

**CENTRO OSSERVAZIONE E DIVULGAZIONE
ASTRONOMICA SIRACUSA**

**Spettri stellari, diagramma H-R
e indice di colore BV**

Dott. Emerico Amari

16 Luglio 2008

INDICE E MAPPA DELL'ARTICOLO

1.1 Spettri stellari	pag. 1
- spettri in uso (O, B, A, F, G, K, M)	
- spettri in disuso (Q, P, WR, R, N, S)	
- sottoclassi spettrali	
1.2 Magnitudine stellare	4
- formula di Pogson	
- visuale apparente	
- visuale assoluta	
1.3 Diagramma di Hertzsprung – Russell	6
- sequenza principale	
- ramo giganti e supergiganti rosse	
- ramo nane bianche	
1.4 Magnitudine bolometrica	9
- astri con BV negativo	
- astri con BV nullo	
- astri con BV positivo	
1.5 Bibliografia	11

1.1 Spettri Stellari

Gli spettri stellari sono costituiti da un fondo continuo solcato da righe oscure, il cui numero, posizione e intensità possono variare da stella a stella. Mentre il fondo continuo è emesso dal globo stellare, costituito da gas a elevate pressioni, responsabile delle linee oscure, di assorbimento, è invece l'atmosfera di gas molto rarefatti circondati dalla stella, che è a temperatura più bassa del globo.

Gli spettri stellari possono essere classificati in varie classi, o tipi spettrali. Tale raggruppamento (classifica spettrale) si fa secondo criteri stabiliti in base al tipo e all'intensità delle righe e al colore dominante nel fondo continuo degli spettri stessi. Secondo i criteri attuali si distinguono le seguenti classi spettrali:

1. **O** spettro continuo particolarmente intenso nell'azzurro e che presenta intense righe di assorbimento dell'elio ionizzato (4026 Å); appartengono a tale classe spettrale le stelle a elio ionizzato, dal tipico colore azzurro (*per es. ζ Orionis*), caratterizzate da alta temperatura (30.000 ÷ 40.000 K).
2. **B** intenso spettro continuo con righe dell'ossigeno ionizzato (4649 Å) e righe di assorbimento dell'elio ionizzato (4026 Å) e neutro (4472 Å); le stelle di questa classe si dicono stelle a elio neutro o del tipo di Orione e hanno colore azzurrognolo. La loro temperatura è fra (12.000 ÷ 25.000 K).
3. **A** intense righe dell'idrogeno della serie di *Balmer*, le stelle di questa classe (*per es. Sirio e Vega*) hanno grande luminosità e sono relativamente luminose; la loro temperatura è fra (8.000 ÷ 12.000 K), hanno colore bianco azzurro e sono dette stelle a idrogeno.
4. **F** righe dell'idrogeno meno intense, mentre sono intense le righe H e K del calcio ionizzato; a tale classifica appartengono stelle di colore bianco-giallastro (*per es. Procione*), dette anche stelle a calcio ionizzato, con temperatura fra (6.000 ÷ 8.000 K).
5. **G** presenti le righe del calcio ionizzato e di elementi metallici, tra cui quelle del ferro (4384 e 4668 Å); le stelle di tale classe (*per es. il Sole*) sono stelle gialle, dette stelle solari, e comprendono sia nane sia giganti. La loro temperatura è fra (4.000 ÷ 6.000 K).

6. **K** ancora presenti le righe del calcio ionizzato insieme a quelle del calcio neutro (4227 Å) e alle bande dell'ossido di titanio (4762 e 4954 Å); tale classe comprende stelle di colore arancione (*per es. Arturo e Aldebaran*), dette anche stelle del tipo delle macchie solari in quanto lo spettro di queste ultime è simile al loro; la temperatura è di 3.500-5.000 K.
7. **M** particolarmente intense le righe del calcio neutro e le bande dell'ossido di titanio; le stelle appartenenti a tale classe, dette stelle a ossido di titanio, sono di colore rosso aranciato (*per es. Betelgeuse*); la loro temperatura è di 2000-3500 K.

Inoltre abbiamo anche i seguenti spettri:

8. **Q** spettro variabile, caratteristico delle novae;
9. **P** spettro delle nebulose planetarie;
10. **WR** spettri delle stelle del tipo *Wolf-Rayet*, in cui sono presenti in emissione le righe dell'idrogeno e dell'elio
11. **R** righe del carbonio e varie bande molecolari (*CN, CO, ecc.*); le stelle di questa classe dette stelle a carbonio, sono giganti e supergiganti, in maggioranza variabili; la loro temperatura è di 2.000-3.000 K.
12. **N** righe del ferro, sodio e calcio neutri con righe dell'idrogeno assai deboli; spettro continuo intenso nel rosso; le stelle appartenenti a tale classe sono anch'esse stelle a carbonio, la loro temperatura è di 2.000-3.000 K.
13. **S** righe H e K del calcio ionizzato, del calcio neutro e bande dell'ossido di zirconio; righe dell'idrogeno in emissione.

Per tener conto delle più piccole differenze, ogni classe è stata suddivisa in 10 sottoclassi, indicate dalla lettera distintiva della classe seguita da un numero variabile da 0 a 9 (per es. B0, B8..). A prescindere dalle classi Q, P, W, S, R, N che sono in un certo senso, varietà delle classi G e K, la classificazione di *Harvard*, nell'ordine sopra riportato, costituisce una successione ordinata secondo il colore delle stelle, che procedendo dalla classe O alla classe M, va dall'azzurro verso il rosso e al tempo stesso, una scala di temperatura superficiale delle stelle, nel senso che le temperature degli astri vanno decrescendo dalla classe O (40.000 K) a quella M (2.500 K).

A questa diversità di temperatura si può far risalire la diversità delle caratteristiche dei vari spettri. Così ad es. le bande dei composti molecolari compaiono solo negli spettri delle stelle più fredde (K, M), a mano a mano che la temperatura aumenta, le molecole si dissociano e cominciano ad apparire le righe degli atomi più facilmente eccitabili e ionizzabili (*righe del calcio, del ferro nelle stelle di classe F, G*). Crescendo ulteriormente la temperatura, tali atomi si ionizzano e le loro righe non sono più visibili, mentre compaiono le righe degli atomi più difficilmente eccitabili e ionizzabili (*righe dell'idrogeno e dell'elio nelle stelle di classe A, B, O*).

Le righe dell'idrogeno, essendo tale elemento il costituente fondamentale di tutte le stelle, sono presenti in tutti gli spettri. Poiché l'idrogeno ha un elevato potenziale di ionizzazione, nelle stelle più fredde la grandissima maggioranza degli atomi di idrogeno è nel livello fondamentale e negli spettri di tali stelle sono presenti le righe della serie ultravioletta di Lyman. Aumentando la temperatura, come nelle stelle bianche e bianco-giallastre, aumenta la percentuale di atomi nel primo livello eccitato e quindi aumenta l'intensità delle righe di *Balmer*. Se la temperatura diviene ancora più elevata (*stelle azzurre*), molti atomi di idrogeno passano al livello eccitato successivo, dando origine alla serie infrarossa di *Paschen*, e le righe di *Balmer* divengono nuovamente meno intense. Le righe dell'elio compaiono nelle stelle particolarmente calde.

1.2 Magnitudine stellare

Per determinare la magnitudine apparente di una stella si utilizza la formula universalmente adottata da Pogson (1857), secondo la quale:

$$m = C - 2,5 \log_{10} I \quad (1)$$

essendo:

- m la magnitudine apparente della stella;
- I la luminosità apparente di quest'ultima;
- C è una costante scelta in modo che le magnitudini così calcolate coincidessero, in media, allora stimate e riportate, per le stelle sino all'ottava magnitudine, nel migliore catalogo dell'epoca, la Bonner Durchmusterung.

Dalla relazione (1) si osserva che m e I sono grandezze correlate inversamente cosicché per astri molto luminosi corrisponde una magnitudine negativa e viceversa. Le magnitudini apparenti più piccole sono in ordine decrescente:

- 1) il Sole allo zenit ha $m = -28,0$
- 2) la Luna piena ha $m = -12,6$
- 3) Venere $m = -4,6$; Marte e Giove risp. all'opposizione $m = -2,9$ e $-2,6$
- 4) Sirio (*la stella più luminosa del cielo*) ha $m = -1,46$

Si osservi che, nella relazione di Pogson, al passaggio da una grandezza alla successiva cioè considerando la variazione di un'unità per magnitudine, corrisponde un rapporto tra le luminosità apparenti pari a:

$$10^{0,4} = \sqrt[5]{100} = 2,512$$

Ciò significa che la luminosità di due stelle le cui grandezze differiscono di 5 stanno tra loro nel rapporto di 1:100. Alla quantità 2,512 si dà il nome di *costante fotometrica stellare*. La magnitudine apparente di una stella dipende, oltre dalla sua luminosità intrinseca, anche dalla distanza a cui si trova l'astro.

Conviene allora assumere il concetto di magnitudine assoluta M , definita come la magnitudine apparente che un astro avrebbe se si trovasse alla distanza di 10 parsec (32,6 anni-luce). La luminosità apparente delle stelle nell'ipotesi che sia trascurabile l'assorbimento di luce negli spazi cosmici, diminuisce con il quadrato della distanza. Così ad esempio se una stella distante in realtà r parsec si venisse a trovare alla distanza di 10 parsec, la sua luminosità varierebbe nel rapporto di $\frac{r^2}{100}$ e la sua magnitudine apparente varierebbe, secondo la relazione (1) della quantità:

$$5 - 5 \log_{10} r.$$

Ricordando che la distanza r in parsec è l'inverso della parallasse p della stella, espressa in secondi d'arco, si ha :

$$M = m + 5 + 5 \log_{10} p \quad (2)$$

La relazione (2) consente di calcolare M , note m e p .

L'utilità della (2) permette di conoscere M di molte stelle, indipendentemente dalla conoscenza di m e p . Inoltre note m e M in base al diagramma di *Hertzsprung - Russell* (vedi paragrafo successivo) è possibile determinare dalla relazione precedente, la parallasse e quindi la distanza delle stelle (*metodo delle parallassi fotometriche e spettroscopiche*). Di qui trae origine il nome di modulo di distanza, la differenza tra apparente e assoluta. La relazione (2) è tuttavia basata su un'ipotesi non corretta, cioè *non vi sia assorbimento di luce negli spazi cosmici*. Bisognerebbe inserire un termine correttivo.

1.3 Diagramma di Hertzsprung - Russell

Ejnar Hertzsprung (1873-1967, olandese) e Henry Norris Russell (1877-1957, statunitense), rispettivamente nel 1905 e nel 1913, notarono entrambi delle caratteristiche comuni alle stelle di colore uguale.

In particolare, osservarono che le stelle blu sono intrinsecamente molto luminose, mentre quelle rosse sono divise in due gruppi, uno di astri più brillanti e uno di meno. Hertzsprung e Russell costruirono un grafico cartesiano scegliendo in ordinata la magnitudine visuale assoluta ed in ascissa la temperatura superficiale delle stelle che è legata direttamente al colore di esse, visto che le più fredde sono rosse e quelle più calde sono blu.

Il risultato dimostrò come alcune combinazioni di luminosità e temperatura sono molto più frequenti di altre. Le stelle, sul piano cartesiano, si dispongono su due fasce principali:

1. la prima, diagonale, taglia il diagramma dall'angolo in alto a sinistra a quello in basso a destra;
2. la seconda, quasi orizzontale, va dal centro verso l'estrema destra.

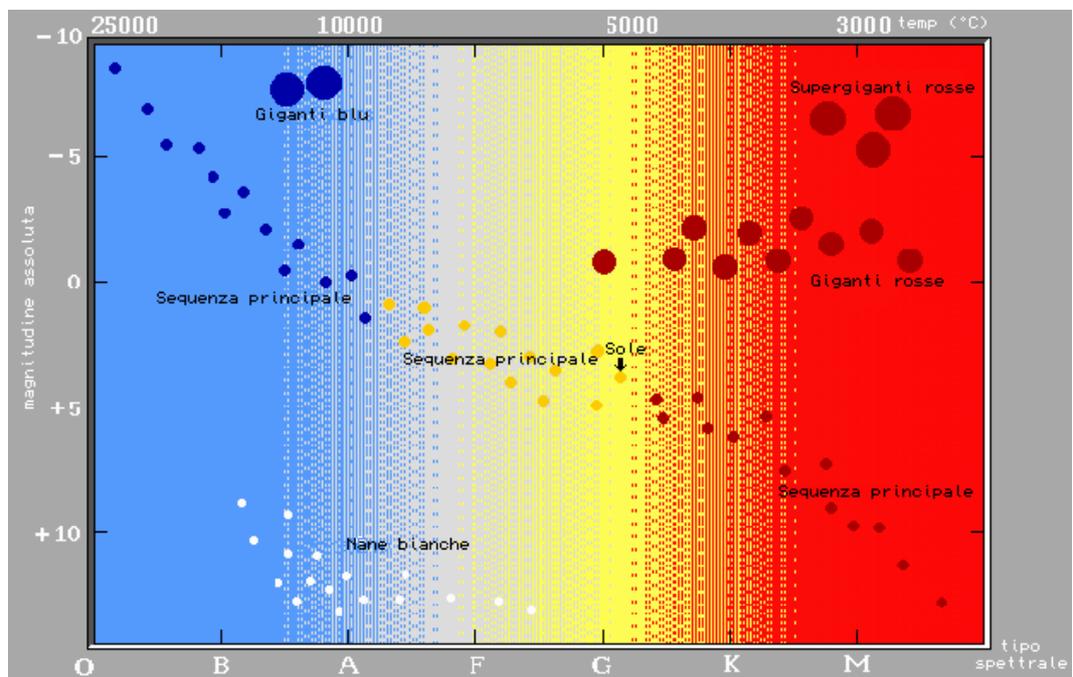


Figura: Diagramma di Hertzsprung - Russell

La prima fascia raggruppa le stelle della *sequenza principale* (SP), la seconda quelle del *ramo delle giganti e supergiganti rosse*. Oltre a questi due grandi gruppi, ne esiste un altro più piccolo, quello delle *nane bianche*. Il loro raggruppamento si trova sotto la sequenza principale, leggermente spostato verso sinistra.

Dai diagrammi H-R si possono ricavare molte informazioni riguardo le stelle. È noto, dalla legge di Stefan, che *la luminosità di un astro è direttamente proporzionale alla sua superficie e alla temperatura superficiale elevata alla quarta potenza*.

Quindi, a parità di temperatura superficiale, le stelle più luminose, saranno collocate nella parte alta del diagramma se hanno un raggio di grandi dimensioni, e nella parte bassa se esso è più piccolo.

Le giganti rosse, che si trovano in alto (per le grandi dimensioni) e a destra (per la bassa temperatura superficiale), sono molto luminose. Invece le nane bianche, che stanno in basso (per le piccole dimensioni) e a sinistra (per l'alta temperatura superficiale), sono poco luminose. Risulta così che la luminosità della gigante è 10.000 volte quella della nana, e se avessero temperature uguali, il raggio della prima sarebbe di 100 volte quello della seconda.

Inoltre se si considera che la massa delle stelle varia di tre ordini di grandezza, significa che si hanno stelle con masse comprese dalle 0,10 alle 100 masse solari, mentre la luminosità varia di dodici ordini di grandezza e quindi la densità di una gigante è molto minore di quella di una nana.

Tuttora non sembra confermata l'esistenza di stelle eccezionali o di **Trumpler**, con masse comprese fra le 200 e le 300 solari.

La posizione di una stella nel diagramma H-R dipende da tre fattori: **massa, composizione chimica ed età**. Il collocamento della stella nel piano cartesiano luminosità – temperatura varia al variare di questi tre fattori. Poiché la maggior parte della vita di una stella si svolge durante la sequenza principale, quasi tutti gli astri (99%) si trovano sull'omonima fascia del diagramma. Il ramo delle giganti è molto più povero, però, le stelle che contiene sono più luminose, quindi si possono osservare a distanze più elevate. Si può affermare che il ramo delle giganti è il più popolato dopo la sequenza principale.

Il diagramma H-R si può rappresentare in diversi modi ma tutti equivalenti e rappresenta il migliore strumento di indagine stellare. Nella tabella sottostante sono state riportate le principali grandezze fisiche che contraddistinguono ogni astro (massa, luminosità, raggio e densità).

Grandezze fisiche	Minimo¹	Massimo
Massa	0,08	100 ÷ 150
Luminosità	10⁻⁶	10⁶
Raggio	0,01	100.000
Densità	10⁻⁷	10⁸

Da un primo sguardo si può notare che le stelle di tipo O sono più calde e luminose di quelle di tipo M. Questo è piuttosto intuitivo perché sappiamo che un corpo ad una certa temperatura emette molta più energia, ed in particolare luce, di uno a temperatura molto inferiore. Quello che è meno intuitivo è perché delle stelle di tipo M, con basse temperature intorno ai 3500 K, abbiano una magnitudine così bassa, cioè siano molto luminose.

La spiegazione è la seguente: prese due stelle di tipo M, una brillante ed debole, esse devono avere la stessa temperatura dal momento che appartengono alla stessa classe spettrale e la quantità di luce emessa per unità di superficie (metro quadro ad esempio) deve essere identica. Quindi la stella più luminosa è quella che ha superficie maggiore. Infatti le stelle di quel tipo vengono chiamate Giganti. Le stelle sotto la sequenza principale vengono chiamate, per simmetria, nane, ed in particolare bianche perché hanno una elevata temperatura e quindi colore tendente al bianco, e una piccolissima superficie.

¹ Le grandezze fisiche del Sole sono state poste uguali a 1.

1.4 Magnitudine bolometrica

Il passaggio successivo dopo aver calcolato la magnitudine visuale di una stella è quello di effettuare le correzioni bolometriche per tener conto delle diverse sensibilità che hanno i recettori a differenti lunghezze d'onda. Si calcolano così le magnitudini *bolometriche*. Le magnitudini bolometriche sono quindi obiettive. Ogni astro è pertanto caratterizzato dal suo *indice di colore*, indicato con la sigla BV (*bolometric visual*), un parametro che esprime la differenza tra la magnitudine bolometrica e visuale, indicando così il colore della stella.

L'indice di colore BV può assumere valori positivi, negativi e nulli. La scala degli indici di colore degli astri è stata costruita scegliendo come stella di riferimento con indice di colore zero: la stella Vega (Alfa Lyrae) classe spettrale A0 e temperatura superficiale 8913 K (dati catalogo Hipparcos).

Un valore negativo dell'indice di colore BV significa che la stella è più calda di Vega quindi appartiene alla classe spettrale superiore alla A0, che denota stelle con temperature superficiali maggiori. Cioè al diminuire del valore dell'indice BV aumenta la temperatura superficiale della stella e i tipi spettrali vanno progressivamente da B9 verso la classe O.

Dall'altra parte se l'indice di colore BV assume un valore positivo significa che la stella ha una temperatura superficiale inferiore alla stella di riferimento, ovvero si tratta di astri che appartengono progressivamente alle classi spettrali F, G, K e M. Quindi al crescere del valore dell'indice diminuisce il valore della temperatura superficiale. Ecco in sequenza i valori degli indici BV, di astri visibili in cielo, riuniti in tre gruppi, a seconda del segno, per valori crescenti:

Mu Columbae² (-0,27); **Naos**³ (-0,27); **Algiebba** (-0,24); **Mirzam** (-0,24); **Spica** (-0,24); **Xi1 Canis Majoris** (-0,24); **Shaula** (-0,23); **Bellatrix** (-0,22); **Adhara** (-0,21); **Nair al Saif** (-0,21); **Alfirk** (-0,20); **Alnitak** (-0,20); **Epsilon Persei** (-0,20); **Algenib** (-0,19); **Alfa Pyxidis** (-0,18); **Alnilam** (-0,18); **Mintaka** (-0,18); **Pi Scorpii** (-0,18); **42 Orionis** (-0,18); **Girtab** (-0,17); **Saiph** (-0,17); **Furud** (-0,16); **Meissa** (-0,16); **Suhail al Mulif** (-0,14); **Elnath** (-0,13); **Cor Caroli** (-0,12); **Dschubba** (-0,12); **Phaet** (-0,12); **Gienah** (-0,11); **Alkaid** (-0,10);

² Mu Colombae, classe spettrale O5, ha una temperatura superficiale di 25.439 K e dimensione 2,9 raggi solari, quindi si tratta di una subgigante azzurra.

³ Naos, classe spettrale O5, ha una temperatura superficiale di 24.669 K e dimensione 13 raggi solari.

Regolo (-0,09); **Aludra** (-0,08); **Theta Aurigae** (-0,08); **Al Nair** (-0,07); **Zubeneschamali** (-0,07); **Gamma Cassiopeiae** (-0,05); **Mesarthim** (-0,05); **Sulafat** (-0,05); **Alpheratz** (-0,04); **Alfa Sextantis** (-0,03); **Kaus Australis** (-0,03); **Rigel** (-0,03); **Alioth** (-0,02); **Algorab** (-0,01).

Algol⁴ (0,00); **Alhena** (0,00); **Chertan** (0,00); **Delta Cygni** (0,00); **Markab** (0,00); **Sheliak** (0,00); **Vega** (0,00);

Deneb el Okab (0,01); **Sirio** (0,01); **Alrescha** (0,02); **Alphecca** (0,03); **Merak** (0,03); **Zaniah** (0,03); **Han** (0,04); **Phecda** (0,04); **Mizar** (0,06); **Phercad** (0,06); **Megrez** (0,08); **Menkalinan** (0,08); **Deneb** (0,09); **Denebola** (0,09); **Zosma** (0,13); **Fomalhaut** (0,14); **Rasalhague** (0,15); **Zubenelgenubi** (0,15); **Canopo** (0,16); **Cursa** (0,16); **Ruchbah** (0,16); **Sheratan** (0,17); **Deneb Algiedi** (0,18); **Seginus** (0,19); **Arneb** (0,21); **Altair** (0,22); **Alderamin** (0,26); **Atik** (0,27); **Alniyat** (0,30); **Alkalurops** (0,31); **Caph** (0,38); **Porrima** (0,37); **Sargas** (0,41); **Procione** (0,43); **Mirfak** (0,48); **Rasalthallah** (0,49); **Muphrid** (0,58); **Chara** (0,59); **Sole** (0,60); **Alula Australis** (0,61); **Polare** (0,64); **Sadr** (0,67); **Wesen** (0,67); **Gamma Persei** (0,72); **Delta Cephei** (0,78); **Capella** (0,80); **Nihal** (0,81); **Sadal Suud** (0,83); **Alshain** (0,85); **Muscida** (0,86); **Kraz** (0,89); **Vindemiatrix** (0,93); **Kornephoros** (0,95); **Rastaban** (0,95); **Nekkar** (0,96); **Izar** (0,97); **Sadal Melik** (0,97); **Yed Posterior** (0,97); **Polluce** (0,99); **Menkent** (1,01); **Deneb Kaitos** (1,02); **Gienah** (1,02); **Er Rai** (1,03); **Dubhe** (1,06); **Ankaa** (1,08); **Albireo** (1,09); **Azha** (1,09); **Algieba** (1,13); **Hamal** (1,15); **Wazn** (1,15); **Rasalgethi** (1,16); **Cebalrai** (1,17); **Schedar** (1,17); **Asmidiske** (1,22); **Arturo⁵** (1,24); **Almach** (1,37); **Alula Borealis** (1,40); **Alphard** (1,44); **Kochab** (1,47); **Hassaleh** (1,49); **Betelgeuse⁶** (1,50); **Tarazed** (1,51); **Eltanin** (1,52); **Enif** (1,52); **Aldebaran** (1,54); **Auva** (1,57); **Delta 2 Lyrae** (1,57); **Mirach** (1,58); **Yed Prior** (1,58); **Zaurak** (1,59); **Beta Gruis** (1,61); **Menkar** (1,63); **Scheat** (1,66); **Al Suhail** (1,67); **Eta Persei** (1,69); **Omicron 1 Canis Majoris** (1,74); **Antares⁷** (1,86); **119E Tauri** (2,06); **Erakis** (2,24); **19X Piscium** (2,51); **La Superba** (2,99)..

⁴ Algol, Alhena, Certan, Delta Cygni, Markab, Sheliak e Vega sono stelle di classe spettrale A0.

⁵ Arturo, classe spettrale K5, gigante arancione (69 raggi solari) ha una temperatura superficiale di 4.106 K.

⁶ Betelgeuse, supergigante rossa (1.516 raggi solari), classe spettrale M0, possiede una temperatura superficiale di 3.488 K.

⁷ Antares (7.329 raggi solari e T = 2.776 K); 119E Tauri (13.600 raggi solari e T = 2.458 K); Erakis (112.809 raggi solari e T = 2.193 K); 19X Piscium (64.847 raggi solari e T = 1.857); La Superba (2.675.855 raggi solari e T = 1.371 K).

1.5 BIBLIOGRAFIA

1. Piero Bianucci, “*Stella per Stella – Guida turistica dell’Universo*” (1985) - Edizione Giunti Martello;
2. De Agostini, “*L’Universo - La Grande Enciclopedia dell’Astronomia*” (1997);
3. E. Amari, “*Viaggio fra le Stelle – Guida alle costellazioni per l’astrofilo*” (2004) - pubblicazione CODAS;
4. Giovanni Treccani, “*Scientifica Treccani*” Istituto della Enciclopedia Italiana;
5. Wikipedia, the free encyclopedia: “*Indice di colore e magnitudini bolometriche*”;
6. Starry Night Pro version 3.1 – Catalogo Hipparcos

Chi è l’autore dell’articolo?

E. Amari, fisico e docente di fisica, è divulgatore CODAS. I suoi studi riguardano le stelle, le costellazioni, la storia delle supernovae e la relazione fra l’attività solare e la Terra. È autore dell’opera “*Viaggio fra le Stelle*” – Guida alle costellazioni per l’astrofilo (2004), disponibile presso la biblioteca CODAS. Nel centenario della catastrofe di Tunguska ha realizzato un ciclo di conferenze dal titolo “La Notte dei Bolidi”.