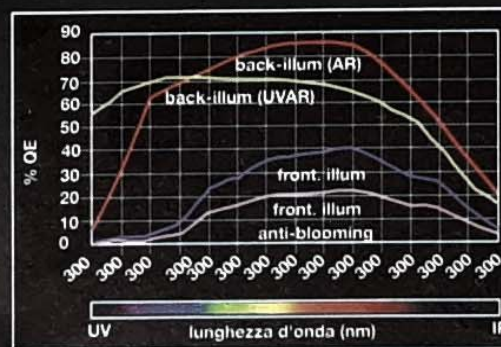
Il rapporto tra FWC e RN indica il massimo numero di livelli "N" che si possono riconoscere nel massimo segnale del sensore (quello di saturazione) e ci dà un'indicazione sul numero minimo "n" di bit che deve rappresentare il segnale relativo a ciascun pixel.

$$N = \frac{FWC}{RN} > N > 2^{n-1}$$

Questo ci fornisce una preziosa informazione sulle caratteristiche

● del convertitore analogico digitale (ADC) che deve essere presente nell'elettronica della camera CCD: il numero "n" di bit del ADC deve essere uguale o maggiore di "n", ma non troppo, poiché si sovraquantizzerebbe, in tal modo, soltanto il rumore con il conseguente inutile aggravio del costo della camera, e

● del software da utilizzare per l'elaborazione delle immagini che ne deve garantire il trattamento nella completezza



della dinamica. L'uso di programmi standard, quali Photoshop e PaintShop, che trattano immagini monocromatiche con una dinamica di 8 bit, deve essere evitato se la dinamica "n" delle immagini prodotte dalla nostra camera è, come in genere deve essere, maggiore. Altre caratteristiche sono altresì importanti. In primo luogo la corrente di buio (Dark Current) e poi le dimensioni geometriche del sensore e del pixel. La corrente di buio indica il numero medio di elettroni che vengono prodotti a causa dell'agitazione termica e che si aggiungono agli elettroni prodotti dalla cattura dei fotoni. Si misura, in genere, in numero di elettroni prodotti, in un secondo, in corrispondenza di ciascun pixel. Tale quantità dipende dalla temperatura e diminuisce con essa. Il numero di tali elettroni varia da pixel a pixel a causa delle microscopiche irregolarità nella geometria del chip e degli elettrodi in corrispondenza di ciascuno di essi. Queste irregolarità sono una caratteristica specifica di ciascun CCD e ne costituiscono una specie di impronta digitale. Le dimensioni lineari "L" del sensore stabiliscono, con uno strumento di lunghezza focale F conosciuta, le dimensioni angolari FOV del campo inquadrato, valida quando, con FOV espresso in rad,

se indichiamo con la stessa unità di misura L e F (p. es. in mm). Se desideriamo ottenere le dimensioni del campo in primi d'arco (') si può leggermente variare la formula precedente:

$$FOV = 3437,75 \frac{L}{F} [']$$

Le dimensioni P del pixel fissano la risoluzione angolare ϕ della ripresa

$$\phi = 206264,8 \frac{P}{F}$$

con ϕ in secondi d'arco (") e P ed F in mm

e, in base all'ottica che si utilizza, da un sito di osservazione non privilegiato in cui il seeing diffonde l'immagine puntiforme di una stella in un angolo di 3".6", dovrebbe corrispondere ad un angolo attorno ai 2". Il sovracampionamento ovvero, a parità di lunghezza focale del telescopio, una minore dimensione del pixel, migliora la qualità dell'immagine a discapito, però, della necessità di una maggiore durata dell'esposizione.

tura e da quello termico. Il primo (RN) presenta un'ampiezza costante e pertanto costituisce un grosso inconveniente soprattutto nei casi in cui il segnale è debole (per esemplare nel caso di bassi livelli di rumore e di pose di breve durata).

Il secondo (DN) presenta un tracciato caratteristico del sensore che può essere ridotto abbassando la temperatura del sensore ed eliminato sottraendo l'immagine di buio, una posa della stessa durata dell'immagine, ripresa ad obiettivo chiuso.

Le fluttuazioni casuali (JN) del segnale non si possono però eliminare e costituiscono pertanto un disturbo con ampiezza proporzionale alla radice quadrata del livello del conteggio (C=S+RN) in ciascun pixel.

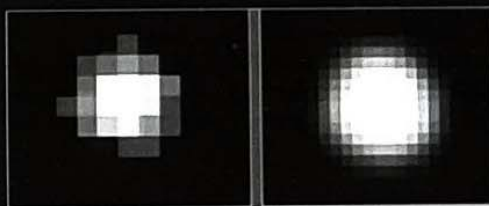
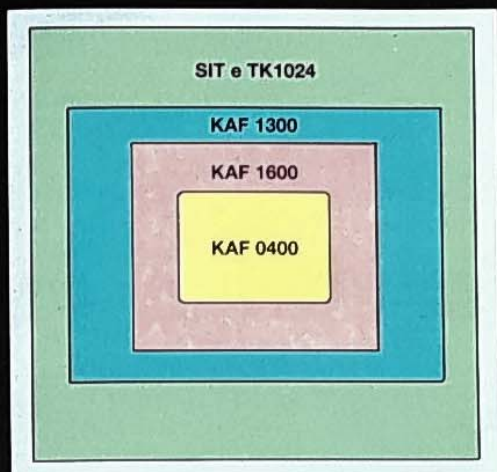
$$JN \propto \sqrt{C}$$

Aumentando la durata t della posa, il segnale aumenta linearmente (S=k×t), mentre il rumore cresce più lentamente. Per pose t relativamente lunghe il rumore di lettura diviene trascurabile.

$$JN = \sqrt{C} = \sqrt{S+RN} = \sqrt{k \times t + RN} \approx \sqrt{k \times t} = K \times \sqrt{t}$$

dove: k, K = cost e t: durata posa. Pertanto il SNR cresce, in tal caso, come la radice quadrata della durata della posa.

$$\frac{S}{N} = \frac{k \times t}{RN + JN} \approx \frac{k \times t}{JN} = \frac{k \times t}{K \times \sqrt{t}} = h \times \sqrt{t}$$



CAMPO INQUADRATO (FOV) E RISOLUZIONE DI UN'IMMAGINE CCD (KODAK KAF-400 KAF-1600)

dimens. pixel	dimens. del CCD		dimensioni lineari del CCD		lunghezza focale dell'ottica (mm)	FOV				risoluzione		
	numero colonne	numero righe	larghezza (mm)	altezza (mm)		X	Y	''	''			
0,009	768	512	6,912	4,608	50	7	55	14	5	16	40	37,13
0,009	768	512	6,912	4,608	135	2	56	1	1	57	21	13,75
0,009	768	512	6,912	4,608	300	1	19	12	0	52	48	6,19
0,009	768	512	6,912	4,608	500	0	47	31	0	31	41	3,71
0,009	768	512	6,912	4,608	1000	0	23	46	0	15	50	1,86
0,009	768	512	6,912	4,608	1600	0	14	51	0	9	54	1,16
0,009	768	512	6,912	4,608	1800	0	13	12	0	8	48	1,03
0,009	768	512	6,912	4,608	2000	0	11	53	0	7	55	0,93

CAMPO INQUADRATO (FOV) CON DIVERSI CCD (FOCALE DI 2000 MM)

tipo di sensore	dimensioni lineari del CCD		FOV			
	larghezza (mm)	altezza (mm)	X	Y	''	''
TC 211	2,5	2,5	4	17	4	17
TC 241	8,6	6,5	14	46	11	10
KAF 0400	6,9	4,6	11	51	7	54
KAF 1600	13,8	9,2	23	43	15	48
KAF 1300	16,4	20,4	28	11	35	3
Marconi CCD77	12,3	12,3	21	8	21	8
SITe SI 502A	12,3	12,3	21	8	21	8
Marconi CCD47-10	13,3	13,3	22	51	22	51
SITe SLA-003A	24,6	24,6	42	17	42	17
pellicola 35 mm	36,0	24,0	61	52	41	15

I fattori che influenzano la qualità dell'immagine

La qualità delle immagini è legata ad un parametro che, tecnicamente, prende il nome di rapporto segnale-rumore (SNR); esso rappresenta un concetto intuitivo: è infatti logico attendersi che la nostra immagine sarà migliore se, in ogni

punto, l'ampiezza del segnale (S, dovuto alla cattura dei fotoni) sarà, di diverse volte, più grande dell'ampiezza dei disturbi generati dal rumore di let-

Invece di aumentare la durata t di una singola posa, si potrebbero anche riprendere m pose più brevi t' = t/m. Se il rumore di lettura RN rimane sufficientemente basso anche nelle singole pose brevi, il risultato finale, che si ottiene componendo le singole pose, è pressoché equivalente a quello di un'unica posa di durata t.

Riassumendo, il pre-trattamento o calibrazione delle immagini CCD deve comprendere i seguenti passi:

- sottrazione dell'immagine di buio (Dark Frame), per la correzione dei difetti del chip;
- divisione per l'immagine di spianamento (Flat Field), per correggere i difetti dell'ottica e gli artefatti dovuti alla presenza di granelli di polvere o altro

$$FOV = \arctg\left(\frac{L}{F}\right) \approx \frac{L}{F} [\text{rad}]$$

lungo il percorso della luce fino alla superficie del sensore.

Inoltre, la qualità delle immagini, ovvero il SNR migliora se

- si allunga la posa, oppure se
- si compone una sequenza di immagini dello stesso campo riprese con pose più brevi.

Ripresa ed elaborazione con una strumentazione standard

Un limite della mia montatura è costituito dal fatto che non mi permette di inseguire, in corsa libera, per intervalli più lunghi di 60" senza un'elevata probabilità di immagine mosso. Pertanto sono costretto a riprendere immagini con la tecnica delle pose brevi.

Attendo che la temperatura del sensore CCD si sia stabilizzata e si sia giunti all'equilibrio termico. Per farlo basta attendere che sia trascorsa circa mezz'ora dall'accensione.

Per garantire una maggiore stabilità termica ed una costanza della temperatura del chip nel corso di una notte e, per quanto possibile, nelle diverse stagioni dell'anno, faccio uso di un sistema di refrigerazione a circolazione d'acqua liquido; questo mantiene costante la temperatura della porzione metallica esterna della camera CCD (il lato caldo della cella termoelettrica di Peltier).

Raggiunto l'equilibrio termico, curata la messa a fuoco, si può iniziare la seduta

di osservazione. Per la ripresa dell'immagine di un'oggetto celeste si segue la seguente procedura:

- Si punta l'oggetto;
- lo si centra nel campo inquadrato dal CCD: per questa operazione si usa un binning 4x4 ed un controllo visuale a monitor con posa di pochi secondi;
- si avvia la procedura di ripresa, in corsa libera, di una sequenza di 10-12 immagini della medesima durata: tipicamente 45" per le immagini di nebulose e galassie. Durante il tempo di ripresa della sequenza sono libero di svolgere altri compiti come, ad esempio, l'elaborazione di una sequenza ripresa precedentemente;

- si ripete la procedura per l'oggetto successivo.

L'elaborazione, quindi, di una sequenza di immagini si svolge con le seguenti modalità:

- Si scelgono le immagini migliori della sequenza, quelle che non presentano un mosso eccessivo o altri difetti evidenti;
- si procede alla calibrazione delle singole immagini della sequenza mediante:

1. sottrazione dell'immagine di offset (il livello di una posa di durata nulla);
2. sottrazione dell'immagine di buio;
3. spianamento dell'immagine mediante l'immagine di flat-field normalizzata al livello unitario.

- si mettono a registro le singole immagini calibrate facendole coincidere con la posizione della prima immagine della se-

quenza;

- si compongono le immagini mediante una somma mediana o algebrica, a seconda dei casi.

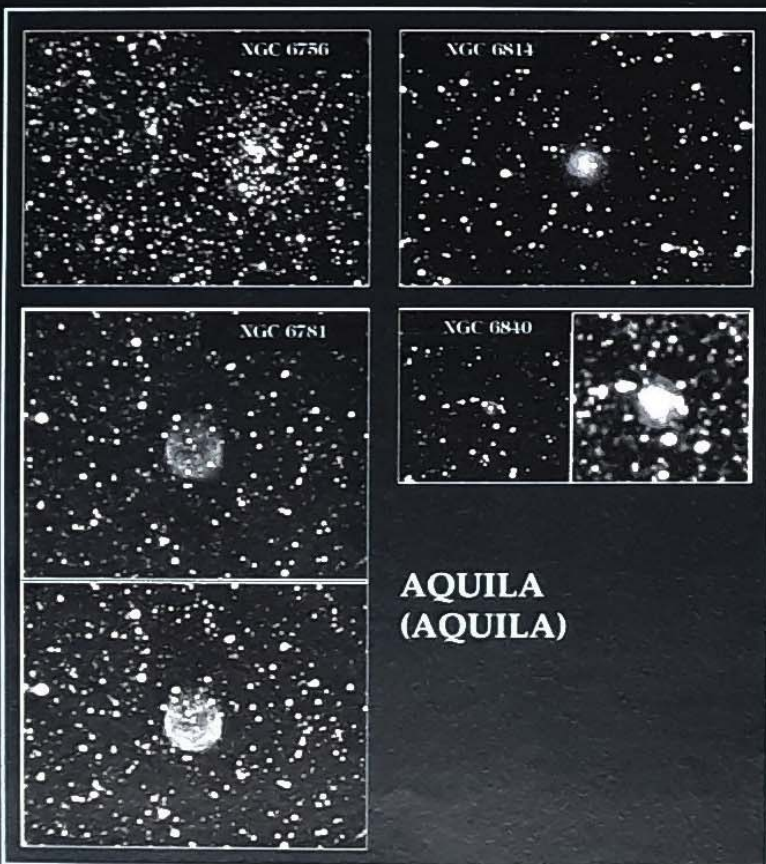
La calibrazione, la messa a registro e la composizione delle immagini avviene mediante una procedura automatica realizzata con IRIS, un programma gratuito, continuamente aggiornato e disponibile in rete.

Per le immagini di calibrazione (offset, dark e flat field) vengono utilizzati dei master frames ottenuti in precedenza sempre mediante somme mediane di sequenze delle rispettive riprese. Questi master frames possono essere utilizzati anche a distanza di diverse settimane.

La bontà di tale impiego è garantito dalla stabilità termica del CCD, soprattutto per quanto riguarda il master dark frame. Il master flat field può invece essere utilizzato finché non si sposta la camera CCD o non si modifica, in un qualsiasi modo, la combinazione ottica.

Il risultato finale del processo descritto presenta un SNR buono o, per lo meno, accettabile e può essere, eventualmente, ulteriormente elaborato con varie operazioni di filtraggio per estrarne l'informazione di interesse.

Alle immagini che vengono presentate negli articoli della rubrica profondo cielo de l'astronomia viene semplicemente applicata una trasformazione logaritmica (oppure gamma) dei livelli di luminosità. ■



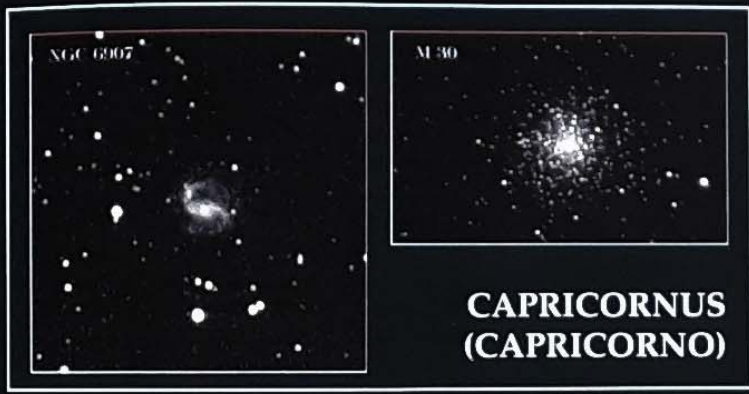
Presentiamo in queste pagine una serie di immagini CCD che mostrano gli oggetti più caratteristici del cielo estivo, suddivisi per costellazione.

Le riprese sono state realizzate da Enrico Prosperi dall'Osservatorio di Castelmartini (PT).

Telescopio Schmidt-Cassegrain di 254 mm, f/6,3; camera CCD Hi-SIS 22 equipaggiata con Kodak KAF-0400.

Nelle tabelle che accompagnano il poster all'interno di questo fascicolo è riportata una serie di dati relativi agli oggetti mostrati nelle foto e ad altri ancora.

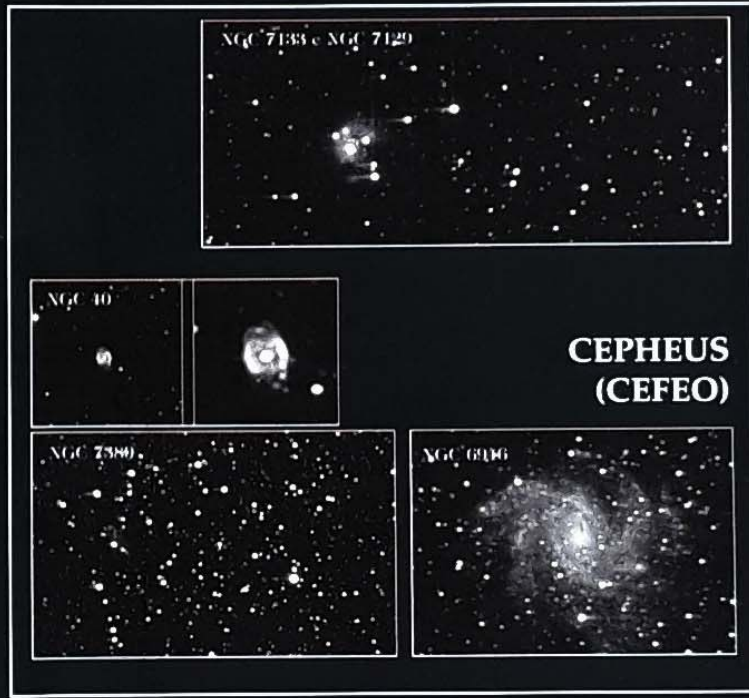
Anche le tabelle sono state compilate da Enrico Prosperi.



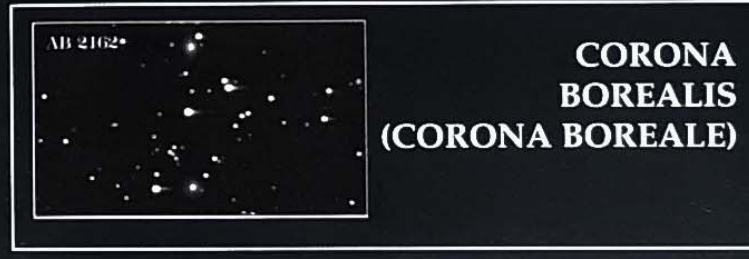
**CAPRICORNUS
(CAPRICORNO)**



**EQUULEUS
(CAVALLINO)**



**CEPHEUS
(CEFEU)**



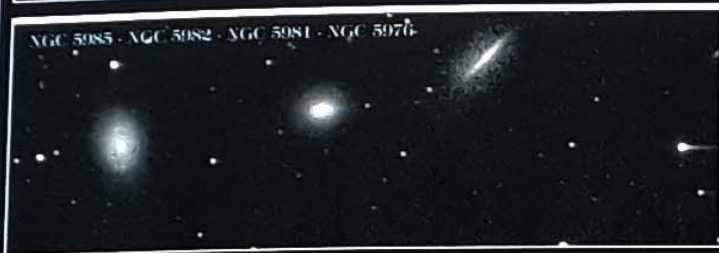
**CORONA
BOREALIS
(CORONA BOREALE)**



**DELPHINUS
(DELFINO)**



**CYGNUS
(CIGNO)**



DRACO (DRAGO)



SAGITTA (FRECCIA)



HERCULES (ERCOLE)



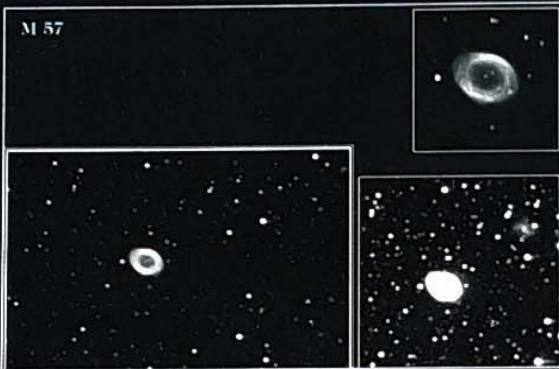
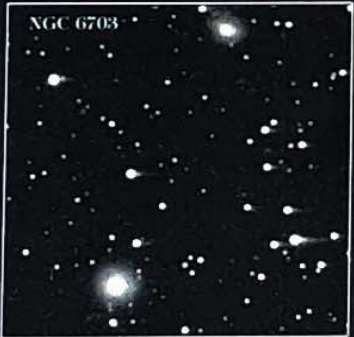
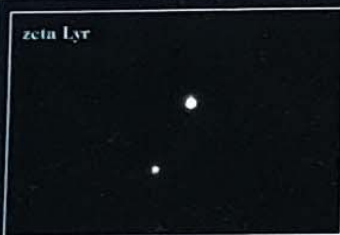
M 13



NGC 6270



M 92



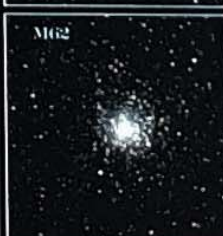
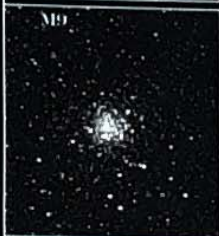
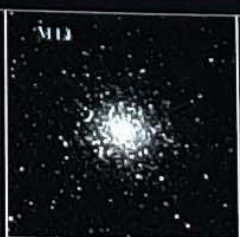
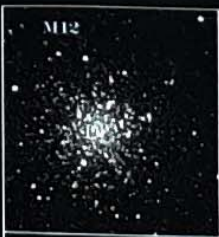
M 57



LYRA (LIRA)



NGC 6765



OPHIUCUS (OFIUCO)



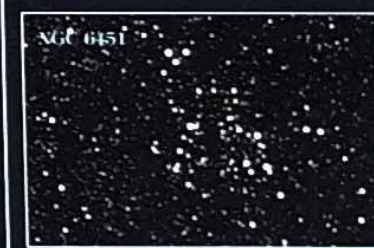
SAGITTARIUS (SAGITTARIO)



la regione delle Zampe d'Elefante ▶

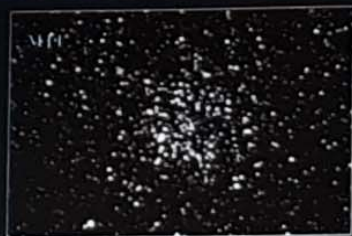


SERPENS (SERPENTE)



SCORPIUS (SCORPIONE)





SCUTUM (SCUDO)



VULPECULA (VOLPETTA)

Nome latino	Nome italiano	Sigla
AQUILA	AQUILA	AQL
CAPRICORNUS	CAPRICORNO	CAP
CEPHEUS	CEFEO	CEP
CORONA BOREALIS	CORONA BOREALE	CrB
CYGNUS	CIGNO	CYG
DELPHINUS	DELFINO	DEL
DRACO	DRAGO o DRAGONE	DRA
EQUULEUS	CAVALLINO o PULEDRO	EQU
HERCULES	ERCOLE	HER
LIBRA	BILANCIA	LIB
LYRA	LIRA	LYR
OPHIUCUS	OFIUCO	OPH
SAGITTA	FRECCIA	SGE
SAGITTARIUS	SAGITTARIO	SGR
SCORPIUS	SCORPIONE	SCO
SCUTUM	SCUDO	SCT
SERPENS	SERPENTE	SER
VULPECULA	VOLPETTA	VUL