

## ΚΑΜΕΡΕΣ CCD - ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Στις μέρες μας που οι κάμερες CCD έχουν γίνει σχετικά προσιτές, πολλές βρίσκονται ήδη στα χέρια των Ελλήνων ερασιτεχνών ενώ περισσότεροι είναι αυτοί που σκέφτονται να αποκτήσουν. Το κείμενο αυτό, σκοπό έχει να δώσει απλή ερμηνεία των τεχνικών χαρακτηριστικών τους ώστε η ανάγνωση των προδιαγραφών να είναι περισσότερο διαφωτιστική.

Οι κάμερες CCD είναι ουσιαστικά συσκευές προσωρινής αποθήκευσης φωτοηλεκτρονίων που έχουν δημιουργηθεί από τα φωτόνια που καταλήγουν στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου. Τα βασικά χαρακτηριστικά που διαβάζουμε στις προδιαγραφές είναι:

- " Μέγεθος pixel (πχ 9 μικρά)
- " Ανάλυση (μέγεθος) εικόνας (πχ 765 x 510 pixels)
- " Μονόχρωμη / έγχρωμη
- " Εύρος ψηφιοποίησης (πχ 8, 12 ή 16-bit)
- " Κβαντική απόκριση (quantum efficiency)
- " Well depth – χωρητικότητα εικονοστοιχείων (πχ 80.000 e-)
- " Gain – συντελεστής μετατροπής φωτοηλεκτρονίων σε ψηφιακές μονάδες
- " Ρεύμα σκότους – dark current
- " Θόρυβος ανάγνωσης - read noise
- " Ύπαρξη ή μη antiblooming gates
- " Είδος επικοινωνίας (παράλληλη, USB κλπ)
- " Ψύξη
- " Τύπος αισθητήρα

Αναλυτικότερα, το **μέγεθος των pixel** καθορίζει τη σχετική συνάφεια της κάμερας με το υπόλοιπο οπτικό σύστημα. Είναι μαζί με το ενεργό εστιακό μήκος, αυτό που θα καθορίσει την κλίμακα ειδώλου στις εικόνες. Ο τύπος που χρησιμοποιούμε είναι:

$$\text{Κλίμακα} = \frac{206.265 \times \text{μέγεθος pixel σε μικρά}}{\text{Ενεργό εστιακό μήκος τηλεσκοπίου σε mm}}$$

Το **εύρος του πεδίου** που θα καλυφθεί δίνεται σε κάθε διάσταση (μήκος ή πλάτος) του CCD από τον τύπο:

$$\text{Πεδίο} = \frac{3438 \times \text{πλάτος CCD σε mm}}{\text{Ενεργό εστιακό μήκος τηλεσκοπίου σε mm}}$$

Παράδειγμα:

Τηλεσκόπιο SCT 8" f/10 , Εστ. Μήκος = 2080 mm

Focal reducer 0.44x =>

Ενεργό εστιακό μήκος = 915 mm

Κάμερα ST 7, 9 μικρά, 765x510 , διαστάσεις CCD= 4.6 x 6.9 mm

Πεδίο= 17.28 x 25.93 πρώτα λεπτά της μοίρας

Κλίμακα = 2.03 arcsec / pixel

Συνήθως θεωρείται πως μία κάμερα «ταιριάζει» με ένα δεδομένο τηλεσκόπιο όταν η κλίμακα ειδώλου είναι μεταξύ 0.4 και 0.6 του τυπικού seeing της περιοχής από όπου παρατηρούμε.

Παράδειγμα: αν το seeing της περιοχής μας βρίσκεται στα 3.5 arcsec, τότε η κλίμακα πρέπει να είναι μεταξύ 1.4 και 2.1 arcsec

Έτσι, για μέγεθος pixel 9 μ μπορούν να χρησιμοποιούνται τηλεσκόπια εστιακού μήκους 885 – 1325 mm

Όταν η ανάλυση είναι πολύ υψηλή (μικρός αριθμός arcsec/pixel) λέμε πως έχουμε υπερδειγματοληψία (oversampling), ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε υποδειγματοληψία (undersampling). Η σωστή επιλογή του συνδυασμού τηλεσκόπιο – κάμερα είναι περισσότερο σημαντική όταν θέλουμε να κάνουμε μετρήσεις. Για τη φωτογράφιση τα πράγματα είναι λίγο πιο ελαστικά.

**Μονόχρωμη ή έγχρωμη;** Οι μονόχρωμες κάμερες έχουν μεγαλύτερη ανάλυση (για το ίδιο πλήθος pixel), μεγαλύτερη ευαισθησία και μεγαλύτερη δυναμική περιοχή από τις έγχρωμες. Για να δώσουν έγχρωμη εικόνα πρέπει να γίνουν λήψεις σε όλα τα φίλτρα και να συνδυαστούν τα αποτελέσματα εκ των υστέρων. Η πιστότητα όμως που μπορούν να δώσουν είναι η υψηλότερη δυνατή. Οι έγχρωμες κάμερες – και οι DSLR φωτογραφικές μηχανές – είναι πιο εύχρηστες και οικονομικές από το συνδυασμό μονόχρωμη CCD + Filter wheel + φίλτρα LRGB.

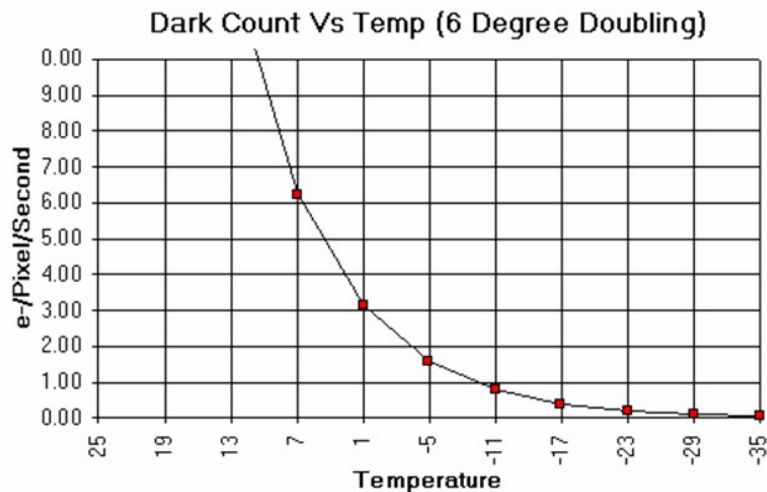
Το **εύρος ψηφιοποίησης** είναι πια σε όλες τις μονόχρωμες 16-bit (65536 αποχρώσεις του γκρι) ενώ στις έγχρωμες 4 x 12-bit. Μεγαλύτερο εύρος ψηφιοποίησης σημαίνει μεγαλύτερη δυναμική περιοχή.

**Quantum efficiency:** Δείχνει το πόσο ευαίσθητη είναι η κάμερα. Οι τιμές εξαρτώνται από το μήκος κύματος και φανερώνουν το ποσοστό των φωτονίων που μετατρέπεται σε φωτοηλεκτρόνια. Αν στο ίδιο μήκος κύματος μία κάμερα έχει ευαισθησία 45% και μία άλλη 85%, η δεύτερη χρειάζεται περίπου το μισό χρόνο για να καταγράψει την ίδια πληροφορία.

**Well depth** (χωρητικότητα εικονοστοιχείων). Είναι εν πολλοίς φυσική ιδιότητα του φωτοευαίσθητου υλικού από το οποίο φτιάχνονται τα εικονοστοιχεία (pixel) και σχετίζεται άμεσα με τις διαστάσεις τους. Έτσι τα 9 μικρά έχουν χωρητικότητα 100.000 φωτοηλεκτρονίων ενώ τα 24 μικρά (Kodak 1001) έχουν 500.000. Εδώ θέλει προσοχή γιατί άλλοι κατασκευαστές δημοσιεύουν (συνήθως) το “full well depth” και άλλοι το “linear well depth” που είναι το πλήθος φωτοηλεκτρονίων στο οποίο η κάμερα έχει γραμμική απόκριση (διπλάσια προσπίπτοντα φωτόνια = διπλάσια δημιουργούμενα φωτοηλεκτρόνια). Όπως είναι φυσικό, στη δεύτερη περίπτωση οι τιμές είναι χαμηλότερες.

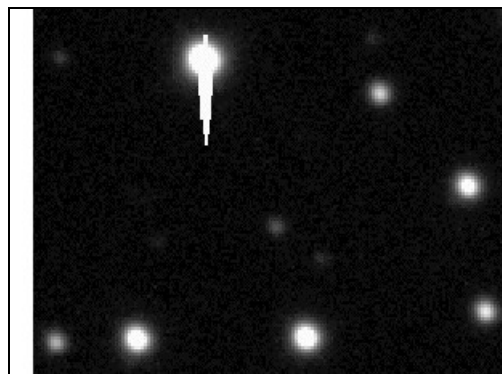
**Gain:** είναι ο συντελεστής μετατροπής φωτοηλεκτρονίων σε ψηφιακές μονάδες (ADU) τις οποίες κατόπιν διαβάζουν τα υποσυστήματα του υπολογιστή μας. Μικρότερες τιμές του, σημαίνουν καλύτερη αξιοποίηση της δυναμικής περιοχής.

**Dark current (ρεύμα σκότους):** η συσκευή παράγει φωτοηλεκτρόνια-παράσιτα. Το καλό νέο είναι πως ο ρυθμός παραγωγής μειώνεται όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας και αυτό εξηγεί την ύπαρξη κυκλώματος ψύξης. Πρακτικά, κάτω από τους -35° C δεν παράγονται παρά ελάχιστα παράσιτα. Αφαιρούνται με τη λήψη εικόνων σκότους (dark frames). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη μεταβολής της παραγωγής τους συναρτήσει της θερμοκρασίας:



**Read noise (θόρυβος ανάγνωσης):** είναι ψηφιακός θόρυβος που εισάγεται κατά τη διαδικασία ανάγνωσης των τιμών των εικονοστοιχείων. Όσο μικρότερη η τιμή του, τόσο το καλύτερο.

**Antiblooming ή όχι;** Η ύπαρξη πυλών antiblooming στο τσιπ της συσκευής αποτρέπει την υπερχείλιση φωτοηλεκτρονίων προς τα επόμενα εικονοστοιχεία όταν φωτογραφίζονται πολύ λαμπρές πηγές, κάτι που είναι ιδιαίτερως επιθυμητό από τους αστροφωτογράφους. Το τίμημα γι αυτή τη δυνατότητα είναι η κατά πολύ μειωμένη κβαντική ευαισθησία και χωρητικότητα των εικονοστοιχείων. Παράδειγμα blooming από non-antiblooming κάμερα:



**Επικοινωνία:** οι σημερινές κάμερες επικοινωνούν με τον υπολογιστή μέσω θύρας USB επιτρέποντας σχετικά σύντομους χρόνους για να μεταφερθεί η εικόνα στο σκληρό δίσκο προς αποθήκευση. Οι παλαιότερες επικοινωνούσαν μέσω παράλληλης θύρας και οι αντίστοιχοι χρόνοι ήταν πολύ μεγαλύτεροι. Κάποιες έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας μέσω δικτύου Ethernet ενώ άλλες – κυρίως συσκευές video – χρησιμοποιούν σύνδεση firewire.

**Ψύξη:** η ψύξη της συσκευής είναι ιδιαίτερης σημασίας όπως είδαμε παραπάνω. Στις ερασιτεχνικές κάμερες χρησιμοποιούνται θερμοηλεκτρικά στοιχεία (Peltier ή TEC cooling) που κατεβάζουν τη θερμοκρασία του αισθητήρα 20 – 35 βαθμούς κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στις υψηλής ποιότητας κάμερες χρησιμοποιείται διπλό ή και τριπλό κύκλωμα που σε συνδυασμό με υδρόψυξη κατεβάζουν τη θερμοκρασία κατά 50° C. Οι επαγγελματικές κάμερες των αστεροσκοπειών χρησιμοποιούν υγρό άζωτο και δουλεύουν μονίμως στους -70 έως -75° C οπότε είναι περιττή η λήψη dark frames. Για τους ερασιτεχνικούς αισθητήρες, αν και δεν αναφέρεται ρητώς, συνιστάται να μην κατεβαίνει η θερμοκρασία κάτω από τους -35° C. Ιδιαίτερης σημασίας είναι να παρέχεται

στο χρήστη η δυνατότητα να επιλέγει τη θερμοκρασία του αισθητήρα. Έτσι μπορούμε να τη ρυθμίζουμε με τρόπο ώστε το θερμοηλεκτρικό στοιχείο να βρίσκεται στο 80% περίπου της απόδοσης. Αυτό επιτρέπει να έχουμε σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια παρατήρησης και να είναι ευκολότερη η αφαίρεση του θερμικού θορύβου. Σε αντίθετη περίπτωση που η συσκευή αποφασίζει να λειτουργεί μονίμως στο 100%, καθώς προχωρά η νύχτα και πέφτει η θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι μεταγενέστερες εικόνες θα λαμβάνονται σε διαφορετική θερμοκρασία και αυτό εισάγει επιπλέον προβλήματα. Κάποιες εταιρείες δεν εφοδιάζουν τις συσκευές με τη δυνατότητα αυτή.

Τέλος, οι κάμερες που χρησιμοποιούμε ανήκουν στον τύπο full frame, front illuminated. Αυτό σημαίνει πως μόλις λήξει η έκθεση διαβάζεται όλη η εικόνα στοιχείο προς στοιχείο, τα δεδομένα μεταφέρονται στον υπολογιστή και κατόπιν είναι όλα έτοιμα για την επόμενη λήψη. Η είσοδος των φωτονίων γίνεται από την εμπρόσθια πλευρά. Κάποιες άλλες συσκευές – κυριώς για video λήψεις – χρησιμοποιούν άλλους τύπους αισθητήρων όπως interline ή frame transfer. Εδώ μόλις λήξει η έκθεση μεταφέρονται είτε οι στήλες μία μία σε διπλάνες ανενεργές, είτε όλη η εικόνα σε περιοχή του αισθητήρα που δεν είναι φωτοευαίσθητη. Μ' αυτό τον τρόπο η έναρξη της επόμενης έκθεσης είναι πρακτικώς άμεση αλλά με το μειονέκτημα της σημαντικά μειωμένης ευαισθησίας και ανάλυσης.

Μιά κατηγορία αισθητήρων που αξίζει αναφορά είναι οι back-illuminated. Έχουν υποστεί διαδικασία λέπτυνσης της φωτοευαίσθητης επιφάνειας από τα 300 μικρά σε λιγότερο από 30 μέσω λείανσης και τοποθετούνται ανάποδα στη συσκευή. Το φως εισέρχεται από την οπίσθια πλευρά – εξ ου και το όνομά τους – παρακάμπτοντας τις πύλες της εμπρόσθιας που προκαλούν σημαντική απώλεια φωτονίων. Η ευαισθησία τους είναι πολύ μεγάλη φτάνοντας το 92 – 93 % αλλά μεγάλο είναι και το κόστος απόκτησης – περίπου τετραπλάσιο ως εξαπλάσιο από μιά συμβατική. Όλα τα αστεροσκοπεία χρησιμοποιούν τέτοιου τύπου κάμερες. Στους ερασιτέχνες είναι περιορισμένη η χρήση λόγω κόστους αλλά και γιατί κάποιες φορές υποφέρουν από παραμορφώσεις στο υπέρυθρο (fringing).

Η Kodak και πίο πρόσφατα η Sony έχουν αναπτύξει τεχνολογία μικροφακών (microlensing) πάνω από κάθε εικονοστοιχείο ώστε να περιορίζονται οι απώλειες φωτονίων. Έτσι, η κβαντική απόδοση των συσκευών CCD ανεβαίνει κατά 50% περίπου.

Στέλιος Κλειδής  
Ε.Α.Ε. / Νοέμβριος 2008