

Rovigo,

13 marzo 2017

Laboratorio di fotometria dei bolidi

Albino Carbognani, Ph.D.



Okie-Tex Star Party
September 30, 2008
Howard Edin

Che differenza c'è fra meteoroidi, meteora, bolide e meteorite?



Un esempio di bolide



Leonide ripresa nel 1998 (Italia)

L'origine dei meteoroidi

Comete: **meteoroidi porosi** ($1-2 \text{ g/cm}^3$) contenenti molecole organiche, emessi dal nucleo in seguito alla sublimazione del ghiaccio. I corpi più massicci, fino ad alcuni cm di raggio, restano in prossimità del nucleo, gli altri sono maggiormente dispersi.

Asteroidi: meteoroidi espulsi durante la collisione di due corpi maggiori. Sono meteoroidi **pietrosi** ($3,5 \text{ g/cm}^3$) e **ferrosi** (8 g/cm^3). Il ΔV di collisione è di 100-200 m/s che, insieme alle forze non-gravitazionali, immette i frammenti in orbite di risonanza con Giove che li può scagliare nel Sistema Solare interno.

Pianeti: meteoroidi emessi durante le collisioni con asteroidi che portano alla formazione di grandi crateri da impatto (esempio la meteorite marziana ALH 84001 oppure le meteoriti lunari ritrovate sulla Terra).

Spazio interstellare: piccoli meteoroidi compresi fra 15 e 40 μm con velocità maggiore di 72 km/s (il 14% del totale). Il flusso di particelle subisce una variazione annuale che suggerisce la presenza di almeno due sorgenti discrete: una associata con il moto del Sole attorno al centro galattico e l'altra associata con stelle vicine di tipo spettrale A. Si sospetta una terza sorgente di polveri associata con ammassi stellari giovani. .

Le parti di una cometa

coma

ion tail

dust tail

nucleus



Un esempio: la cometa Hale-Bopp (1997)



Il nucleo della cometa di Halley di Halley!

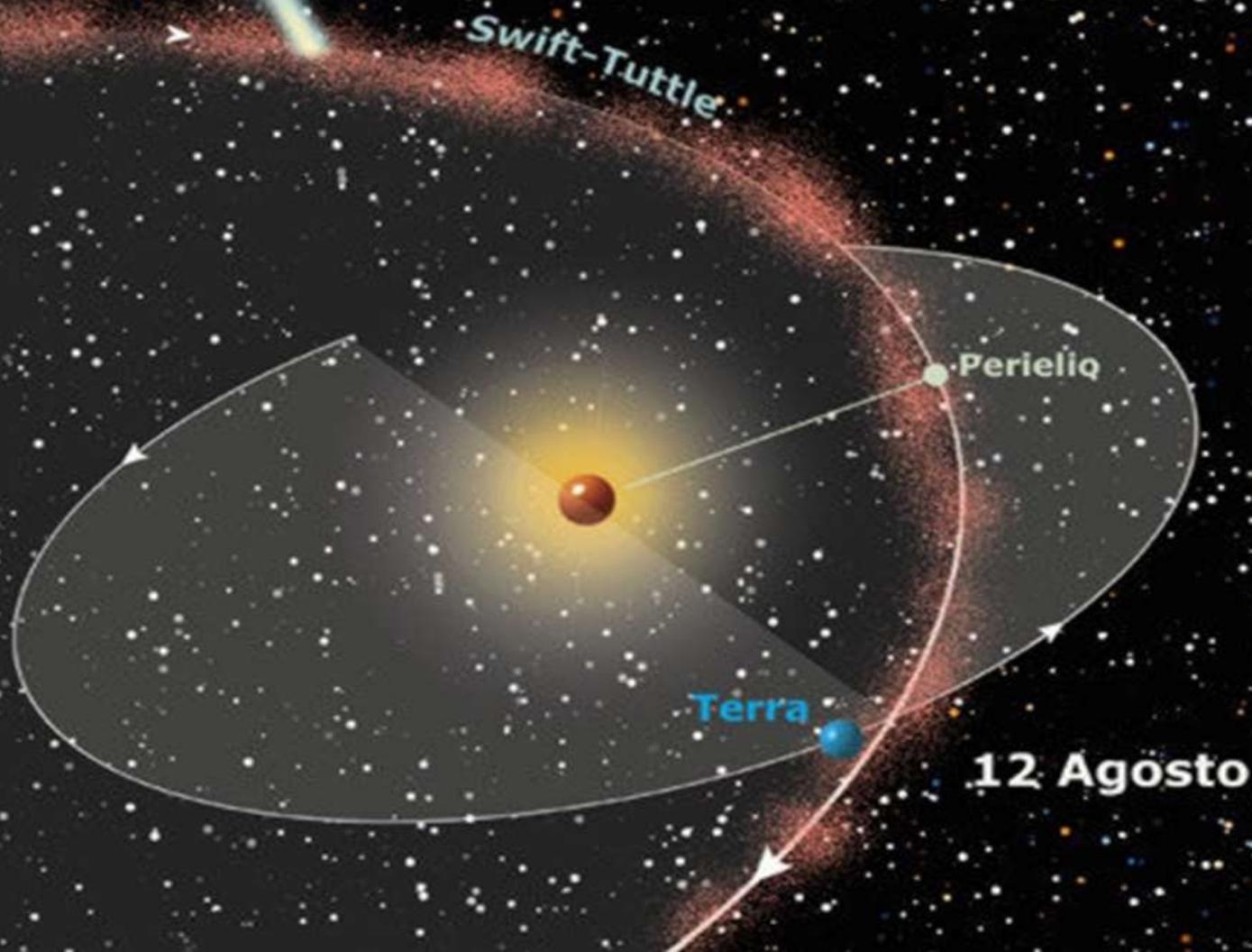
La storica immagine del nucleo della cometa di Halley ripreso dalla sonda dell'ESA "Giotto" il 13 marzo 1986 a 0,89 UA dal Sole.

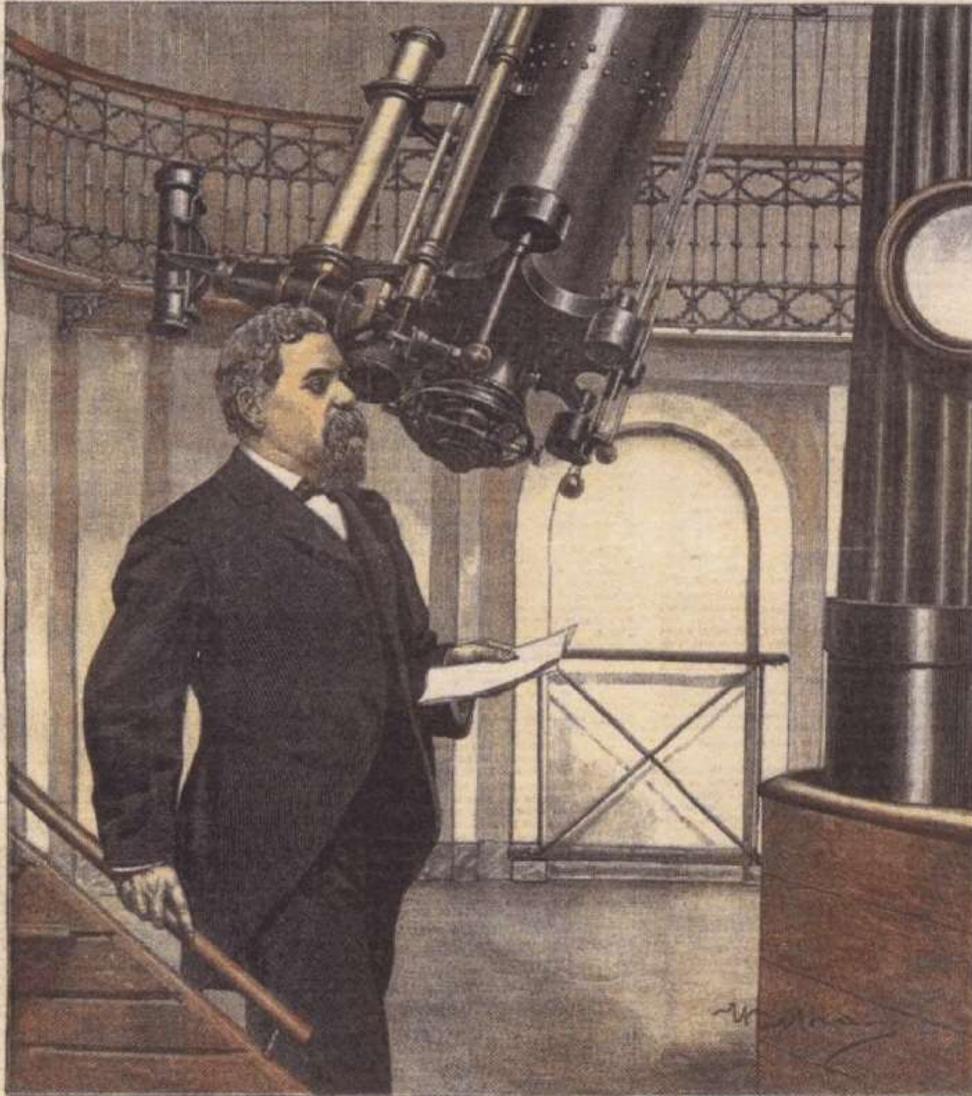
Nella parte esposta al Sole, sono visibili 3 intensi getti di gas e polveri in uscita dal nucleo, di aspetto allungato e irregolare, avente dimensioni di 15,3×7,2×7,2 km.

L'attività dei getti non è distribuita su tutto l'emisfero diurno e il nucleo stesso appare di aspetto bilobato con una topografia superficiale molto irregolare e riflettività variabile da 0,05 a 0,08 secondo la posizione.

Al centro del nucleo è visibile una chiazza biancastra allungata, si tratta di una collina alta 500 m illuminata dal Sole

L'emissione dei meteoroidi cometari e la formazione delle «correnti»





IL GRANDE ASTRONOMO SCHIAPARELLI NELL'OSSERVATORIO DI BRERA.

(Disegno di A. Belloni, da 3 anni)

La connessione fra comete & sciame di meteore

Che esista una **associazione** fra **sciame di meteore** e **comete** è dimostrato dal fatto che le orbite eliocentriche seguite dai meteoroidi che originano gli sciame delle meteore sono molto simili a quelle di alcune delle comete conosciute.

La scoperta che gli sciame di meteore sono strettamente correlati alle orbite delle comete periodiche si deve all'astronomo italiano **Giovanni Virginio Schiaparelli** (1835-1910). Schiaparelli, originario di Savigliano (Cuneo), appena arrivato all'Osservatorio Astronomico di Brera (Milano), osservò e raccolse dati sulla direzione e velocità delle meteore e riuscì a dimostrare che lo sciame delle **Perseidi** seguiva la stessa orbita della cometa **109P/Swift-Tuttle**, mentre quello delle **Leonidi** seguiva quella della **55P/Tempel-Tuttle**.

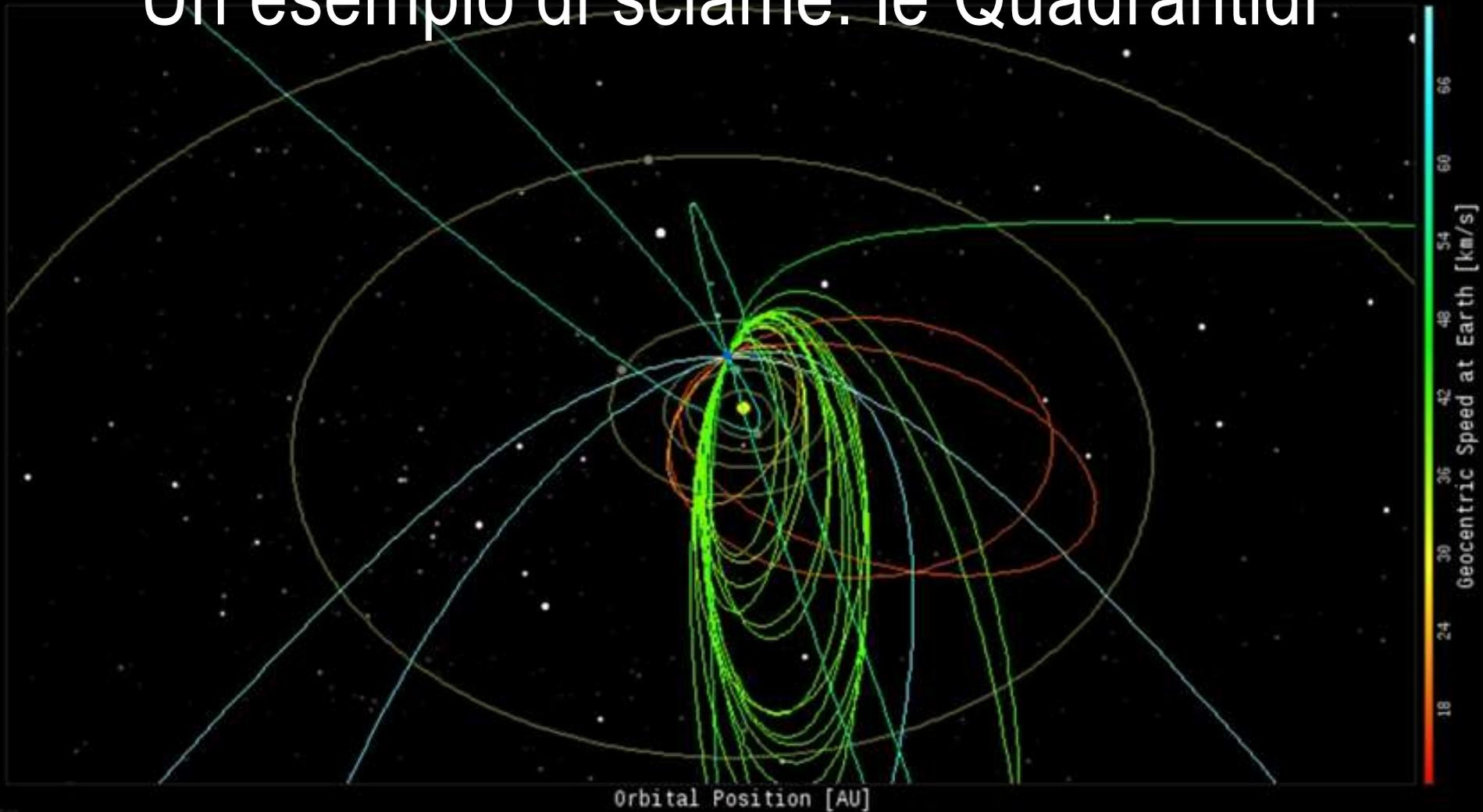
I risultati di Schiaparelli furono esposti in una serie di lettere a padre Angelo Secchi dal 1866 al 1867 e in una pubblicazione tedesca del 1871.

Comete & meteore: gli sciami annuali

Cometa	Periodo (anni)	Sciame associato	Data massimo	del	ZHR
2003 EH1 (C/1490 Y1)	5,5	Quadrantidi	3 gennaio		120
C/1861 G1 (Thatcher)	410	Lyridi	22 aprile		18
1P/Halley	75,7	Eta Aquaridi	5 maggio		65
96P/Machholz (?)	5,2	Arietidi	7 giugno		54
109P/Swift-Tuttle	134	Perseidi	12 agosto		100
21P/Giacobini-Zinner	6,6	Draconidi	9 ottobre		20
1P/Halley	75,7	Orionidi	21 ottobre		25
2P/Encke	3,3	Tauridi	3 novembre		5
55P/Tempel-Tuttle	33,2	Leonidi	17 novembre		15
3200 Phaethon	1,4	Geminidi	13 dicembre		120
8P/Tuttle	13,6	Ursidi	23 dicembre		10

Elenco delle comete associate con i principali sciami annuali di meteore (tranne 3200 Phaethon che è un asteroide). Lo ZHR (Zenithal Hourly Rate) è la frequenza oraria zenitale delle meteore, cioè il numero di meteore che si vedrebbero in condizioni ideali di osservazione

Un esempio di sciame: le Quadrantidi



Le orbite dei meteoroidi appartenenti allo sciame meteorico delle Quadrantidi riprese il 3 gennaio 2014 dalla All Sky Fireball Network della NASA. Il network è formato da 12 camere che monitorano i bolidi nel cielo degli Stati Uniti misurandone la posizione, la velocità e calcolandone l'orbita eliocentrica in tempo reale (NASA).

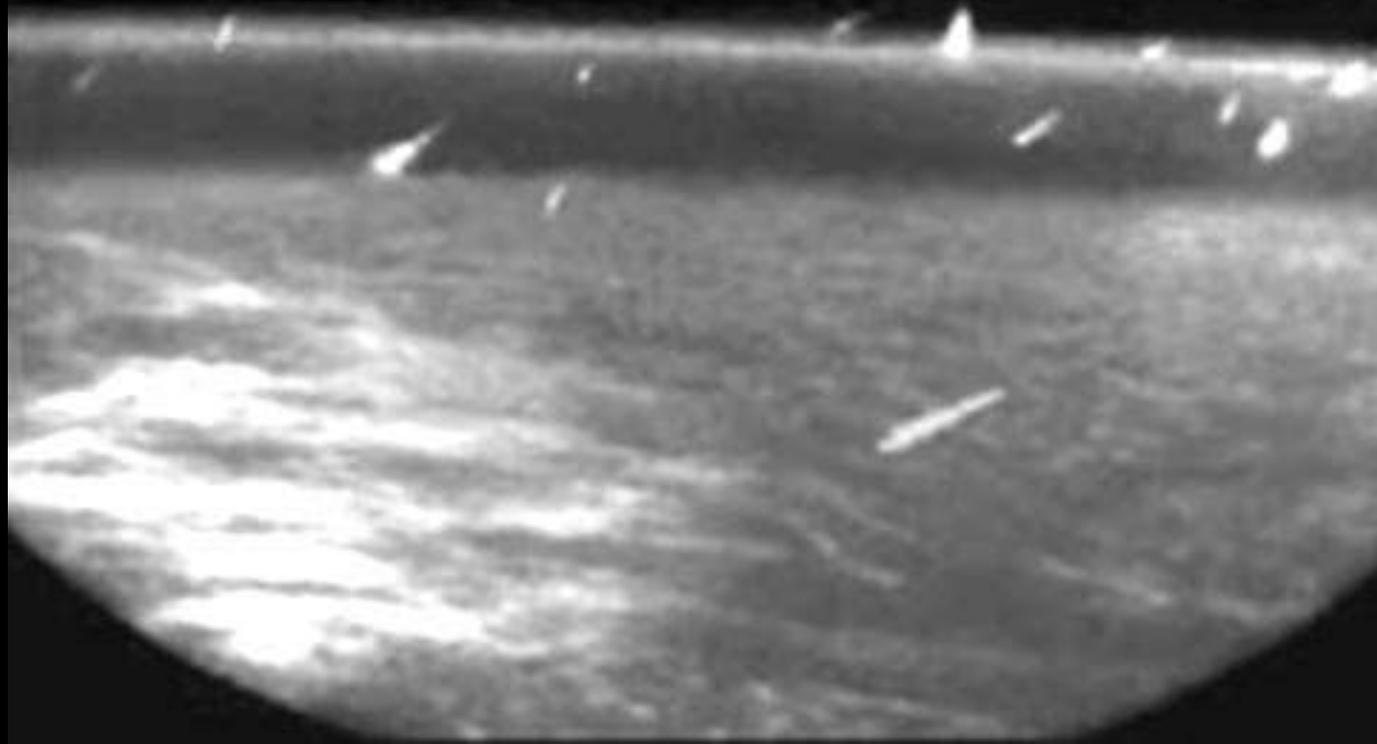
Le Leonidi 2001 dalla Cina



Immagine di Ferruccio
Zanotti, 10 minuti di
esposizione.

Le Leonidi dallo spazio

(MSX satellite, 1997)



Le «tempeste» di meteore

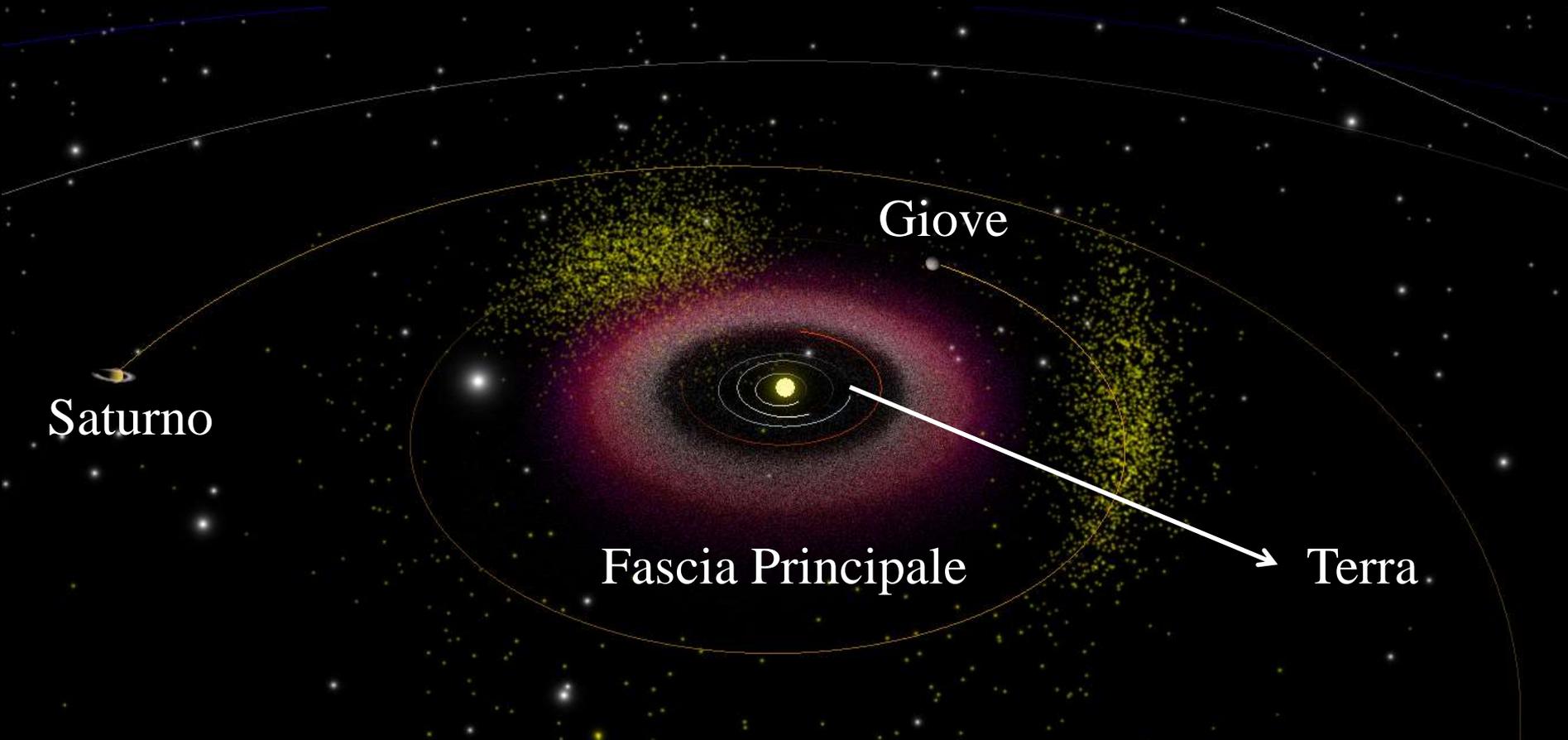


Leonidi, 18 nov. 2001 e 1833

Un esempio di asteroide: (243) Ida

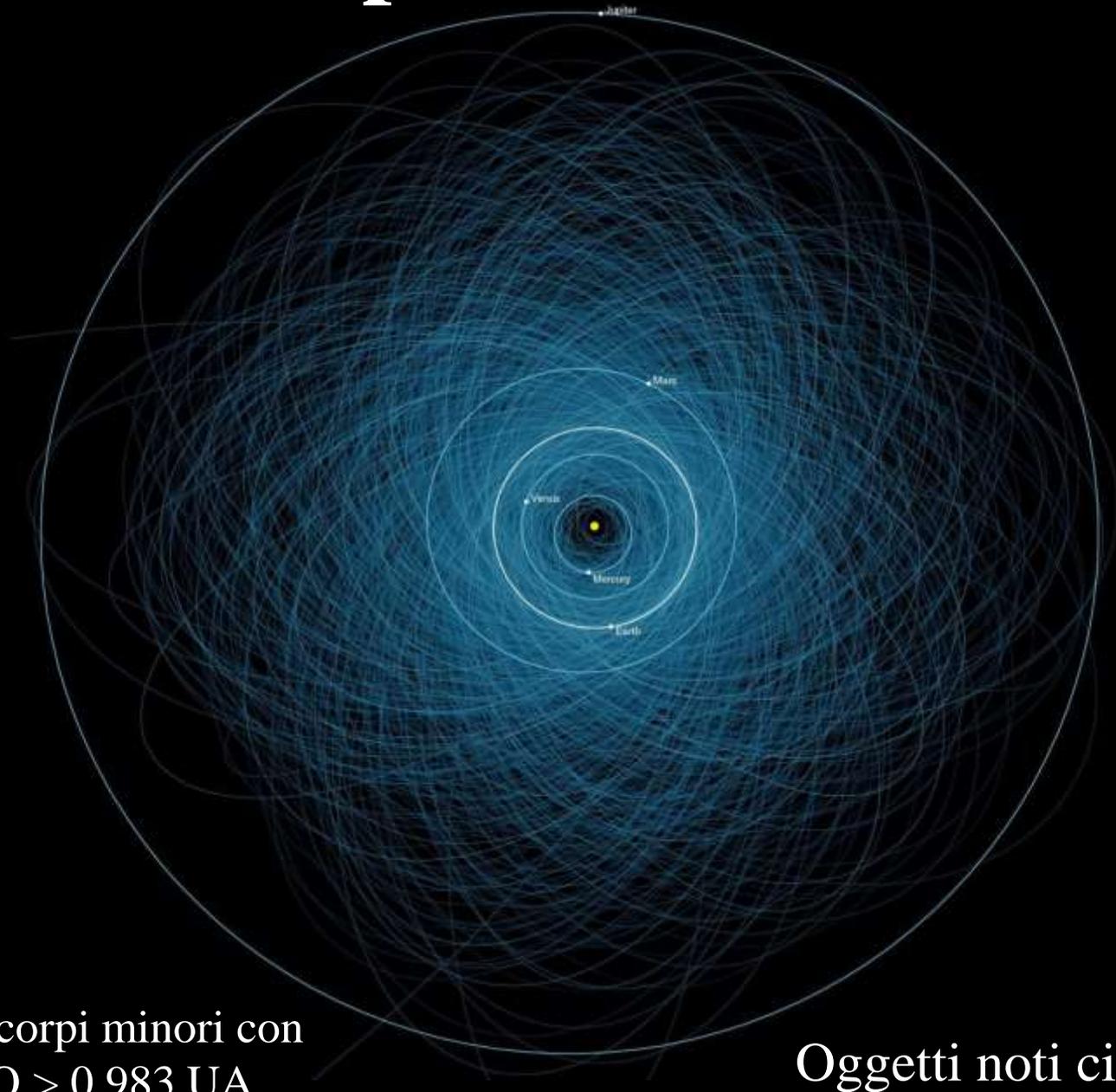


Dove sono gli asteroidi nel Sistema Solare?



Comete ed asteroidi sono oggetti relativamente primordiali, i resti dei planetesimi da cui si sono formati i pianeti e i loro satelliti 5 miliardi di anni fa.

Asteroidi «pericolosi»: i N.E.A.



I NEO sono i corpi minori con $q < 1,3 \text{ UA}$ e $Q > 0,983 \text{ UA}$.

Oggetti noti circa 15.000



1566 Icarus
17 giugno 2015, 21:11 UT
Immagine di A. Carbognani (OAVdA)

Il bolide del 10 agosto 1972



Il 10 agosto 1972 un NEA di circa 10 m di diametro entra ed esce dall'atmosfera terrestre raggiungendo l'altezza minima di 60 km di quota alla velocità di 15 km/s (Jackson Lake, Wyoming, USA).

Il bolide di Chelyabinsk (2013)



Caduta di un asteroide di 20 m di diametro presso la città russa di Chelyabinsk il 15 febbraio 2013. Velocità media di 19 km/s, esplosione a 30 km di quota con un rilascio di energia cinetica pari a 500 kt (rapporto=30)



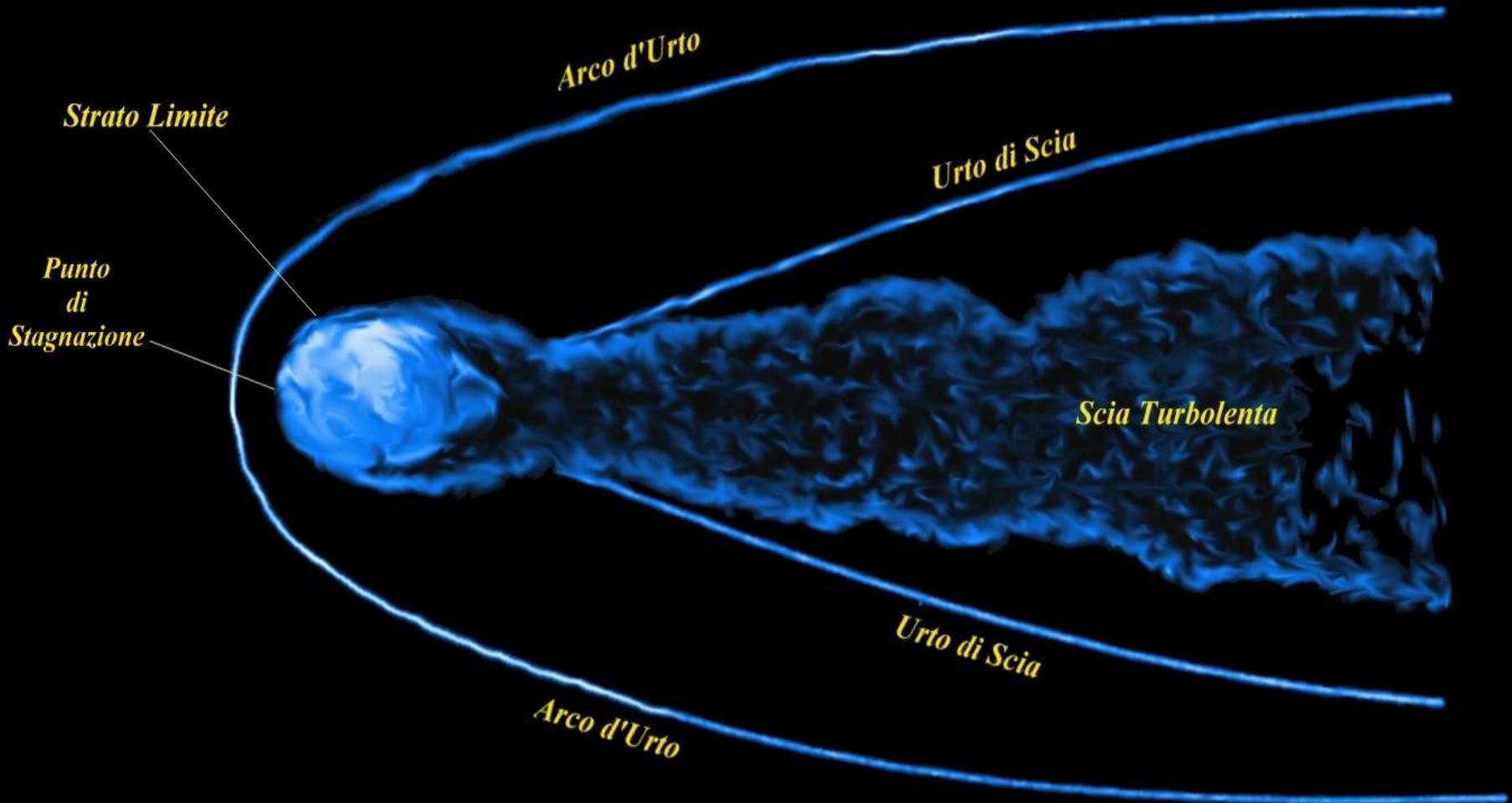
Meteosat 10

Fisica dei solidi

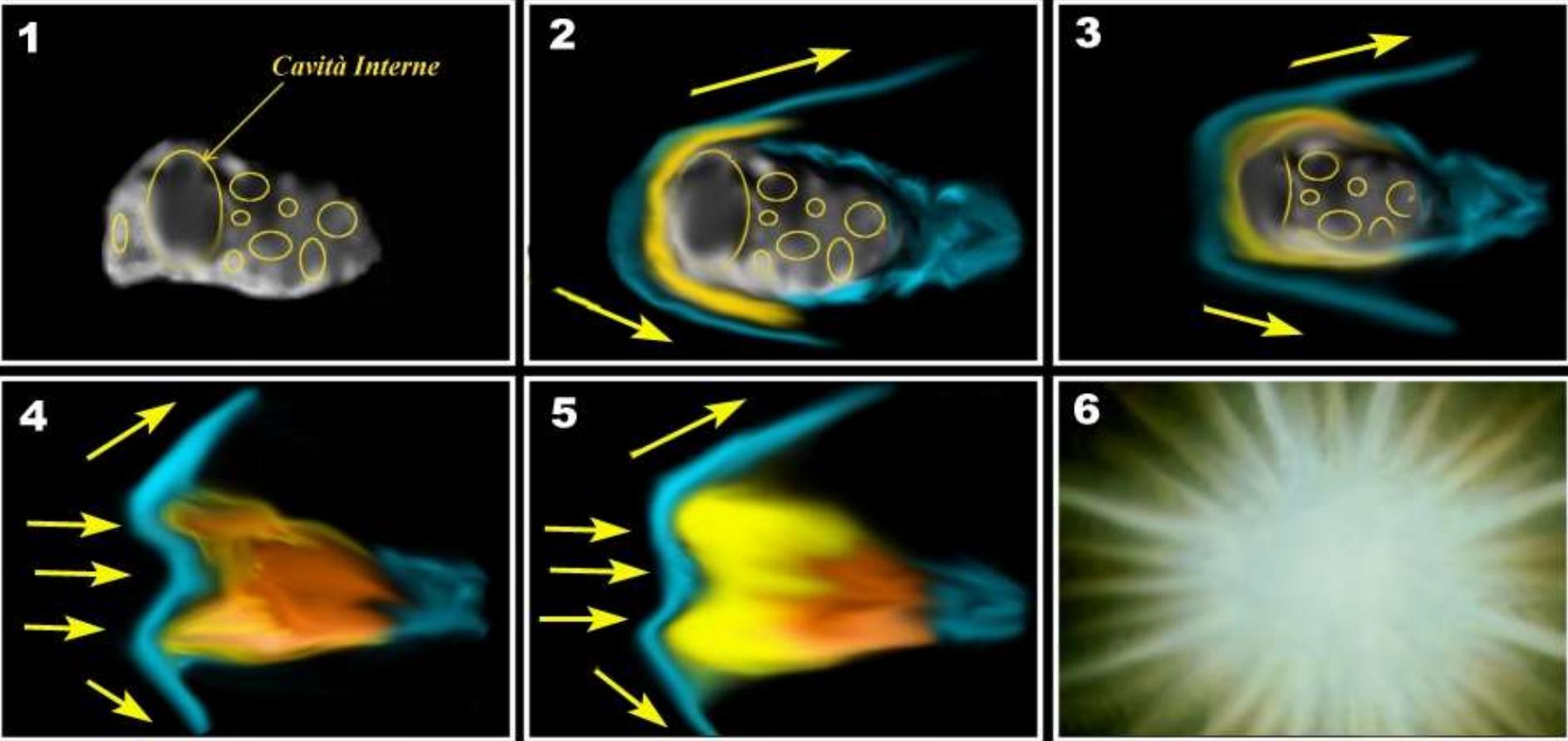
Tappe dell'ingresso in atmosfera:

- Riscaldamento per attrito atmosferico
- Inizio ablazione della superficie per $T > 2500 \text{ K}$
- Formazione della meteora
- Eventuale frammentazione, suoni elettrofonici
- Rallentamento, cessa l'ablazione, al di sotto dei 3 km/s inizia la fase di "volo buio"
- Impatto al suolo. Per una velocità geocentrica di 15 km/s la velocità di impatto è compresa fra 10 e 100 m/s
- Per piccoli asteroidi (diametro $> 100 \text{ m}$), non c'è la fase di volo buio e nell'impatto si forma un cratere.

Schema di un tipico bolide



Possibile meccanismo di frammentazione di un grosso meteoroide



Frammentazione del bolide di Peekskill



9 ottobre 1992, Peekskill, New York

Condrite di Peekskill (9 ottobre 1992)

Frammento di 11,8 kg



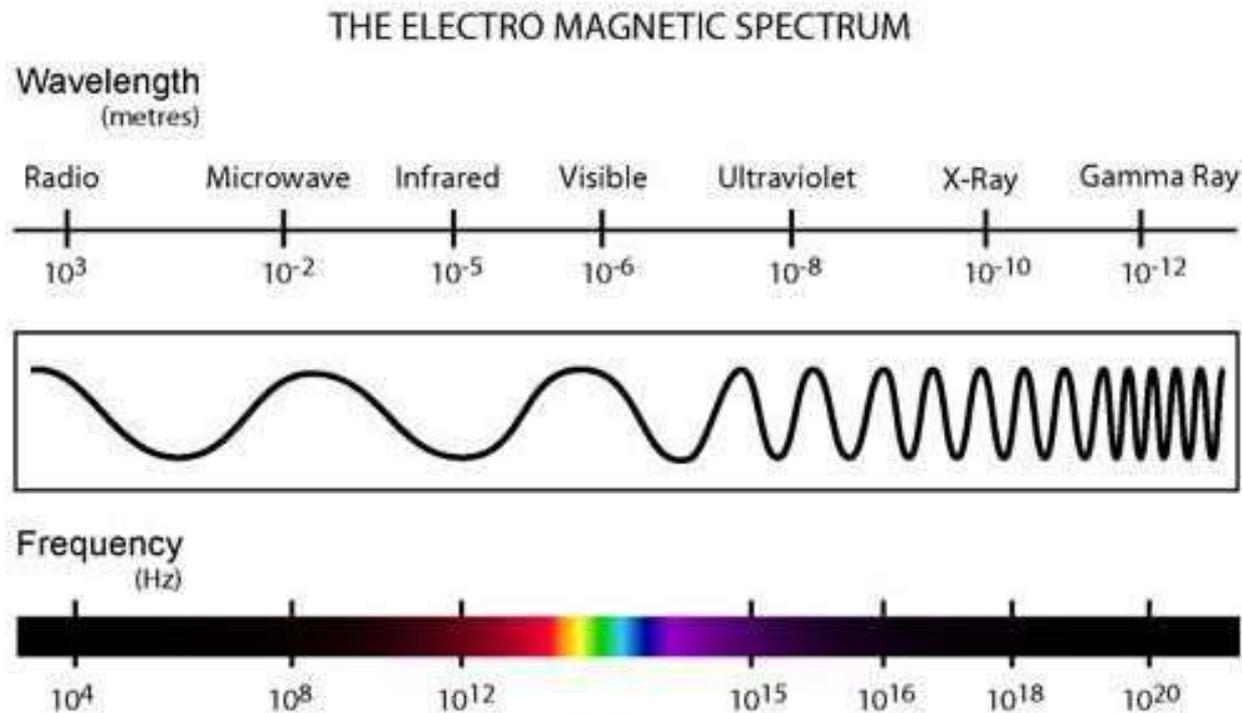
Il colore rosso al di sopra della crosta di fusione nera è la vernice dell'auto su cui è caduta

Cosa possiamo
misurare di un bolide?

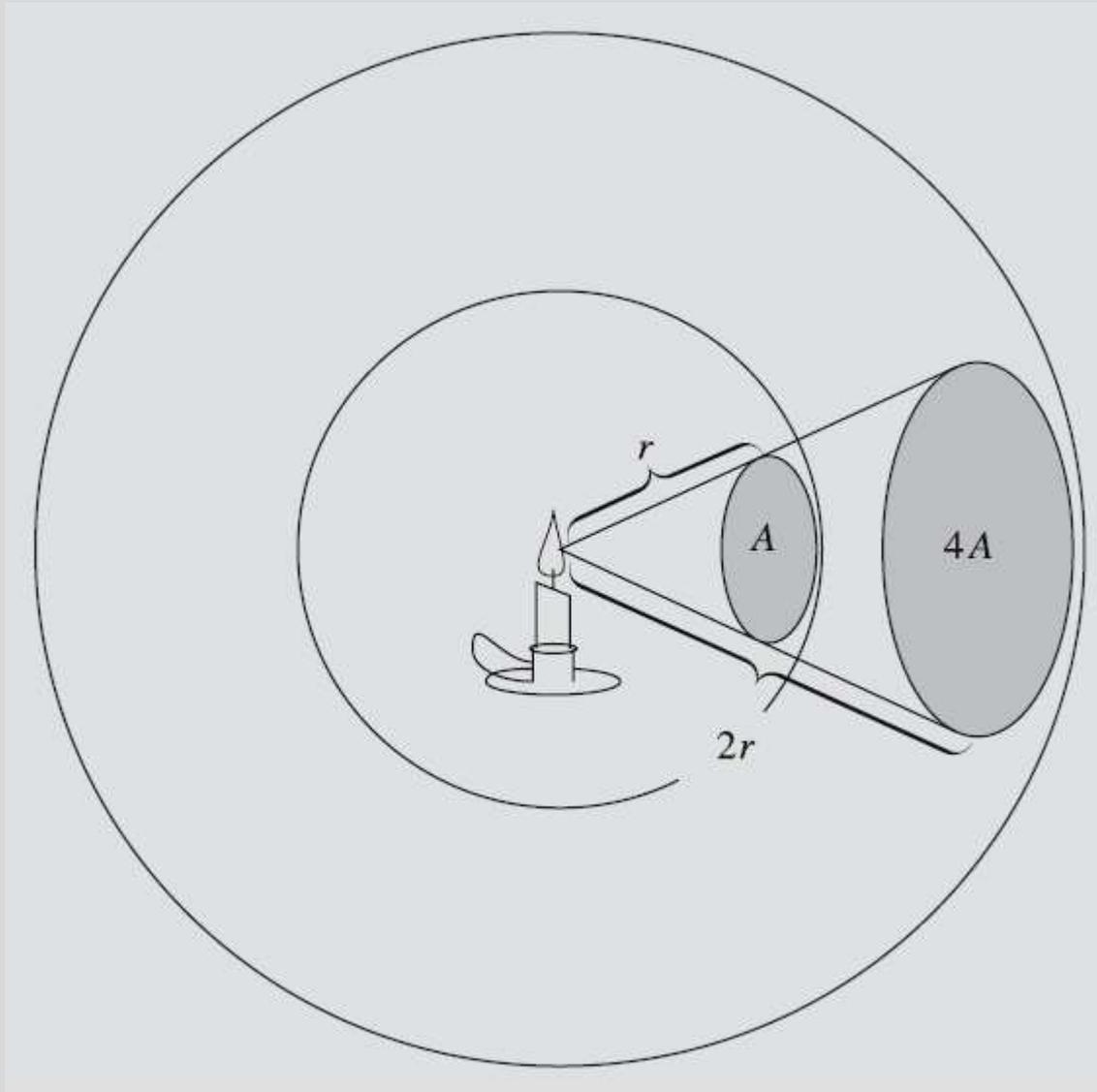
La traiettoria che
percorre in atmosfera,
la sua velocità e...
la sua luminosità!

La misura della luminosità: la fotometria

In astrofisica con il termine **fotometria** si indica lo studio della **radiazione ottica** emessa da un corpo celeste. Poiché i corpi celesti emettono radiazione elettromagnetica anche a lunghezze d'onda non visibili, il termine da usare in questo caso è **radiometria**.



La densità di flusso



Una tipica sorgente luminosa come una stella di solito irradia in modo isotropo e se f è la quantità di energia che arriva per unità di tempo e superficie dalla sorgente a distanza r , la luminosità totale della stella è data da:

$$L = 4\pi r^2 f$$

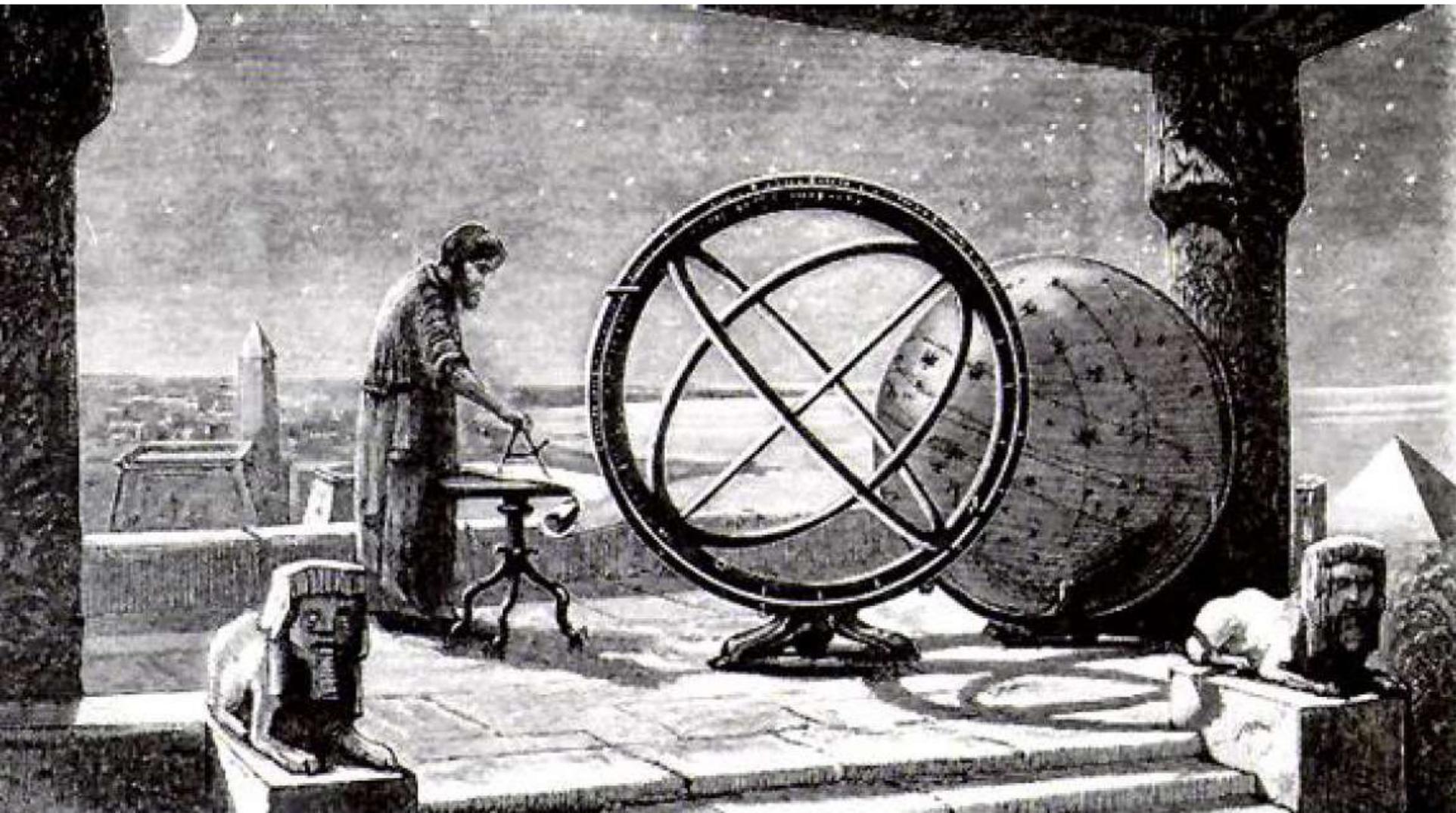
Da cui:

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}$$

Quindi la densità di flusso va come l'inverso del quadrato della distanza.

$$[L] = \text{Joule/s} = \text{Watt}$$

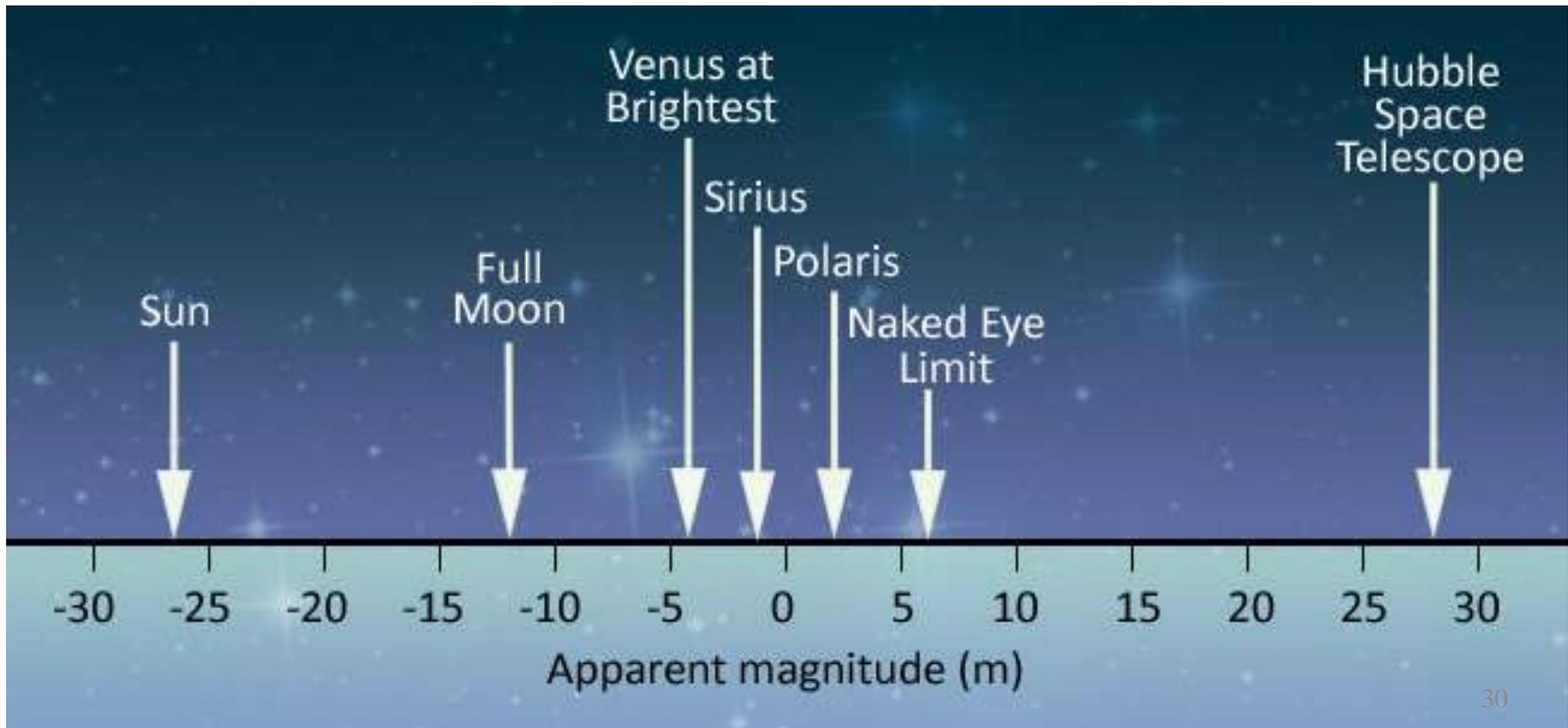
Cenni storici: le magnitudini di Ipparco



Una rozza fotometria visuale fu introdotta per la prima volta dall'astronomo greco **Ipparco di Nicea** (190-120 a.C. circa). **Ipparco compilò il suo catalogo stellare di 1080 stelle esprimendone la luminosità in magnitudini** (Nicea è l'attuale città turca di Iznik).²⁹

La magnitudine apparente

Nella scala di Ipparco le stelle di prima magnitudine erano quelle più brillanti come Vega, Capella, Arturo, mentre quelle appena visibili ad occhio nudo erano di sesta. Una definizione più quantitativa di magnitudine apparente venne data nel **1856** dall'astronomo inglese **Robert Pogson** (1829-1891).



La formula di Pogson

Pogson **definì** il rapporto di luminosità fra due stelle che differiscono di una magnitudine come $\sqrt[5]{100} = 2,512$, ed espresse in modo quantitativo la scala delle magnitudini (**sensazione**), legandole al flusso luminoso f ricevuto al suolo (**stimolo**), con la relazione:

$$m = C - 2,5 \text{Log}_{10}(f)$$

Qui **C** è una **costante** che segna il “**punto zero**” della scala, mentre f è il flusso luminoso ricevuto dalla stella, misurato in Watt/m^2 . La relazione precedente si può calibrare assegnando un valore di m a una stella assunta come riferimento e misurandone il flusso, come ad esempio Vega che è, quasi per definizione, di magnitudine 0. Esprimendo C con una stella di riferimento si trova:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \text{Log} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)$$

Con la definizione di Pogson, 2 stelle che differiscono di 5 magnitudini hanno un rapporto fra i flussi esattamente pari a 100.

La magnitudine assoluta

Quella di cui abbiamo parlato ora è la **magnitudine apparente**, cioè la **luminosità come appare** che dipende, oltre che dalla luminosità intrinseca della sorgente, anche dalla distanza a cui si trova la stella. Se s'immagina di portare tutti i corpi celesti a una **stessa distanza** e di misurarne la magnitudine si trova quella che gli astronomi chiamano **magnitudine assoluta**. La distanza assunta come riferimento è di 32,6 anni luce pari a 10 parsec.

Per definizione, alla distanza di un parsec il raggio orbitale della Terra sottende esattamente un secondo d'arco e vale l'equivalenza
 $1 \text{ parsec} = 3,26 \text{ anni luce}$.

Solo **confrontando le magnitudini assolute** di due stelle si può sapere quale effettivamente sia la più **intrinsecamente luminosa**.

Magnitudine assoluta e distanza

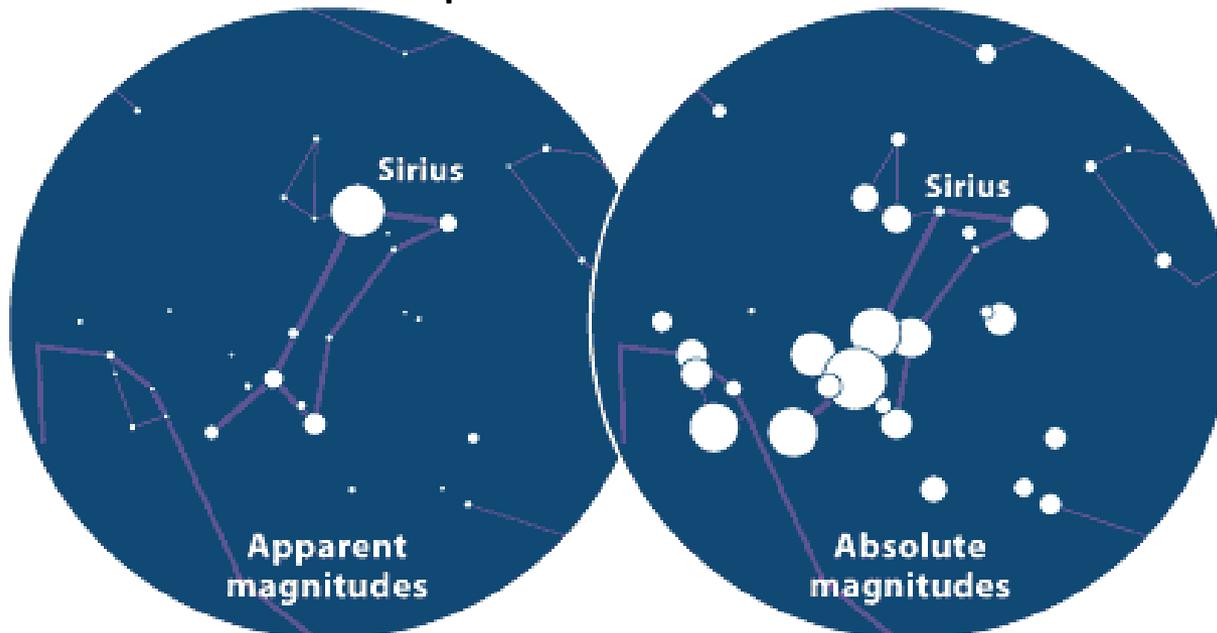
La relazione che lega magnitudine apparente, distanza e magnitudine assoluta è:

$$M = m + 5 - 5 \log_{10}(d)$$

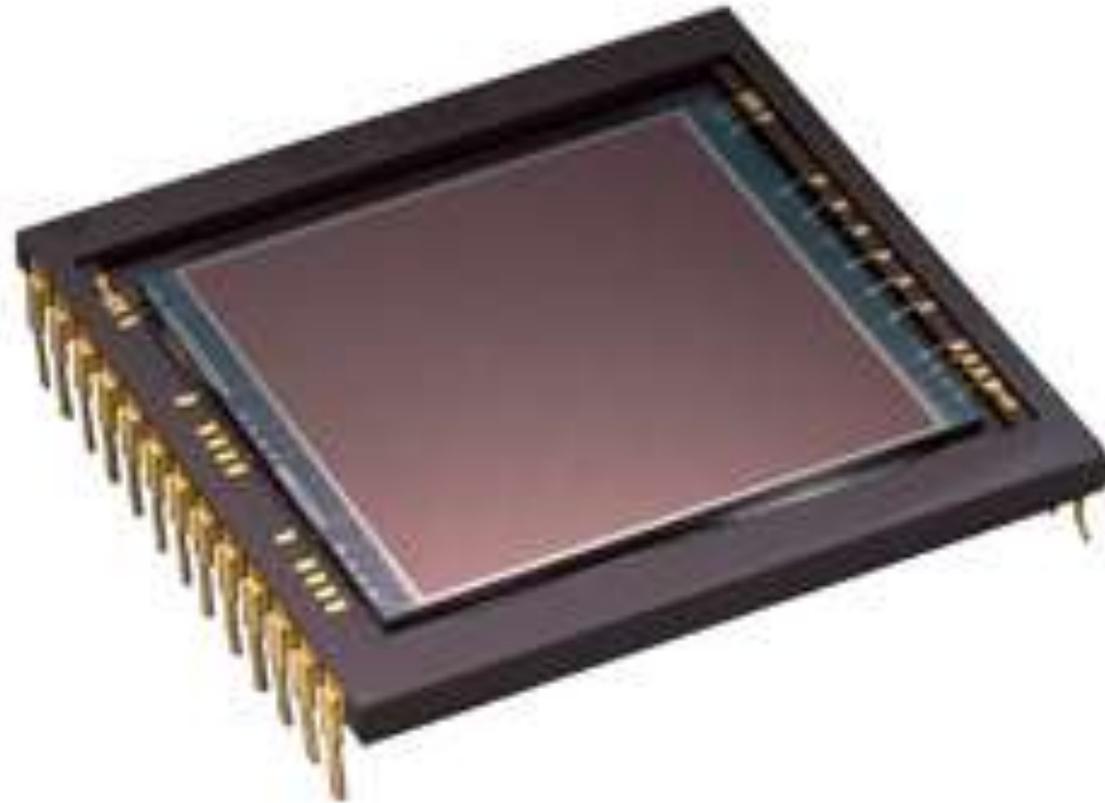
M = magnitudine assoluta

m = magnitudine apparente

d = distanza della stella in parsec



Il CCD (Charge-Coupled Device)

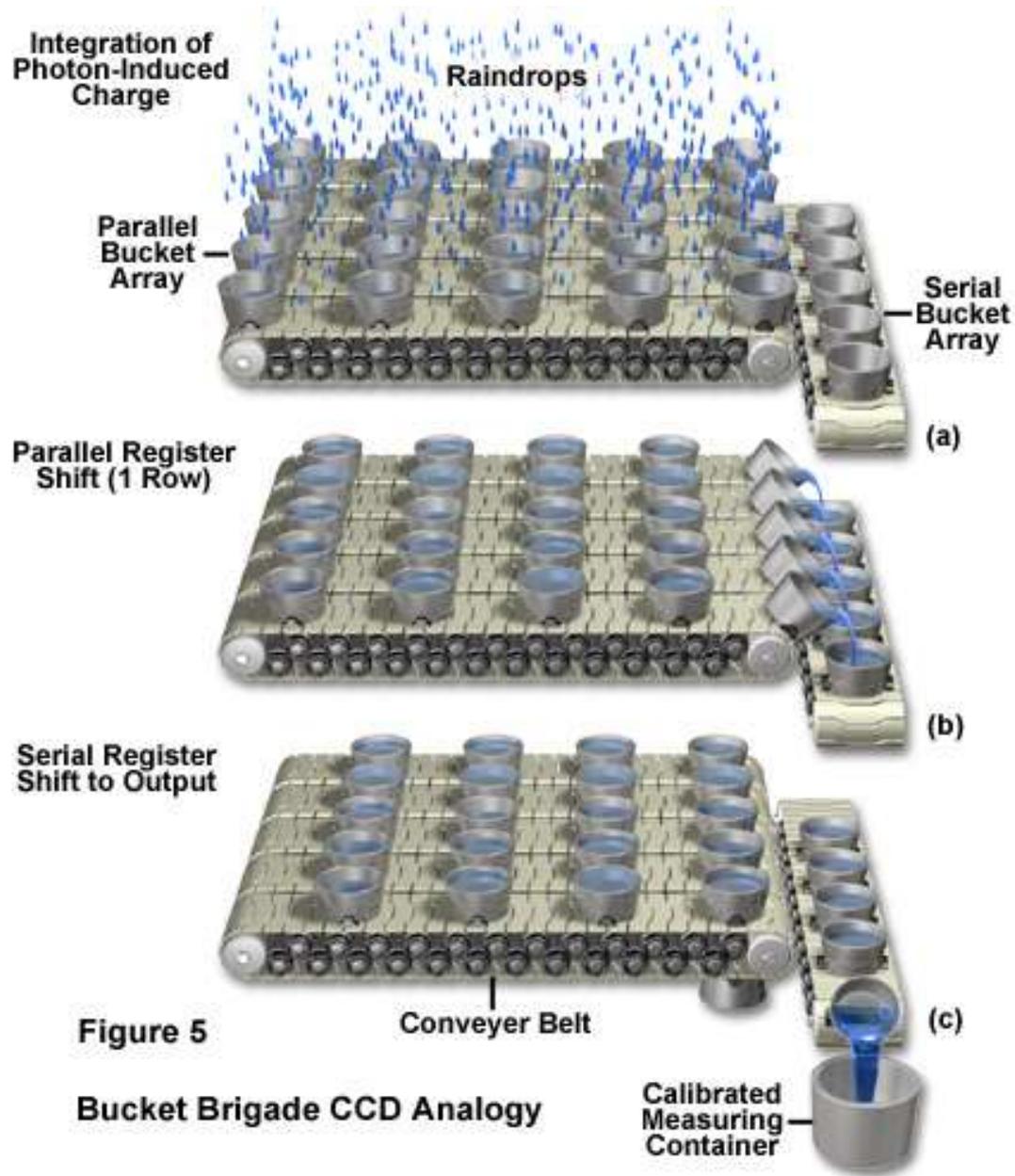


Il CCD fu ideato nei Bell Laboratories da Willard S. Boyle e George E. Smith nel **1969**. Si tratta di un **chip a base di silicio** dotato di una matrice di **elementi fotosensibili** chiamati **pixel**, i quali possono avere delle dimensioni variabili da 5 a 27 micron, per un numero totale di svariati milioni di elementi sullo stesso chip. Per questo dispositivo i due inventori hanno ricevuto il Premio Nobel per la fisica nel 2009.

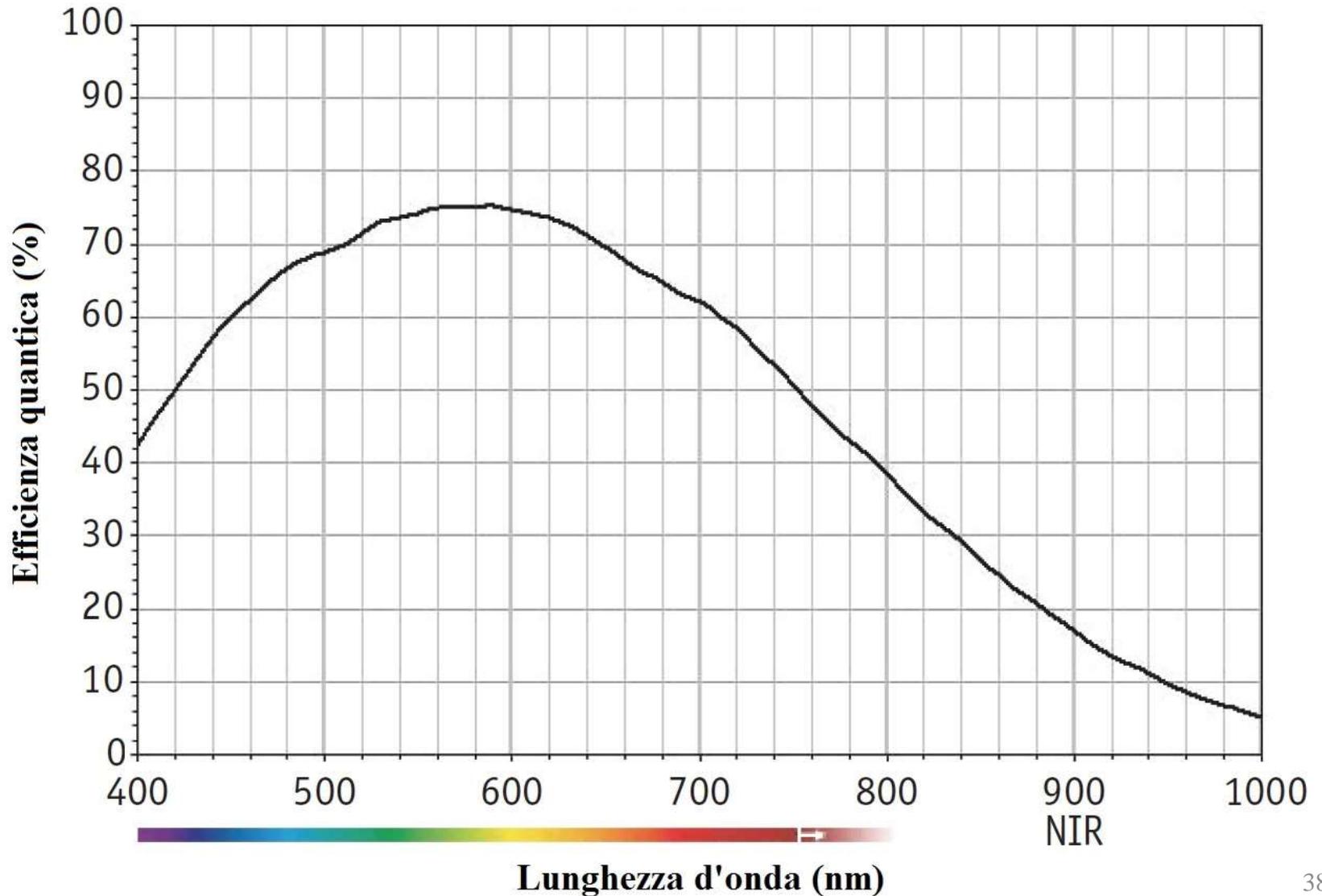
Un esempio di camera CCD



Principio di funzionamento di un CCD



La curva di efficienza quantica di un tipico CCD



INAF-OATo



Alcune camere CCD all-sky della rete PRISMA

OAVdA



La magnitudine strumentale

La misura della **magnitudine strumentale** di un corpo celeste si può ottenere riprendendo una immagine CCD dell'oggetto.

Il CCD è un dispositivo a risposta lineare quindi l'intensità I di una stella (ottenuta sommando l'intensità di tutti i pixel che compongono l'immagine della stella), espressa in elettroni estratti ($\text{ADU} \cdot \text{Gain}$), è direttamente proporzionale al flusso luminoso ricevuto. Al segnale S va ovviamente tolto il valore del fondo cielo che indichiamo con b :

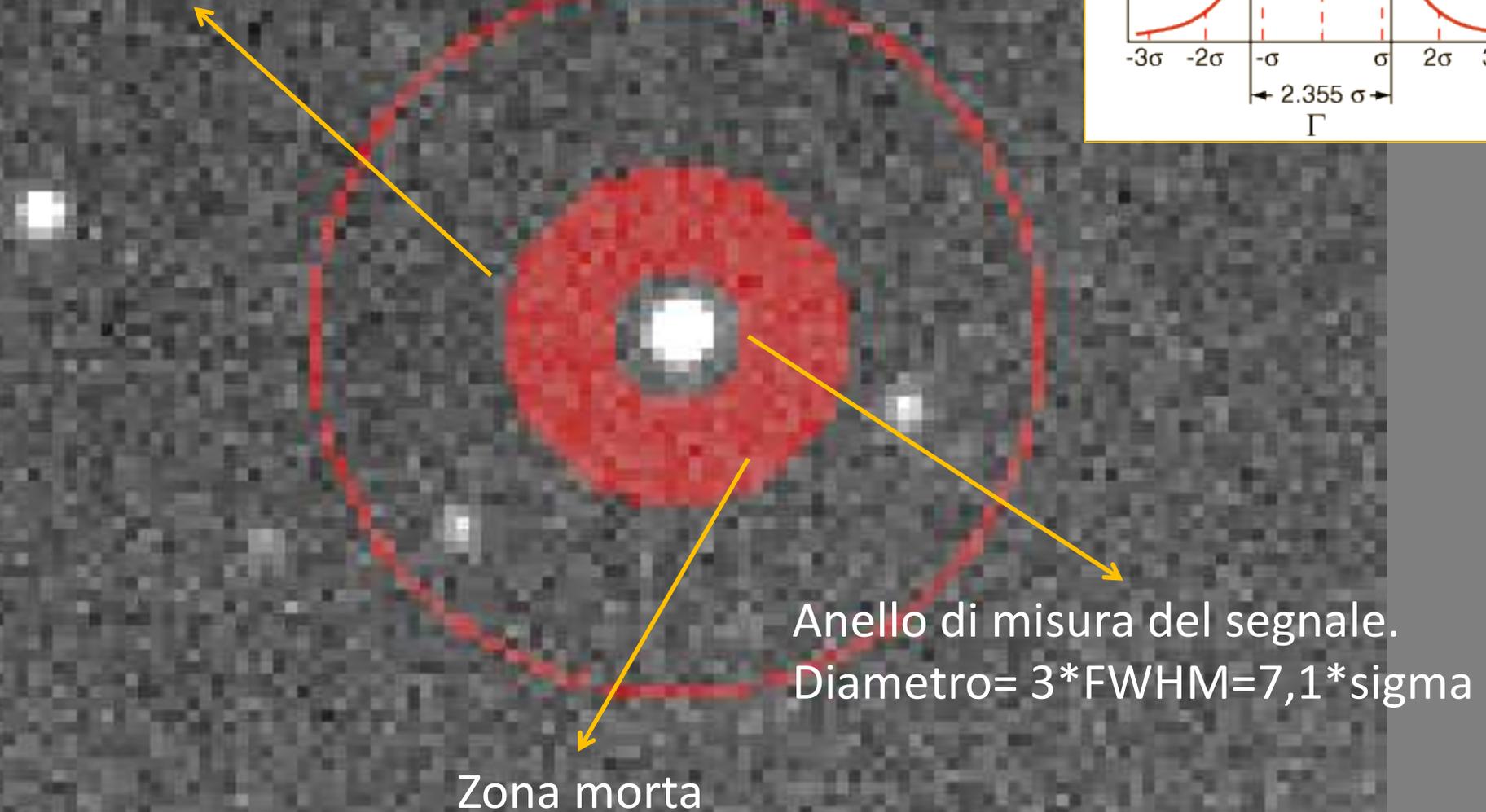
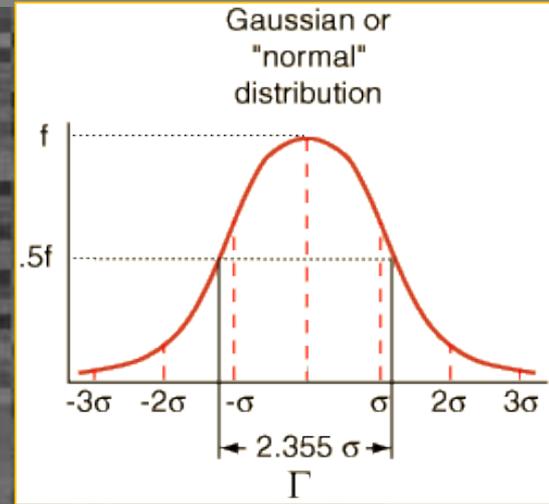
$$I = S - b$$

$$m_{str} = -2,5 \log \left(\frac{I}{\Delta t} \right)$$

Qui Δt è il tempo di posa dell'immagine. In questo modo si possono confrontare magnitudini strumentali riprese con tempi di esposizione diversi.

La fotometria d'apertura

Anello di misura del fondo cielo



Il software per la misura della magnitudine strumentale : Aperture Photometry Tool

Aperture Photometry Tool v 2.6.4

Open Image FITS Header Thumbnail About & Help Exit

Lower bound of stretch (D.N.) +0.000000 Upper bound of stretch (D.N.) +142.00

Switch to Bounds 0.3%/99.7% Image Histogram

Adjust stretch min. (percentile of set range) Adjust stretch max. (percentile of set range)

Linear Stretch

Click on Big Button on Right to Change Aperture Attributes & Photometry Radii:

Aperture Slice Source Scatter Sky Scatter Hide Aperture

Curve of Growth Radial Profile Sky Histogram Color-Toggle

VALUES UNDER CURSOR

Pixel (X, Y) = 455, 463

(R.A., Dec.) = 16h, 70m

Pixel value = +14,000 D.N.

Magnify Image [1] 5x 10x 20x

APERTURE MEASUREMENTS

Aperture (X, Y) = 453 465 Snap

Centroid (X, Y) = 452.78, 464.87

Centroid (R.A., Dec.) = 16h, 70m

Counts in aperture = +4569.6 D.N.

APERTURE PHOTOMETRY RESULTS

Photometry data units: D.N.

Sky background (model) = -30,000 (B)

Sky scale, sigma = +24,500, +22.211

Source intensity (sky subtracted) = +2198.4

Source uncertainty = +247.18

Magnitude (dimensionless) = -3.3553

Mag. uncertainty (dimensionless) = +0.1221

More Settings Recompute Photometry

Save Results List Results Plot Results

Blink Refresh 1 Refresh 2

Source List Pick/Zip Screenshot

Magnify: 1x 5x 10x 20x Find Aperture

Image [1] Name: 16h_70m [1] (primary image)

Select source algorithm:

- Model 0 = No aperture radial-profile interpolation
- Model 1 = Interpolate only for NaN/Inf/outlier/saturated pixels
- Model 2 = Interpolate for all aperture pixels
- Model A = No sky-background subtraction
- Model B = Sky-annulus median subtraction
- Model C = Custom sky subtraction (below)
- Model D = Sky-annulus average subtraction
- Model E = Sky-annulus mode subtraction
- Model F = Non-sky-annulus local mode subtraction

Select sky algorithm:

Custom sky value (D.N.):

Use centroid in photometry calculation?

Automatically snap aperture to centroid?

Reject source values (D.N.) less than:

Reject source values (D.N.) greater than:

Reject sky values (D.N.) less than:

Reject sky values (D.N.) greater than:

BUNIT:

Default image-data title:

Gain (electrons per D.N.):

Image-data-to-D.N. conversion factor:

Aperture correction:

Magnitude zero point:

Depth of coverage:

Perform new image-data conversion (see settings below)?

New image-data conversion factor:

Image-data units after new conversion:

Image-data title after new conversion:

Photometry Major Radii

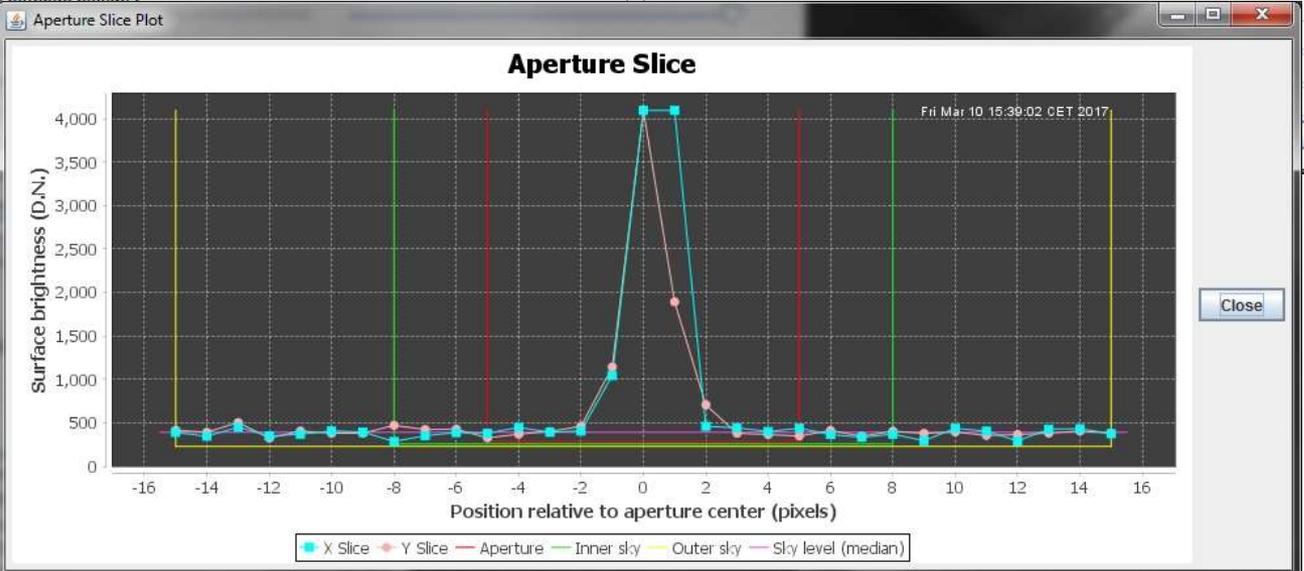
Centroid radius (pix.):

Aperture attributes:

Inner-sky radius (pix.):

Outer-sky radius (pix.):

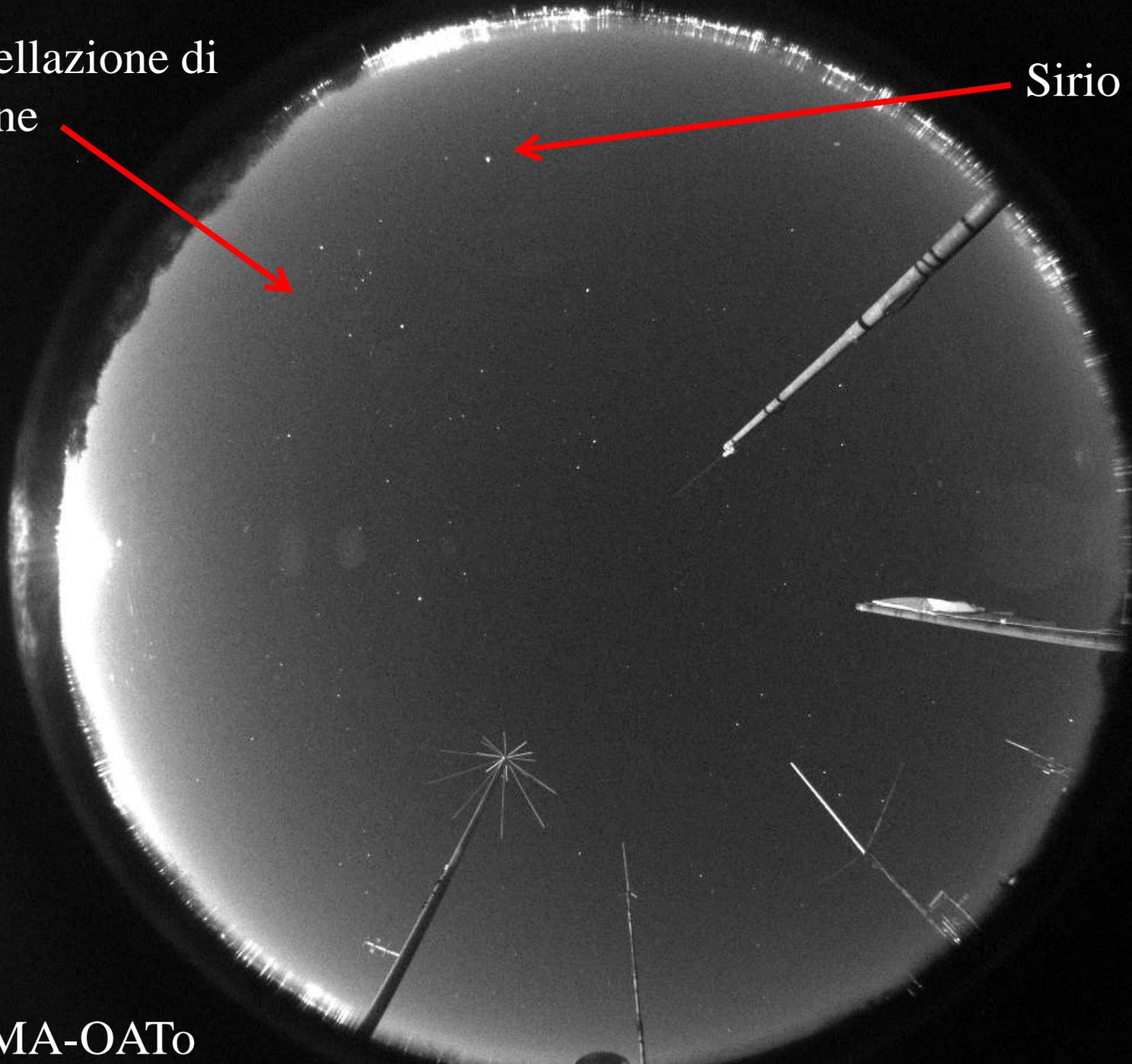
1.0000



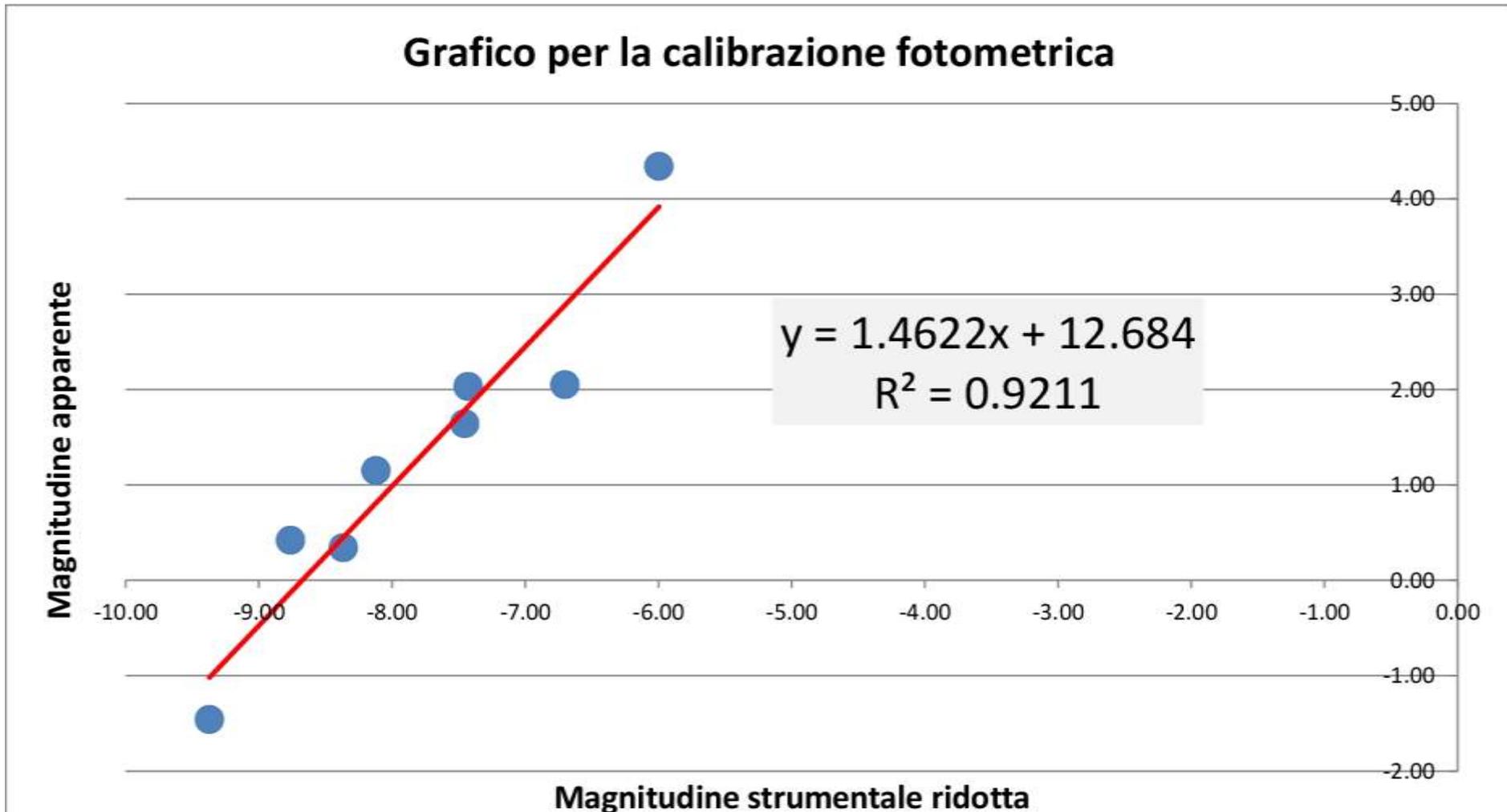
Costellazione di
Orione

Sirio

PRISMA-OATo

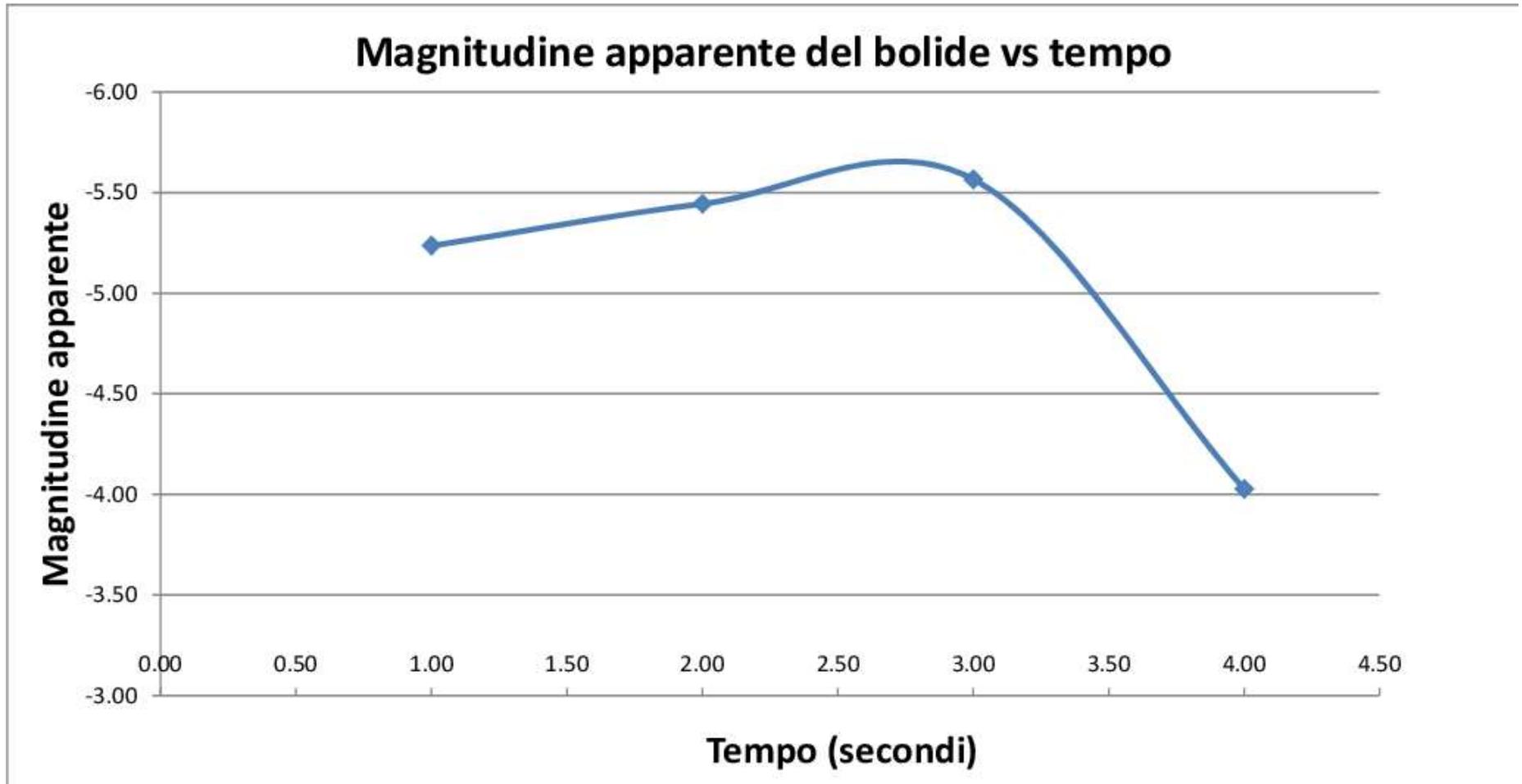


La calibrazione fotometrica



Una volta misurata la **magnitudine strumentale del target**, la **magnitudine apparente** può essere ottenuta usando come riferimento fotometrico stelle di magnitudine nota presenti nella stessa immagine o in immagini riprese nelle stesse condizioni con lo stesso strumento.

Il risultato: la curva di luce del bolide



Triangolando la traiettoria, dalla magnitudine apparente si può risalire a quella assoluta e si può stimare la dimensione del meteoroido originario.

Un po' di bibliografia

