

Alcune considerazioni sulle stelle giganti di Valter Arnò (Gruppo Astrofili Eporediesi)

Come si può appurare, la tecnica fotometrica, quando adeguatamente impiegata, permette di ottenere sotto opportune condizioni, i parametri fisici stellari. L'uso dei dati fotometrici è l'unica strada percorribile per ragionare in modo concreto su questioni come quelle viste in precedenza. Certo la realtà rappresentata dai numeri a volte può essere deludente, poiché il più delle volte tende a smorzare l'entusiasmo catastrofistico producendo, quasi sempre, anche un totale decadimento delle discussioni intorno all'argomento di cui si stava discutendo. Colgo l'opportunità della domanda posta da un socio per continuare con qualche altro calcolo e per dare qualche altra informazione su quella classe d'oggetti che vanno sotto il nome di RSG (Red Supergiants, Supergiganti Rosse). Proprio questo mese, quasi l'intero contenuto del Bollettino della Società Reale di Scienze di Liegi tratta di: Luminous Blue Variables (LBV), Red Supergiants (RSG) e Wolf-Rayet stars (WR). Queste classi d'oggetti sono importantissime perché, come vedremo, sono i principali oggetti che contribuiscono a cambiare la composizione chimica del mezzo interstellare dal quale, successivamente, si formeranno le nuove generazioni stellari. Vi chiederete, che cosa centrano stelle blu caldissime con stelle rosse freddissime? E' il caso degli opposti estremi che si toccano, quando "Giano bifronte" si presenta in astronomia. Le tre classi d'oggetti sono, infatti, uno solo o meglio sono tre stadi evolutivi d'una stella di sequenza principale appartenente alle classi spettrali O oppure B di elevata massa. Sostanzialmente è la stessa stella che si presenta alle nostre osservazioni con volti diversi ad età evolutive diverse. Tante parole per dire che un tempo Betelgeuse era una stella Early Type, cioè una stella dei primi tipi spettrali e probabilmente di classe spettrale B, la quale brillava di luce bianco-azzurra. Quando osserviamo una supergigante rossa dobbiamo essere consci che stiamo osservando una stella massiccia di tipo spettrale O oppure B, alla fine del suo ciclo evolutivo. Schematicamente lo scenario evolutivo di tali stelle che prende anche il nome di scenario di Conti, un astrofisico statunitense che ha contribuito molto a questo tipo di ricerche, è - semplificando molto - il seguente:

Range di Masse	Percorsi tra le fasi evolutive
> 90	O -> Of -> WNL -> (WNE) -> WCL -> WCE -> SN I
60 ÷ 90	O -> Of/WNL ⇔ LBV -> WNL -> WCL -> SN I
40 ÷ 60	O -> BSG -> LBV ⇔ WNL -> WCL -> SN I
30 ÷ 40	O -> BSG -> RSG -> WNE -> WCE -> SN I
20 ÷ 30	O -> (BSG) -> RSG -> BSG (Blue Loop) -> RSG -> SN II
10 ÷ 20	O -> RSG -> (Cepheid Loop per masse <15 masse solari) -> RSG -> SN II

La precedente tabella illustra lo scenario di Conti e dev'essere letta come spiegazione delle fasi evolutive attraversate dalle stelle dei tipi spettrali O oppure B, in funzione della loro massa, durante la loro evoluzione di post-sequenza principale.

Il segno ⇔ significa che la stella può saltare avanti e indietro tra le due fasi concatenate da tale simbolo, per un certo tempo evolutivo. Mentre il segno -> indica, ovviamente, il progredire con l'età attraverso le diverse fasi. Inoltre il significato degli altri termini è il seguente:

O = stella di tipo spettrale appunto O

Of = stella di tipo spettrale O che mostra peculiarità nel suo spettro

WN = stella di Wolf-Rayet ricca in Azoto

WC = stella di Wolf-Rayet ricca in Carbonio

LBV = variabile blu superluminosa (Eta Carinae è attualmente in questa fase)
 SN I = supernova di tipo I
 SN II = supernova di tipo II (normalmente meno luminose del tipo I)
 BSG = supergigante blu
 RSG = supergigante rossa (fase attuale di Betelgeuse)

Una conseguenza immediata dello scenario di Conti è la constatazione che le supernove di tipo I richiedono una massa iniziale minima di circa 30 masse solari, mentre al di sotto di tale limite si verificano solo esplosioni di supernove di tipo II. Questo, naturalmente, è già un primo risultato da memorizzare. Intanto, però, dobbiamo determinare a quale delle categorie di massa apparterrà Betelgeuse.

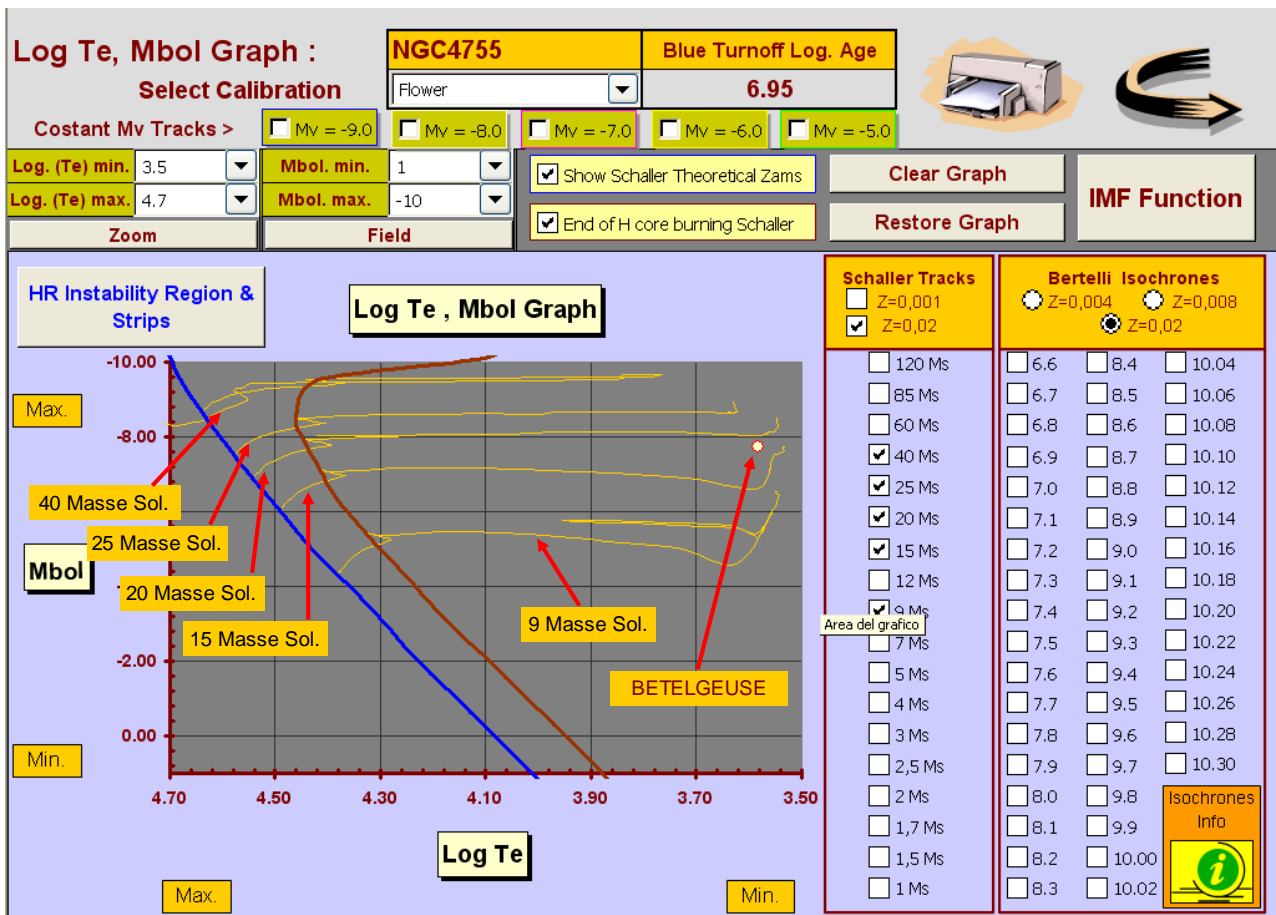
La fotometria può aiutare a risolvere tale questione. Dalle misure fotometriche di flusso, possiamo ottenere la magnitudine "apparente" che può essere convertita in "assoluta", conoscendone la distanza come abbiamo visto nell'articolo precedente. Sempre da misure fotometriche di flusso, utilizzando questa volta due diverse lunghezze d'onda, possiamo ottenere l'indice di colore per questa stella e dalla correlazione esistente tra indice di colore e temperatura, possiamo ottenere la sua temperatura superficiale. Siamo poi ancora in grado di ottenere, con le stesse modalità già viste, la magnitudine bolometrica. **A questo punto, qualcuno si chiederà che cosa stiamo cercando? La risposta è la seguente: stiamo cercando un valore per la massa di Betelgeuse, per poter decidere dove collocarla nello scenario di Conti!** Il problema, semmai, è come fare ad ottenere tale valore. Nessuna paura, abbiamo i nostri valori fotometrici da cui abbiamo già ottenuto - la volta precedente - il seguente quadro:

Classe Spettrale e Classe di Luminosità	M2 Iab
Manitudine visuale apparente	0,45
Indice di colore (B-V)_o	1,71
Magnitudine Assoluta M_v	-5,75
Magnitudine Bolometrica M_{bol}	-7,73
Correzione Bolometrica B_c	-1,98
Temperatura Effettiva T_{eff}	3450
Logaritmo della temperatura effettiva Log (T_{eff})	3,538
Magnitudine Bolometrica Solare	4,74
Rapporto Log (L/L_s)	4,988
Rapporto L/L_s	97275

Come sappiamo, la magnitudine apparente visuale si ottiene da una misura fotometrica di flusso, effettuata attraverso un filtro V Johnson.

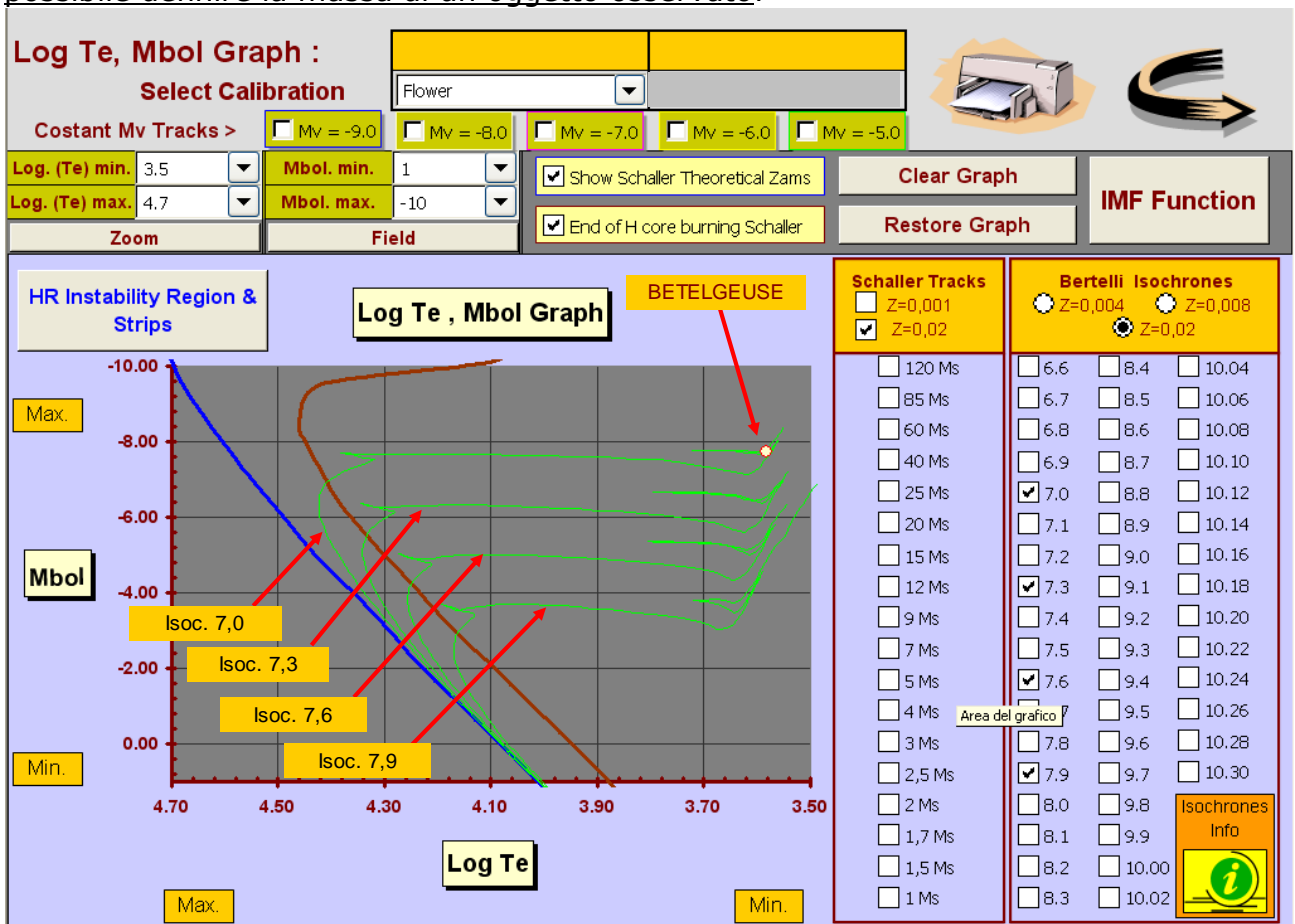
L'indice di colore (B-V)_o per una stella di classe spettrale e classe di luminosità M2 Iab come Betelgeuse è: (B-V)_o = +1,71. Anche tale valore si ottiene, normalmente, da misure fotometriche di flusso a due distinte lunghezze d'onda e attraverso due filtri, ad esempio il filtro B Johnson e V Johnson, i quali permettono d'ottenere l'indice di colore (B-V). Noi però, non possedendo materialmente le misure fotometriche, useremo, per questo esempio, un valore di (B-V) dearrossato ottenuto utilizzando la calibrazione di Schmidt-Kaler 1982, relativo alla classe spettrale M2 e classe di luminosità Iab. Sempre usando la calibrazione (indice di colore-temperatura) ovvero (B-V)_o, T_{eff} di Schmidt-Kaler 1982, ricaviamo un valore di temperatura superficiale

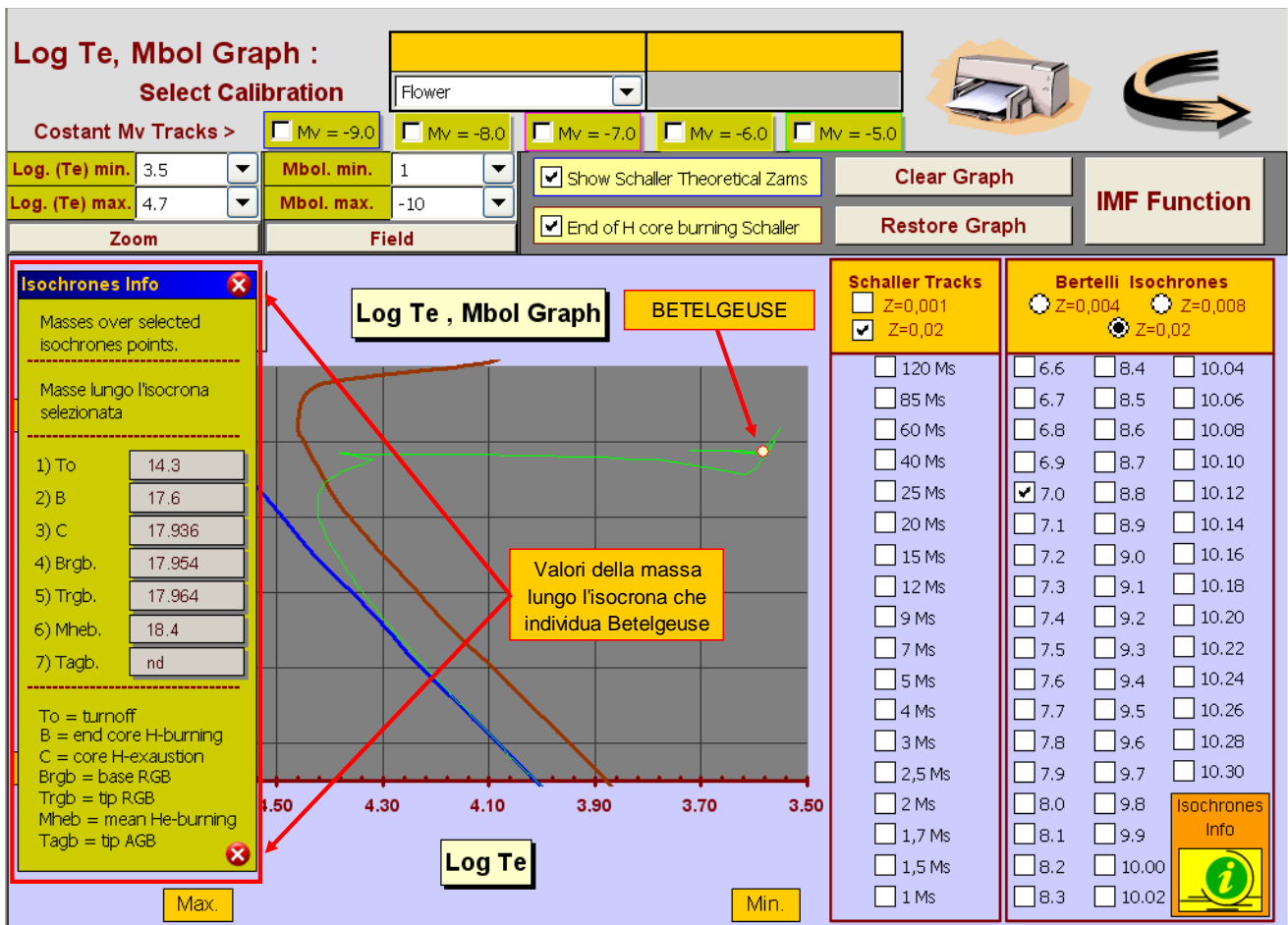
per Betelgeuse pari a 3450 K (gradi Kelvin). La magnitudine assoluta visuale di Betelgeuse la conosciamo già, dalla relazione precedente, come pari a: $M_v = -5,75$. Mentre la magnitudine bolometrica, sempre dalla relazione precedente, risulta essere pari a: $M_{bol} = -7,73$. Con tutti questi dati provenienti o ricavabili da misure fotometriche, possiamo tentare di posizionare Betelgeuse su un diagramma HR teorico Log (Teff), Mbol. Facciamo questo per confrontare la sua posizione con una serie di tracce evolutive calcolate da modelli stellari e quindi ottenere il valore della sua massa. Faccio notare che si può arrivare a questo risultato soltanto utilizzando valori derivanti da osservazioni. Per posizionare Betelgeuse su un diagramma teorico HR Log (Teff) - Mbol, dovremo calcolare il logaritmo della temperatura che sappiamo essere, dalle misure di indice di colore, pari a: 3450 K. Allora, $\text{Log (Teff)} = \text{Log } 3450 = 3,538$. Mentre per il valore della magnitudine bolometrica, non è richiesto alcun calcolo in quanto sappiamo, sempre dalla relazione precedente, che il suo valore è pari a: $M_{bol} = -7,73$. Adesso procediamo e vediamo la posizione di Betelgeuse sul diagramma HR teorico, dove per confronto saranno evidenziate anche le tracce evolutive dei modelli stellari del gruppo di Ginevra (Shaller, Maeder, Meynet) e isocrone dai modelli stellari del gruppo di Padova (Bertelli e altri). Come si vede nella prossima figura con i valori di $\text{Log (Teff)} = 3,538$ e $M_{bol} = -7,73$ Betelgeuse è perfettamente individuata tra le tracce evolutive teoriche di 15 e 20 Masse Solari.



Tuttavia se osserviamo le prossime due figure, possiamo essere più precisi. Infatti, sovrapponendo le isocrone dai modelli stellari di Bertelli, siamo in grado di verificare il valore della massa che Betelgeuse ha nel punto - sul diagramma HR teorico - in cui i parametri misurati dalla fotometria la individuano. Infatti, se andiamo a leggere nel riquadro che mostra e specifica i valori della massa lungo l'isocrona che si sovrappone alla posizione di Betelgeuse sul diagramma teorico HR, possiamo vedere come il suo

valore si aggiri tra 17 e 18 masse solari. Ecco come, partendo da valori fotometrici, è possibile definire la massa di un oggetto osservato!





Sulle tre precedenti figure, sono sempre indicate due linee in grassetto, una blu e l'altra marrone, le quali rappresentano rispettivamente: ZAMS (blu), ovvero la Zero Age Main Sequence, e TAMS (marrone), ovvero la Terminal Age Main Sequence. La TAMS, generalmente meno conosciuta rispetto alla ZAMS, indica il luogo sul diagramma HR, dove una stella lungo la propria traccia evolutiva termina la fusione dell'idrogeno nel nucleo stellare.

Ora che siamo stati in grado di definire, per Betelgeuse, una massa pari a 18 Masse Solari, possiamo affermare con tutta serenità che, quando esploderà lo farà come una supernova di tipo II, essendo la sua massa largamente inferiore alle 30 Masse Solari necessarie, secondo lo scenario di Conti, per produrre una supernova di tipo I. Come vedete la fotometria, quando utilizzata in modo accurato, è assolutamente in grado di rispondere a diverse questioni che altrimenti risulterebbero insolubili. Sembra quindi che la fotometria sia uno strumento molto potente e assolutamente adatto ad ottenere i parametri fisici stellari.

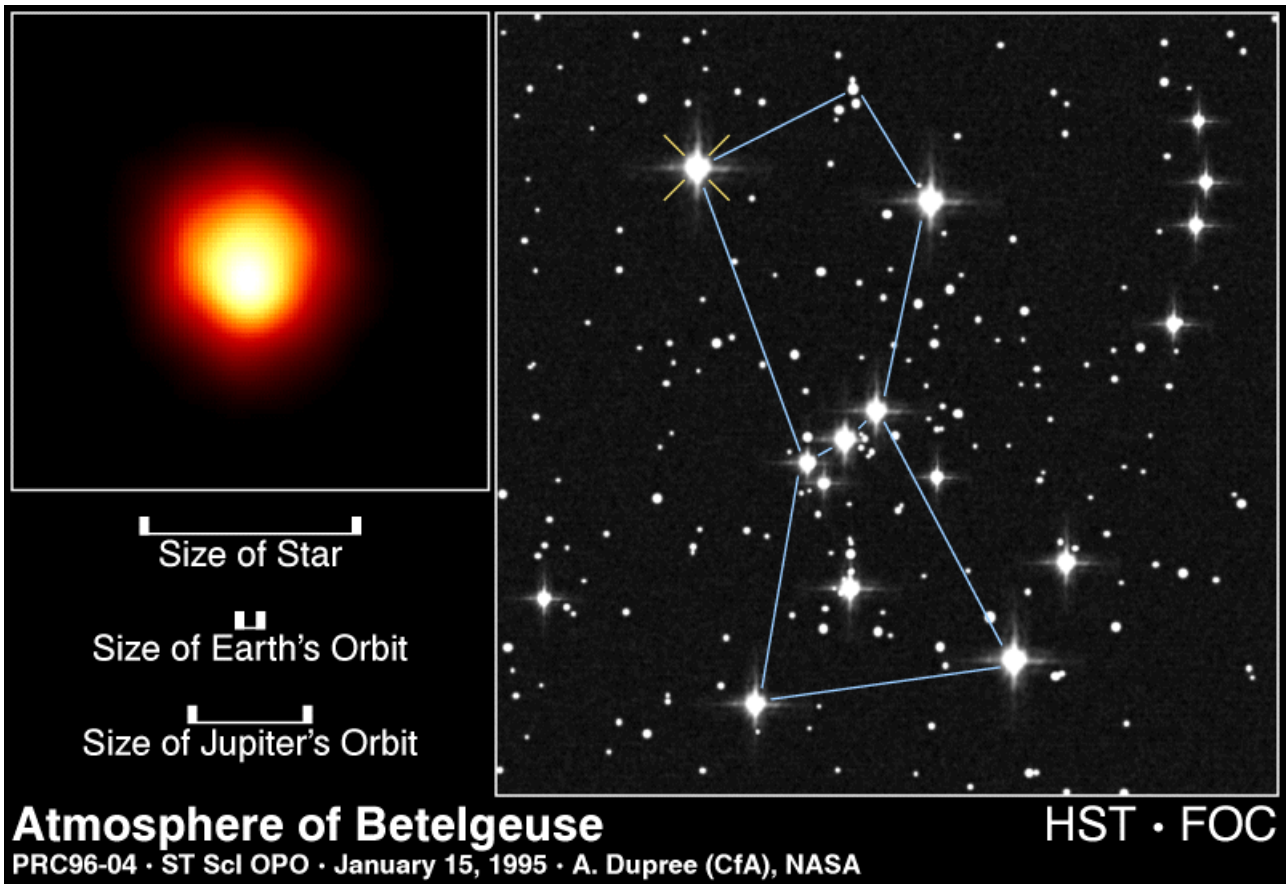
Se teniamo nella giusta considerazione, quanto ottenuto fino a questo momento sembra del tutto evidente che, quando Betelgeuse terminerà la sua attuale fase evolutiva esplodendo come supernova di tipo II, sarà meno luminosa di quanto da noi considerato nella precedente relazione. Questo, naturalmente, non vuol dire che i calcoli che abbiamo fatto la volta scorsa siano in linea di principio errati. Tutto ciò vuol soltanto dire, che i valori trovati saranno appena diversi, in quanto l'ipotetica supernova Betelgeuse sarà meno luminosa di quanto avevamo considerato. E questo mi pare sia un altro passo in avanti circa le improbabili catastrofi, eccetera.

Ma la vera importanza delle stelle di gran massa, come Betelgeuse e tante altre nelle loro varie fasi evolutive di post-sequenza principale, è dovuta alla grande perdita di massa che queste stelle attuano con la complicità di imponenti venti stellari. Dunque sono queste le stelle che influenzano in modo preponderante il mezzo interstellare,

disperdendo materiale nello spazio intorno a loro. Che ci siano grandi quantità di materiale intorno ed anche a discreta distanza da queste stelle, è un fatto assodato. E' noto da varie misure, che tali stelle prolungano la loro vita in tutte le fasi evolutive di post-sequenza espellendo grandi quantità di materiale. E' principalmente con questo sistema, e non solo con le esplosioni di supernove, che viene arricchito il mezzo interstellare. L'arricchimento avviene con l'immissione nel mezzo interstellare di specie atomiche più pesanti dell'elio. Tali prodotti di nucleosintesi sono portati in superficie dal nucleo di una supergigante rossa, attraverso grandi celle convettive e/o fenomeni di dragamento profondi e successivamente dispersi nello spazio circostante attraverso imponenti venti stellari. Del resto la velocità di fuga dalla superficie stellare di una supergigante rossa è più facile di quanto la stessa cosa non sia dalla superficie del nostro Sole. Vediamo perché, con appena due calcoli. La velocità di fuga (o escape speed) è data dalla seguente formula:

$$V_{ESCAPE} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \left(\frac{2GM}{R}\right)^{0,5}$$

dove: G = costante universale di gravità e M ed R sono rispettivamente massa e raggio della stella per la quale si vuole calcolare la velocità di fuga dalla sua atmosfera. Ora, per giustificare la nostra affermazione precedente dove abbiamo sostenuto che è più facile sfuggire da una supergigante rossa rispetto al nostro Sole, dovremo risolvere la precedente formula sia per Betelgeuse sia per il Sole. Già da una semplice osservazione della precedente formula si vede, in ogni caso, come velocità di fuga e raggio siano tra loro inversamente proporzionali. Detto questo, per dimostrare ciò che ci proponiamo occorre conoscere i raggi del Sole e di Betelgeuse. Benché il valore del raggio di Betelgeuse si possa ricavare per via fotometrica, utilizzando calibrazioni empiriche quali quelle di Wesselink o Popper, qui seguiremo una via soltanto geometrica, in quanto il diametro angolare di Betelgeuse è stato misurato direttamente in modo abbastanza preciso. La misura del diametro angolare di Betelgeuse è stata fatta dall'Hubble Space Telescope, il quale ha ottenuto un valore pari a 0,125 secondi d'arco. Per confronto il diametro angolare del Sole è pari a 1919 secondi d'arco.



Il raggio d'una stella può essere calcolato a partire dalle sue dimensioni angolari, a patto che tali dimensioni angolari si possano in qualche modo ottenere, visto che tutte le stelle o quasi, producono solo un'immagine puntiforme. Questo è il caso di Betelgeuse, e ovviamente del Sole, i quali mostrano i valori di diametro angolare già visti in precedenza. Se si conosce la distanza "d" e il diametro angolare " α ", allora si può calcolare il raggio "r" attraverso la semplice formula trigonometria:

$$\frac{r}{d} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

dove r = raggio (in unità astronomiche), d = distanza (in metri) e α = diametro angolare (in secondi d'arco). In astronomia è invalso confondere la tangente con l'angolo sotteso dall'arco, quando il valore di α (diametro angolare) è molto piccolo, cioè molto minore di 1 radiante, quindi possiamo scrivere:

$$r = d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \approx \frac{d\alpha}{2}$$

Ora facendo un po' di calcoli per il Sole e per Betelgeuse, possiamo ottenere i loro raggi come segue.

Per il Sole

La distanza media del Sole è $d = 1$ unità astronomica = $1,496 \times 10^8$ Km. Il suo diametro medio angolare è come abbiamo visto, 1919 secondi d'arco = $9,3 \times 10^{-3}$ radianti quindi:

$$\text{Raggio Solare} = \frac{(1,496 \times 10^8 \text{ Km}) \times (9,3 \times 10^{-3} \text{ rad})}{2} = 696000 \text{ Km}$$

Per Betelgeuse

La sua distanza è $d = 173,8$ parsec = $3,58 \times 10^7$ unità astronomiche. Il diametro angolare di Betelgeuse misurato dall'Hubble Space Telescope è di 0,125 secondi d'arco, corrispondenti a $6,06 \times 10^{-7}$ radianti. Pertanto il raggio di Betelgeuse sarà:

$$\text{Raggio Betelgeuse} = \frac{(5,36 \times 10^{15} \text{ km}) \times (6,06 \times 10^{-7})}{2} = 1,62 \times 10^9 \text{ Km}$$

il che equivale a circa 2327 raggi solari.

Ora che possediamo raggi e masse delle due stelle, possiamo comparare le velocità di fuga tra il nostro Sole e Betelgeuse applicando la seguente formula:

$$V_{ESCAPE} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \left(\frac{2GM}{R} \right)^{0,5}$$

Quindi per il Sole avremo:

$$V_{ESCAPE} = \sqrt{\frac{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 1,98 \times 10^{30}}{6,69 \times 10^8}} = 6,2 \times 10^5 \text{ m / s}$$

e per Betelgeuse:

$$V_{ESCAPE} = \sqrt{\frac{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 3,564 \times 10^{31}}{1,62 \times 10^{12}}} = 5,52 \times 10^4 \text{ m / s}$$

Pertanto il rapporto tra la velocità di fuga dal nostro Sole e da Betelgeuse sarà:

$$\frac{6,2 \times 10^5 \text{ m / s}}{5,52 \times 10^4 \text{ m / s}} = 11,23$$

Il che significa che la velocità di fuga dal nostro Sole supera di ben 11 volte, la velocità di fuga da Betelgeuse. Tutto questo, evidentemente, deve favorire la fuoriuscita di massa dalle supergiganti RSG rendendole, insieme alle altre rappresentanti di questa classe di oggetti molto massivi (O, Of, SGB, LBV, WR), delle vere protagoniste, insieme alle supernove di tipo I e II, nell'arricchimento del mezzo interstellare in elementi pesanti, il cosiddetto "arricchimento in metallicità" dell'ISM.

Quanto appena detto ha un'importanza assolutamente non secondaria. Pensiamo, infatti, che nuove stelle si possono formare là dove vi sia il materiale adatto alla loro costruzione. Poiché, oggi nella galassia, tale materiale si trova nel disco galattico, zona fortemente dominata da stelle dei primi tipi spettrali, vorrà dire che le future generazioni di formazione stellare dovranno utilizzare - forzatamente - il materiale arricchito dalla popolazione attuale di stelle massicce. In questo modo modificheranno la loro composizione chimica, la quale sarà diversa dalla composizione chimica delle stelle progenitrici. In ogni caso, gli astri come Betelgeuse sono i protagonisti di quello che sarà il futuro delle nuove generazioni stellari nelle galassie.

Per gentile concessione dell'autore.