

# Laboratorio di Ottica e Spettroscopia

Quarta lezione  
**Vedere lontano**  
(Laboratorio III)

**Antonio Maggio e Luigi Scelsi**  
Istituto Nazionale di Astrofisica  
Osservatorio Astronomico di Palermo

# Sommario 4<sup>a</sup> lezione

## Prima parte

- Rivisitazione dei principi di ottica geometrica introdotti nelle lezioni precedenti
- Discussione dei risultati del Laboratorio II (dimensione del sensore di luce CCD di una macchina fotografica digitale)
- Strumenti ottici a più lenti (telescopi rifrattori)
- Il Sunspotter
- Immagini astronomiche digitali (con esercizio)

## Seconda parte

- Osservazione del transito di Venere davanti al Sole del 6/6/2012

# Esperimenti e modelli

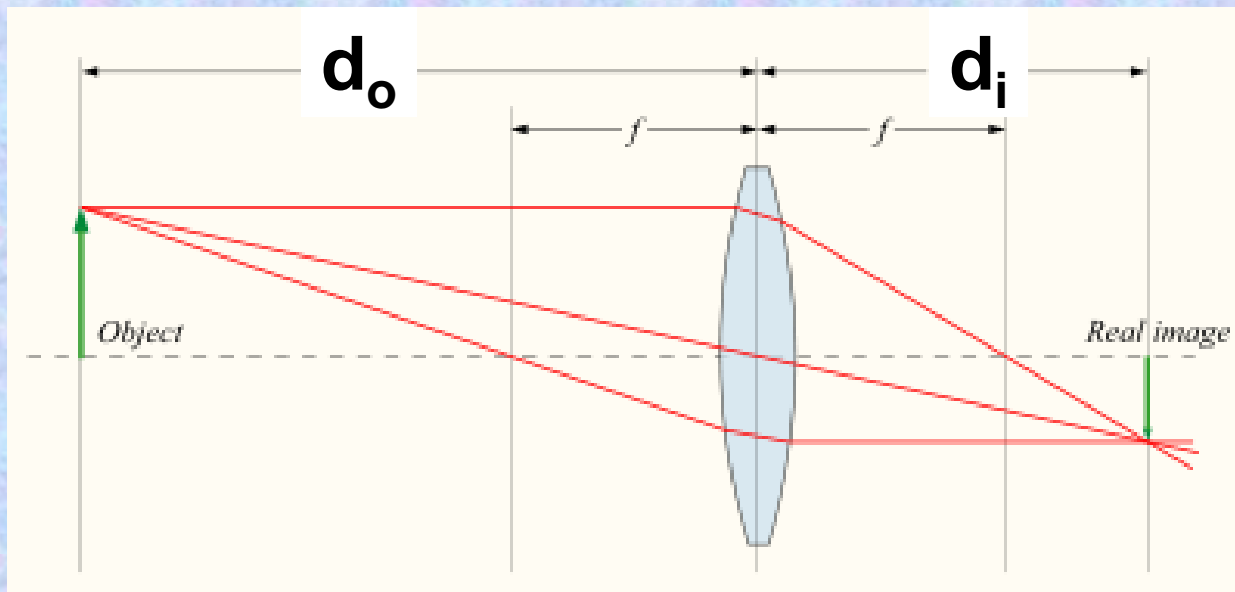
- La scienza si basa su esperimenti, osservazioni, misure di quantità fisiche e modelli
- Una stessa entità fisica, come la radiazione, può essere descritta con diversi modelli
- I diversi modelli possono essere utilizzati (o sono necessari) per spiegare fenomeni diversi
- E' importante distinguere tra modelli descrittivi, come il *modello a raggi*, e modelli fisici, come le *onde* o i *fotoni*, di cui parleremo nella prossima lezione

# Cos'è la radiazione

- La **radiazione** (luce) è il mezzo più veloce scelto dalla natura per trasportare **energia** attraverso lo spazio
- Vale il **principio di conservazione dell'energia**: l'energia trasportata dalla radiazione si può diffondere nello spazio, può cambiare forma, ma non può essere distrutta
- L'**ottica geometrica** (*modello a raggi*) spiega alcuni fenomeni considerando semplicemente due caratteristiche della radiazione, la direzione e la velocità di propagazione

# Propagazione della luce attraverso una lente (ottica geometrica)

- **Equazione delle lenti sottili:**  $1/d_o + 1/d_i = 1/f$
- **Ingrandimento:**  $h_i = m h_o$  con  $m = -d_i/d_o$   
( $d_o$  e  $d_i$  distanze oggetto e immagine dalla lente,  $f$  lunghezza focale,  $m$  ingrandimento,  $h_o$  dimensione dell'oggetto,  $h_i$  dimensione dell'immagine)



# Macchine fotografiche digitali

- Obiettivi con Lunghezza focale molto più piccola ( $f = 5-10$  mm)

- *Esercizio (Laboratorio II)*

- Calcolare la dimensione del rivelatore (CCD) provando a fotografare un oggetto di dimensioni note a distanza nota

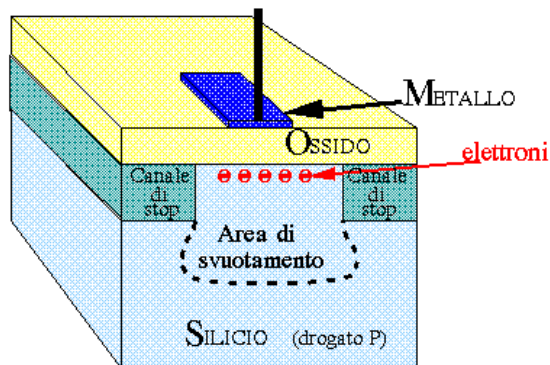
- Conoscendo il numero di pixel nell'immagine, calcolare la loro dimensione

# Macchine fotografiche digitali

- Obiettivi con Lunghezza focale molto più piccola ( $f = 5-10 \text{ mm}$ )
- Ciò comporta una dimensione dell'immagine più piccola rispetto al caso di una macchina fotografica classica
- Esse hanno inoltre un diametro  $D$  della lente più piccolo, a parità di **numero  $F = f / D$** : la quantità di luce raccolta dall'obiettivo è minore ma ciò è compensato dalla maggiore sensibilità del rivelatore CCD rispetto alla pellicola fotografica

# CCD: Charge Coupled Device

## ELEMENTO BASE DI UN CCD: IL CONDENSATORE MOS

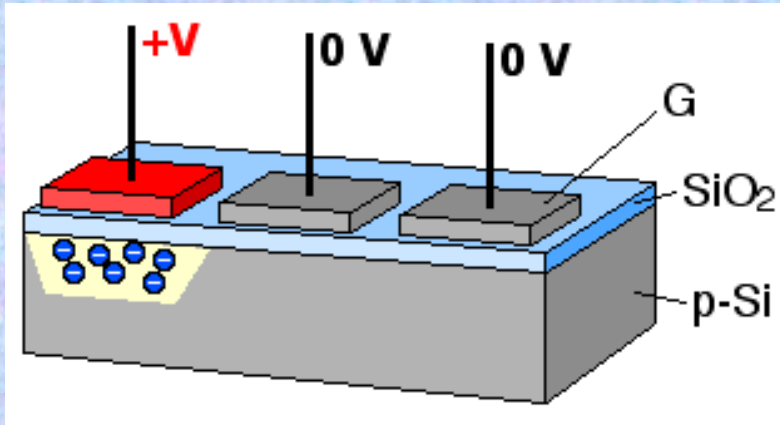


- Lo strato isolante di  $\text{SiO}_2$  (Ossido) separa l'elettrodo di alluminio (Metallo) dal substrato di Silicio
- Una tensione positiva applicata all'elettrodo respinge le buche creando una regione di svuotamento, nella quale possono accumularsi le cariche (in questo caso elettroni)
- Due canali di stop (pesantemente drogati P) limitano l'estensione laterale della zona di svuotamento

Il CCD è costituito da una matrice di elementi fotosensibili (*pixel*) realizzati utilizzando *silicio*. La radiazione incidente rilascia energia che genera cariche elettriche. Queste si accumulano nel silicio durante la *fase di esposizione* alla luce e successivamente vengono "contate" nella *fase di lettura* del contenuto del CCD.

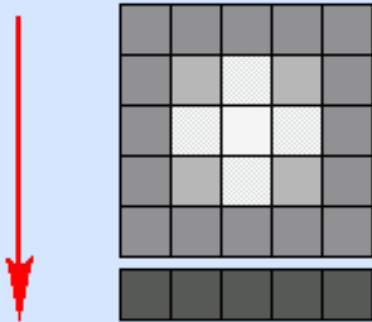


# Lettura di un CCD



Il rivelatore CCD è esposto alla luce per un dato intervallo di tempo e periodicamente un circuito elettronico esegue la lettura di tutte le cariche elettriche accumulate nei vari pixel.

## Clocking Parallel Register



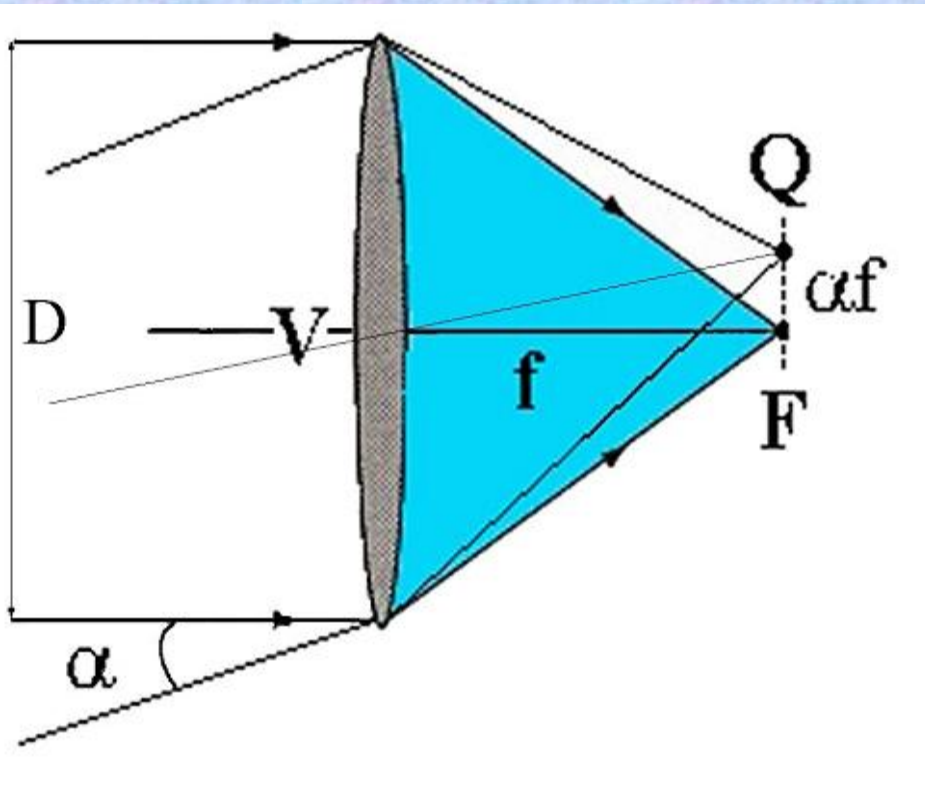
# Energia raccolta

- Energia raccolta da ciascun elemento del CCD:  
flusso  $\times$  area  $\times$  tempo di esposizione  
[joule m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>]  $\times$  [m<sup>2</sup>]  $\times$  [s]  
dove area = superficie dell'elemento sensibile  
esposto alla luce

# Propagazione della luce attraverso una lente (ottica geometrica)

- La retta passante passante per il centro della lente e perpendicolare ad essa si chiama *asse ottico*
- Raggi paralleli all'asse ottico convergono nel fuoco dopo aver attraversato la lente
- Come si propaga la luce emessa da una sorgente puntiforme posta nel fuoco di una lente?
- Cosa succede se la lente è illuminata da un fascio di luce costituito da raggi paralleli tra loro ma inclinati rispetto all'asse ottico?

# Dimensione sul piano focale



Supponiamo di osservare un oggetto a distanza molto grande con una lente caratterizzata dai seguenti parametri:

$D$  = diametro

$f$  = lunghezza focale

$V$  = asse ottico

$F$  = fuoco, sorgente in asse

$Q$  = fuoco, sorgente fuori asse

$\alpha$  = dimensione angolare dell'oggetto

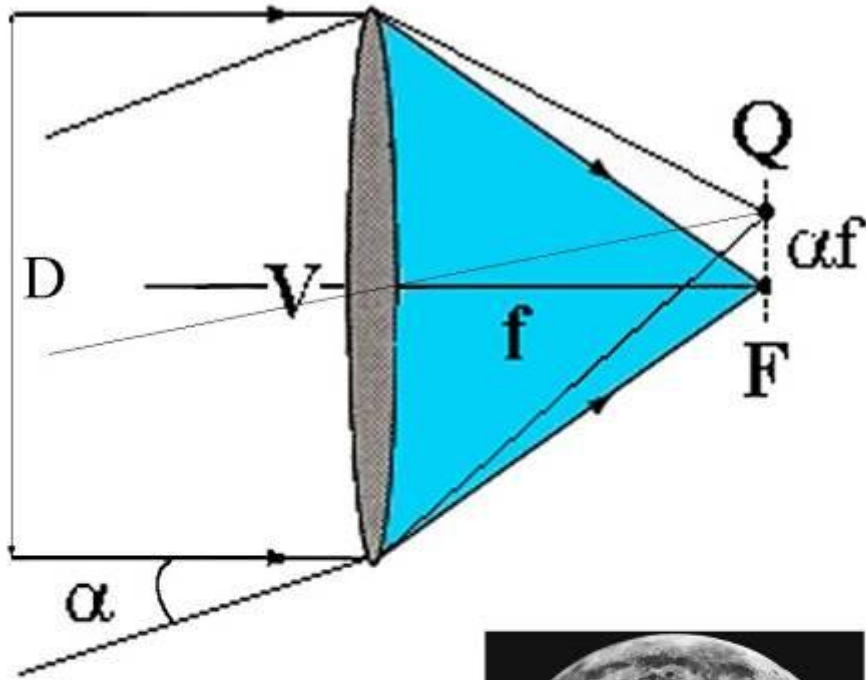
$FQ$  = dimensione lineare dell'immagine sul piano focale =  $f \tan \alpha$

$f \tan \alpha \approx f \alpha$  (con buona approssimazione, se  $\alpha \ll 1$  in radianti)

# Dimensione e scala angolare

- **Piano focale:** piano perpendicolare all'asse ottico, passante per il fuoco della lente
- Un oggetto che sottende un angolo di vista  $\alpha$ , osservato tramite un sistema ottico con lunghezza focale  $f$ , produce un'immagine con una **dimensione sul piano focale**  
$$h = f \tan \alpha \approx f \alpha \quad [\alpha \text{ in radianti, } f \text{ in mm}]$$
- Ricordando che  **$1 \text{ radiante} = 180^\circ / \pi \approx 57.3^\circ = 206264.8''$**   
 **$\alpha = 1 / f$**  (in radianti) =  **$206264.8 / f$**  (secondi d'arco) indica l'estensione angolare di un oggetto la cui immagine sul piano focale è di 1 mm. Questo numero viene chiamato **scala angolare** (secondi d'arco per mm).

# Esempio con la Luna



$$2\alpha(\text{Luna}) = 32'$$



Ogni punto della superficie lunare è una sorgente di luce molto lontana (raggi paralleli), distante  $0 \leq \theta \leq \alpha$  dal centro.

La Luna è un oggetto di dimensione angolare

$$2\alpha = 32/60 \times \pi/180 = 0.0093$$

radianti che creerà un'immagine di dimensioni  $h = 2\alpha f$  sul piano focale della lente.

Ad es., se  $f = 700 \text{ mm}$ ,  
 $h = 6.5 \text{ mm}$

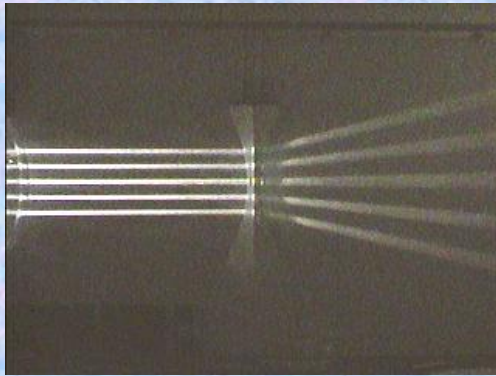
# Ancora su immagini reali e virtuali

- Che succede se l'oggetto (sorgente di luce) è a distanza minore della lunghezza focale? Perché l'occhio vede l'immagine virtuale?

*Ricordiamo che la luce trasporta un segnale: lo vediamo perché evidentemente la lente fa passare la luce e l'occhio (retina) la percepisce; **l'occhio riesce a focalizzare un'immagine che sullo schermo appare completamente sfocata**; l'occhio si comporta come una seconda lente.*

# Altre lenti

- Come si comporta una lente correttiva (per miopi)? Proviamo a effettuare il tracciamento dei raggi con una penna laser.

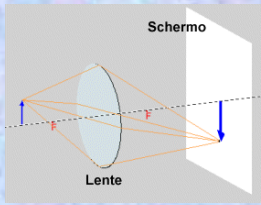


- Vi sono lenti (*concave, divergenti*) come quelle correttive per miopia, che non focalizzano mai, ma ancora una volta l'occhio vede un'immagine reale

•



# Esperienze al banco ottico

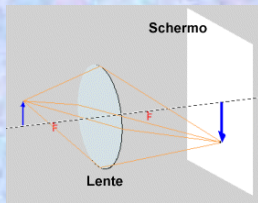


- Esperienze con due lenti:

- Sorgente (oggetto), prima lente concava, seconda lente convessa, schermo

In quali condizioni si forma un'immagine reale sullo schermo?

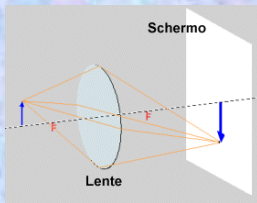
Com'è orientata l'immagine?



# Esperienza con due lenti

- Sorgente (oggetto) a  $d_o < f$  da una prima lente convessa, seguita da una seconda lente convessa e infine lo schermo
- In quali condizioni si forma un'immagine reale sullo schermo? In quali condizioni l'immagine è visibile con l'occhio?

# Esperienze al banco ottico



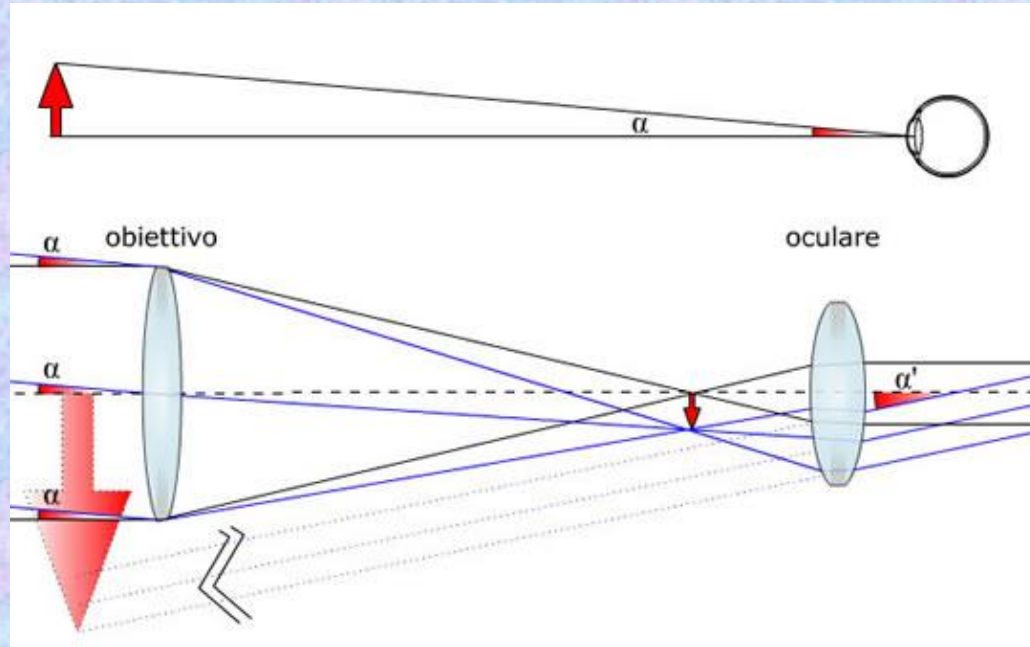
- Costruzione di un **telescopio** con due lenti di focale diversa (*l'immagine prodotta da una lente diventa l'oggetto per quella successiva; ciò è vero qualunque sia la combinazione di lenti, poiché - da un punto di vista fisico - le lenti sono elementi rifrangenti della radiazione, la quale viene comunque trasmessa da una parte all'altra*)
- **Previsione:** se l'immagine formata dalla prima lente viene messa nella posizione del fuoco della seconda lente o più vicina ( $d \leq f$ ), cosa ci aspettiamo?

*(La seconda funziona come una lente d'ingrandimento, usata in modo classico, si forma un'immagine virtuale ingrandita, visibile solo con i nostri occhi)*

Se invece la seconda lente è posta a distanza  $d > f$  dall'immagine formata dalla prima?

*(Si forma un'immagine reale a una distanza calcolabile con la legge delle lenti sottili)*

# Il telescopio rifrattore Kepleriano



- Obiettivo e oculare sono lenti convergenti ( $f > 0$ )
- Le due lenti sono poste a distanza  $f_1 + f_2$ , quindi i raggi di luce in uscita dall'oculare sono paralleli
- Se  $f_{\text{obiettivo}} > f_{\text{oculare}}$  si ottiene un ingrandimento pari al loro rapporto:  $m = f_{\text{obiettivo}} / f_{\text{oculare}} = \alpha' / \alpha$

# Un'altra applicazione



## • *Il Sunspotter*

- Un telescopio rifrattore con una geometria particolare.  
Come funziona? [schema](#)

- Obiettivo acromatico da 700 mm di lunghezza focale, diametro 61,7 mm.  
Oculare da 12,5 mm di focale, diametro 10 mm

- **Esercizio:** sapendo che lo schermo è posto a 175 mm di distanza dall'oculare, calcolare la dimensione dell'immagine del Sole (raggio del Sole =  $7 \times 10^8$  m, distanza del Sole =  $1.5 \times 10^{11}$  m)

# Sequenza degli esperimenti e dei concetti

Esperienze	Interpretazione fisica e metodi d'analisi
<p><b>6a.</b> Le lenti correttive per miopia hanno un comportamento diverso da quello delle lenti d'ingrandimento .</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Le <i>lenti concave</i> proiettano solo immagini virtuali</li><li>• La capacità di focalizzazione di una lente dipende quindi da caratteristiche fisiche (<i>indice di rifrazione</i>) e da fattori geometrici (<i>curvatura</i>)</li></ul>
<p><b>6b.</b> Un sistema di lenti può "convertire" una immagine virtuale in una reale o viceversa. Le dimensioni dell'immagine dipendono dal sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Un sistema ottico modifica il <i>percorso</i> della radiazione tramite effetti di rifrazione multipli</li></ul>

# Sequenza degli esperimenti e dei concetti

Esperienze	Interpretazione fisica e metodi d'analisi
<p>7. Con due lenti (<i>oculare</i> e <i>obiettivo</i>) convesse di focale diversa si può costruire un <i>telescopio rifrattore</i> (kepleriano)</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se la 2<sup>a</sup> lente è posta a distanza <math>f_1+f_2</math> dalla 1<sup>a</sup> lente, l'immagine prodotta è virtuale (non proiettabile, ma visibile con l'occhio). In altre parole, se l'immagine formata dalla 1<sup>a</sup> lente (obiettivo) viene posta sul fuoco della 2<sup>o</sup> lente (oculare), si formerà un fronte d'onda piano (raggi paralleli) che può essere focalizzato solo tramite il nostro occhio (terza lente) così formando un'immagine reale sulla retina.</li><li>• La dimensione dell'immagine dipende dal rapporto <math>f_1/f_2</math>. L'ingrandimento angolare che si ottiene è pari infatti al rapporto delle lunghezze focali delle due lenti: <math>m = f_1/f_2</math></li><li>• Se invece la 2<sup>a</sup> lente è posta a distanza maggiore (<math>&gt; f_1+f_2</math>), essa produrrà una seconda immagine reale (proiettabile sullo schermo)</li></ul>

# Conclusioni basate sull'ottica geometrica

- L'accoppiamento di varie lenti può essere impiegato per ottenere immagini ben focalizzate e ingrandite, sfruttando le proprietà di rifrazione dei vetri
- L'ottica geometrica e il modello a raggi ci consentono di prevedere gli angoli di rifrazione, le posizioni in cui si formano le immagini (equazione delle lenti sottili) e la dimensione (ingrandimento) dell'immagine finale
- Da un punto di vista fisico stiamo solo trovando un modo di raccogliere quanta più radiazione è possibile e trasferirla su un "rivelatore" (occhio, schermo, pellicola) mantenendo l'informazione spaziale sulla struttura della sorgente (*trasformazione lineare tra coordinate dei punti oggetto e coordinate dei punti immagine*)



# Osservazioni con un telescopio astronomico

- Dato un telescopio con una lente (o specchio) principale di diametro **D** e lunghezza focale **f** :
  - **Scala dell'immagine sul rivelatore** (dimensione **h** dell'immagine di un oggetto che sottende un certo angolo di vista  **$\theta$**  (in radianti), prodotta dal telescopio sul piano focale):  **$h = \theta f$**  [mm]
  - **Apertura del telescopio**:  **$F = f / D$**
  - **Limite di diffrazione** (migliore risoluzione spaziale possibile in un'immagine):  **$\theta \sim 1,22 \lambda / D$**
- Il riflettore Schmidt-Cassegrain C14 dell'Osservatorio Astronomico di Palermo:
  - **D = 14 pollici** (355,6 mm), **F = 3.3**
  - Rivelatore CCD da 765 x 510 pixels, dimensione lineare di un pixel = 9  $\mu\text{m}$  (1  $\mu\text{m} = 10^{-3}$  mm)

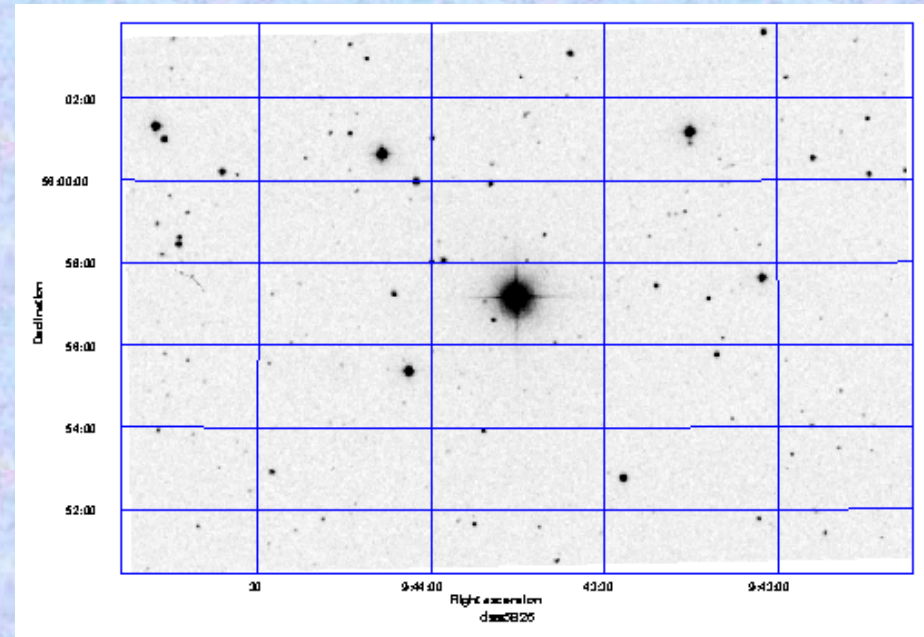
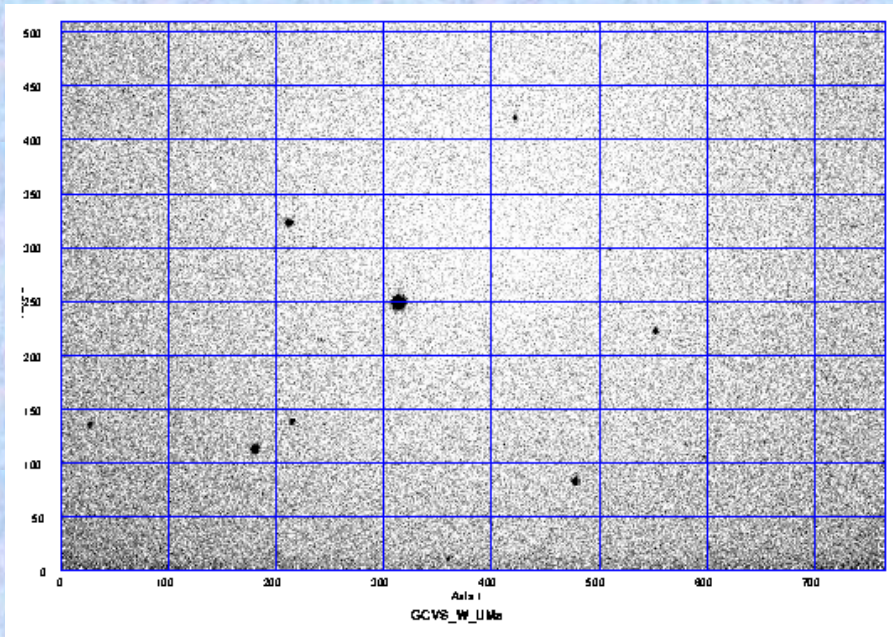
# Esempi di rivelatori CCD



**DOLORES**  
(Telescopio Nazionale  
Galileo)



# Immagine astronomiche



- A sinistra: campo stellare fotografato con il rivelatore CCD al fuoco del C14 (la stella più luminosa è W UMa)
- A destra: la stessa regione di cielo fotografata con un telescopio Schmidt da 48 pollici (1.2 m); questa immagine è invertita rispetto a quella presa con il C14.

# La "scala" del telescopio

- Il parametro  $s = 206264.8/f$  (**scala angolare**) (secondi d'arco per mm) indica l'estensione angolare di un oggetto la cui immagine sul piano focale è di 1 mm
- Per ottenere la **scala spaziale** dello strumento il parametro  $s$  va confrontato con le dimensioni dell'elemento di immagine del rivelatore posto sul piano focale (dimensioni dei pixel di un sensore CCD, tipico delle macchine fotografiche digitali): ad es., se  $s = 10''/\text{mm}$  e il CCD ha pixel di lato  $10 \mu\text{m} = 10^{-2} \text{ mm}$ , avremo una scala spaziale di  $0''.1$  per pixel

# Un esercizio di astrometria

- La Fig. 1 rappresenta l'immagine di un campo stellare fotografato con il rivelatore CCD al fuoco del C14; le unità in ascissa e ordinata sono in pixel
- Conoscendo il diametro **D** e l'apertura **F**, calcolare la scala dell'immagine sul piano focale, ovvero a quanti arcosecondi d'angolo (nel cielo) corrisponde la dimensione di un pixel
- Misurare in Fig.1 la dimensione del campo di vista e la distanza di alcuni oggetti stellari tra di loro e convertire queste misure in angoli tramite la relazione di scala trovata prima
- Verificare i risultati con analoghe misure effettuate sulla Fig. 2, la quale rappresenta la stessa regione di cielo (tratta dall'archivio del *Digital Palomar Observatory Sky Survey*) fotografata con un telescopio Schmidt da 48 pollici (1.2 m); su questa seconda immagine le unità dell'ascissa (*Right ascension*) sono in ore ( $1 \text{ h} = 4 \text{ arcominuti}$ ), mentre quelle in ordinata (*Declination*) sono in gradi sessagesimali. Porre attenzione al fatto che questa immagine è invertita rispetto a quella presa con il C14.