

Alessandro Marchini  
Mario Menichella

## Stelle variabili, che passione!

*Rappresentano il soggetto di studio ideale sia per il profano sia per gli astrofili più navigati. In questo articolo vi guideremo in particolare nell'osservazione visuale...*

**L'**astronomia è uno dei pochi campi della scienza in cui anche il contributo dei dilettanti può essere importante. Anzi, le osservazioni compiute dalle migliaia di astronomi non professionisti sparsi nel mondo – i cosiddetti “astrofili” – si rivelano estremamente utili, specie quando si tratta di seguire, in maniera continuativa e protratta nel tempo, il comportamento di certi oggetti celesti specifici: Sole, Luna, stelle, pianeti, comete, meteore. Ma il settore di ricerca che più si avvantaggia delle osservazioni effettuate dagli astrofili è lo studio delle “stelle variabili”, cioè di quelle stelle la cui luminosità varia nel tempo molto rapidamente rispetto alla durata della loro vita.

Il numero delle stelle variabili note o sospette tali, attualmente stimato in circa 60.000, è enorme in rapporto all'esiguo numero di scienziati che si dedicano a tale tipo di stelle. Pertanto gli astronomi, che hanno a disposizione i telescopi sempre per tempi assai limitati, da soli non sarebbero certo in grado di studiarle tutte con la dovuta attenzione, soprattutto quando si tratta di variabili non periodiche o con una periodicità superiore ai pochi giorni. Ma per fortuna esistono, ormai un po' in tutti i Paesi, singoli appassionati oppure interi gruppi di osservatori dilettanti che si affiancano ai professionisti in questo fondamentale lavoro di sorveglianza, e danno così un piccolo ma significativo contributo al progresso delle nostre conoscenze astrofisiche. Lo studio delle stelle variabili, infatti, fornisce agli specialisti informazioni essenziali sulla natura fisica delle stelle, sul loro ciclo evolutivo e – più indirettamente, grazie al fatto che alcuni tipi di variabili sono degli eccellenti indicatori di distanza – perfino sulla struttura dell'universo galattico ed extragalattico.

L'osservazione amatoriale delle stelle variabili non richiede costose attrezzature o difficili nozioni tecniche: basta possedere un binocolo e, soprattutto, sapere dove e quando osservare. Con appena un po' di pratica e di pazienza, è possibile rivelare anche le più piccole variazioni di luminosità e raccogliere in poco tempo una gran mole di dati osservativi, i quali potranno essere poi facilmente analizzati dallo stesso astrofilo, magari con l'ausilio di un personal computer. Questo articolo, che si rivolge soprattutto a un profano della materia, intende fornire tutte quelle indicazioni necessarie per effettuare, partendo da zero, delle

osservazioni di tipo visuale assolutamente valide dal punto di vista scientifico. Mi auguro dunque che esso possa rivelarsi di utilità pratica per gli astrofili che si vogliono avvicinare allo studio delle stelle variabili ma, ancor di più, che spinga nuove persone a puntare un telescopio al cielo: magari per scoprirvi – come spesso accade – qualcosa di inatteso.

**U**na stella variabile è semplicemente una stella che varia nel tempo la sua luminosità, cioè la quantità di luce emessa e che arriva fin qui sulla Terra. Una tale definizione, tuttavia, potrebbe includere in pratica ogni tipo di stella, visto che i normali cambiamenti evolutivi fanno mutare in maniera significativa la luminosità di questi astri, almeno su scale di tempo dell'ordine del milione di anni o più grandi. Pertanto, una definizione più corretta di stella variabile dovrebbe richiedere che la luminosità osservata vari su scale di tempo piuttosto brevi: minuti, giorni, mesi o al massimo decenni.

Le prime osservazioni di variazioni luminose rilevanti nelle stelle si riferiscono all'improvvisa apparizione nel cielo di *supernove*. La prima supernova di cui abbiamo notizia è quella del 1054 d.C. riportata nelle antiche cronache cinesi, alla quale seguirono a distanza di alcuni secoli quelle del 1572 e del 1604, osservate rispettivamente dai due più famosi astronomi dell'epoca, Tycho Brahe e Giovanni Keplero. Ma solo nel Novecento si è capito che anche le supernove sono, a loro modo, delle stelle variabili; per secoli, la prima variabile scoperta dall'uomo è stata considerata *Mira Ceti*, la cui fluttuazione di luce venne notata nel 1609 dal pastore protestante David Fabricius. Da allora, le scoperte di stelle con luce variabile si sono susseguite con ritmo crescente. Una lista compilata da Argelander nel 1844 ne comprende appena 18, ma l'elenco si allunga rapidamente già verso la fine dell'Ottocento, grazie alla ricerca sistematica resa possibile dall'introduzione della fotografia.

Le variabili oggi catalogate sono oltre 55.000 e migliaia di nuove stelle vengono scoperte ogni anno. Per la stragrande maggioranza, si tratta di oggetti appartenenti alla nostra galassia, e più della metà sono visibili anche con uno strumento di modesta apertura, quali un telescopio del diametro di 30 cm. Siccome con uno strumento del genere si possono rivelare in tutto il cielo 25 milioni di stelle, se ne deduce che sono note come variabili circa due stelle su mille. Tuttavia questa percentuale è nella realtà alquanto più elevata, perché malgrado le ricerche sistematiche molte variazioni di luminosità sfuggono all'osservazione. Secondo alcune stime, è ragionevole valutare il numero delle stelle variabili nella Galassia intorno all'1-2% del numero totale di stelle. Poiché la Via Lattea contiene circa 300 miliardi di stelle, le variabili galattiche potrebbero pertanto essere in tutto qualche miliardo.

Il primo sistema di nomenclatura delle stelle variabili si deve ad Argelander, che propose di indicarle con una lettera maiuscola da R a Z (in ordine di scoperta) seguita dal genitivo del nome latino della costellazione: ad es., R Cyg, S Cyg, e così via fino a Z Cyg. Ma i nomi si rivelarono presto insufficienti e la sequenza fu estesa con la combinazione di due lettere, a partire da RR, RS fino a ZZ. Quando anche le nuove 45 sigle furono esaurite, si continuò la serie con altre coppie di lettere prima non utilizzate: AA, AB fino a QR (saltando però la J), per un totale di 334 combinazioni. Negli anni Venti, infine, l'Unione Astro-

nomica Internazionale decise di numerare le variabili, a partire dalla 335<sup>a</sup>, premettendo la lettera V al numero d'ordine progressivo: a QR Cyg sarebbe quindi seguita V335 Cyg, poi V336 Cyg, eccetera. A questa complicata nomenclatura sfuggono così solo le variabili comprese nel catalogo di Bayer delle stelle più brillanti pubblicato all'inizio del Seicento, che non sono mai state rinominate (es.:  $\delta$  Cephei,  $\eta$  Carinae,  $\beta$  Persei).

**L**a classificazione delle stelle variabili è cominciata più di un secolo fa, quando le diverse classi di variabili erano descritte in termini di stelle prototipo o capostipite (si parlava, ad esempio, di stelle tipo *Mira Ceti* o variabili tipo *Algol*), e gli astronomi introducevano spesso nuove classi allorché scoprivano delle piccole differenze osservative fra gli oggetti noti. La moderna tassonomia è però, almeno a un primo livello, assai più generica. Infatti, tranne alcune eccezioni, in base al meccanismo fisico che determina la variazione di luce, le variabili possono essere divise in quattro gruppi:

- *Geometriche* (per esempio, le v. tipo *Algol*) – Sono sistemi di due o più stelle delle quali una è deformata, oppure periodicamente eclissata, dalla sua compagna. Vengono dette anche variabili *estrinseche*, o “false variabili”, poiché la loro variazione luminosa dipende da cause del tutto esterne alla stella. Sono invece delle variabili *intrinseche*, o “vere variabili”, perché devono la loro fluttuazione di luce a fenomeni fisici interni, le:
- *Rotanti* (per esempio, il Sole, le pulsar) – Si tratta di stelle che variano di luminosità in maniera periodica a causa della propria rotazione. Quest'ultima può essere rapidissima come nel caso delle pulsar, resti radioemittenti di stelle collassate, o molto più lenta, come nel caso del Sole. Sono incluse pure le stelle di forma ellissoidica a causa della veloce rotazione;
- *Eruttive* (per esempio, le novae, le supernovae e le stelle a *flare*) – Sono stelle caratterizzate da esplosioni che avvengono in modo improvviso e imprevedibile. La potenza associata a questi fenomeni va dalle esplosioni cataclismiche delle supernovae, che comportano quasi la sparizione della stella, alle esplosioni delle novae, che interessano solo gli strati superficiali, fino ai piccoli guizzi, o *flare*, delle stelle più normali;
- *Pulsanti* (per esempio, le v. tipo *Mira Ceti*) – Sono stelle la cui luminosità varia in relazione a un ciclo periodico di contrazione ed espansione degli strati superficiali dell'astro. Non sono delle stelle anomale bensì, come la maggior parte delle variabili intrinseche, semplicemente stelle normali che attraversano una fase evolutiva critica, la quale contrassegna il passaggio da un lungo periodo di relativa stabilità al successivo.

La distinzione fra i vari tipi di stelle variabili è in realtà molto più complessa, nel senso che all'interno di queste quattro categorie vi è un'ulteriore classificazione in sottotipi, o *classi*, per un totale di circa 100 classi diverse. Un utilissimo elenco, completo e commentato, di tutti questi sottotipi (organizzati in sette grossi gruppi) è reperibile in Internet nel sito dell'*Astronomical Society of South Australia*, all'indirizzo <http://www.assa.org.au/vstars/class.htm>. Non è altro che la descrizione dettagliata delle classi menzionate nella quarta edizione del Catalogo Generale delle Stelle Variabili.

A seconda dell'andamento nel tempo della luce emessa, si può inoltre distinguere tra stelle periodiche, semiregolari e irregolari. Una stella variabile è considerata *periodica*, o regolare, se la variazione della sua curva di luce, in particolare la posizione dei massimi e dei minimi, si ripete nel tempo in maniera quasi uguale, dove la parola “quasi” sta a significare che sono ammesse delle piccole irregolarità. Se gli sfasamenti tra un ciclo di variazione luminosa e l'altro oltrepassano una certa soglia – diciamo, sono dell'ordine di un decimo del periodo – oppure se la forma della curva di luce cambia nel tempo accompagnata dalla presenza di “disturbi” vari (pianerottoli, inflessioni, gobbe, doppi massimi, etc.) per cui non si possono determinare i massimi e i minimi, allora la stella è *semiperiodica*, o semiregolare. Infine, se la curva di luce presenta ondulazioni di notevole ampiezza ma nessuna riconoscibile periodicità, la variabile viene considerata *irregolare*.

Le variabili periodiche sono stelle di cui è facile seguire l'andamento nel tempo perché, proprio grazie alla loro ciclicità, è possibile prevedere il loro comportamento futuro sulla base di osservazioni passate. In particolare, la previsione dei futuri istanti di massimo o minimo luminoso si fa conoscendo la loro *effemeride*, uno scritto contenente gli elementi o la formula che permettono di calcolare la data in cui il minimo (o massimo) si verificherà. Se ad esempio per una stella viene fornita la seguente effemeride:

$$Min = 2442961,0934 + 3,0632253 \times E$$

il primo numero, detto *epoca*, è la data di partenza (espressa in giorni giuliani e corrispondente a un minimo avvenuto alle ore 14:15 T.U. del 1° luglio 1976; si veda la box a pag.[..]), che va usata per il calcolo dei minimi successivi; il secondo numero è il *periodo* della variazione, espresso in giorni, mentre  $E$  (= 1, 2, 3...) numera gli eventi. Per convenzione, l'epoca corrisponde a un massimo primario (a un minimo per le variabili a eclisse e RV Tauri).

**D**i stelle variabili ce n'è, come abbiamo visto, per tutti i gusti. Come scegliere allora quelle su cui concentrare la propria attenzione? Certo, innanzitutto in base ai gusti e alle situazioni personali. Chi sa già di poter effettuare solo una stima per notte, per esempio, troverà senz'altro più opportuno rivolgere le sue attenzioni alle variabili a lungo o medio periodo; chi invece è in grado di compiere più stime per notte su una stessa variabile, potrà occuparsi anche di quelle a corto e cortissimo periodo.

Molto conta anche l'obiettivo che ci si prefigge di raggiungere: tipicamente, all'inizio una certa dimestichezza con la tecnica osservativa adottata, e solo in seguito il monitoraggio di alcune stelle di interesse scientifico (accuratamente selezionate tra le migliaia possibili) allo scopo di mettere a disposizione della comunità scientifica i dati raccolti. In ogni caso, la nostra scelta è influenzata *a priori* da tre importanti fattori: la strumentazione ottica disponibile, che limita la possibilità di osservazione alle stelle abbastanza luminose da risultare visibili anche quando sono al minimo; la tecnica fotometrica usata (visuale, fotografica, fotoelettrica, CCD), che restringe la scelta alle variabili con un intervallo di luminosità ben maggiore della minima fluttuazione di luce rilevabile con quella tecnica; la latitudine del luogo di osservazione, che determina quali stelle risul-

tano visibili per tutto l'anno, quali solo in alcune stagioni dell'anno (ed a certe ore), e quali addirittura mai.

A un certo punto occorrerà inoltre decidere se elaborare un programma osservativo proprio o aderire invece alle campagne osservative promosse dalle associazioni di variabilisti, tipo la AAVSO americana e il GEOS europeo, che operano a livello internazionale, o altre più "locali", come l'AFOEV francese, la BAAVSS britannica e la Sezione Stelle Variabili dell'Unione Astrofili Italiani. È preferibile, in effetti, che chiunque si accinga a osservare stelle variabili lavori in coordinamento con altri. Solo un variabilista esperto, difatti, potrebbe essere in grado di elaborare un programma di osservazione di sicura validità scientifica. Inoltre, mentre le osservazioni visuali di un singolo astrofilo non costituiscono di solito un dato affidabile agli occhi della comunità scientifica, quando sono cumulate con le osservazioni di altri astrofili possono essere prese in seria considerazione dai professionisti. In molti casi, infine, è difficile per un singolo osservatore riuscire a seguire una variabile per l'intero suo ciclo, o comunque con la continuità necessaria.

Per ottenere tutte le informazioni che servono nella fase di scelta delle stelle da studiare (oppure per controllare se una variabile da noi scoperta non era magari già nota alla comunità scientifica) è sempre consigliabile consultare i cataloghi specializzati. Le principali pubblicazioni di questo tipo, curate dallo *Sternberg Astronomical Institute* di Mosca (Russia), sono tre: il Catalogo Generale delle Stelle Variabili (GCVS), giunto alla sua quarta edizione, un'opera in cinque volumi che contiene informazioni su 28.435 oggetti galattici classificati come variabili prima del 1982 (Vol. I-III) e su 10.979 variabili extragalattiche (Vol. V); le periodiche "Liste di designazione di nuove variabili", pubblicate ogni uno o due anni per aggiornare e integrare il GCVS (in particolare, le liste n° 67-73 comprendono 3.506 variabili riconosciute ufficialmente tali fra il 1982 e il 1997); il Nuovo Catalogo delle Sospette Variabili (NSV), una raccolta di dati relativi a 14.811 stelle sospettate di variabilità non ancora classificate, negli anni '80, come variabili a tutti gli effetti.

Oggi è possibile consultare direttamente *online* questi immensi archivi di dati, oltre che gli innumerevoli cataloghi "specializzati" in certi tipi di oggetti (supernove, variabili cataclismiche, cefeidi a lungo periodo, etc.), grazie ad Internet. Le informazioni tipiche su un oggetto così ottenibili sono numerose: il nome che designa ufficialmente la stella, la costellazione cui appartiene, le coordinate celesti (ascensione retta e declinazione), il sottotipo o la classe di variabilità, la magnitudine minima e massima, il tipo spettrale, eventualmente il periodo e l'epoca, e la referenza bibliografica più importante sulla variabilità della stella. Quando si interroga uno di questi *database* si può dunque compiere facilmente ricerche su categorie di oggetti da noi stessi definite: per esempio, si può chiedere un elenco di tutte le variabili ad eclisse di periodo inferiore a 12 ore e più luminose della nona magnitudine che si trovano nella costellazione dell'Orsa Maggiore, o cose del genere.

Il *VizieR Catalogue Service*, che è un gigantesco archivio gestito dal Centro dati astronomici di Strasburgo (Francia), raccoglie in sé i dati contenuti in tutti i principali cataloghi di carattere astronomico pubblicati nel mondo. Una volta entrati nel sito (<http://vizier.u-strasbg.fr/vizier/>), potrete consultare anche più cataloghi allo stesso tempo seguendo le istruzioni che vi saranno fornite. Se la

banca-dati francese è lo strumento ideale per soddisfare le esigenze degli astronomi professionisti e degli astrofili più esperti, l'astrofilo alle prime armi, interessato semplicemente a individuare delle stelle su cui impraticarsi, potrà consultare con maggiore profitto un archivio gestito dallo stesso Istituto Sternberg: <http://www.sai.msu.ru/groups/cluster/gcvs>. I dati che sono contenuti in tale *database* sono infatti "solo" quelli dei Vol. I-III del GCVS e delle liste di designazione n° 67-73, per un totale di 31.918 variabili, ma il suo uso è più intuitivo del *VizieR* e la grafica è migliore.

Una volta selezionate le stelle che faranno parte del nostro programma osservativo, il problema successivo è quello di riuscire a individuarle sulla volta celeste per poterne poi stimare la luminosità rispetto ad alcune stelle di splendore costante. A questo scopo è utilissima la cosiddetta *cartina di riferimento*, o semplicemente cartina della variabile, che rappresenta il campo stellare in cui la stella che ci interessa monitorare si trova immersa.

Tale carta è una mappa stellare a grande campo se la stella è luminosa e visibile a occhio nudo, mentre rappresenta una piccola zona di cielo, fortemente ingrandita come se la si vedesse al telescopio, se la stella è debole e si trova in un ricco campo di stelline. La funzione primaria della cartina è infatti di permettere un'identificazione sicura della variabile rispetto alle altre stelle vicine: cosa molto facile nel caso di stelle visibili a occhio nudo, ma che diventa progressivamente più complessa al diminuire del loro splendore. I problemi cominciano quando la variabile – o per sua natura, o per il fatto di trovarsi al minimo di luminosità – presenta magnitudine oltre la  $8^a$ - $10^a$ . In questi casi è necessario disporre di una serie di carte stellari a magnitudine limite crescente che abbracciano campi celesti sempre più ristretti e folti di stelle. La variabile può allora essere individuata con il binocolo o il cercatore del telescopio partendo dalle stelle più luminose del campo e tracciando idealmente triangoli, quadrati e linee fra stelle via via più deboli.

L'altra funzione, non meno importante, della cartina di riferimento è quella di indicare una serie di stelle nei dintorni della variabile, dette *stelle confronto*, che dovranno essere utilizzate come termini di paragone nella stima di luminosità della variabile stessa. Tali stelle non sono frutto di scelte casuali ma rispondono a una serie di criteri preferenziali, quali la somiglianza di colore, la facilità di reperimento, una congrua differenza di magnitudine, eccetera. Esse sono identificate, in ordine di luminosità decrescente, da una sequenza di lettere dell'alfabeto maiuscole o minuscole (*a, b, c...*); oppure da valori numerici, in cui è omessa la virgola decimale, che stanno a indicarne direttamente la luminosità (ad es., "92" sta per magnitudine 9,2). Altre informazioni utili, ma reperibili anche su Internet, fornite generalmente dalla cartina di una variabile sono le coordinate celesti (ascensione retta e declinazione) della stella, la sua classificazione corrente, l'intervallo di variazione, l'eventuale periodo con relativa effemeride, e infine il tipo spettrale.

Se si intraprende un programma osservativo autonomo, sarà in genere molto difficile riuscire a reperire delle cartine relative alle stelle da noi prescelte, specie se si tratta di oggetti poco studiati. Tuttavia, grazie agli *atlanti elettronici*, cioè agli atlanti celesti consultabili tramite computer, è oggi possibile stampare

in pochi minuti tutte le cartine di riferimento che ci occorrono. Gli atlanti elettronici in commercio vengono forniti su CD-ROM, e i migliori includono nel loro archivio i principali cataloghi astronomici di interesse per l'astrofilo: in particolare il già citato GCVS e l'*Hubble Guide Star Catalogue*, che oggi rappresenta il più vasto pacchetto di dati astrometrici disponibili in forma digitale, con i suoi oltre 18 milioni di oggetti stellari e non fino alla 15<sup>a</sup> magnitudine. Spesso in grado anche di controllare alcuni tipi di telescopi con computer interno, tali programmi hanno prezzi diversi a seconda del loro livello. Tra i prodotti più indicati per gli osservatori di variabili possiamo segnalarne alcuni: *Guide* (<http://www.projectpluto.com>), *TheSky* (<http://www.bisque.com>) e *SkyMap* (<http://www.sky-map.com>).

Se non si ha nemmeno la possibilità di stampare al computer le cartine, può essere utile l'atlante cartaceo. Il migliore è il *Millennium Star Atlas*, un'opera in tre volumi che mostra le stelle fino alla 11<sup>a</sup> magnitudine visuale, comprese 9.000 variabili; il suo maggior limite è rappresentato dal prezzo, che si aggira sui 250 dollari. Più economici, ma non per questo meno validi, sono *Uranometria 2000.0*, con magnitudine limite pari a circa 9,5 e lo *Sky Atlas 2000*, che copre l'intera volta celeste con le sue 26 carte complete fino all'8<sup>a</sup> magnitudine. Tuttavia, poiché sulle cartine ricavate dagli atlanti (elettronici e non) le stelle di confronto non sono indicate, esse andranno scelte da noi fra le stelle vicine leggermente più luminose e meno luminose della variabile, e soprattutto di colore simile a quello della variabile, perché l'occhio umano è più sensibile ai colori rossi che a quelli bianco-azzurri (fenomeno noto col nome di *effetto Purkinje*), per cui si rischierebbe di stimare una stella rossa più luminosa di una bianco-azzurra di uguale magnitudine.

**N**aturalmente, è inutile osservare una variabile con frequenza maggiore del dovuto. Per le semiregolari e le irregolari la cadenza osservativa ideale varia, in misura anche notevole, da caso a caso. In generale possiamo dire che, se la variazione è veloce, sono necessarie stime piuttosto frequenti, mentre se è molto lenta può talvolta bastare una stima al mese. Le novae classiche e nane, le supernovae e la maggior parte delle variabili cataclismiche, per esempio, andrebbero osservate tutte le sere e, qualora si verificasse un'esplosione (o una caduta) improvvisa di luminosità, si potrebbero rendere necessarie anche più stime nel corso di una stessa notte.

Se la variabile è periodica, invece, è possibile stabilire una regola grossolana ma di validità abbastanza generale secondo cui le stime possono essere distanziate fra loro, in media, di circa 1/30 di periodo. Così, nel caso di una variabile a eclisse con periodo di qualche ora, si dovrebbe effettuare mediamente una misura di luminosità ogni 5-10 minuti; mentre per una Mira sui 300 giorni sarà sufficiente una stima (o meglio un valore medio serale ottenuto a partire da 3-4 stime) alla settimana. Se, in particolare, le effemeridi della nostra stella periodica sono note, è opportuno prendere un numero maggiore di stime in prossimità dei massimi e dei minimi di luminosità. Le osservazioni di una stella periodica dovrebbero essere fatte, per il resto, a intervalli abbastanza regolari e ripetute per un tempo pari almeno a 2-3 periodi di variabilità della stella. Questo sia per poter ricavare una buona curva di luce media (che necessita minimo di

80-100 stime), sia per sopperire a eventuali “buchi” osservativi dovuti al maltempo o ad impegni personali impreveduti.

Per iniziare a fare esperienza con la tecnica della fotometria visuale descritta in questo articolo, non tutte le stelle variabili vanno però ugualmente bene. Si consiglia di partire con stelle abbastanza luminose (sono più facili da individuare nel cielo), caratterizzate da un intervallo di variazione piuttosto ampio (almeno 0,5 magnitudini, dati i limiti intrinseci di questa tecnica osservativa), da una posizione nel cielo favorevole per la latitudine alla quale ci troviamo (le stelle andrebbero osservate preferibilmente quando sono ben alte sull'orizzonte), e infine da un periodo né troppo lungo (per seguire più cicli nei mesi in cui la stella è visibile), né troppo corto (affinché i tempi per compiere le misure non siano troppo ristretti). Per il neo-variabilista è particolarmente indicato lo studio delle cefeidi e delle variabili a eclisse: l'andamento di queste stelle periodiche è infatti molto regolare e prevedibile, per cui, se le nostre stime indicheranno strani “brillamenti” o inaspettate “cadute di luce”, sarà il segno che è stato commesso qualche errore osservativo.

Una volta pianificate le osservazioni, per potersi organizzare ulteriormente occorre chiedersi di che attrezzatura si ha bisogno in pratica per fare della fotometria visuale. Ecco dunque un breve elenco di ciò che va considerato indispensabile e che ci si deve ricordare di portare con sé al momento di uscire di casa per una serata osservativa. Si tratta, in effetti, di poche cose: un quaderno e una penna, oppure un computer portatile, per registrare in maniera preliminare tutte le stime e altri dati salienti; le cartine di riferimento delle variabili da osservare, meglio se protette dall'umidità notturna avendole infilate all'interno di apposite cartelle trasparenti; una torcia a luce rossa, con cui leggere le cartine o scrivere senza correre il rischio di abbagliare i propri occhi; una sedia a sdraio reclinabile, raccomandata per una più comoda osservazione binoculare; un buon orologio, per determinare con la precisione necessaria i tempi relativi alle singole stime; infine, ma non meno importante, un abbigliamento adeguato al clima, specie nel periodo invernale.

Per quanto riguarda invece gli strumenti ottici, nell'osservazione visuale ci si può servire di qualsiasi attrezzatura: dall'occhio nudo al binocolo, dal cannocchiale al più potente dei telescopi. L'occhio nudo è in grado di vedere solo stelle fino alla 6<sup>a</sup> magnitudine, ma già con un comune binocolo 7 × 50 (dove il primo numero rappresenta gli ingrandimenti, il secondo il diametro delle lenti in millimetri) si può raggiungere la magnitudine 9,6. Con un riflettore da 50 mm di diametro si possono vedere stelle fino alla magnitudine 10,3, che sale alla 11,4 con un binocolo 11 × 80. Infine, con un telescopio riflettore da 200 o 300 mm di diametro si arriva, rispettivamente, alle magnitudini visuali 13,3 e 14,2. Queste sono però magnitudini limite teoriche, raggiungibili solo in condizioni osservative ideali: cielo molto buio e *seeing* ottimo (ovvero scintillazione atmosferica, che allarga il disco stellare, minima). I valori limite effettivi risultano, di solito, leggermente inferiori.

Purtroppo l'occhio umano non fornisce una risposta lineare alle diverse intensità luminose: in particolare, ha difficoltà a stimare le stelle al limite di visibilità e quelle troppo luminose. Ciò comporta che ogni strumento, pur potendo abbracciare un'ampia gamma di magnitudini, si rivela efficace per la stima di variabili solo in una fascia di poco più di tre magnitudini.

Strumento	Intervallo ( $m_v$ )
Occhio nudo	1 - 4,5
Binocolo 7 × 50	4,5 - 8
Rifratore 50 mm	4,5 - 8,5
Binocolo 11 × 80	6 - 9,5
Riflettore 114 mm	6,5 - 10
Riflettore 200 mm	7,5 - 11
Riflettore 300 mm	8 - 12

Di conseguenza, per una stella che varia dalla magnitudine 3,5 alla 5,5 si è costretti a cambiare strumento, se si vuole seguire l'intera escursione di luminosità. Ma questa operazione va evitata, perché porta a ricavare valori differenti anche di alcuni decimi con i vari strumenti: ciò sia per il diverso trattamento delle ottiche, sia per motivi legati alla fisiologia della visione. Tale inconveniente può essere superato "diaframmando" lo strumento, cioè ponendo davanti all'obiettivo un tappo di cartone con un foro centrale di larghezza opportuna. Con un simile accorgimento, per esempio, un binocolo da 80 mm (fascia ottimale 6-9,5 magnitudini) può venire trasformato in un 50 mm (fascia 4,5-8), oppure in un 15 mm (fascia 2,5-5).

**O**ra possiamo finalmente rispondere alla domanda fondamentale alla base di questo articolo: «Come si fa a stimare in pratica una stella variabile?». Ciò, infatti, rappresenta di solito il maggiore scoglio che il neofita incontra nel momento in cui decide di intraprendere tale attività. Tra i numerosi metodi di confronto visuale noti per valutare la luminosità della nostra variabile rispetto a quella di stelle vicine di colore simile e splendore costante, il più antico e anche il più usato dai variabilisti è il *metodo di Argelander* o, più pomposamente, metodo dei gradini di Argelander.

Per effettuare la stima con questa tecnica occorre innanzitutto scegliere, tra le stelle della sequenza di confronto *A, B, C...* indicate dalla cartina di riferimento, due stelle consecutive tali che la variabile appaia di luminosità intermedia fra le due, o eventualmente uguale a una delle due. Dopodiché si procede stimando la differenza di luminosità fra la variabile e ciascuna stella di confronto secondo una scala a gradini messa a punto dallo stesso Argelander. I gradini di tale scala assumono i seguenti valori interi sebbene, man mano che si andrà costruendo una scala personale delle sensazioni, un'osservatore sarà in grado di introdurre anche dei valori intermedi (0,5; 1,5; 0,75...), nonché i gradini superiori al 5, che risultano piuttosto mal definibili:

Gradino	Descrizione
0	La variabile e la confronto appaiono uguali e anche un'osservazione più accurata non permette di notare alcuna differenza di luminosità tra i due corpi
1	Le due stelle appaiono inizialmente uguali, ma un'osservazione accurata evidenzia, dopo un certo tempo, una leggera differenza di luminosità

- |   |  |
|---|--|
| 2 | Le due stelle appaiono ancora uguali al primo colpo d'occhio, ma immediatamente dopo ci si accorge di una differenza di luminosità |
| 3 | Fin dal primo momento si apprezza una leggera differenza di luminosità   |
| 4 | Già dal primo sguardo si evidenzia un chiaro divario nella luminosità  |
| 5 | Esiste una notevole sproporzione fra la luminosità delle due stelle  |

Poniamo, per ipotesi, di aver valutato la variabile di una luminosità compresa fra le due stelle di confronto  $A$  e  $B$ . Allora la stima con il metodo di Argelander della sua luminosità è di solito sintetizzata con la notazione  $A(x)V(y)B$ , dove  $A$  e  $B$  indicano le stelle di confronto usate, in ordine decrescente di luminosità, ed  $x$  e  $y$  sono i valori dei gradini di Argelander apprezzati confrontando, indipendentemente, la variabile  $V$  prima con  $A$  e poi con  $B$ . Per esempio, il risultato di una stima potrebbe essere il seguente:  $A(1)V(3)B$ , ovvero la stella  $V$  è meno luminosa di  $A$  di 1 gradino e più luminosa di  $B$  di 3 gradini. Se poi le magnitudini  $m_A$  e  $m_B$  di entrambe le confronto sono note, dalla stima di Argelander si può immediatamente ricavare la magnitudine  $m_V$  della nostra stella variabile attraverso la semplice formula:

$$m_V = m_A + \frac{x}{x+y} (m_B - m_A)$$

dove  $x$  e  $y$  rappresentano sempre il valore dei gradini. Si noti, tuttavia, che le magnitudini delle stelle di confronto da utilizzare in questa formula non sono quelle fornite dalle cartine di riferimento o dai cataloghi stellari, bensì quelle “personalizzate” che insegniamo a calcolare nell’apposito riquadro, e che sono ricavabili solo al termine della campagna osservativa. Ma a quell’epoca sarà possibile determinare abbastanza bene l’andamento della curva di luce anche senza conoscere le magnitudini delle confronto. Il trucco consiste nell’attribuire alle singole stelle di confronto valori di luminosità pari al numero medio di gradini osservati fra le stesse. Supponiamo, ad esempio, di aver raccolto le seguenti stime:  $A(1)V_1(2)B$ ,  $A(2)V_2(1,5)B$ ,  $A(0)V_3(2)B$ ,  $A(1)V_4(1,5)B$ ,  $A(4)V_5(0,5)B$ ,  $A(2)V_6(1)B$ . Calcolando il numero medio di gradini fra  $A$  e  $B$ , e  $B$  e  $C$ , ricaviamo  $A-B = 3,5$  e  $B-C = 2,25$  gradini, per cui assegniamo alle confronto le pseudo-magnitudini:  $A = 0$ ,  $B = 3,5$  e  $C = 5,75$ . Per le singole stime da riportare in curva di luce, con la formula precedente otterremo così i valori:  $V_1 = 1,17$ ,  $V_2 = 2$ ,  $V_3 = 3,5$ ,  $V_4 = 4,4$ ,  $V_5 = 3,11$ ,  $V_6 = 2,33$ .

Si noti che, siccome la sensibilità ai bordi della retina e del campo inquadrato da uno strumento non è la stessa che al centro, la variabile e le confronto vanno portate a turno al centro del campo dello strumento, dando un’occhiata veloce (non più di due secondi) a ciascuna di esse. Quindi si valuta la luminosità della variabile ripetendo l’operazione almeno due volte a distanza di alcuni minuti, così da confermare i primi valori ottenuti. In caso di dubbio, per verificare se la variabile è più, meno o ugualmente luminosa di una stella di confronto, può essere utile sfuocare l’immagine fino a far scomparire una delle due: quella che scompare per prima è la meno luminosa. Può essere inoltre utile sapere, per effettuare delle stime corrette, che il nostro apparato visivo raggiunge la sua capacità di visione ideale nell’oscurità dopo circa 40 minuti, ma essa viene perduta quasi istantaneamente per ogni esposizione a una luce intensa, quale sarebbe per esempio il dover tornare un attimo in casa o il venir abbagliati anche per un’istante dai fari di un’automobile.

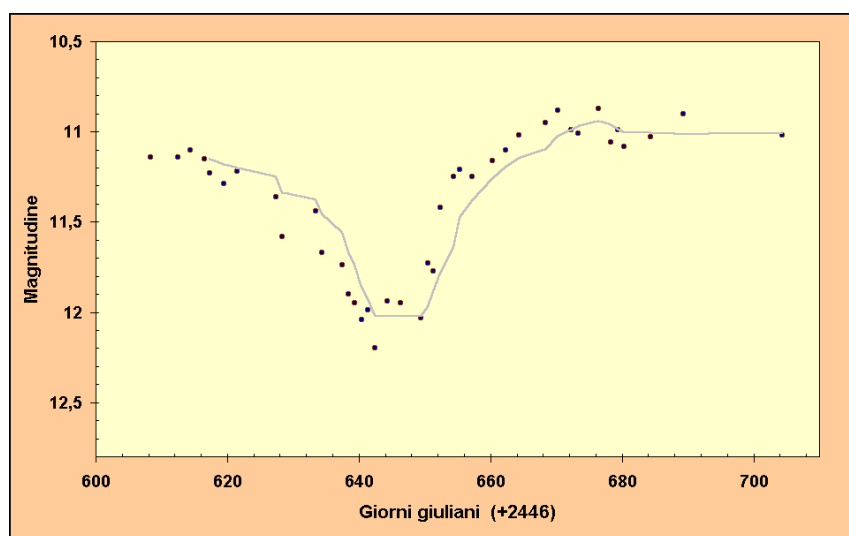
Non bisogna, inoltre, lasciarsi spaventare dall'apparente soggettività con cui i gradini sono definiti: l'esperienza di milioni di stime eseguite in tutto il mondo con questa metodologia insegna che, per i principianti alle loro prime misure, il valore personale del gradino è di circa 0,20-0,25 magnitudini, ma col tempo scende a un valore medio di 0,10-0,13 magnitudini, o anche inferiore. Di conseguenza, la precisione necessaria nel rilevamento dell'istante di osservazione nelle stime visuali deve essere di almeno 1/100 del periodo della variabile. Questo significa che, per una variabile con periodo di 100 minuti, l'errore massimo tollerabile dovrà mantenersi inferiore al minuto. Per sincronizzare gli orologi con la precisione del secondo si possono allora utilizzare: l'«ora esatta» ufficiale fornita per l'Italia, anche via Internet, dall'Istituto Elettrotecnico Nazionale «Galileo Ferraris» di Torino (<http://www.ien.it>); i segnali orari trasmessi dalla RAI prima dei radiogiornali; o, infine, i segnali orari trasmessi in continuazione da alcune stazioni radio estere.

---

## Dalla data giuliana alla curva di luce

Il principale strumento utilizzato per studiare la variazione luminosa di una stella variabile è la cosiddetta *curva di luce*, un diagramma che mostra come cambiano i valori della luminosità “apparente” (cioè misurata sullo sfondo della volta celeste) nel corso di osservazioni effettuate in tempi diversi.

Si tratta, in pratica, di un grafico  $x$ - $y$  che riporta in ordinata la magnitudine della stella ( $y$ ) e in ascissa il tempo ( $x$ ), indicato in “giorni giuliani”, un computo usato in astronomia in base al quale si dà ai giorni una numerazione progressiva: in tal modo è facilissimo calcolare il numero di giorni trascorsi fra due date qualsiasi. La luminosità apparente e il tempo rappresentano dunque i dati osservativi fondamentali di una stella variabile che, una volta ridotti a curva di luce, permettono di determinare parametri caratteristici come l’ampiezza (o *range*) della variazione, l’eventuale periodicità e la scala di tempo tipica della fluttuazione.



*Una tipica rappresentazione grafica dei dati osservativi di una stella variabile. La figura mostra sia la curva di luce per punti che riproduce i dati grezzi, sia una curva di luce smussata ricavata in maniera del tutto automatica grazie all’opzione «media mobile» supportata dal programma Excel®.*

Per convertire il tempo in giorni giuliani e loro frazioni decimali occorre prima di tutto convertire l’ora di osservazione in Tempo Universale (T.U.), o tempo al meridiano di Greenwich, sottraendo un’ora (o due nei mesi estivi, quando è in vigore l’ora legale) all’ora misurata dall’orologio. Dopodichè si può effettuare la conversione del Tempo Universale e della data civile in giorni giuliani (G.G.), che rappresentano per convenzione il tempo, espresso in giorni e decimali di giorno, trascorso dal mezzogiorno del 1° gennaio del 4713 a.C.

Per esempio, supponiamo di aver compiuto un’osservazione alle ore 1:22 del 14 luglio 1997. Innanzitutto, poichè le ore 1:22 del 14 luglio sono legali, esse corrispondono alle ore 23:22 T.U. del 13 luglio 1997. Ma alle ore 12:00 T.U. del 14 luglio 1997 inizia il G.G. = 2451008, come si può facilmente scoprire consultando delle apposite tabelle. D’altra parte, poichè le ore 23:22 seguono di 11 ore e 22 minuti il

mezzogiorno, esse costituiscono la seguente frazione di giorno: 0,47361111.. (per precisare l'ora, il minuto o il secondo è sufficiente fermarsi rispettivamente alla seconda, alla terza o alla quinta cifra decimale). Dunque la data giuliana relativa all'osservazione è G.G. = 2451008,47361...

### Un algoritmo di conversione

Ma come si può fare per calcolare la data giuliana relativa a un determinato istante di tempo se uno non ha le tabelle a portata di mano o non vuol perder tempo in calcoli? Considerata l'enorme diffusione ormai raggiunta dai personal computer, il modo più semplice è quello di sviluppare un semplice programma che permetta, in pochi secondi, di ottenere la risposta desiderata.

Qui di seguito ne proponiamo uno scritto in QuickBasic, un linguaggio di programmazione molto semplice che può essere compreso e utilizzato anche da chi ha poca confidenza con l'informatica. Ecco il relativo listato:

```
10 DEFDBL A-Z
20 INPUT "ANNO"; Y
30 INPUT "MESE"; MM
40 INPUT "GIORNO"; D
50 INPUT "ORA"; H
60 INPUT "MINUTO"; M
70 INPUT "SECONDO"; S
80 HD = ((S/60) + M)/60 + H
90 G1 = HD/24
100 GD = G1 + D
110 IF MM <> 1 THEN IF MM <> 2 THEN 140
120 Y = Y - 1
130 MM = MM + 12
140 A = INT(Y/100): B = 2 - A + INT(A/4)
150 C = INT(365.25*Y) + INT(30.6001*(MM + 1))
160 JD = B + C + GD + 1720994.5
170 PRINT "JD:"; JD
180 END
```

Diamo ora una breve descrizione del listato. La linea 10 abilita la doppia precisione numerica per tutte le variabili in gioco. Le linee da 20 a 70 rappresentano i dati da inserire: Y anno, MM mese, D giorno, H ora, M minuti e S secondi. Le linee 80-100 servono a trasformare le ore, i minuti ed i secondi in decimali di giorno. Infine, nelle linee 110-160 viene effettuato il calcolo dei giorni giuliani a partire dalla data civile, tenendo conto del fatto che un anno potrebbe essere bisestile o secolare, nel qual caso vengono apportate le opportune correzioni.

Si tenga presente che l'ora da inserire nel programma è espressa in Tempo Universale. Occorre inoltre precisare che l'algoritmo proposto è in grado di convertire in giorni giuliani soltanto le date successive al 15 ottobre 1582, che è il giorno in cui venne introdotto il calendario gregoriano attualmente in vigore. Ma per i nostri scopi ciò non costituisce affatto un problema.

Chi volesse implementare il precedente algoritmo per il calcolo della data giuliana in un programma di foglio elettronico, troverà certamente utile averlo tutto “riasunto” all’interno di una sola riga di istruzioni:

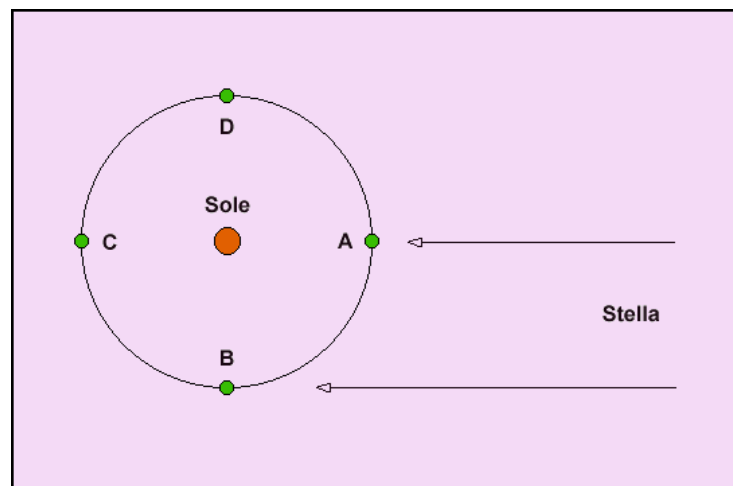
$$JD = -INT(7*(INT((MM+9)/12)+Y)/4)+INT(275*MM/9)+D-INT((INT(INT(Y+INT((MM-9)/7))/100)+1)*3/4)+1721028,5+367*Y+((S/60)+M)/60+H/24$$

dove le variabili Y, MM, D, H, M e S sono le stesse del programma in QuickBasic. Si noti, comunque, che questo secondo algoritmo ultracompatto (tratto dall’*Astrophysical Journal Supplement Series*, **41**, 1979, pag. 392) non può essere utilizzato in un programma scritto in QuickBasic perché, mentre in un foglio elettronico si ha  $INT(-10/6) = -1$ , nei vari linguaggi Basic  $INT(-10/6) = -2$ .

### Calcolo del tempo eliocentrico

In alcuni casi particolari che ora discuteremo, i dati grezzi ricavati dalle osservazioni, prima di essere impiegati per tracciare la curva di luce o ricercare delle periodicità, vanno opportunamente “corretti” per tener conto della differenza di tempo che la luce di una stella impiega a raggiungere il Sole e la Terra.

A causa del moto di rivoluzione annuo della Terra intorno al Sole, infatti, uno stesso evento che ha luogo su una determinata stella può apparire prodursi in tempi diversi per osservatori posti in punti differenti lungo l’orbita terrestre. Poiché la luce impiega al massimo 8 minuti e 19 secondi per viaggiare dal Sole alla Terra è chiaro che, rispetto a un ipotetico osservatore situato al centro del Sole, un osservatore terrestre potrà misurare l’evento in questione con un anticipo o con un ritardo che può assumere valori da 0, per oggetti posti ai poli dell’eclittica, a  $\pm 8$  minuti e 19 secondi per un astro giacente, apparentemente, sull’eclittica stessa.



**Significato della correzione eliocentrica.** Per l’osservatore posto in C, un evento che ha luogo sulla «Stella» appare prodursi quasi 17 minuti dopo rispetto al tempo misurato da un ipotetico osservatore che si trovi in A. Il ritardo è dovuto alla differente distanza degli osservatori dalla stella e alla velocità finita della luce. Con la correzione eliocentrica descritta nel testo i tempi vengono pertanto riferiti a un osservatore posto al centro del Sole.

Ma quand'è che occorre, in pratica, tener conto di questo effetto e applicare alle proprie stime la cosiddetta *correzione eliocentrica*, cioè riportare i tempi delle osservazioni come se fossero state effettuate dal Sole? Molto semplicemente, ogni volta che è necessario conoscere l'istante di un evento o anche solo di una stima luminosa con una precisione migliore di  $\pm 8$  minuti. Tipici casi sono le variabili con periodi pari o inferiori al giorno (ad es. le RR Lyrae), soprattutto se vanno combinate insieme osservazioni effettuate nell'arco non di pochissimi giorni ma di almeno alcune settimane. Nel caso di variabili con periodi noti o presunti assai superiori al giorno, invece, la correzione può di solito venire ignorata.

Per definizione, la correzione eliocentrica è il valore da aggiungere al tempo che misuriamo normalmente (tempo geocentrico) per ottenere il tempo detto *eliocentrico*, che è quello misurato da un osservatore posto sul Sole. Poiché le effemeridi di stelle variabili indicano sempre il tempo eliocentrico degli eventi, se per una variabile rapida si vogliono studiare, ad esempio, le variazioni degli istanti osservati di massimo o minimo rispetto a quelli previsti in base alle effemeridi, è indispensabile applicare tale correzione ai propri dati osservativi.

Il valore della correzione eliocentrica che va sommato alla data giuliana per ottenere la data giuliana eliocentrica può essere ricavato grazie ad apposite pubblicazioni o usando dei programmi per calcolatore. In ogni caso, la formula che permette di calcolarlo, proposta da Binnendijk nel 1960, è la seguente:

$$\text{C.E.} = -0^{\text{g}},0057755 \times [R \cos \Theta (\cos \alpha \cos \delta) + R \sin \Theta (\sin \varepsilon \sin \delta + \cos \varepsilon \cos \delta \sin \alpha)]$$

dove  $R$  è la distanza Terra-Sole (in Unità Astronomiche),  $\Theta$  è la longitudine celeste del Sole lungo l'eclittica,  $\alpha$  e  $\delta$  sono le coordinate equatoriali della variabile (ossia Ascensione Retta e Declinazione) ed  $\varepsilon$  è l'obliquità dell'eclittica.

Il calcolo dei valori  $R$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$  ed  $\varepsilon$  richiede, a sua volta, l'utilizzo di apposite formule. Se però ci si accontenta di una precisione minore, corrispondente comunque a scarti non superiori a  $\pm 20$  secondi, basterà attribuire a  $R$  il valore medio di 1 e ad  $\varepsilon$  il valore medio attuale (anni 2000-2020) di  $23^{\circ},438$ . Per quanto riguarda  $\alpha$  e  $\delta$ , si possono usare i valori riferiti all'anno 2000 tratti dal Catalogo Generale delle Stelle Variabili, dalla cartina di riferimento o da un catalogo di posizione. Mentre per il valore di  $\Theta$  ci si può rifare all'*Almanacco UAI* pubblicato dall'Unione Astrofili Italiani, che dà il valore giornaliero di  $R$  e di  $\Theta$ .

## La sequenza personale e il *decalage* sistematico

I principianti di solito non sanno che, per ottenere una curva di luce personale “corretta”, cioè esattamente rispondente nell’andamento (ma non nel valore assoluto, come vedremo) alla reale variazione luminosa della stella, occorre aver calcolato prima la cosiddetta *sequenza personale*, ovvero aver corretto le magnitudini della sequenza di stelle confronto indicate nella cartina di riferimento secondo la sensazione personale che se ne è avuta.

Difatti l’occhio – anzi, più precisamente, la retina – è assimilabile a una lastra fotografica con sensibilità diversa alle differenti lunghezze d’onda e dunque al colore delle varie confronto (è il cosiddetto *effetto Purkinje*). Ma pure altri fattori, come ad esempio il passaggio da un binocolo a un telescopio per seguire una variabile in vicinanza di un minimo, possono causare differenze significative di tipo fittizio tra le diverse stime del singolo variabilista. Risulta quindi assai utile costruirsi una curva di calibrazione personale che permetta di “livellare” i vari errori sistematici così introdotti.

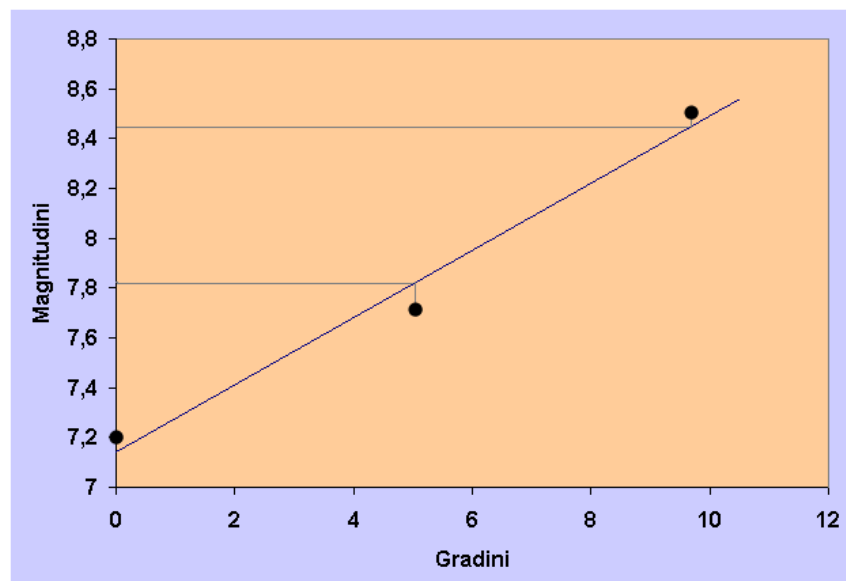
La correzione in questione andrà effettuata al termine della stagione di visibilità di una data variabile (oppure a fine campagna osservativa per le variabili circumpolari), purché si possa disporre di un numero sufficiente di stime distribuite fra le diverse stelle di confronto impiegate. Indicativamente, occorrono un minimo di 15-20 stime, limite al di sotto del quale la correzione in pratica non ha senso. Inoltre, date le caratteristiche del procedimento di calcolo impiegato, la determinazione della sequenza personale è possibile solo se le stelle di confronto utilizzate sono almeno tre.

### Le magnitudini personalizzate

Per illustrare concretamente come si effettua l’aggiustamento della sequenza di confronto prendiamo in esame il seguente esempio, in cui sono state raccolte 10 stime di una variabile  $V$  usando tre stelle confronto  $A$ ,  $B$  e  $C$  rispettivamente di magnitudini  $m_A = 7,2$ ,  $m_B = 7,7$  e  $m_C = 8,5$ :

$A(3) V(2) B$	$A(5) V(0) B$
$A(3,5) V(2) B$	$B(0,5) V(4) C$
$A(3) V(2) B$	$B(1) V(3) C$
$A(3) V(1,5) B$	$B(2) V(3) C$
$A(4) V(1) B$	$B(2,5) V(2,5) C$

Il primo passo da compiere è il calcolo dello scarto medio espresso in gradini (qui indicato con il simbolo  $\langle S \rangle$ ) fra le coppie di stelle confronto. Nel nostro caso:  $\langle S_{A-B} \rangle = (5 + 5,5 + 5 + 4,5 + 5 + 5) / 6 = 5$  e  $\langle S_{B-C} \rangle = (4,5 + 4 + 5 + 5) / 4 = 4,625$  gradini. Dopodiché, fissando arbitrariamente che la magnitudine della confronto più luminosa corrisponda a 0 gradini, è possibile tracciare un grafico avente in ordinata le magnitudini note delle confronto e in ascissa i valori, via via cumulantesi, dei rispettivi scarti medi in gradini.



*Esempio di calcolo della sequenza personale a partire dai dati forniti nel testo. La retta che si ottiene, qui determinata con il programma Excel® selezionando semplicemente dal menù la funzione statistica di regressione lineare, risulta avere equazione  $y = 0,134 x + 7,14$ .*

Se le osservazioni sono corrette e le differenze di colore tra la variabile e le confronto sono contenute, i vari punti del grafico risulteranno allora distribuiti all'incirca lungo una retta. A questo punto si traccia la retta che meglio approssima tali punti e si leggono i nuovi valori di magnitudine che essa individua in corrispondenza delle “vecchie” ascisse: questi valori costituiscono le *magnitudini personalizzate* delle confronto. Nel nostro caso, per esempio, i nuovi valori risultano:  $m_A = 7,14$ ,  $m_B = 7,82$  e  $m_C = 8,44$ .

La determinazione della sequenza personalizzata appena illustrata può naturalmente essere effettuata sia in maniera grafica, tracciando “ad occhio” la retta che sembra approssimare meglio i vari punti sia, con precisione assai maggiore, per via analitica, calcolando l'equazione della retta approssimante con il “metodo dei minimi quadrati”. Tale retta ha equazione  $y = mx + n$ , dove  $m$  è il valor medio del gradino di Argelander (per un dato osservatore e per quello specifico campo stellare) e  $n$  è la magnitudine personalizzata della stella di confronto più luminosa. In pratica, comunque, la retta può essere subito calcolata e disegnata, con l'ausilio di un foglio elettronico tipo Excel®, selezionando dal menù la funzione statistica “regressione lineare”.

### **Per una curva di luce comune**

Una volta ricavata, dopo l'aggiustamento della sequenza di confronto, la curva di luce personale, può essere interessante confrontare quest'ultima con le curve analoghe ottenute da osservatori diversi, e magari cumulare le proprie stime con quelle altrui per ricavare un'unica curva di luce.

Il requisito fondamentale per ottenere risultati omogenei e coerenti fra i vari osservatori – e dunque cumulabili fra loro – è l’uso da parte di tutti di un’identica sequenza di stelle confronto. Tuttavia, anche quando tale condizione è soddisfatta, non è corretto applicare immediatamente la media aritmetica a un insieme di stime ottenute da persone differenti. Tale operazione presuppone infatti che le curve di luce ricavate da ciascun osservatore (che, grazie all’ipotesi precedente e all’aggiustamento della sequenza, hanno sostanzialmente lo stesso andamento) abbiano pure uguale valor medio.

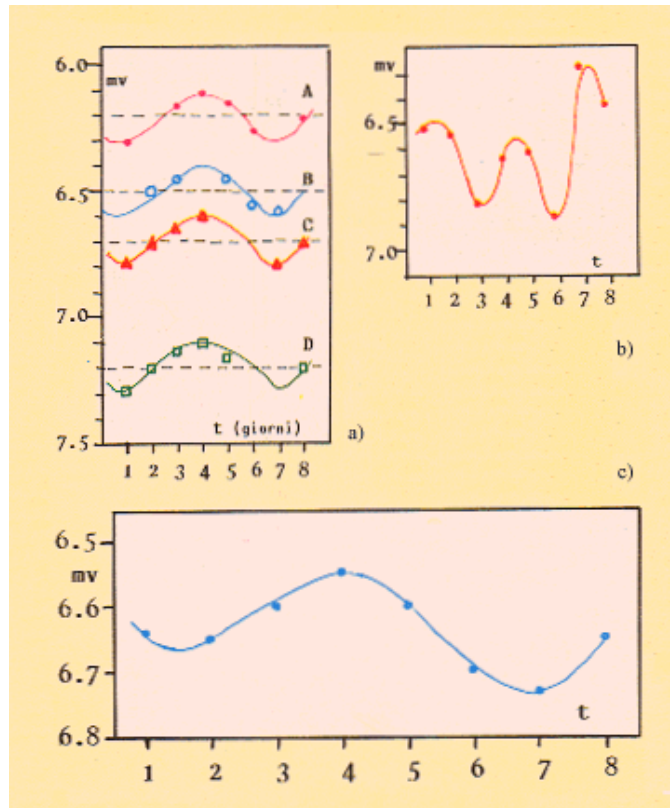
Invece non è affatto così. È noto, innanzitutto, che la sensibilità cromatica dell’occhio è diversa per ogni individuo, e introduce perciò differenze sistematiche tra i vari osservatori. Ma a produrre piccole discrepanze contribuiscono pure svariati altri fattori, come l’ “effetto di posizione” (quello per cui la stima è influenzata dall’angolo con il quale si osservano sullo sfondo del cielo la variabile e le confronto), lo strumento e l’ingrandimento usato, le condizioni ambientali, eccetera. Tutte queste differenze, sommate fra loro, possono portare ad avere curve di andamento analogo ma traslate di alcuni decimi di magnitudine. Se si vogliono cumulare stime di più osservatori, occorre quindi correggerne la rispettiva discrepanza che, con termine francese mutuato dalla terminologia sportiva, è detta *decalage sistematico*.

Per comprendere il genere di errori che si possono altrimenti introdurre tralasciando la correzione del *decalage* sistematico, prendiamo in considerazione il seguente esempio, in cui quattro osservatori diversi (*A*, *B*, *C* e *D*) hanno raccolto, nell’arco di otto giorni, le stime mostrate in tabella:

Osserv./Giorno	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>A</b>	6,30	---	6,15	6,10	6,14	6,25	---	6,20
<b>B</b>	---	6,50	6,45	---	6,45	6,55	6,58	---
<b>C</b>	6,78	6,71	6,65	6,60	---	---	6,78	6,71
<b>D</b>	7,28	7,20	7,13	7,10	7,15	---	---	7,20

Le stime corrispondono, per l’osservatore *A*, ad una magnitudine media  $\langle m_A \rangle = (6,30 + 6,15 + 6,10 + 6,14 + 6,25 + 6,20) / 6 = 6,20$ , e per gli altri tre a:  $\langle m_B \rangle = 6,50$ ,  $\langle m_C \rangle = 6,70$  e  $\langle m_D \rangle = 7,20$ . Ebbene, se andiamo a calcolarci direttamente i valori medi delle stime ottenute in ciascuna giornata dai quattro osservatori, otterremo una curva di luce del tutto casuale, visto che nessuna curva individuale mostra un tale andamento.

Prima di eseguire la media occorre dunque rendere omogenee le stime applicando la correzione per il *decalage* di ciascun osservatore. Per fare questo, basta calcolare quanto le curve individuali differiscono dalla media delle curve di tutti gli osservatori, o meglio, quanto la magnitudine media individuale differisce dalla media di tutte le magnitudini medie dei singoli osservatori, che nel nostro caso è data da:  $\langle m_{ABCD} \rangle = (6,20 + 6,50 + 6,70 + 7,2) / 4 = 6,65$ . Le differenze fra il valor medio delle curve individuali e questa magnitudine media ci indicheranno infatti proprio le correzioni da apportare alle stime di ciascun osservatore per renderle omogenee.



*Una figura che chiarisce bene l'utilità della correzione del decalage sistematico. Vi sono mostrate, nell'ordine: (a) le curve di luce di una medesima stella ottenute da quattro osservatori diversi; (b) la curva di luce comune ricavata da medie giornaliere delle magnitudini osservate dai quattro astrofili senza alcun trattamento preliminare; (c) la curva di luce comune per i quattro osservatori ricavata invece dopo la correzione del decalage sistematico e il calcolo dei nuovi valori medi giornalieri di magnitudine.*

In pratica, la formula generale che esprime la correzione  $\Delta m$  da apportare alle stime dell'osservatore  $i$ -esimo è:  $\Delta m_i = \langle m_{ABCD} \rangle - \langle m_i \rangle$ , con  $i = A, B, C, D, \dots$ . Nel nostro caso avremo dunque:  $\Delta m_A = (6,65 - 6,20) = +0,45$ ,  $\Delta m_B = +0,15$ ,  $\Delta m_C = -0,05$  e  $\Delta m_D = -0,55$  magnitudini. Una volta corretti i valori giornalieri di magnitudine di  $A, B, C$  e  $D$  otterremo quindi la nuova tabella:

Osserv./Giorno	1	2	3	4	5	6	7	8
A	6,75	---	6,60	6,55	6,59	6,70	---	6,65
B	---	6,65	6,60	---	6,60	6,70	6,73	---
C	6,73	6,66	6,60	6,55	---	---	6,73	6,66
D	6,73	6,65	6,58	6,55	6,60	---	---	6,65

A questo punto possiamo finalmente calcolare i valori medi delle stime di ciascuna giornata (che nell'esempio considerato risultano, rispettivamente, 6,737; 6,653; 6,595; 6,55; 6,597; 6,70; 6,73; 6,653), e utilizzarli per tracciare la corretta curva di luce media cercata.