

Modelli di estinzione atmosferica per dati di Betelgeuse

C. Sigismondi¹, W. Vollmann², A. Amorim²⁻³, R. Stubbings², F. Mariuzza²⁻⁴

¹ ICRA/Sapienza University of Rome and ITIS G. Ferraris, Rome

² AAVSO, American Association of Variable Stars Observers

³ NEOA-JBS, Brasile

⁴ UAI, Unione Astrofili Italiana

submitted May 19th, 2020 and accepted June 13th, 2020

Abstract The semiregular variable star Betelgeuse has two main periods of 425 and 2100 days; its light curve form is not known, being well defined only the minima. The present May-June 2020 maximum at or below magnitude 0.4, follows the historical minimum at 1.45 of February 2020. The rapidity of descent and ascent with V-shape, is reproduced for all past cycles. The choice of Earth's atmosphere model for data reduction is discussed for the large angular distance between suitable reference stars, for very low altitudes and for seasonal variations of humidity and transmission of the air.

Riassunto La natura semiregolare della stella variabile Betelgeuse ha due principali periodi di 425 e 2100 giorni circa; la sua curva di luce non è nota, essendo ben definiti solo i minimi. L'attuale massimo di Maggio-Giugno 2020 a magnitudine minore o uguale a 0.4 segue lo storico minimo di Febbraio 2020 a 1.45. La rapidità della discesa e della risalita della curva di luce, con andamento a V, è riprodotto nei cicli passati. La scelta di un modello per l'estinzione atmosferica è discussa per le grandi distanze angolari che si possono trovare con le stelle di riferimento, per le stelle vicine all'orizzonte e per variazioni stagionali della trasmittanza dell'atmosfera.

Keywords First order equations, systems, airmass, differential atmospheric extinction; Equazioni di primo grado e sistemi, masse d'aria, estinzione atmosferica differenziale.

Introduzione: dove sono i massimi di Betelgeuse?

Perché non si vedono massimi nella curva di luce di Betelgeuse?

Abbiamo già visto, nei capitoli precedenti (Sigismondi, Gerbertus 13, 1), questa caratteristica della curva di luce della supergigante rossa di Orione. Riteniamo che il motivo sia quello che la luminosità ordinaria di Betelgeuse, che ha una fluttuabilità su scala pluriennale di circa 6 anni, sia perturbata ogni 1.2 anni dal passaggio di una macchia oscura, meglio una nube di polvere. Questa, in congiunzione superiore, dietro la stella ma in vista con noi, può rinforzarne la luminosità occasionalmente. Il logo in



basso a destra che sta in ogni pagina di questo volume riassume questa idea con una sola immagine.

Massimo dopo il minimo del 2020: osservazioni al tramonto eliaco

Lo studio della luminosità di Betelgeuse nel 2020 è stato prolungato fino al 25 maggio da Roma, e fino all'11 giugno dall'Australia, nel tentativo di stabilire se la magnitudine del massimo era 0.5 come stimato in aprile. La stella però si avvicinava al suo tramonto eliaco che avviene in date differenti a seconda della latitudine del luogo di osservazione.

Per Roma questo evento avviene attorno al 29 maggio e la stella era confrontabile -a parità di fondo cielo brillante- solo con Mercurio nei crepuscoli tra l'11 ed il 25 maggio.

Nello stato di Santa Catarina in Brasile e presso Melbourne in Australia il tramonto eliaco non era ancora avvenuto alla prima decade di Giugno, confermando ciò che ebbe a scrivere Tolomeo nell'Almagesto a proposito della definizione di tali eventi.

Per stabilire 1) se la stella ha raggiunto il massimo e 2) il valore in magnitudine di questo massimo abbiamo dovuto rivedere gli algoritmi usati per la riduzione dati, e con la stella vicina all'orizzonte a Roma “tutti i nodi sono venuti al pettine”.

Tipi di confronto tra Betelgeuse e la stella di riferimento

È naturale che le osservazioni con la stella alta sull'orizzonte e con la corrispondente stella di riferimento altrettanto alta sono quelle più precise, ma nel corso di questa stagione in cui Betelgeuse ha raggiunto un minimo molto profondo sono state usate varie tecniche di confronto, utili da rivedere in questa sede.

1. Stessa altezza sull'orizzonte con la stella di confronto

Una situazione ideale è con stella di riferimento y e Betelgeuse x alla stessa altezza sopra l'orizzonte. Questo fa in modo che, in assenza di nubi a velo, difficilmente visibili di notte, non si debba tenere conto



dell'estinzione differenziale, e la differenza in magnitudine tra x e y è la stessa che c'è tra x_0 e y_0 , cioè le magnitudini

2. Stessa luminosità apparente del confronto, ma stelle a diverse altezze

Si aspetta che x e y appaiano della stessa luminosità, in questo caso è cruciale avere un modello di estinzione atmosferica molto preciso, che fornisca i giusti valori per le due altezze differenti.

3. il metodo di Argelander per tutte le situazioni intermedie con diverse altezze e diverse luminosità. Se 1. e 2. sono i casi limite con meno errori sistematici, il metodo 3, che è il metodo classico, li include tutti. Normalmente per il metodo 3 si consiglia di trovare due stelle di riferimento y_1 e y_2 che siano $y_1 < x < y_2$ e meglio ancora che siano molto prossime entrambe a x , cioè $y_1 \leq x \leq y_2$.

Per Betelgeuse che è stella di prima grandezza y_2 normalmente è Procione 0.37 o Rigel 0.13 e y_1 è Aldebaran 0.86, nel 2019-2020 y_2 è stata Polluce 1.16 e y_1 Castore 1.64.

Ricordiamo che le magnitudini crescono quando la luminosità diminuisce.

Uso dei diversi metodi nelle osservazioni SGQ di Betelgeuse su AAVSO

Nell'inverno 2019-2020 il metodo 1 è stato provato varie volte, e ogni giorno alla stessa ora diminuita di 4 minuti per la durata del giorno siderale, 23h 56m 4s, che è l'intervallo tra due configurazioni alla stessa altezza sull'orizzonte. Il metodo 2, invece, è stato applicato a metà della primavera 2020 con Betelgeuse x sotto Polluce y ; attendendo che diventasse $x=y$, poiché Betelgeuse già aveva superato Polluce in luminosità, ma era molto più bassa sull'orizzonte occidentale e quindi veniva indebolita alla nostra vista dall'estinzione atmosferica, finché $x=y_1$, e qualche minuto dopo scendendo ancor di più in luminosità apparente $x=y_2$ eguagliando Castore.

Così ogni sera si potevano avere due stime indipendenti della magnitudine di Betelgeuse a pochi minuti una dall'altra. L'errore



sistematico di queste stime era però dovuto al modello di estinzione atmosferica considerato, che quando Betelgeuse, x , scendeva sotto i 15° questa incertezza del modello diventa cruciale per la stima di magnitudine. E poiché l'estinzione dipende dalla stagione, umidità, temperatura... si può commettere un certo errore nello scegliere un determinato modello fisico o soltanto numerico di corrispondenza magnitudine - airmass anziché un altro. Il range tipico della trasparenza dell'atmosfera relativamente all'estinzione in magnitudine per massa d'aria e_1 può estendersi tra $e_1=0.23$ ed $e_1=0.32$ magnitudini/airmass per Roma passando dall'inverno più freddo e secco all'estate più calda e umida. Per le osservazioni crepuscolari a Roma dell'ultima decade di maggio il metodo 2 era l'unico possibile, ma le stelle di riferimento erano di quarta grandezza.

Le altre osservazioni disponibili AAX e SRX sul database AAVSO per questo periodo invece erano con la stella su cielo scuro nella condizione 1. con Rigel alla stessa altezza.

L'analisi fatta da VOL a Vienna ha preso altri valori dell'estinzione per airmass $e_1=0.20$, ed ha sempre lavorato con la stella ad altezza $h \geq 30^\circ$ (Vollmann, 2013)

<https://www.bav-astro.de/rb/rb2013-2/101.pdf>

Modelli di airmass extinction a confronto

L'algoritmo di airmass correction messo a punto a partire dall'anno 2003 riportato nell'articolo corrispondente a pag. 17, funzionava fino all'orizzonte per il Sole d'inverno a Roma, in caso di cielo terso, ma è risultato inadeguato con il cielo chiaro di sfondo e color arancio acceso del tramonto. Questo modello è il PPG Piano-Parallelo-Garstang, che da 15° di altezza in giù interpola le masse d'aria fino ad un massimo di 5 all'orizzonte. Le magnitudini/airmass sono 0.236.



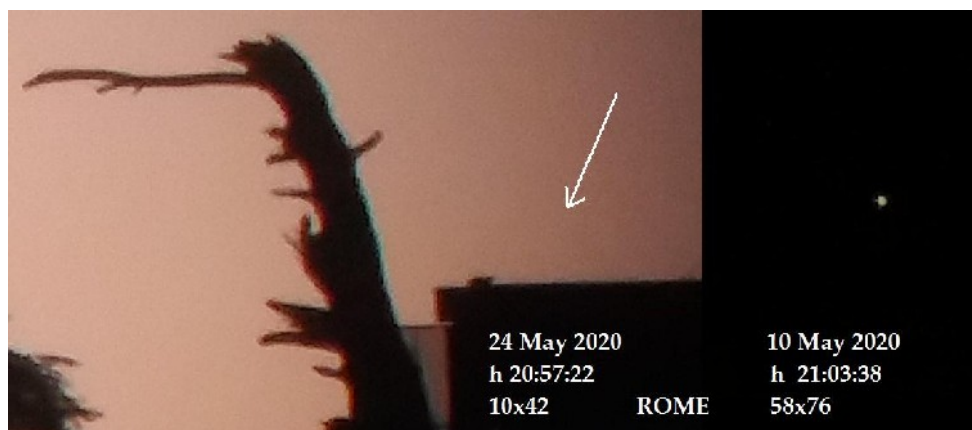


Fig. 1 Fondo cielo a confronto a due settimane di distanza per Betelgeuse. La stella, che nella foto non si vede, ma si vedeva con l'occhio nudo al cannocchiale, era a 4° sopra l'orizzonte geometrico, ma prossima a sparire dietro le case di Monte Mario che erano sul *foreground*, subiva un forte effetto di scintillazione, sparendo addirittura per qualche istante alla vista, durante le pulsazioni. Mentre qualche giorno prima questo non accadeva, sia pure ad altezze molto basse sopra l'orizzonte maggiori di 9° e con cielo chiaro, ma non arancione. Se si utilizza l'algoritmo PPG descritto da pag. 17 Betelgeuse risulta comparabile con stelle di terza grandezza come Gamma e Rho Geminorum, e dopo la correzione per l'airmass differenziale Betelgeuse risulterebbe di magnitudine 1.5.

Modelli di airmass alternativi

Modello usato da Stellarium 12.4

Abbiamo provato a considerare la correzione per airmass implementata dal programma Stellarium, ricavandola empiricamente dai dati di luminosità estinta forniti dal programma stesso. Ne è venuta fuori una funzione a *legge di potenza*, *power law* pari a $8.2[h^\circ]^{-0.9}$ magnitudini di estinzione, che sembra adattarsi meglio a questi dati in luce vespertina. Il mio algoritmo PPG era stato messo a punto sul Sole, di giorno, sereno senza umidità con i dati del 3 gennaio 2003 e prevedeva -per



estrapolazione con dati fino a $h=5^\circ$ - all'orizzonte 5 masse d'aria (modello di Garstang, per un osservatorio ad alta quota).

Questa *power law*, invece, diverge per $h=0^\circ$ e comunque si attesta attorno alle 2.5 magnitudini per 4° sopra, che corripondono già a 8 masse d'aria di 0.236 magnitudini ciascuna nel modello PPG. È anche vero che un po' di umidità fa il gioco di parecchie masse d'aria, ma non era il caso del 24 e 25 maggio, con vento da Nord. Anche applicando questa legge con i dati osservativi del confronto con Gamma Geminorum si può arrivare al risultato di 0.5, ma con un'incertezza di ± 0.2 mag, poiché non si riusciva a percepire differenze lungo circa 10 minuti di tempo, in cui il modello di *power law* prevede notevoli variazioni di airmass con l'altezza sull'orizzonte che variava di qualche grado.

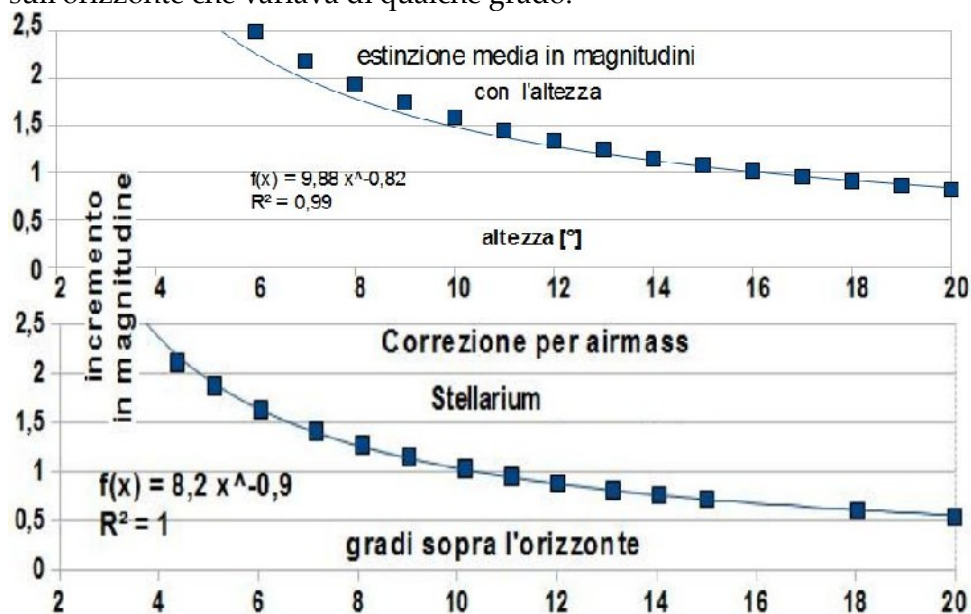


Fig. 2 Airmass correction per Stellarium 12, senza differenza tra crepuscolo e notte comparata (sopra) con quella media tra estate e inverno di D.W.E. Green (1992) dell'ICQ, International Comet Quarterly 14, 55 (1992).



Il modello ICQ (1992) e il modello Piano-Parallelo PP

Se consideriamo, invece, la correzione in magnitudini dovuta al modello ICQ (1992) che propone una differenza tra airmass invernale e quella estiva e ne tabula i valori per il livello del mare, 1, 2 e 3 km di quota, la legge di potenza, in media, fornisce più estinzione rispetto al modello adottato da stellarium 12.4.

La nuova equazione risulta $9.88[h^\circ]^{-0.82}$, con maggiore decremento di luminosità a parità di altezza sull'orizzonte rispetto a Stellarium12.4.

ICQ è basato sull'esperienza di valentissimi astronomi osservativi (Green, 1992) e mostra un allontanamento significativo dal modello piano parallelo e da quello di Garstang per basse altezze sull'orizzonte.

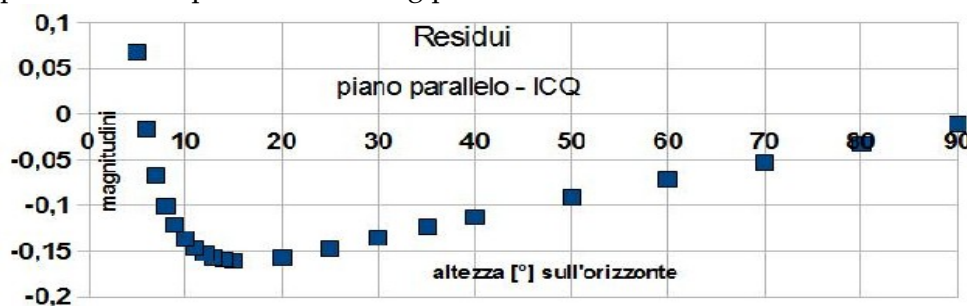


Fig. 3 Residui tra il modello piano parallelo con airmass/mag=0.236 e ICQ con airmass/mag=0.29±0.02 medio tra 15° e 90° di altezza (rapportato alle airmass PP).

Il confronto tra i modelli piano parallelo PP, dove l'airmass= $1/\sin(h^\circ)$ è data dalla famosa legge della cosecante, e l'estinzione per massa unitaria vale 0.236 (per Roma cielo terso e inverno), e ICQ medio mostra un sostanziale accordo fino a circa 7° sopra l'orizzonte, e ciò giustifica l'uso del modello piano parallelo per la maggior parte delle misure. Se l'estinzione atmosferica seguisse esattamente ICQ e dovessimo valutare la magnitudine di Betelgeuse a 15° sopra l'orizzonte, confrontata con Polluce a 48° di altezza (tipica situazione di fine aprile 2020) il modello piano parallelo sottostima il decremento in luminosità allo stesso modo per le



due situazioni, quindi il dato differenziale -su cui si basa la correzione per massa d'aria- resta invariato. Quando l'altezza sull'orizzonte di Betelgeuse va a 10° il dato differenziale resta contenuto entro 0.01 magnitudini.

Per l'altezza di Betelgeuse pari a 5° , come nelle osservazioni crepuscolari fino al 25 maggio fatte da Roma, con la stella di riferimento tra i 20° e i 35° la differenza diventa compresa tra 0.21 e 0.17 magnitudini, valore significativo per una stima corretta della magnitudine stellare.

Facciamo l'esempio dell'algoritmo con Betelgeuse, x , a 5° e Rho Geminorum, y , a 33° sull'orizzonte. Se le due stelle x e y , per comodità di esempio, mostrassero la stessa luminosità: cioè $x=y$ dato osservativo.

Ecco l'esempio dell'algoritmo in cui includo l'estinzione atmosferica

$$\begin{array}{lll} x=y & \text{PP:} & x_0+2.71=y_0+0.44; \quad x_0=y_0-2.27 \\ & \text{PPG:} & x_0+1.02=y_0+0.44; \quad x_0=y_0-0.79 \\ & \text{ICQ:} & x_0+2.64=y_0+0.58; \quad x_0=y_0-2.06 \end{array}$$

Poiché x_0 e y_0 sono le magnitudini delle stelle fuori dall'atmosfera, si vede che in PP in questo caso specifico stimerei Betelgeuse x_0 più luminosa di 0.21 magnitudini in PP rispetto a ICQ. Con PPG che è l'ibrido Piano Parallelo-Garstang che tende a 5 masse d'aria all'orizzonte, in modo lineare a partire da 15° e 3.86 masse d'aria avrei un risultato ancora peggiore. Facciamo l'esempio dell'algoritmo con Betelgeuse, x , a 15° e Beta Geminorum, y , a 48° sull'orizzonte.

$$\begin{array}{lll} x=y & \text{PP:} & x_0+0.91=y_0+0.32; \quad x_0=y_0-0.59 \\ & \text{PPG:} & x_0+0.91=y_0+0.32; \quad x_0=y_0-0.59 \\ & \text{ICQ:} & x_0+1.07=y_0+0.42; \quad x_0=y_0-0.65 \end{array}$$

In questo caso Betelgeuse risulterebbe stimata 0.06 magnitudini più debole usando PP e PPG (che sono equivalente fino a 15° di altezza) rispetto a ICQ medio. Usando un ICQ estivo

$$\text{ICQ:} \quad x_0+1.21=y_0+0.47; \quad x_0=y_0-0.74$$

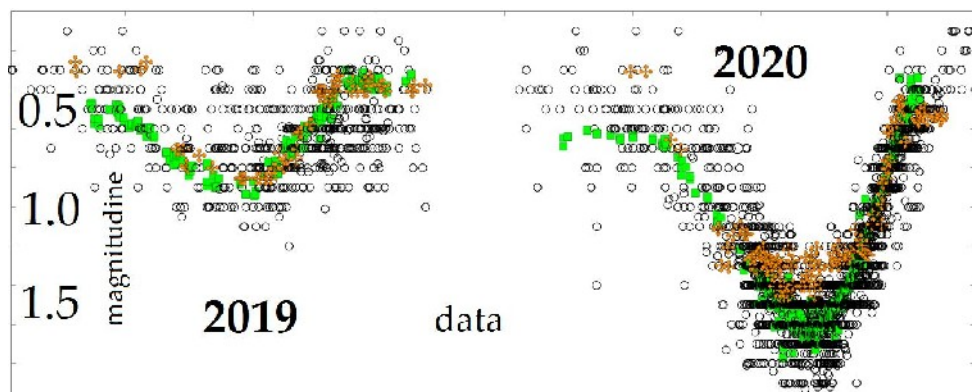
la differenza aumenterebbe a 0.15 magnitudini più debole. Quindi SGQ a fine Aprile 2020 può aver sottostimato tra 0.06 fino a 0.15 magnitudini la luminosità intrinseca di Betelgeuse per aver ridotto i dati con un modello Piano-Parallelo con airmass/magnitudine 0.236 esteso fino a 15° sopra



l'orizzonte.

La magnitudine di Betelgeuse trovata attorno a 0.52 a fine Aprile 2020 con PPG sarebbe dunque da ritoccare tra 0.46 e 0.37 con ICQ.

Questa differenza non si pone per le misure invernali in cui la stella e il suo confronto erano ad altezze superiori ai 50° , dove le differenze tra i due modelli sono minime.



Il modello PPG tra 15° e l'orizzonte, invece, non va bene per le riduzioni al livello del mare, ed è addirittura meglio continuare ad usare PP fino a 5° gradi sopra l'orizzonte, con le distinzioni di trasparenza invernale rispetto a quella estiva. Fig. 4 La curva di luce di Betelgeuse da AAVSO, in arancione i dati SGQ ridotti con modello PPG. Dalle considerazioni fin qui fatte, gli ultimi dati vanno alzati un po', e vanno in accordo con gli ultimi cerchietti in alto a destra di AAX e SRX con $m_v \leq 0.4$.

Curva di luce di Betelgeuse tra aprile e giugno 2020

Con le considerazioni circa l'analisi dei dati tra 15° e 5° sopra l'orizzonte, in cui ho svolto le misurazioni tra fine aprile ed il 25 maggio 2020 da Roma, posso ritenere che la magnitudine di Betelgeuse stimata da SGQ possa essere inferiore al vero tra 0.06 e 0.21 magnitudini.

AAX è Alexandre Amorim da Florianopolis, Brasile, 27°S e SRX è Rod Stubbings da Melbourne 37°S , per entrambi Betelgeuse tramontava alla stessa altezza di Rigel in un cielo abbastanza oscuro, a più di 10°



dall'orizzonte. Le loro stime vanno tra 0.3-0.1 per AAX e 0.4 fisso per SRX. Ciò conferma il raggiunto massimo, ad una magnitudine uguale o leggermente più brillante di 0.4, consistente con la previsione secondo un modello "cinematico" fatta in Atel#13601 al momento della massima variazione di luminosità giornaliera, ritenuto perciò a metà tra min e max. Fu una considerazione meramente "cinematica" basata sul modello dell'oscillatore armonico.

Conclusioni

L'estinzione per massa d'aria e_1 dipende dal luogo e dalla quota di osservazione e dalla stagione dell'anno (più o meno umida), con variazioni stagionali anche significative. Il modello geometrico per determinare la massa d'aria lungo una certa linea di vista, fino a $h \geq 20^\circ$ è in ottima approssimazione quello Piano Parallelo, poi è bene passare a quello ICQ (1992) che, al livello del mare, raggiunge circa 10 ± 1 magnitudini di estinzione. Betelgeuse nella stagione 2019-2020 è stata osservata sia alla stessa altezza della stella di riferimento, affrancandoci dal problema del modello geometrico, fisico e/o numerico di estinzione atmosferica; e anche quando raggiungeva la stessa luminosità apparente del riferimento per l'effetto dell'estinzione atmosferica. In questo secondo caso, al crepuscolo vicino al tramonto eliaco da Roma, Betelgeuse aveva magnitudine 0.3 ± 0.1 . A questo risultato si giunge anche calcolando di quanto viene abbassato il fondo cielo usando il cannocchiale con cui è stata seguita Betelgeuse fino al suo tramonto eliaco.

Referenze

- C. Sigismondi, Atel#13601 (2020)
- D. W. E. Green, <http://www.icq.eps.harvard.edu/ICQExtinct.html> (1992)
- R. H. Garstang, Pub. Astron. Soc. Pacific, **101**, 306 (1989)
- Claudio Tolomeo, Almagesto, Libro VIII cap. 4-6 e Libro XIII cap. 6
- C. Sigismondi, Gerbertus 13, 65 (2020)
- W. Vollmann, BAV Rundbrief, *Betelgeuze und Mintaka* [...] (2013)

