



# Rotazioni in Astrofisica

Paolo de Bernardis

Dipartimento di Fisica, La Sapienza

25/11/2011

Le leggi che avete visto in azione in  
laboratorio ...

Funzionano anche nello spazio,  
ed in galassie lontanissime,  
nello spazio e nel tempo.

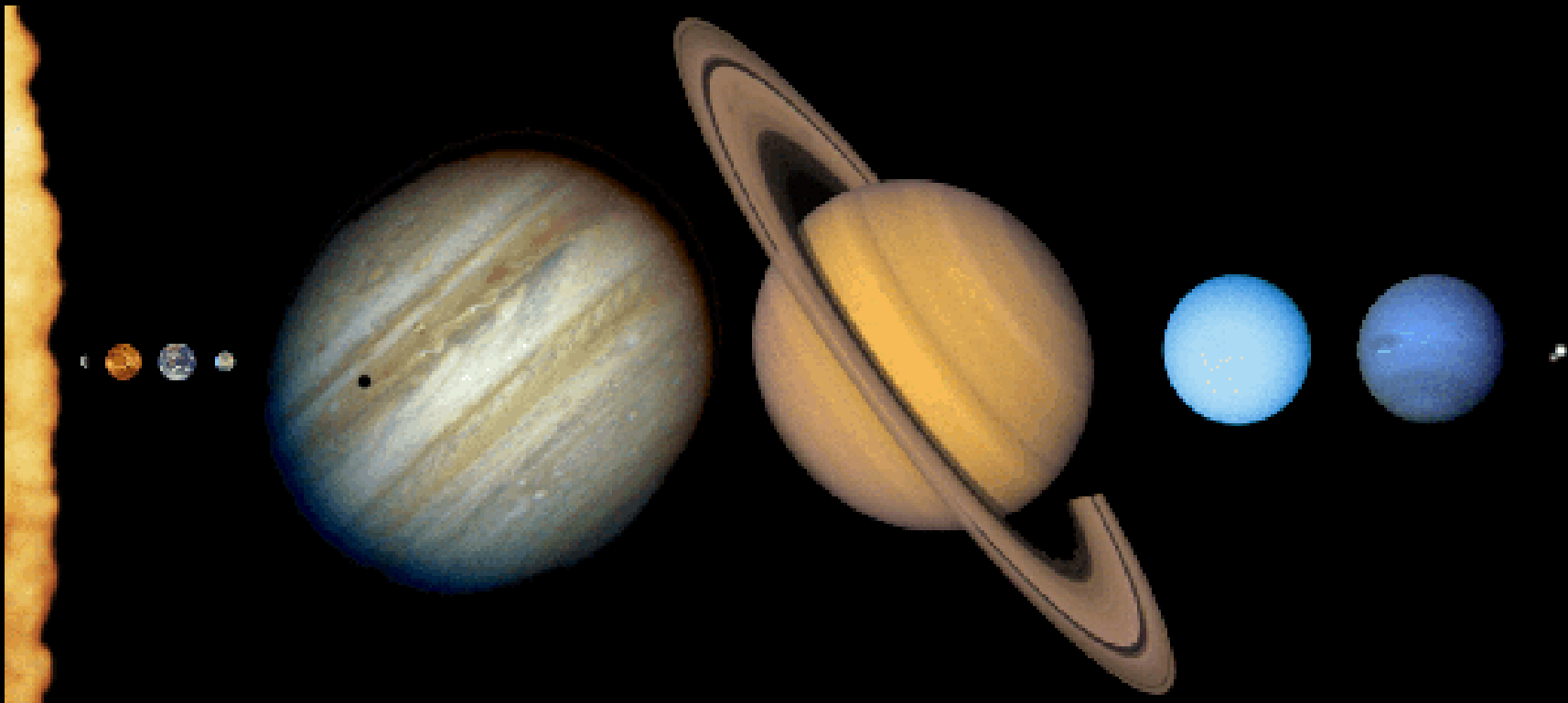
# Rotazione terrestre

La terra ruota su se stessa. La rotazione terrestre e' responsabile dell'alternarsi di giorno e notte. Apparentemente il cielo ruota intorno al polo nord celeste. Energia cinetica:  $2.5 \times 10^{29}$  J , momento angolare:  $1.2 \times 10^{34}$  Kg m<sup>2</sup>



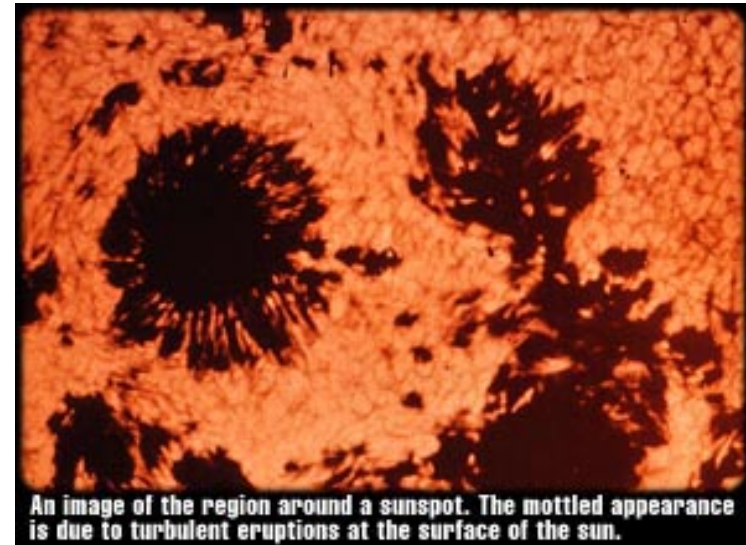
# Rotazione dei pianeti

- Tutti i pianeti ruotano su se stessi
- Urano ha l'asse di rotazione molto inclinato, a volte punta verso il Sole



# Rotazione del Sole - 1

- Evidenziata dalle macchie solari
- Nota fin dall' antichita', famose le osservazioni di Galileo
- Il periodo e' di circa 24 giorni all' equatore, e 36 giorni vicino al polo
- Rotazione differenziale, il Sole non e' un corpo rigido



# Rotazione del Sole - 2

- Esposizione multipla ottenuta con lo strumento MDI del satellite SOHO
- Sono sovrapposte le immagini del sole in alcuni giorni dell'agosto 1999
- I gruppi di macchie ruotano con la fotosfera

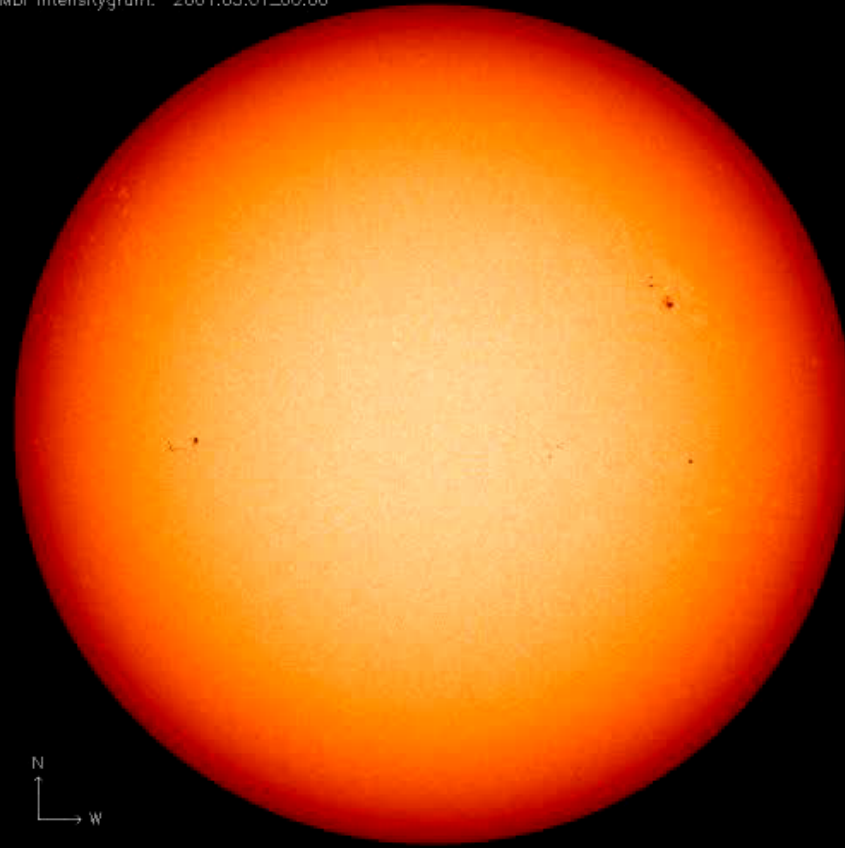
SOHO/MDI Full-Disk  
Continuum Image



Observed:  
August 1999

LS

MDI Intensitygram: 2001.03.01\_00:00



## Conservazione del momento angolare: le pulsar - 1

- Le **stelle normali ruotano**.
- Quando finisce il combustibile nucleare, sparisce la pressione interna e la stella si puo' contrarre fino a diventare una **stella di neutroni**, un oggetto compatto con diametro  $D = 10$  km
- Conservazione del momento angolare:  
 $I\omega = \text{costante}$
- Ma  $I$  va come  $D^2$  e  $\omega$  va come  $1/T$ , quindi  $D^2/T$  deve rimanere costante da prima a dopo il collasso.



## Conservazione del momento angolare: le pulsar - 2

- Il nuovo periodo puo' essere ricavato da

$$D_{\text{nuovo}}^2/T_{\text{nuovo}} = D_{\text{vecchio}}^2/T_{\text{vecchio}}$$

- Con diametro  $D_{\text{vecchio}} = 100000$  km,

e  $T_{\text{vecchio}} = 1$  mese = 2592000 s.

Si ottiene  $T_{\text{nuovo}} = 0.025$  s, cioe' circa **40 rotazioni al secondo !**

- Devono quindi esistere piccole stelle ruotanti molto velocemente
- Questo e' stato verificato sperimentalmente, sono le cosiddette PULSAR

1967 Cambridge (UK): Jocelyn Bell Burnell scopre la prima pulsar

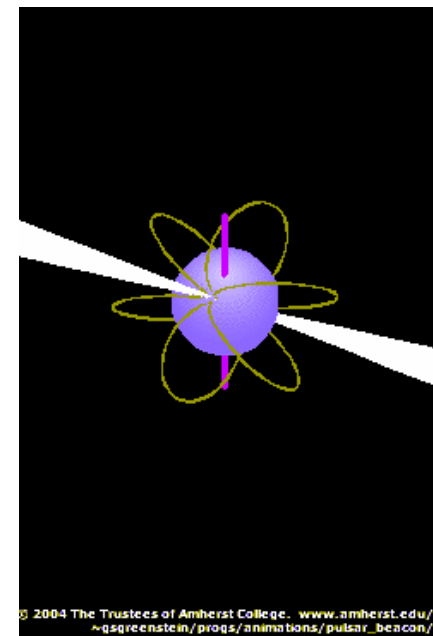
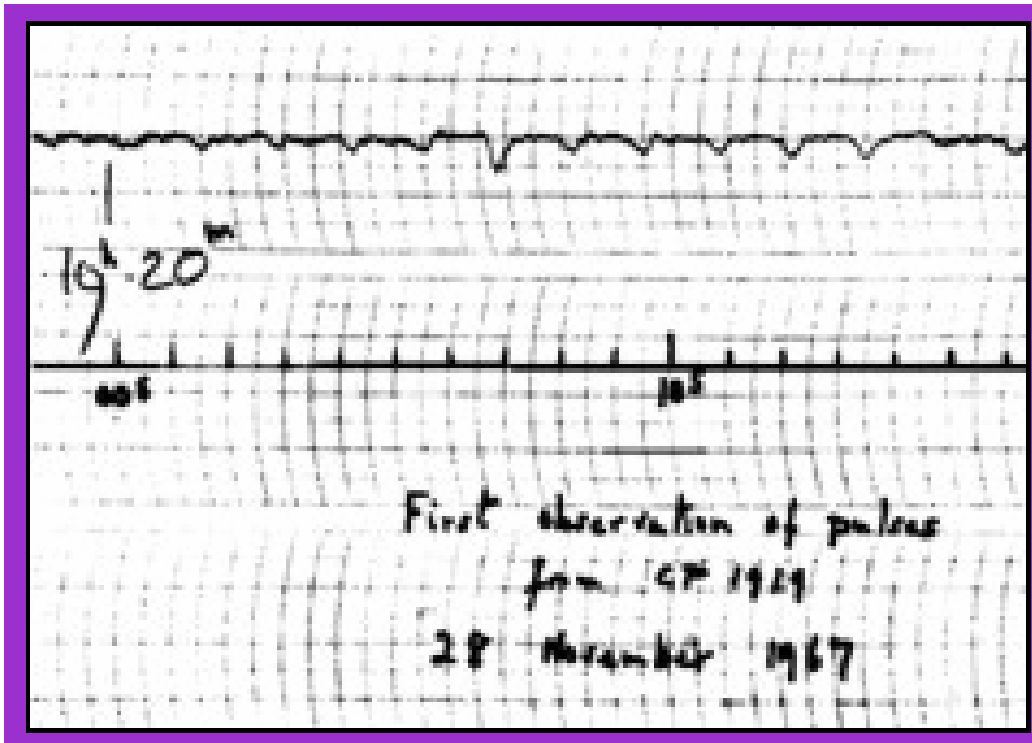
Nel 1960 il suo professore, Tony Hewish, ebbe l'idea di costruire un radiointerferometro con un mosaico di 2000 antenne dipolari, per misurare i quasar.

Fu costruito da 5 studenti in due anni, e costò circa 15000 Euro.

JBB ebbe poi la responsabilità di registrare i segnali e analizzarli (a occhio, su un registratore a carta) e ...



*'here was I trying to get a Ph.D. out of a new technique, and some silly lot of little green men had to choose my aerial and my frequency to communicate with us.'*







## Conservazione del momento angolare: le pulsar - 3

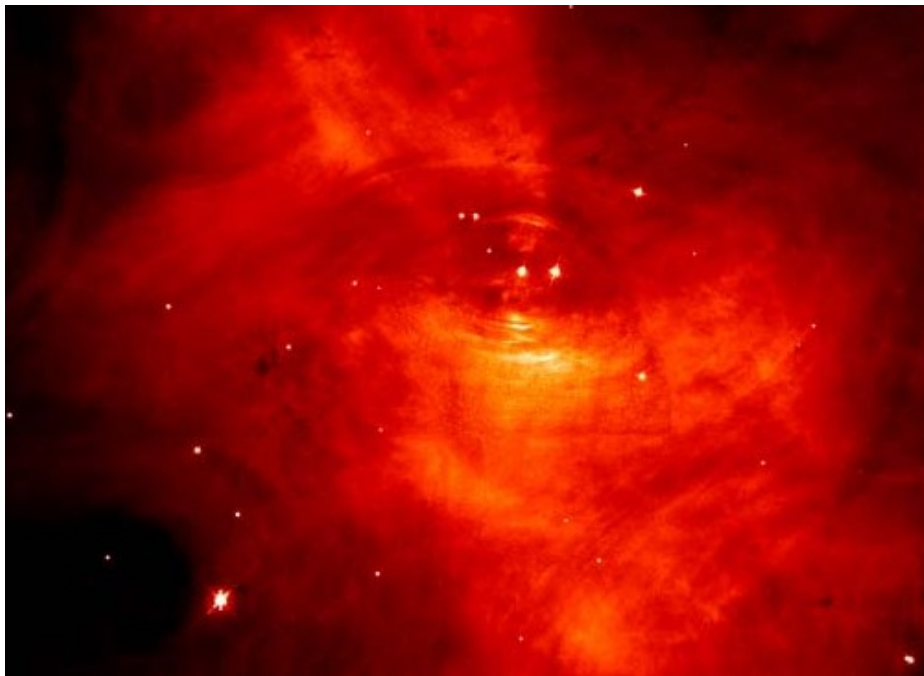
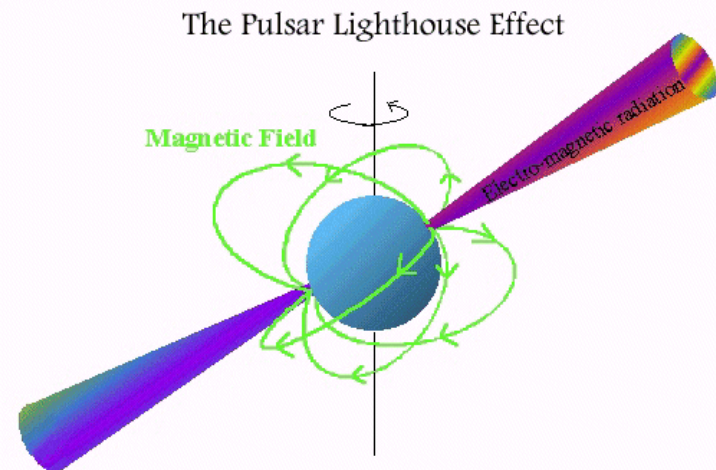
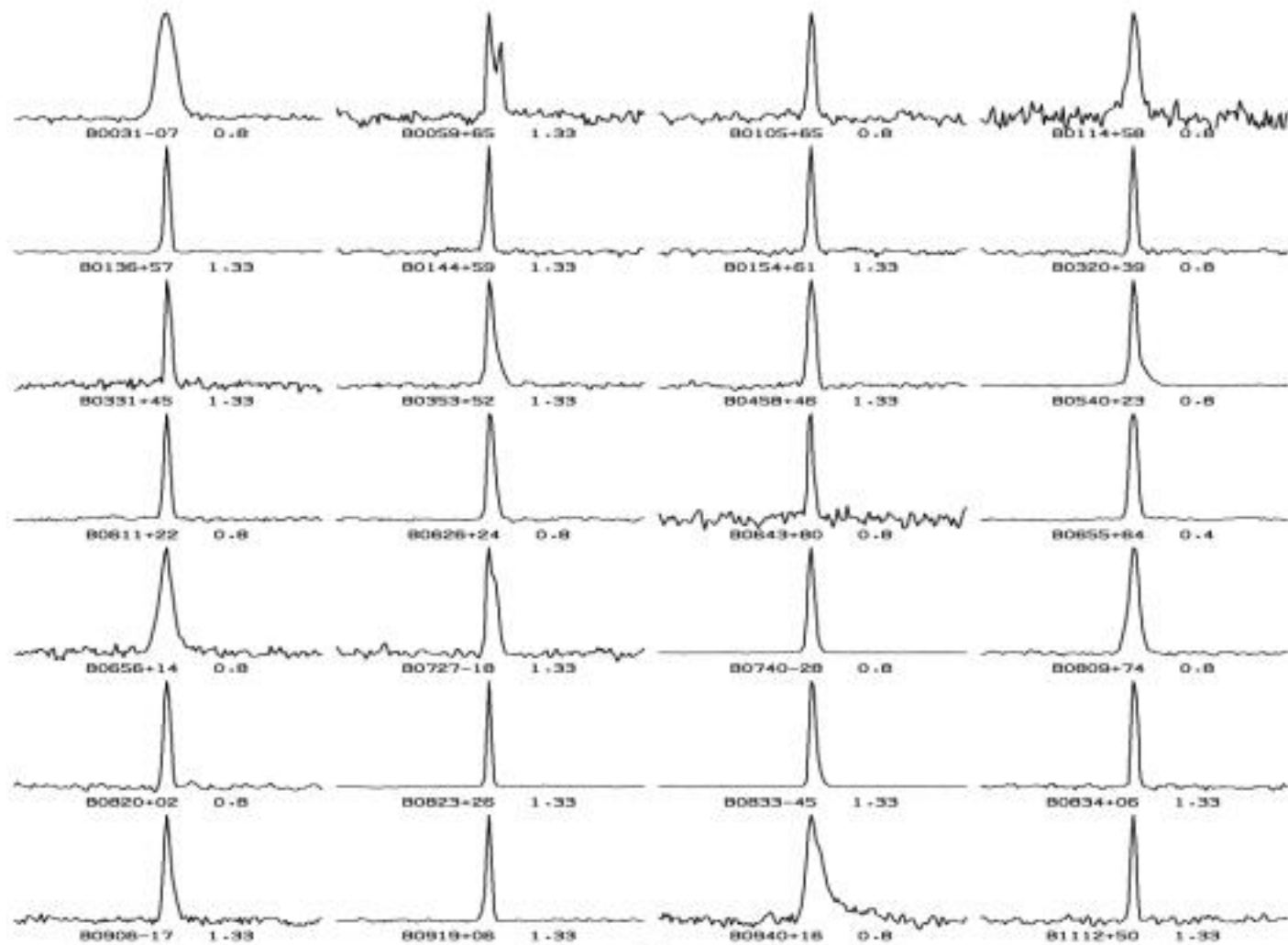


Immagine dell' Hubble Space  
Telescope della pulsar nella nebulosa  
del granchio (CRAB nebula)  $T = 0.033$  s

### Generazione di impulsi luminosi nelle Pulsar



## Esempi di segnali da diverse pulsar (solo 1 periodo)



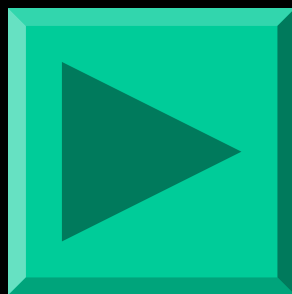
## il “suono” delle Pulsar

<http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html>

<http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html>



PSR J0737-3039A/B



# La Rotazione delle Galassie



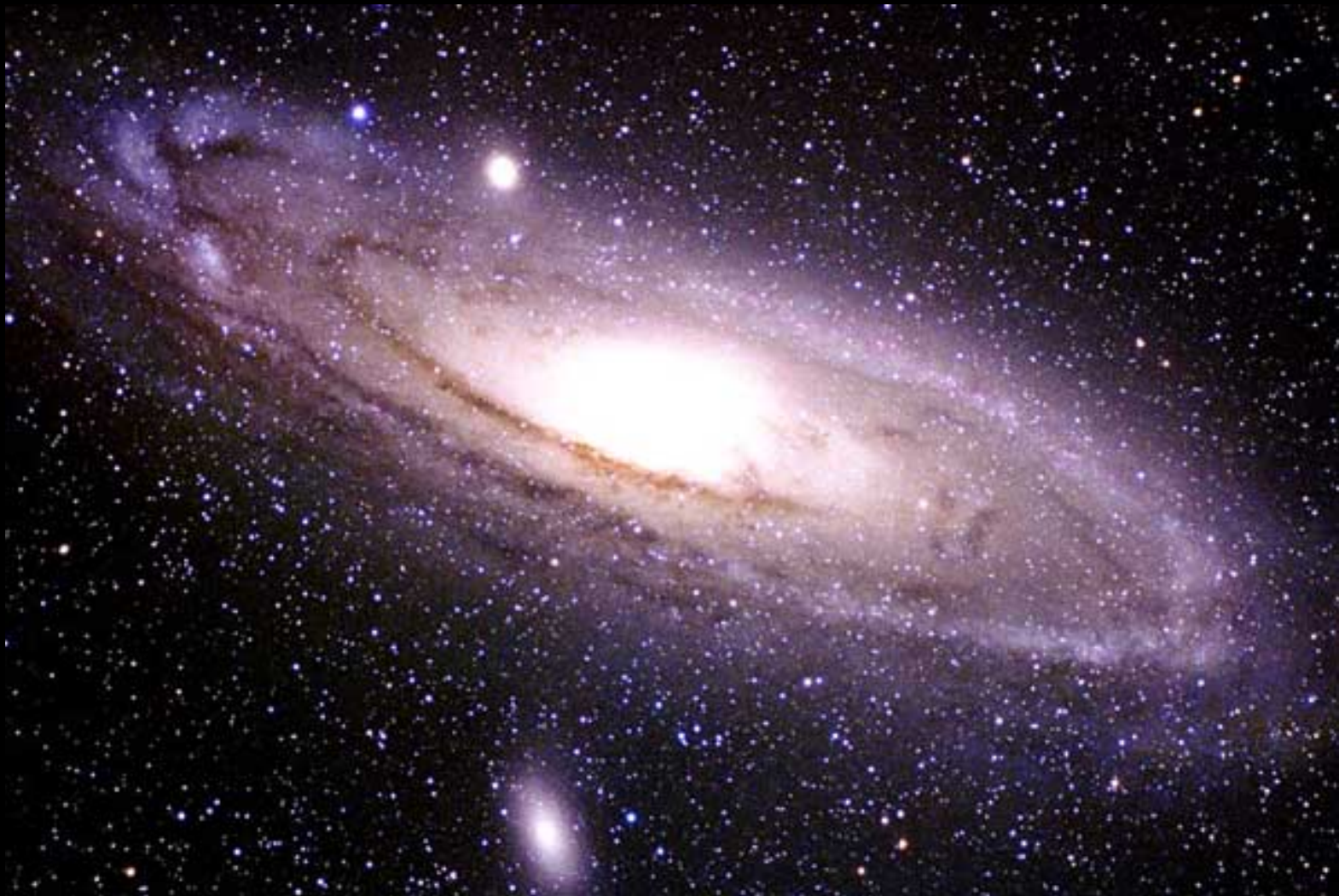
1 miliardo di miliardi di km = 100000 anni luce

una galassia:  
e' costituita da  
centinaia di miliardi  
di stelle



300 miliardi di miliardi di km =  
30 milioni di anni luce

# Andromeda



# M104 (Sombrero)



NGC7742



NGC1232



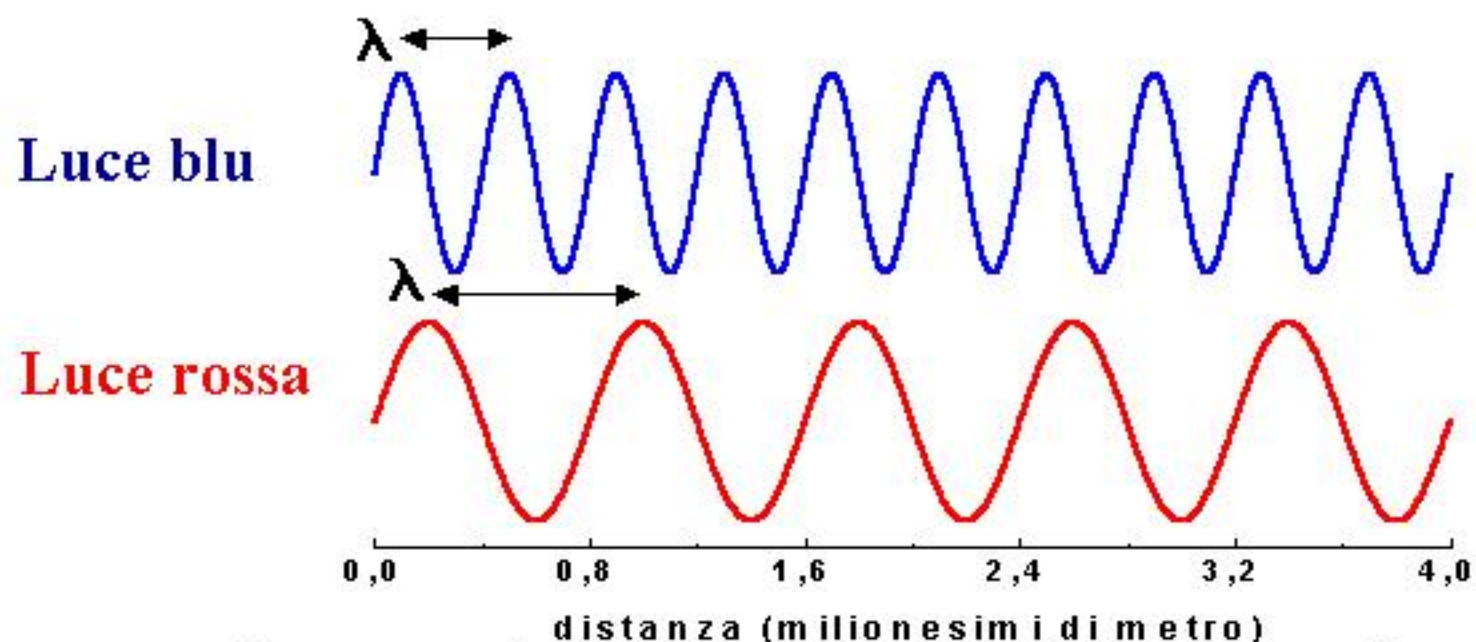
## Rotazione delle Galassie - 2

Come possiamo accorgerci del fatto che le stelle della galassia stanno lentamente ruotando intorno al centro ?

Ci aiuta l'effetto Doppler, che permette di stabilire se una sorgente di onde si sta avvicinando o allontanando dall'osservatore.



- La luce e' formata da onde elettromagnetiche. Il colore della luce dipende dalla sua lunghezza d' onda  $\lambda$

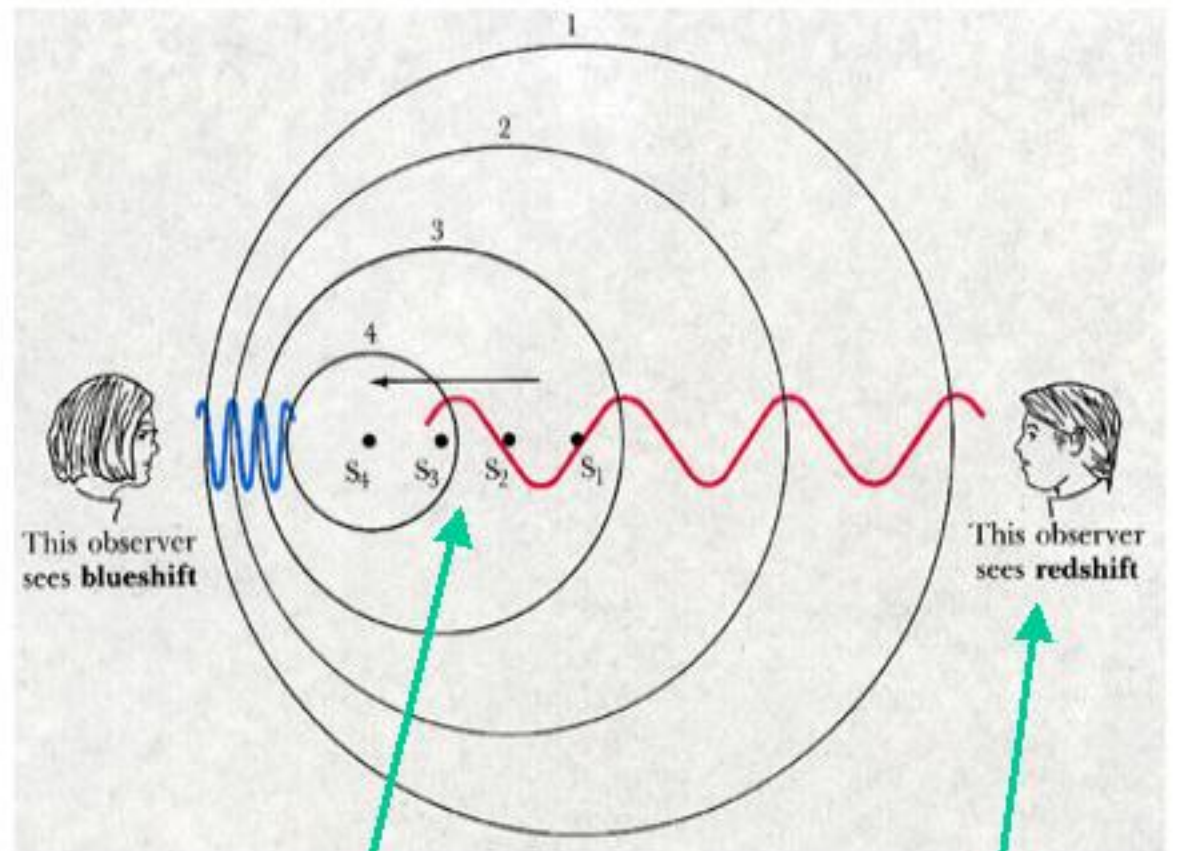


- L' effetto Doppler, dovuto alla velocita' relativa di sorgente e osservatore, altera la lunghezza d' onda della luce, trasformando un colore in un altro.

# Effetto Doppler

- Christian Doppler dimostrò nel 1843 la dipendenza della lunghezza d'onda dal moto relativo di sorgente ed osservatore.
- Tanto maggiore è la velocità relativa, tanto maggiore è lo spostamento della lunghezza d'onda misurata:

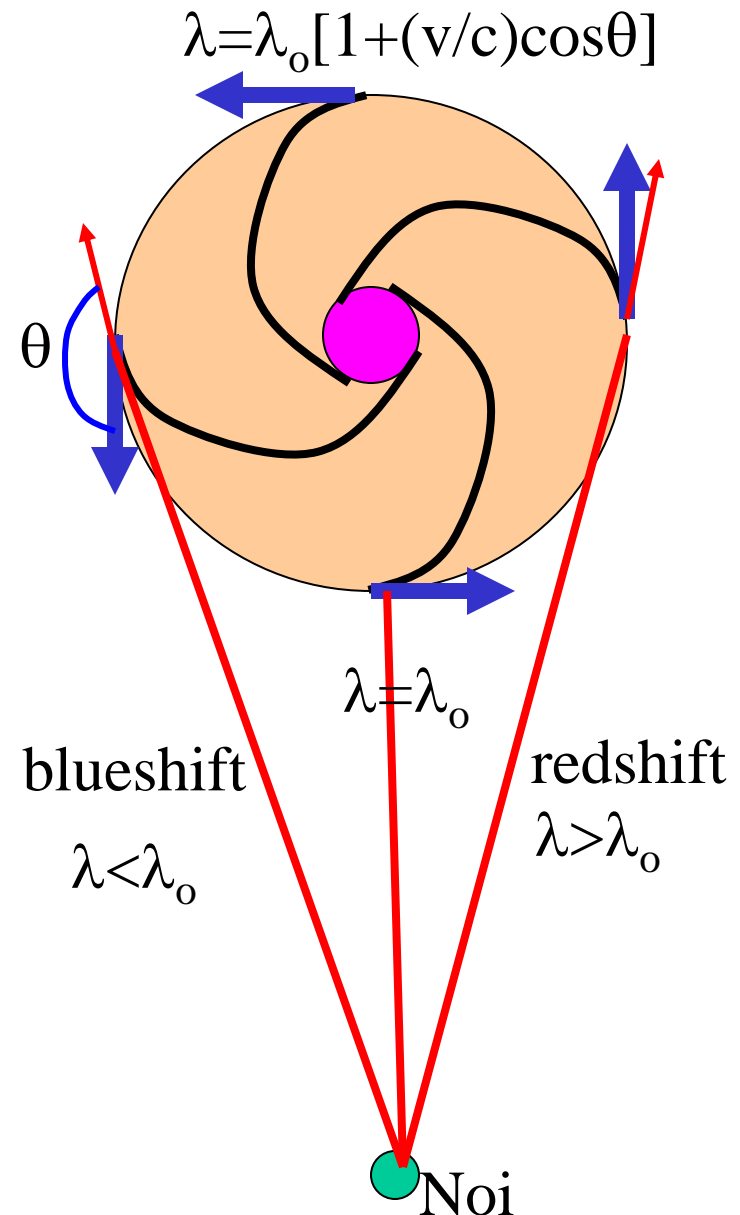
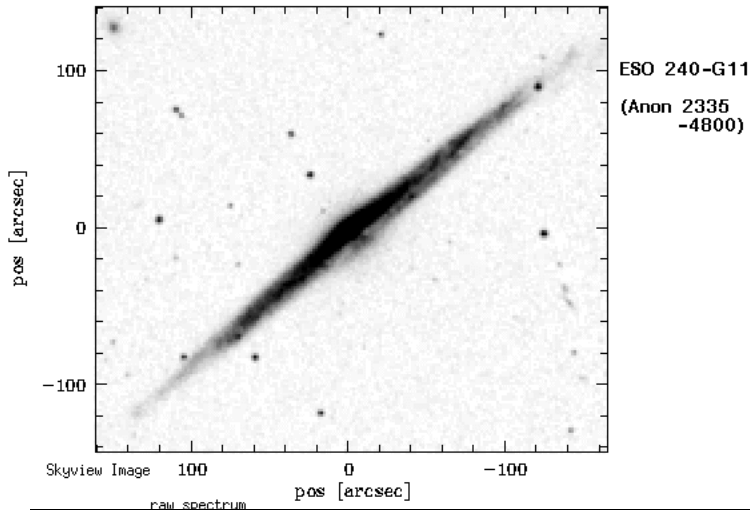
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = v/c$$



Sorgente sonora o luminosa in movimento

Questo osservatore vede una lunghezza d'onda maggiore perché la sorgente si sta allontanando

# Effetto Doppler per la luce stellare

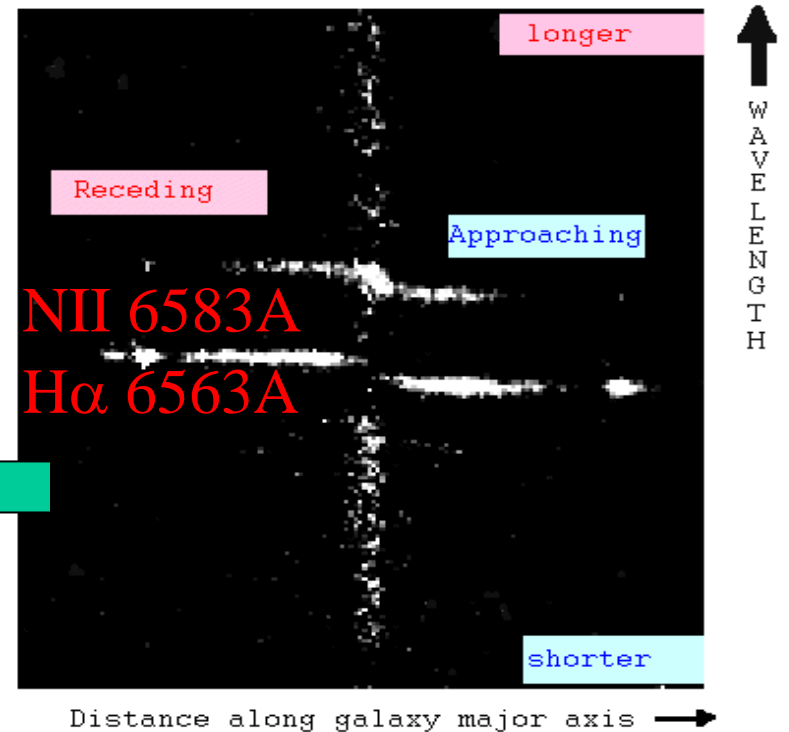
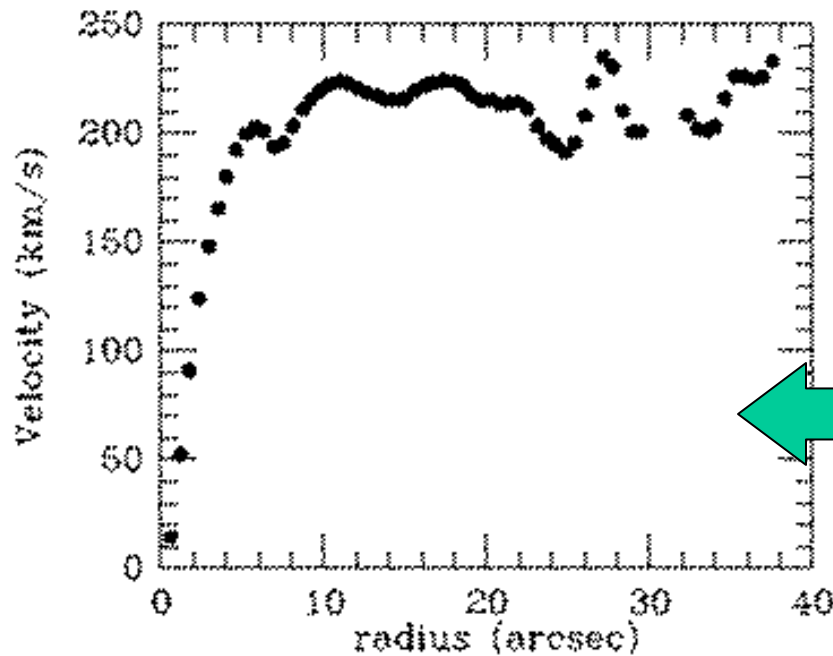
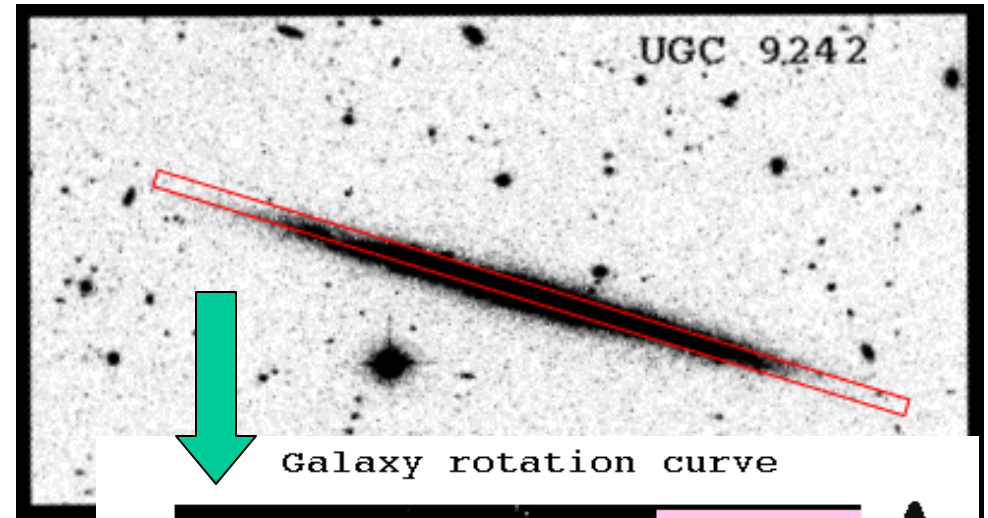


- La misura viene meglio per galassie viste di taglio. Si misura la lunghezza d'onda apparente di una ben precisa riga spettrale in funzione della posizione per tutte le direzioni tra i due estremi della galassia.

v [km/s]

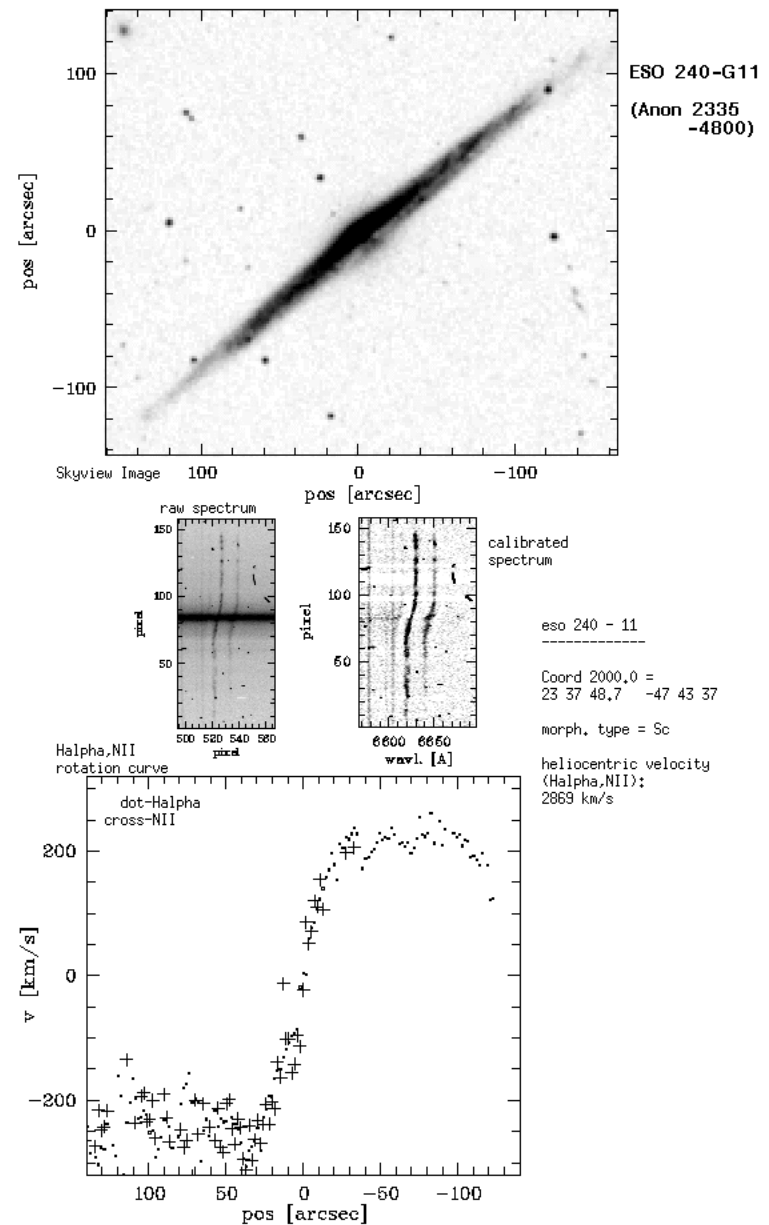
# Rotazione delle Galassie

- Per farlo si allinea la fenditura di ingresso dello spettroscopio al disco (visto “edge-on”).
- La lunghezza d’onda della riga (e quindi la velocità) varia in funzione della posizione lungo il disco:



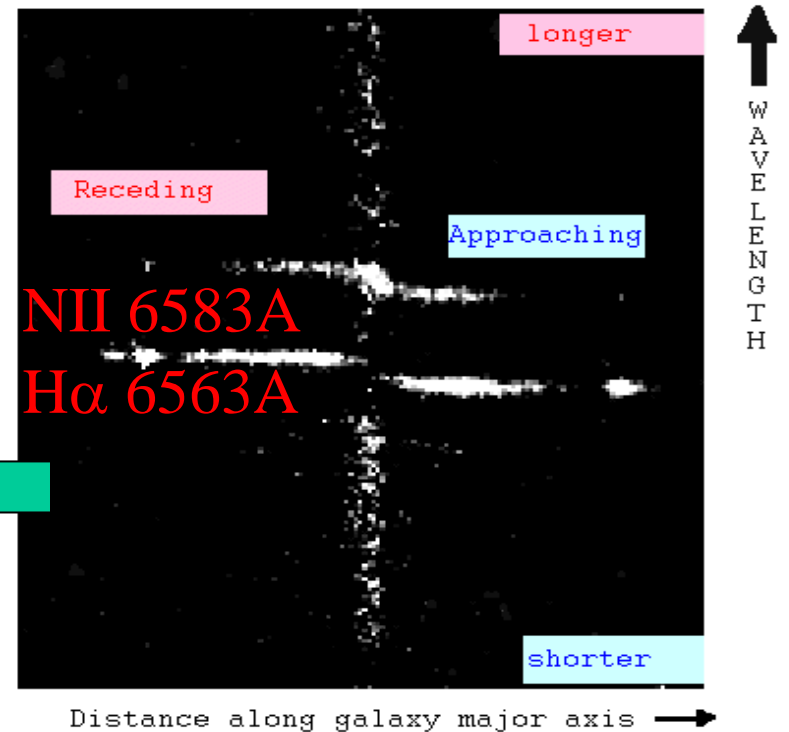
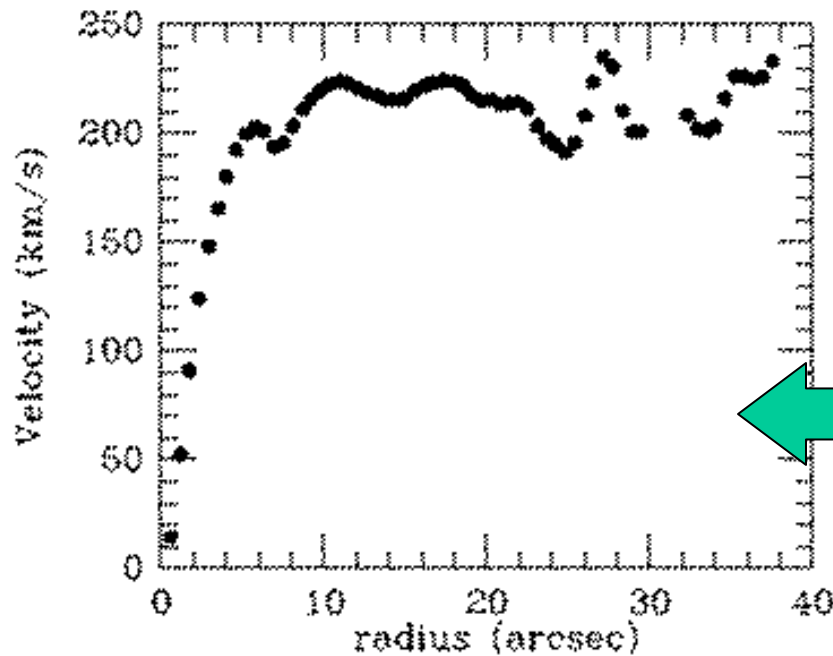
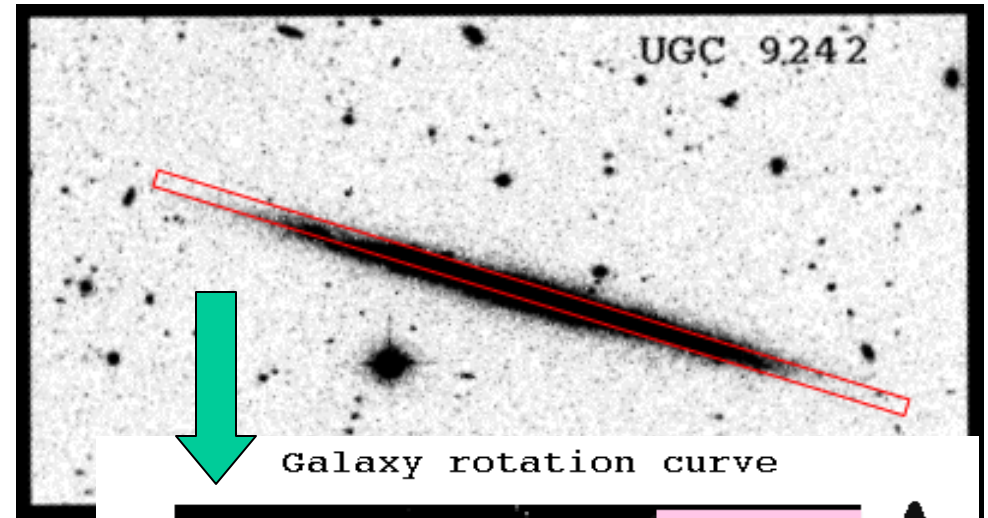
# Rotazione delle Galassie

- Altro esempio:
- Risultano velocità di rotazione dell'ordine di 200-300 Km/s



# Materia Oscura

- Per farlo si allinea la fenditura di ingresso dello spettroscopio al disco (visto “edge-on”).
- La lunghezza d’onda della riga (e quindi la velocità) varia in funzione della posizione lungo il disco:

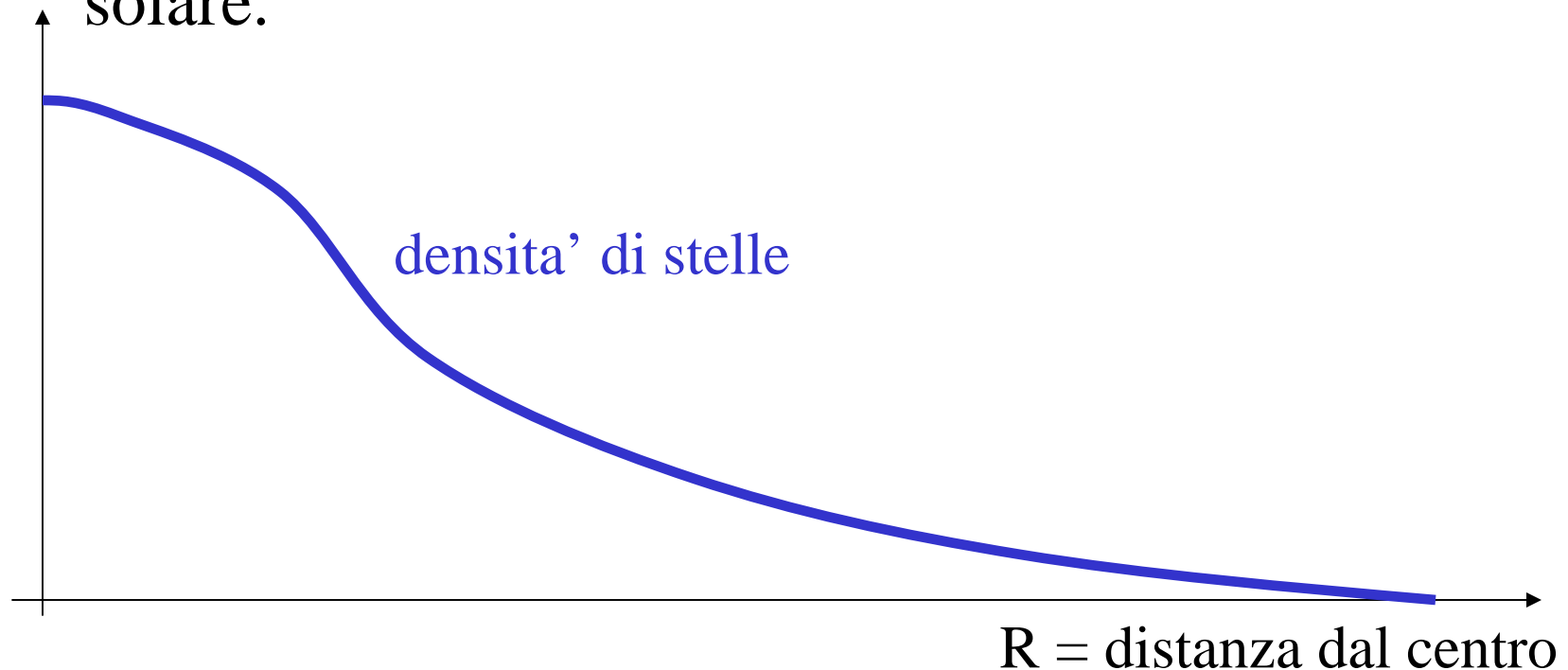


# Curva di Rotazione

- Il fatto che la velocità di rotazione non diminuisca anche dove la densità di stelle è diventata molto bassa implica la presenza di un alone di materia oscura. Vediamo perché.
- La densità di stelle (e quindi la densità di massa visibile), è stimabile dalla luminosità osservata, e decresce allontanandosi dal centro della galassia (spesso come  $1/r^4$ ).
- Vogliamo studiare come dovrebbe ruotare una stella di prova all'interno di un sistema di questo genere.

# Curva di rotazione

- Ci aspettiamo che la nube o una stella campione orbitino intorno al centro della galassia più o meno come un pianeta intorno al sole.
- Ma qui la massa attraiante non è tutta concentrata nel centro del sistema come accade nel sistema solare.





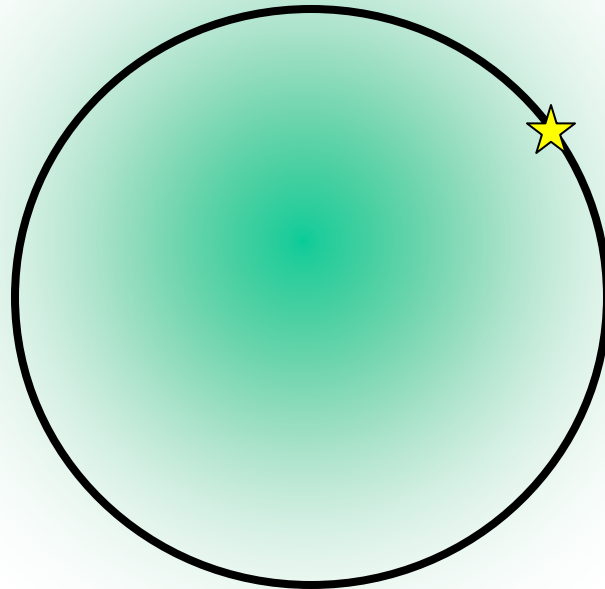
# Curva di rotazione

- In un sistema a simmetria sferica, la stella sente solo l'azione della massa interna alla sua orbita (teorema di Gauss) come se fosse concentrata nel centro.
- Quindi se l'orbita ha un raggio  $r$  relativamente piccolo, la stella sente solo poca massa.



# Curva di rotazione

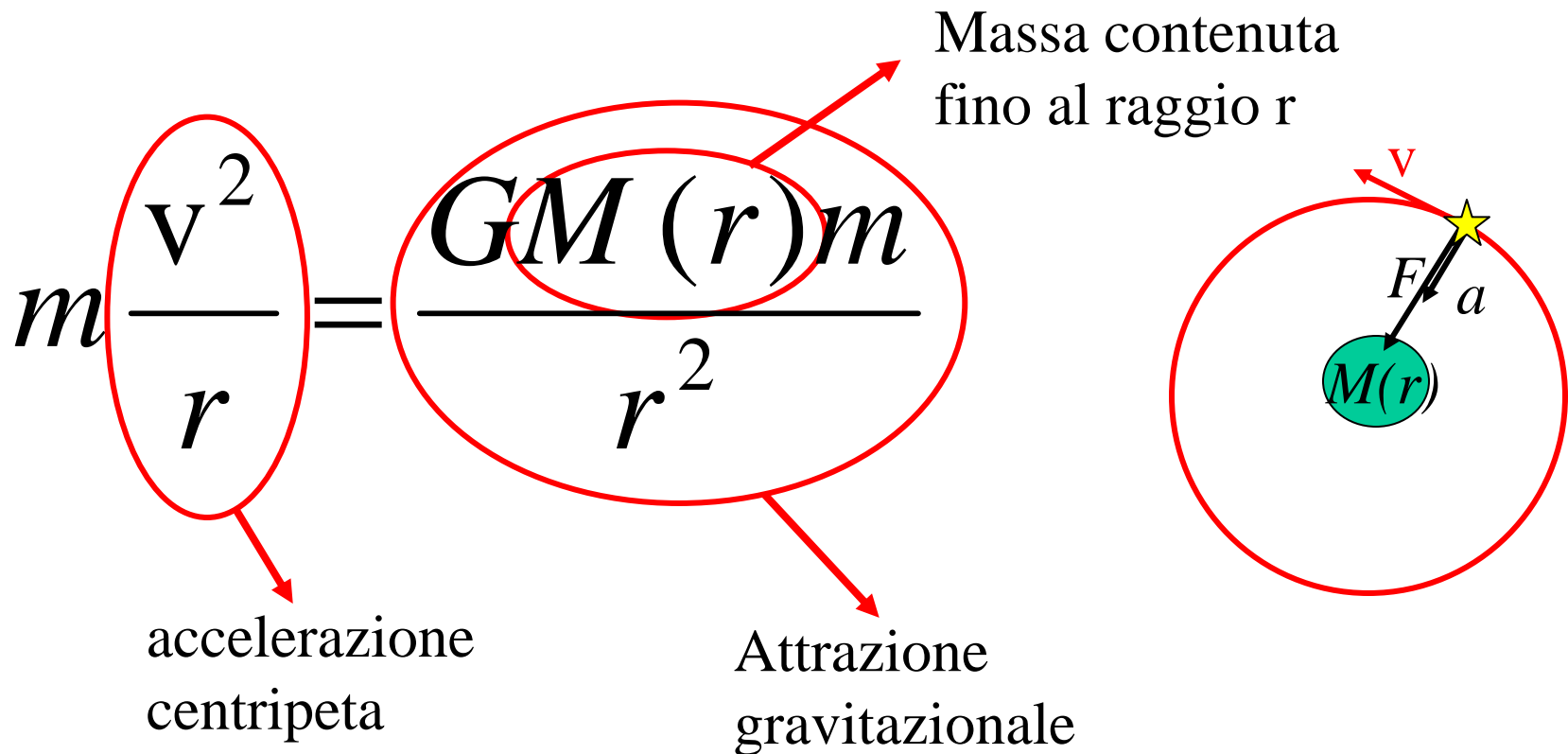
- In un sistema a simmetria sferica, la stella sente solo l'azione della massa interna alla sua orbita (teorema di Gauss) come se fosse concentrata nel centro.
- Invece se l'orbita ha un raggio  $r$  molto grande, la stella sente l'azione di tutta la massa della Galassia.



Moto di una stellina “di prova”

di massa  $m$  soggetta all' azione della massa di tutte le altre stelle:

$$ma = F$$



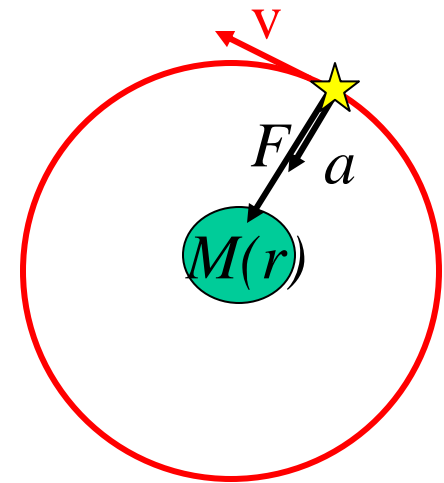
Moto di una stellina “di prova”

di massa  $m$  soggetta all' azione della massa di tutte le altre stelle:

Massa contenuta  
fino al raggio  $r$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

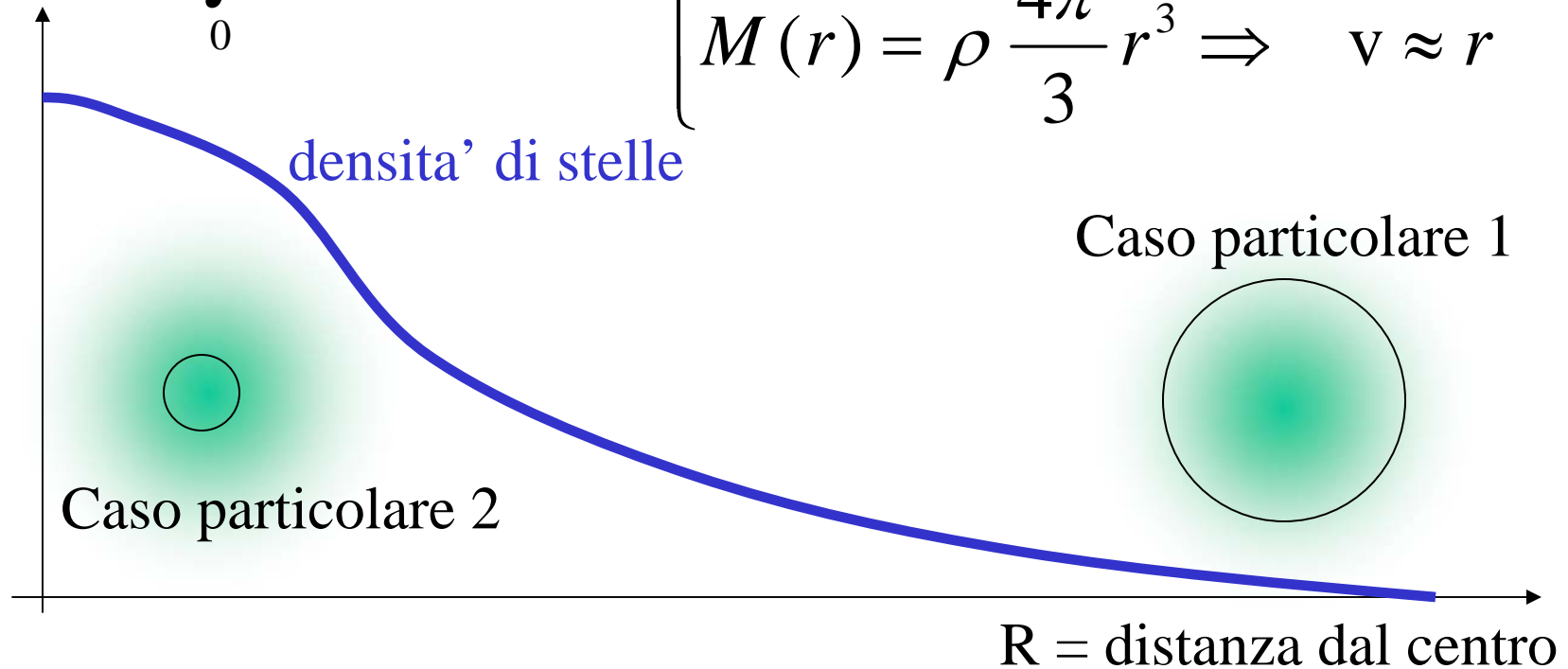


Moto di una stellina “di prova”

di massa  $m$  soggetta all' azione della massa di tutte le altre stelle:

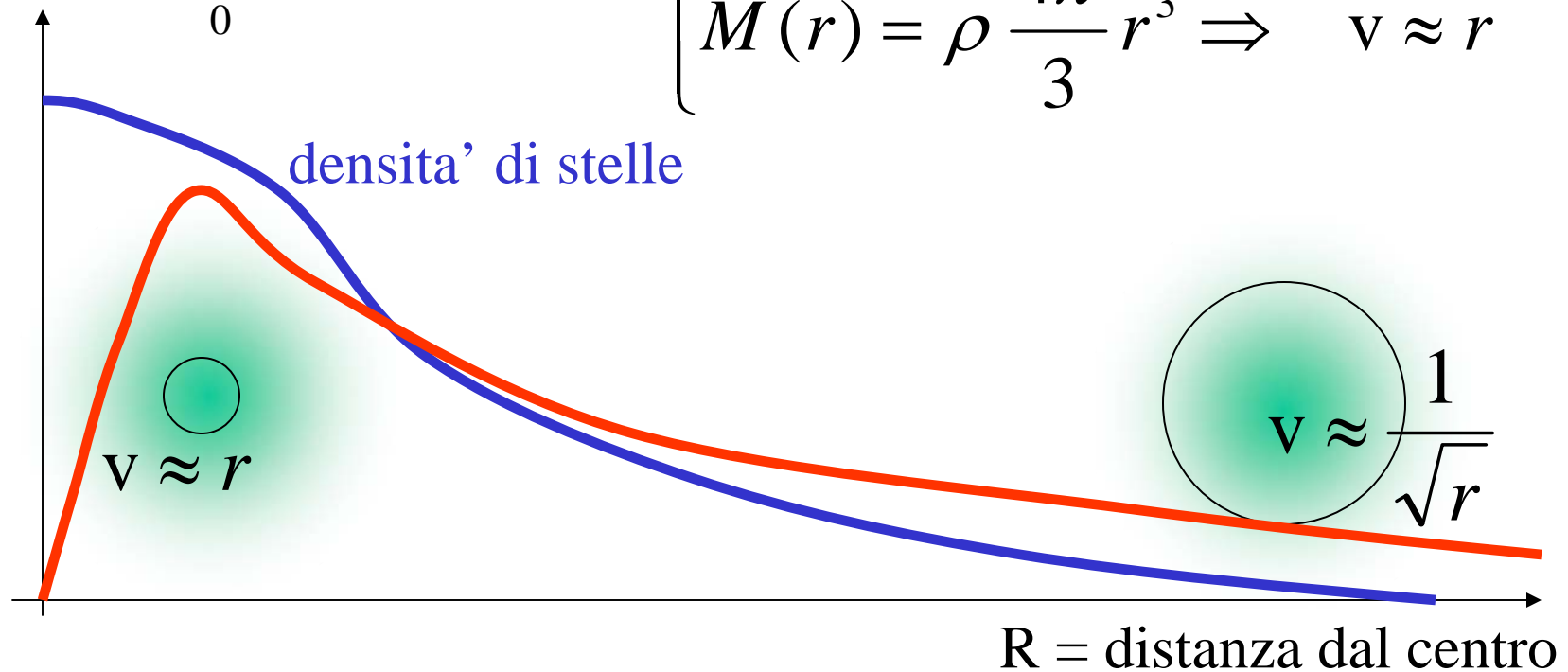
$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$M(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr = \begin{cases} \text{Caso particolare 1} \\ M(r) = M_o \Rightarrow v \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \\ \text{Caso particolare 2} \\ M(r) = \rho \frac{4\pi}{3} r^3 \Rightarrow v \approx r \end{cases}$$



$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

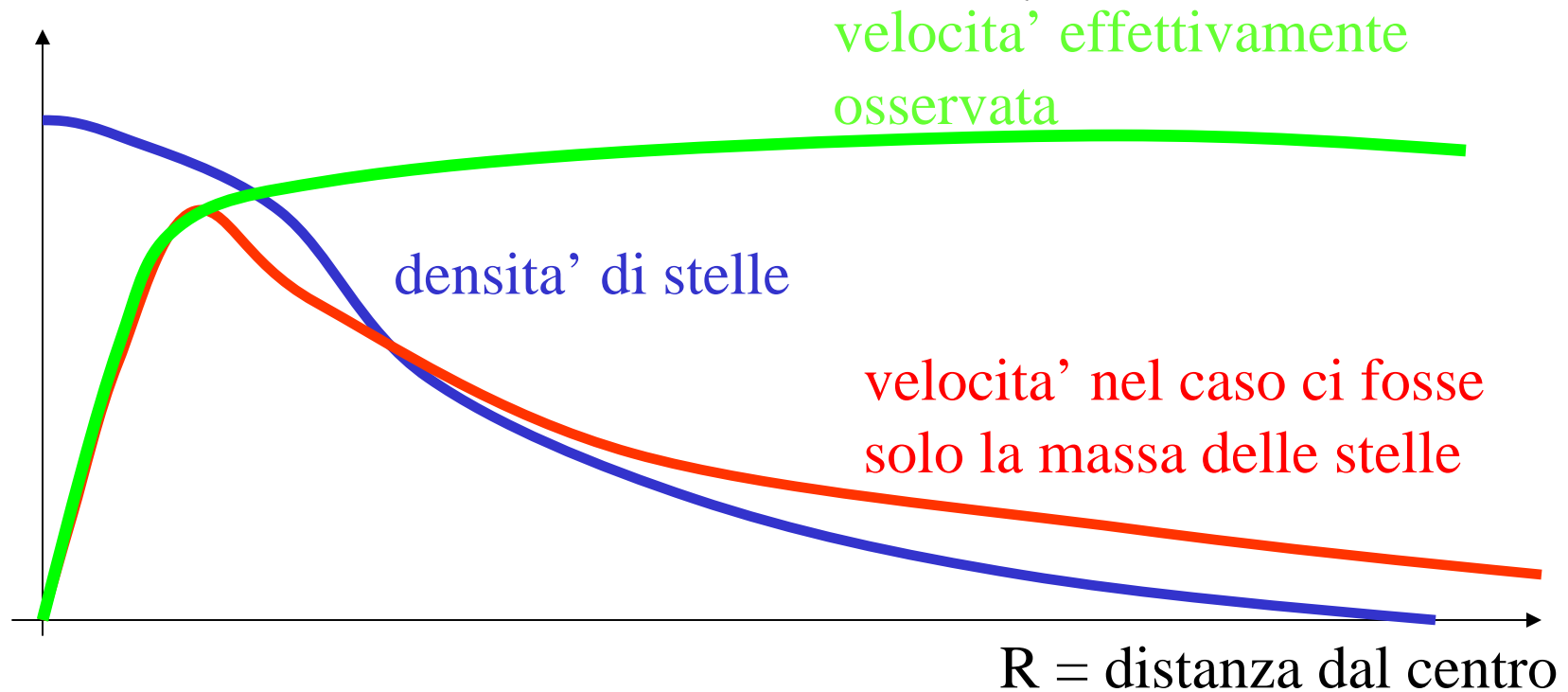
$$M(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr = \begin{cases} M(r) = M_o \Rightarrow v \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \\ M(r) = \rho \frac{4\pi}{3} r^3 \Rightarrow v \approx r \end{cases}$$



# Curva di Rotazione

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$v = \text{costante} \Rightarrow M(r) \approx r \Rightarrow \begin{cases} \rho(r) \approx r^{-2} & (\text{sfera}) \\ \rho(r) \approx r^{-1} & (\text{disco}) \end{cases}$$



- Una massa proporzionale al raggio implica una densità che va come  $1/r^2$  (non come  $1/r^4$  !)
- Cioè una componente aggiuntiva di materia, che non vediamo, quindi che non interagisce con la luce.
- La chiamiamo **materia oscura**



# Materia Oscura

- I cosmologi pensano che piu' del 90% della materia nell' universo sia in questa forma "non luminosa".
- Non c'e' ancora una determinazione certa della natura di questa materia "non luminosa": non ci sono cioe' misure fatte in laboratorio su queste ipotetiche particelle, che non fanno nemmeno parte del modello standard delle particelle elementari.
- Ci sono, invece, moltissime ipotesi alternative: particelle debolmente interagenti, modifica della legge di Newton etc..
- E' un tipico campo in cui astrofisica e fisica delle particelle elementari si complementano !