

Planetario di Caserta

LA LUCE DELLE STELLE

ovvero

FISICA DELLA RADIAZIONE TERMICA

Prof. Luigi A. Smaldone

Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Napoli Federico II

Planetario di Caserta

smaldone@unina.it

Introduzione. Ho cercato qualche libro che potesse farmi da guida per questa lezione. Non è stato facile perché non ci sono molti testi che parlino della radiazione elettromagnetica in modo semplice, senza troppe formule, adatti cioè a studenti di un liceo. Per quella che è stata la mia esperienza, al liceo di questioni connesse con la *luce* se ne è parlato un pò a proposito di specchi e lenti e questo è tutto! Sì, forse molti non lo sanno, ma *luce* è il termine che abbraccia l'intera famiglia di quella che è chiamata radiazione elettromagnetica: radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X e raggi gamma. Gli astronomi estraggono più informazioni dalla luce di chiunque altro nel mondo, anzi è l'unico *contatto* che hanno con gli oggetti del loro studio. L'analisi della luce, visibile ed invisibile, è la base di questa disciplina. Noi la raccogliamo, la pieghiamo, la diffondiamo, la disperdiamo, la riflettiamo, la focalizziamo, la dividiamo, la polarizziamo, la filtriamo e di conseguenza la ... *contempliamo*. Si trovano libri che parlano in modo semplice di luce ma, spesso, sono estremamente *banali*. Dopo averli letti non resta nulla: io, invece, voglio darvi le basi per capire il perché dei colori e della luminosità delle stelle. Alla fine ho trovato quello che fa al caso nostro in uno scaffale della mia libreria: *Universe Down to Earth* di Neil de Grasse Tyson (edito dalla Columbia University Press). E' un libro che cerca di far capire la fisica delle stelle ad un pubblico di estrazione culturale varia e, in numerosi aspetti, ... ci riesce. Accidenti, non esiste la traduzione italiana: mi tocca lo stesso scrivere! Piluccherò dal de Grasse Tyson (aggiungendovi un bel pò ... in fin dei conti non siete un pubblico di estrazione varia, siete degli *scientifici*). Spero vivamente di riuscire a conservare il sottile *humour* che pervade ogni capitolo di questo libro.

(Ci sono numerosi esercizi semplici, con le relative risposte, sparsi nel testo ma facilmente individuabili perché utilizzo questi caratteri: tentare di risolverli aiuta molto la comprensione dell'argomento. Prendete nota di quelli che non riuscite a portare in fondo ed indicatemi la prossima volta che ci vedremo. Nello scrivere i numeri uso il punto al posto della virgola, quindi 1,3 lo scrivo come 1.3, e la notazione scientifica, cioè 135.3 lo scrivo come 1.353×10^2)

La famiglia dei fotoni. La luce viaggia, nello spazio vuoto a 299 792 458 metri al secondo (per gioco ho voluto metterla con tutte le cifre per esteso, negli esercizi sarà naturalmente 3.0×10^8 m/s, tradizionalmente la si indica con *c*, è la velocità limite di qualsiasi particella). La luce è composta di particelle prive di massa, chiamati *fotoni*. Fotoni radio, fotoni microonde, fotoni infrarossi e così via, fino ai fotoni gamma, differiscono unicamente per il loro contenuto energetico. Si differenziano anche per la loro *lunghezza d'onda* e *frequenza*, ma esse sono legate da una semplicissima relazione all'energia del fotone.

Tutti i fotoni presentano un duplice comportamento : da onde (nella loro propagazione) e da particelle (nella loro interazione con la materia); si parla di dualismo onda-corpuscolo. Quando li immaginiamo come onda dobbiamo chieder loro la lunghezza d'onda e la frequenza. Queste due sono caratteristiche di qualsiasi onda che si propaghi, come le onde sonore o le onde sulla superficie dell'acqua (includendo anche le onde *seduti-in piedi* che calorosi spettatori inscenano negli stadi!). La lunghezza d'onda è la distanza tra due successive creste (o ventri). La frequenza è il numero di creste che passano nell'unità di tempo (sia esso un secondo, un minuto, un'ora,

un giorno) per un punto fermo nello spazio. Nel *Sistema Internazionale* l'unità di frequenza è il numero di creste al secondo, chiamata *hertz* (con simbolo Hz) in onore di Heinrich Hertz, il fisico del diciannovesimo secolo che ha contribuito notevolmente ad unificare lo studio delle differenti parti dello spettro. Visiteremo ora l'estesa famiglia dei fotoni mettendo in rilievo il loro ruolo nella nostra conoscenza del cosmo.

Prima di tutto il legame tra energia (E_f), lunghezza d'onda (λ), frequenza (ν) e velocità nel vuoto (c) del fotone:

$$\lambda \nu = c \quad (1)$$

$$E_f = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

dove h è una costante fondamentale della fisica moderna, detta costante di Planck (vedere oltre), e vale 6.626×10^{-34} joule per secondo. Dalla (2) si vede che più corta è la lunghezza d'onda (o più alta è la frequenza) della radiazione e più energetico è il fotone.

(Suggerimento per un esercizio : supponiamo che una lampada da 100 Watt emetta solo luce visibile gialla alla lunghezza d'onda di 0.56 micron, quanti fotoni emette al secondo ? -è , come vedremo, una situazione non realistica, ma serve a darvi un pò l'idea dei numeri con cui si opera)

Le Onde Radio. I fotoni radio hanno l'energia più bassa e la lunghezza d'onda più lunga di tutto il gruppo. Tipicamente fotoni con lunghezza d'onda più lunga di una decina di centimetri sono classificati come radio. Alcuni ovvi esempi di fotoni radio sono le Onde Corte, televisione, AM ed FM. Usualmente riveliamo questi fotoni, a differenti energie, semplicemente *cambiando canale o sintonizzandoci* su una stazione differente col nostro ricevitore. Nella radio di casa, la scala della sintonia è in hertz, ma poteva benissimo essere in energia.

(Provate a convertire la frequenza della vostra stazione radio preferita, tramite la (2), in energia dei fotoni, in joule. A proposito, la risposta alla precedente domanda è 2.8×10^{20} fotoni al secondo, perché l'energia di ogni fotone giallo è di 3.5×10^{-19} joule)

Fotoni radio sono emessi da una varietà di oggetti cosmici che includono radio galassie, regioni di formazione stellare e, forse il più importante, atomi di idrogeno.

Radio galassie sono frequentemente galassie ellittiche che mostrano violenta ed esplosiva attività al loro centro (nuclei galattici attivi); queste esplosive regioni sono dotate di forti campi magnetici ed abbondanza di elettroni liberi. Gli elettroni (come ogni altra particella carica) muovendosi nel campo magnetico, percorrono delle spirali ed emettono luce (ogni particella carica *accelerata* emette radiazione elettromagnetica). La forza del campo magnetico e la velocità degli elettroni hanno valori tali nelle radio galassie che gli elettroni emettono onde radio note come *radiazione di sincrotrone*.

Nelle regioni di formazione stellare, ricche di gas, gli elettroni vengono *strappati* dagli atomi nelle collisioni con altri atomi. Vengono poi ricatturati dai nuclei attraverso una cascata successiva tra i livelli energetici dell'atomo. In questa cascata vengono emessi i fotoni radio che prontamente sfuggono dalla regione.

Atomi isolati di idrogeno (un elettrone ed un nucleo formato da un protone) nelle nubi di gas interstellari emettono anche onde radio. Questo fenomeno, predetto dall'astronomo olandese H. C. Van de Hulst nel 1944, fu scoperto nel 1953 da due fisici americani, H. I. Ewen e E. M. Purcell. Una volta ogni dieci milioni di anni, lo *spin* dell'elettrone nell'atomo di idrogeno cambia verso, da parallelo allo spin del protone, che costituisce il nucleo, ad antiparallelo e viceversa (l'elettrone ed il protone sono dotati di momento angolare intrinseco, come se girassero intorno al proprio asse, chiamato spin). Ogni volta che questo avviene, l'atomo perde energia emettendo un fotone radio alla lunghezza d'onda di 21 cm. (è detta proprio *radiazione a 21 centimetri*). Verrebbe da pensare che i radio-astronomi si annoino notevolmente aspettando 10 milioni di anni per rivelare questo fotone. Occorre ricordare che gli atomi di idrogeno costituiscono il 90% degli atomi nelle nubi interstellari e nell'universo. Ci sono tanti atomi da avere, in ogni istante, abbastanza elettroni che cambiano il loro spin e mantenere i radio-astronomi sufficientemente occupati.

(Questo offre la possibilità di fare ancora un esercizio con numeri enormi e piccolissimi: sia A il numero di secondi in un anno -calcolate voi quanto vale A - $A \times 10^7$ è quindi il tempo in secondi tra due variazioni di spin -perchè 10 milioni di anni sono $A \times 10^7$ secondi-. Se prendo un atomo di idrogeno a caso, questo ha la probabilità $P=1/(A \times 10^7)$ di emettere un fotone a 21 centimetri nel prossimo secondo. Se ho un numero enorme N di atomi di idrogeno isolati, il numero di fotoni emessi al secondo è $N \times P$. Quanti fotoni al secondo emette una nube di raggio 1 anno-luce, sapendo che la densità è di 2 atomi per cm^3 ?).

La lunghezza d'onda dei radio fotoni è abbastanza lunga da permettere loro di attraversare grosse nubi di gas e polveri interstellari senza essere assorbiti (cosa che accade a fotoni di più corta lunghezza d'onda). Per queste regioni di formazione stellare e nuclei di galassie (le uniche immagini del centro della nostra Via Lattea sono immagini nel radio), che sono completamente oscurate alle altre lunghezze d'onda, possono essere *osservate* usando questi fotoni.

Nel 1960 fu scoperto un oggetto, di dimensioni angolari apparenti abbastanza piccole da rassomigliare ad una stella nelle fotografie, che emetteva una quantità insolitamente grande di onde radio. Nel dubbio, fu chiamato *sorgente radio quasi stellare* o *quasar* (dall'inglese quasi-stellar radio source). Ora sappiamo che i quasars sono gli oggetti osservabili più distanti nell'Universo e, sebbene molti di essi non emettano nel radio, il nome quasar è rimasto.

Da un punto di vista fisiologico, i fotoni radio, essendo i meno energetici, sono i meno dannosi eccetto quelli di alcuni programmi televisivi che, si sospetta, hanno la capacità di prosciugare il cervello di tutta l'intelligenza presente.

(Se non ci credete, provate a risolvere l'esercizio precedente dopo uno di tali programmi, certamente non vi verrà che 3.16×10^7 è il numero di secondi in un anno, che 3.17×10^{-15} è la probabilità che un atomo di idrogeno scelto a caso emetta un fotone a 21 cm nel prossimo secondo, che il volume della nube di raggio 1 anno-luce, distanza percorsa dalla luce in un anno = 9.5×10^{17} cm, è 3.6×10^{54} cm^3 e contiene 6.4×10^{54} atomi di idrogeno che emettono circa 2.0×10^{40} fotoni a 21 cm per secondo. Non vi trovate col risultato? Certamente avete trascurato che gli atomi di idrogeno sono il 90% di tutti gli atomi).

Le Microonde. Come suggerisce *micro*, sono a lunghezza d'onda più corte delle onde radio; tipicamente vanno da un millimetro a circa dieci centimetri. Le microonde offrono la miglior vista delle molecole interstellari: il biossido di carbonio, la formaldeide e l'acqua sono solo alcune della lunga lista di molecole che possono assorbire ed emettere microonde. Poiché le molecole si formano principalmente dove gli atomi sono densamente impaccettati e si muovono lentamente, le microonde sono i migliori traccianti di nubi gassose fredde.

Proprio la predilezione delle molecole d'acqua per le microonde, fa sì che le osservazioni a tali lunghezze d'onda sono possibili solo in cima ad alte montagne, quando ci si è lasciati sotto la parte di atmosfera più ricca di vapore acqueo.

Nella regione delle microonde è localizzato il massimo di emissione dei residui della radiazione del *Big Bang*, vecchia di 15 miliardi di anni. I resti dell'esplosione che ha dato origine all'universo si sono raffreddati fino a 3 gradi Kelvin

(E' tempo di andarsi a cercare la relazione tra gradi centigradi, o Celsius, e gradi Kelvin; visto che avete in mano il libro di fisica ai capitoli sulla termologia, date un'occhiata anche ai gradi Fahrenheit - non si sa mai ... se capitate dalle parti del Regno Unito!).

I resti del Big Bang furono misurati per la prima volta in un esperimento, che ha fruttato il premio Nobel, con un telescopio a microonde da A. Penzias e R. Wilson. E' la famosa *radiazione di fondo cosmico* o *radiazione di fondo a 3 K*, anche se, come hanno confermato anche numerosi esperimenti a bordo del satellite *Cosmic Background Explorer* (CoBE), la temperatura del fondo cosmico è prossima a 2.7 K. Detto in questo modo si ha la sensazione che la radiazione di fondo cosmico sia qualcosa di lontano (*al fondo del cosmo* !?), in realtà tutto l'Universo è pervaso da questi fotoni. Nella vostra stanza ci sono circa un miliardo di tali fotoni per metro cubo ... non ci sono pericoli, la potenza è molto lontana da quella dei forni a microonde, una superficie di un metro quadro è attraversata da un flusso (energia al secondo per metro quadro) di circa 10^{-5} Watt.

(Una nota: la radiazione di fondo cosmico è presente a tutte le lunghezze d'onda, nelle microonde ha il massimo!).

Non c'è accordo nella comunità scientifica internazionale sulla nocività dell'esposizione a bassi livelli di microonde. Le microonde ci circondano: telefonini, radar, walkie-talkies e forni.

Sui forni a microonde: il meccanismo di funzionamento sfrutta le ottime relazioni tra i fotoni a microonde e l'acqua. In presenza di microonde, le molecole d'acqua (un comune additivo per cibi) letteralmente si *eccitano* e *vibrano* (di passione). Se si fanno vibrare rapidamente abbastanza molecole d'acqua, come è previsto faccia il fascio ad alta intensità di microonde nei forni a microonde, l'attrito tra esse riscalda il cibo; il piatto o la scodella, che non è fatto di acqua, resta freddo tranne che per quel poco di calore trasmesso, per conduzione, dal cibo.

L'Infrarosso. I fotoni infrarossi hanno energia più alta e lunghezza d'onda più corta dei fotoni a microonde, essa va dal millesimo di millimetro (micron) al millimetro. Sebbene non possano essere rivelati dalla retina umana, tutti noi abbiamo avuto a che fare con essi. La sensazione di benessere che proviamo di fronte ad un camino acceso: sono i fotoni infrarossi; stare distesi sul divano e cambiare canale col telecomando: grazie ai fotoni infrarossi !

La lunghezza d'onda dei fotoni infrarossi è ancora abbastanza lunga da penetrare le nubi oscure del mezzo interstellare. L'infrarosso è una eccellente sonda delle regioni di gas riscaldato, specialmente quelle che circondano le stelle appena nate. La radiazione emessa da oggetti *caldi* ha il massimo dell'emissione nell'infrarosso se la loro temperatura è compresa da qualche centinaio a poche migliaia di Kelvin (da una decina a 3000 gradi centigradi). Precisiamo meglio: un oggetto che emette radiazione, emette radiazione di tutte le lunghezze d'onda; se la temperatura dell'oggetto è compresa in questo intervallo, esso emetterà più fotoni infrarossi che fotoni di altro tipo. Notiamo che in questo intervallo di temperatura è compreso anche il corpo umano; in condizioni normali, a 35 °C, il massimo di emissione è per fotoni a 9.41 μm , con una febbre a 40 °C è a 9.25 μm .

(In cosa consiste un'esame diagnostico chiamato termografia?)

Oltre alle regioni di formazione stellare, ci si aspetta emissione infrarossa dai dischi di materiale appena collassati che precedono la formazione di pianeti intorno ad una stella. E' una misura estremamente difficile da fare perché la stella si è già formata e la sua luce (visibile ed infrarossa) *acceca* le misure della regione circostante. Ciò nonostante, sono stati trovati diversi dischi protoplanetari. Certamente il più notevole è quello che ruota intorno ad α Lyrae, nota anche come Vega, la stella più brillante della costellazione della Lyra.

La superficie del bellissimo pianeta Venere può, a ragione, ritenersi uno dei posti più inospitali del sistema solare. La sua densa atmosfera è composta per il 96% da biossido di carbonio (anidride carbonica) che è la causa dell'effetto *serra*. La luce che raggiunge la superficie del pianeta è assorbita dalle rocce e reirraggiata principalmente nell'infrarosso. L'anidride carbonica *intrappola* i fotoni infrarossi, assorbendoli ed impedendo, quindi, che fuoriescano dall'atmosfera; l'energia entra solamente nell'atmosfera e, di conseguenza, la temperatura è cresciuta sopra i 500 °C, alta abbastanza da fondere stagno, piombo, zinco ed ... umani. L'uso di combustibili fossili, al ritmo attuale, raddoppierà il contenuto di anidride carbonica dell'atmosfera terrestre ... preparatevi!

Il Visibile. Le cellule della retina umana sono sensibili a fotoni con lunghezza d'onda compresa tra i 0.4 ed i 0.7 micron. E' questo l'intervallo detto luce visibile. Distinguiamo le diverse lunghezze d'onda attraverso quelli che chiamiamo *colori*, quelli *puri* dell'arcobaleno: Rosso, Arancio, Giallo, Verde, Blu e Violetto (in ordine decrescente di lunghezza d'onda; è chiaro ora il significato di infrarosso, oltre il rosso, e di ultravioletto ?). Qualsiasi altro colore abbiate visto, può essere ottenuto da una combinazione di questi fotoni.

Molecole e polveri dell'atmosfera terrestre sono molto selettive in fatto di fotoni. Diffondono in tutte le direzioni fotoni a più corta lunghezza d'onda (violetto e blu) ed ignorano quelli a più lunga (verde, giallo, arancio e rosso). Durante il giorno, fotoni blu e violetti provenienti dal Sole sono diffusi in tutte le direzioni: dovunque si guardi, il cielo è celeste per questo motivo. Il meglio di questo effetto lo si ottiene con il Sole vicino all'orizzonte quando, cioè, la radiazione solare deve attraversare uno strato più spesso d'atmosfera: un fotogenico Sole rosso-arancio su uno sfondo blu-violetto (non per niente alba e tramonto sono gli spettacoli più gettonati in ... certe occasioni!).

Le caratteristiche di sensibilità del nostro occhio (il massimo di sensibilità si trova nel giallo) sono il risultato dell'evoluzione pilotata da due cause ambientali: l'atmosfera terrestre è abbastanza trasparente a fotoni nel visibile ed il massimo dell'emissione della nostra stella, il Sole,

cade proprio nel giallo. In realtà il visibile è proprio la finestra più adatta per studiare le stelle: sia stelle blu (hanno il massimo di emissione nell'ultravioletto) che, dall'altro estremo, stelle rosse (il cui massimo di emissione è nel vicino infrarosso) emettono una sufficiente quantità di luce in tutta la banda visibile. Nonostante con queste caratteristiche visive si riesca a sopravvivere, occorre riconoscere che i fotoni visibili sono solo una parte molto-molto piccola di tutti i possibili fotoni dello spettro elettromagnetico: siamo praticamente ciechi!

L'astrofisica è nata quando, dietro al telescopio, si è posizionato un prisma per separare i fotoni visibili, provenienti dalle stelle e raccolti dal telescopio, nei colori puri (ovvero ordinati secondo la loro energia). Detto in modo tecnicamente preciso: se ne è osservato lo spettro. Un'atomo di idrogeno, col suo singolo elettrone, può produrre delle strutture, nello spettro di una stella, che indicano chiaramente dove è stato l'elettrone e dove esso è andato. Detto in gergo quasi astrofisico, l'elettrone dell'atomo di idrogeno può *saltare* tra differenti livelli energetici intorno al nucleo; in questi *salto* fotoni sono assorbiti (e l'atomo guadagna energia) o emessi (l'atomo perde energia). Se la temperatura superficiale della stella è intorno ai 10 000 K, l'atomo di idrogeno è pronto a *divorare* fotoni visibili. Spettri di queste stelle mostrano sottili parti di colore mancante, o *righe spettrali*, dove i fotoni sono stati assorbiti dagli elettroni dell'idrogeno. Le lunghezze d'onda (o le energie) a cui ciò avviene sono caratteristiche dell'idrogeno.

Ogni elemento nella Tavola Periodica degli Elementi ed ogni molecola ha il proprio unico e ben definito insieme di lunghezze d'onda a cui assorbe (o emette): sono come le impronte digitali, permettono di individuare inequivocabilmente il responsabile dell'assorbimento (o dell'emissione). Molta parte dell'astrofisica è indissolubilmente legata alla nostra abilità nell'interpretare le *righe spettrali* negli spettri delle stelle. Da esse si deducono la composizione chimica, se la stella è in un sistema binario, con quale velocità si avvicina o si allontana dalla Terra, la temperatura superficiale, la velocità di rotazione, la velocità di espansione o di contrazione (se pulsa cambiando dimensioni), la gravità superficiale, le dimensioni.

L'Ultravioletto. La luce ultravioletta è composta di fotoni a più alta energia e più corta lunghezza d'onda del visibile. Numerosi insetti che volano nelle ore serali hanno la sensibilità dei loro occhi spostata verso l'ultravioletto rispetto a quelli umani. E' questa la ragione per cui, nelle cene all'aperto, conviene usare luci rosse (per favore non fraintendetemi, è solo per non attrarre gli insetti!) e la *sedia elettrica* per insetti è dotata di luce violetta.

Nel cosmo, stelle ad alta massa hanno temperature superficiali alte abbastanza da emettere luce con un massimo nell'ultravioletto; telescopi ultravioletti (posti su razzi o satelliti intorno alla Terra) le individuano facilmente quando non vi sono polveri interstellari che le oscurino. Altri oggetti che emettono un numero elevato di fotoni ultravioletti sono: sistemi stellari binari con le stelle abbastanza vicine tra loro da trasferire il materiale gassoso da una stella all'altra, novae, supernovae e quasar. In breve, gli astronomi che lavorano nel campo dell'ultravioletto tendono a specializzarsi in fenomeni singolari ed energetici.

I fotoni ultravioletti provenienti dal Sole (e anche dagli altri oggetti celesti, ma il numero di fotoni per unità di tempo che da essi provengono non è così elevato da darci preoccupazioni) sono in massima parte bloccati dall'ozono atmosferico. La piccola frazione che riesce a raggiungere la superficie della Terra è sufficiente a fornire, ai *patiti* del Sole, una notevole *tintarella* ed a volte, purtroppo, il cancro della pelle.

I Raggi X. Mentre i fotoni ultravioletti si fermano alla pelle, i fotoni X vanno dritti alle ossa. Eccessiva esposizione ai raggi X può indurre un vasto assortimento di tumori agli organi interni. E' questo il motivo per cui il radiologo esce dalla stanza e chiude la porta mentre vi sottopone ad una radiografia.

I fenomeni che nell'universo producono fotoni X sono ancora più strani ed energetici di quelli che producono gli ultravioletti. Speciali satelliti che orbitano intorno alla Terra rilevano i raggi X provenienti dalla tenue corona che avvolge l'atmosfera solare, dai dischi, riscaldati dall'attrito, di gas che spiraleggia verso la superficie di *pulsar* o *buchi neri*, dal caldissimo mezzo intergalattico esistente nei superammassi di galassie e dalle supernovae ed i loro resti. (In realtà le supernovae sono esplosioni così titaniche ed energetiche da rilasciare un'immensa quantità di fotoni di ogni energia). Vi è anche un tenue flusso di raggi X proveniente da ogni direzione. E' chiamato, giustamente, *fondo a raggi X*, ancora non c'è una spiegazione ragionevole sulla sua origine.

Come curiosità, il primo premio Nobel per la fisica fu assegnato nel 1901 allo scopritore dei raggi X, Wilhelm Konrad Röntgen.

I Raggi Gamma. Il nostro viaggio attraverso lo spettro elettromagnetico termina con la luce con la più corta lunghezza d'onda e la massima energia. Sono i mortali fotoni a raggi gamma. Esposizioni a raggi gamma, quando non portano alla morte, inevitabilmente inducono difetti genetici. Il famoso *Hulk* della serie televisiva e dei cartoni è grosso, verde e orribile grazie ad una eccessiva esposizione ai raggi gamma.

Affinchè una stella abbia il massimo di emissione nei gamma, occorre che la sua temperatura superficiale sia superiore al miliardo di gradi. Questo eccede di molto la temperatura superficiale di qualsiasi stella nota. La fusione termonucleare dell'idrogeno in elio produce, nelle parti centrali delle stelle, un numero notevole di fotoni X e gamma. Il loro viaggio verso la superficie della stella dura un tempo di circa dieci milioni di anni durante il quale sono assorbiti, riemessi, diffusi da atomi ed elettroni che incontrano sulla loro strada. Il loro percorso è molto simile a quello di ubriachi, spinti da una parte all'altra della sala, mentre tentano di raggiungere l'uscita in un locale affollato. Ma, mentre gli ubriachi a volte non raggiungono l'uscio della propria casa, l'energia dei fotoni X e gamma raggiunge sempre la superficie della stella. Solo che la forma di questa energia è notevolmente cambiata, da fotoni a raggi X e gamma di partenza, all'arrivo in superficie la ritroviamo, principalmente, sotto forma di fotoni ultravioletti e visibili. Un singolo fotone gamma può dar luogo (a costo della propria esistenza, naturalmente) a più di centomila fotoni visibili.

Poichè i fotoni gamma sono completamente assorbiti dall'atmosfera terrestre, l'astronomia gamma è possibile solo da satellite. Il primo di questi, il satellite americano *Vela*, lanciato alla fine degli anni sessanta (per controllare i test nucleari sovietici e cinesi!), rivelò una breve ed intensa raffica di raggi gamma di origine cosmica. Forti raffiche di breve durata accadono 4 o 5 volte per anno, provenienti da tutte le direzioni. La causa ... ancora un mistero.

Emettitori gamma sono supernovae ed i loro resti, il centro della Via Lattea e, naturalmente, Hulk quando è imbestialito.

La luce di Corpo Nero. Il titolo di questo paragrafo vi avrà lasciati come minimo perplessi: luce e nero sono termini in antitesi! (*quelli che non hanno trovato niente da obiettare possono anche terminare qui la lettura: quei famosi fotoni televisivi hanno prodotto danni irrimediabili ... vi bevete tutto senza protestare; quelli che son convinti che è asciut' pazz' o' professor' sono vivamente pregati di continuare, ci sono stati diversi premi Nobel dietro questo titolo*). Procediamo con ordine e progettiamo un esperimento ideale, nel senso che fino ad un certo punto può essere portato a termine in casa od in laboratorio. Cercheremo di capire come è distribuita tra i diversi colori la luce emessa da un oggetto luminoso (questo per quello che riguarda la luce nel *visibile*, se vogliamo farlo per tutti i tipi di fotoni bisogna vedere come varia la quantità di luce emessa *in funzione* della lunghezza d'onda o frequenza; per inciso questa operazione è detta *acquisire lo spettro*). Prendiamo una lampada ad incandescenza (quelle col filamento di tungsteno) e dotiamola di un interruttore con un potenziometro in modo che si possa variare la corrente che circola nel filamento.

In condizione di funzionamento normale il nostro cervello interpreta il suo colore come *bianco*; in realtà alcuni dei fotoni sono rossi, altri gialli, verdi, blu (peccato che i nostri occhi non siano sensibili ai fotoni infrarossi, la maggior parte della luce emessa da una normale lampada ad incandescenza è sprecata, per quanto concerne la nostra visione, perché emessa nell'infrarosso; nelle nuove lampade ad alto rendimento luminoso, questo spreco è notevolmente ridotto).

Regolando il nostro potenziometro, col variare della corrente varia la luminosità della lampada (cioè la quantità di luce emessa nell'unità di tempo). Inequivocabilmente l'aumento di corrente nel filamento induce un aumento della temperatura ... basta toccare il bulbo per accorgersene. A bassi valori di corrente il filamento non emette luce visibile, poi piano piano il colore passa da un rosso scuro ambrato fino a diventare quasi bianco. Se si avesse a disposizione un super-filamento (in grado di emettere una potenza da 250 kilowatt), a valori molto alti della corrente il suo colore tenderebbe al blu. Agendo, quindi, sul potenziometro non solo aumentiamo il numero di fotoni emessi nell'unità di tempo, ma variamo anche il colore a cui viene emesso il maggior numero di fotoni : all'inizio avveniva nell'infrarosso per poi passare al

rosso e quindi attraversare tutto lo spettro dei colori usuali (arancione, giallo, verde, violetto) fino a spostarsi nell'ultravioletto. Cerchiamo di analizzare in dettaglio tutto questo in relazione alla risposta dei nostri occhi:

1. *Massimo nell'Infrarosso.* Nell'intervallo di temperatura tra i 1000 ed i 3000 Kelvin, il tungsteno è troppo *freddo*. Freddo per un oggetto incandescente, non certo come sensazione fisiologica. L'emissione è più elevata nel rosso che nel blu. Se è abbastanza luminoso da eccitare i coni della retina, questa miscela appare rosso-arancio ai nostri occhi. Queste basse temperature sono comunque le più alte che si incontrano nella vita di tutti i giorni: la brace, le resistenze dei forni e delle stufe elettriche. Questa è la causa dell'idea comune che rosso vivo restituisca sensazioni di caldo.
2. *Massimo nel Visibile.* A temperature tra i 3000 ed i 10000 Kelvin, il filamento è molto più caldo di prima (in realtà a 3500 Kelvin fonde, ma facciamo finta di niente e cerchiamo di ignorare questa complicazione) e la lampada è molto più brillante di prima. Emette, infatti, molti più fotoni a tutte le energie, incluso il rosso. Il massimo dell'emissione è per fotoni tra il rosso ed il violetto ed il filamento ci appare bianco. L'oggetto bianco incandescente per eccellenza è il Sole, la cui temperatura superficiale è intorno ai 5800 Kelvin. Gli astronomi lo classificano come stella gialla perché il massimo della sua emissione è nella regione verde-gialla dello spettro. Senza battere ciglio, per lo stesso motivo lo si può dichiarare verde. In realtà, chiamo le vostre retine a testimoniare, il Sole a mezzogiorno (... ricordate l'effetto dell'atmosfera terrestre? ... il colore del cielo? questo effetto è minimo a mezzogiorno) non rassomiglia affatto ad una foglia di lattuga o un limone. Infatti nella sua luce ci sono abbastanza fotoni da una parte e dall'altra del picco giallo-verde di emissione da eccitare in modo uguale i coni della retina sensibili al blu, al verde ed al rosso. E' questo il motivo per cui la miscela di fotoni del Sole e del filamento ci appare bianca. Una stella, per apparirci verde, dovrebbe emettere quasi esclusivamente nella striscia di energia che chiamiamo verde, con pochissimi fotoni nel blu e nel rosso. E' una situazione fisicamente così poco realistica che nessuna stella di buona famiglia si sognerebbe di fare.
3. *Massimo nell'Ultravioletto.* A temperature più grandi di 10000 Kelvin, il filamento è caldissimo (il filamento si è infatti vaporizzato, ma tralasciamo anche quest'altra complicazione per ora) e la lampada è sempre più brillante (emette più fotoni a tutte le lunghezze d'onda). I fotoni ultravioletti sono invisibili, nell'intervallo visibile il numero più alto di fotoni è nel violetto ed il più basso nel rosso. Questa miscela appare agli occhi umani blu-viola nonostante che un filamento blu-caldo emetta molti più fotoni rossi di un filamento rosso-caldo. Gli astrofisici e gli addetti alle macchine saldatrici sono, forse, le sole persone al mondo ad essere pienamente consapevoli, anche nel linguaggio, che il caldo blu è più caldo del caldo rosso. (Ora, per favore, non andate nel bagno a scambiare le targhette colorate per mettere quella blu sul rubinetto dell'acqua calda e la rossa per la fredda ... qualcuno potrebbe non apprezzare il vostro *nuovo* senso fisico).

Wilhelm Wien, un fisico vincitore del premio Nobel nel 1911 e che lavorò sulla radiazione tra la fine secolo scorso e l'inizio di questo secolo, fu il primo a formulare la relazione esistente tra la posizione in lunghezza d'onda del picco di emissione e la temperatura dell'oggetto (nota come *legge dello spostamento di Wien*):

la lunghezza d'onda del picco di emissione è *inversamente proporzionale* alla temperatura

Se misuriamo le temperature T in gradi Kelvin e le lunghezze d'onda in metri, tale relazione (con la costante giusta di proporzionalità) è:

$$\lambda_{max} = \frac{2.8979 \times 10^{-3}}{T} \quad (3)$$

(ovvero il massimo di emissione della radiazione di fondo cosmico a 2.7 K è a poco più di un millimetro. Ora sapete come ho determinato la lunghezza d'onda del massimo di emissione del

corpo umano, divertitevi a calcolare quella del più gelido professore o quella di un vulcano in eruzione.)

Sempre verso la fine dello scorso secolo due fisici, Josef Stefan e Ludwig Boltzmann, determinarono la potenza complessivamente emessa, sotto forma di radiazione, da una superficie unitaria di un oggetto al variare della temperatura superficiale (detta naturalmente *legge di Stefan-Boltzmann*). La potenza emessa da una superficie unitaria è chiamata *flusso* di radiazione. Essi trovarono che il flusso è indipendente dalla composizione chimica dell'oggetto, dalla sua forma, dallo stato di aggregazione della sua materia (solida, liquida, gassosa o plasma) è questo il motivo per cui vi avevo detto di non preoccuparvi del fatto che il filamento fonda e vaporizzi e dipende solo dalla sua temperatura. La legge trovata da Stefan e Boltzmann stabilisce che:

il flusso emesso è *proporzionale* alla quarta potenza della temperatura

Misurando la temperatura T in Kelvin, il flusso F in Watt su metro quadro, risulta quindi

$$F = \sigma T^4 \quad (4)$$

dove σ (costante di Stefan-Boltzmann) vale $5.67 \times 10^{-8} \text{ W gradi}^{-4} \text{ m}^{-2}$. Il flusso cresce con la quarta potenza della temperatura, potete quindi immaginare quanta energia al secondo in più corrisponde a piccole variazioni di temperatura. La temperatura superficiale di una stella blu è circa 5 volte più alta di quella di una stella rossa; un metro quadro di superficie di stella blu emette $5 \times 5 \times 5 \times 5 = 625$ volte più energia al secondo di un metro quadro di superficie di una stella rossa !

(La termografia è, grosso modo, un'immagine del flusso emesso dal corpo umano in tutto l'infrarosso. Piccole variazioni della temperatura tra le diverse parti del corpo corrispondono a grandi variazioni di flusso. E' uno strumento diagnostico in grado di rilevare infiammazioni superficiali localizzate.

Sulla superficie del Sole esistono delle regioni localizzate a temperatura più bassa del resto della superficie chiamate macchie solari. Sono regioni sedi di intensi campi magnetici che ostacolano l'arrivo di energia dalle zone profonde. La loro temperatura è di circa 3500 gradi Kelvin contro i 5800 delle zone circostanti. Calcolate con la (4) quanto flusso in meno emettono rispetto alle zone circostanti e vi renderete conto del perché Galileo, il primo ad osservarle, le ha chiamate macchie.)

Quello che stelle, filamenti al tungsteno e corpo umano hanno in comune è che il picco ed il flusso dei fotoni emessi possono essere descritti dalle stesse leggi di base. La cosa più sorprendente è che queste leggi emergono dal concetto più semplice di *assorbitore nero ideale* o *corpo nero*.

E' noto che oggetti perfettamente neri assorbono tutti i fotoni che colpiscono la loro superficie (... per quale ragione, d'estate, ci si veste di abiti bianchi o chiari ?), non altrettanto noto è che questo non avviene senza diverse conseguenze termiche - i corpi neri emettono anche fotoni. Se vengono assorbiti più fotoni di quelli emessi ... la temperatura dell'oggetto aumenta ed aumenta, quindi, anche il flusso di fotoni emessi fino a quando il flusso emesso eguaglia il flusso assorbito. E' esperienza comune che, lasciando per un pò di ore sotto il Sole estivo un'auto con i sedili neri ed i finestrini chiusi, i sedili diventano molto caldi raggiungendo una temperatura di diversi gradi più alta dell'aria esterna - infatti irraggiano fortemente nell'infrarosso (invisibile).

Un assorbitore più efficace dei sedili neri di un'auto è costituito da un piccolo foro in una scatola chiusa che abbia le pareti interne dipinte di nero. Potete dire addio per sempre ai fotoni che entrano nel foro, vengono tutti assorbiti anche quelli che vengono riflessi per alcune volte dalle pareti interne. Già sappiamo che la lunghezza d'onda del massimo (picco) di emissione ed il flusso totale sono legati esclusivamente alla temperatura. La cosa più impressionante è che il numero di fotoni che fuoriescono (vengono irraggiati) ogni secondo dal foro alle varie lunghezze d'onda dipende unicamente dalla temperatura della scatola e non da quanti e quali fotoni entrano nel foro. Il valore del flusso emergente alle varie lunghezze d'onda, cioè lo spettro, è detto *spettro di corpo nero*. La forma di questo spettro, alle opportune temperature, è uno strumento analitico efficace per descrivere, con discreta precisione, lo spettro di oggetti diversi come i filamenti delle lampade, la superficie gassosa del Sole, il corpo umano e qualsiasi altro oggetto che mantenga costante la sua temperatura. La costanza della temperatura è assicurata

solo se l'energia termica irraggiata -quella dovuta alla temperatura, cioè al moto disordinato o alle oscillazioni degli atomi e molecole- è equilibrata da altra energia che entra nell'oggetto: nel caso del corpo umano è energia chimica -il cibo-, nel caso del filamento della lampada è energia elettrica -ve ne accorgete dalla bolletta dell'ENEL- nel caso stellare è energia nucleare prodotta nelle zone centrali della stella.

Se Sole, filamento, corpo umano e sedili di un'auto non vi sembrano una lista sufficiente, potete aggiungerci il corpo nero più grande di tutti: i resti raffreddati dell'enorme esplosione del Big Bang. L'andamento alle varie lunghezze d'onda del suo spettro è perfettamente rappresentato dallo spettro di un corpo nero a 2.7 Kelvin !

La comprensione fisica dello spettro di corpo nero si deve principalmente al lavoro di Max Planck, un fisico tedesco vincitore del premio Nobel per la fisica nel 1918. Quasi 100 anni fa (era il 14 dicembre 1900) presentò una deduzione dello spettro di corpo nero, ad un congresso a Berlino, assumendo che la materia riscaldata (e che quindi vibrava) potesse emettere luce in forma discreta e quantizzata (i fotoni). Il nuovo concetto di *quanto* fu il primo seme di una nuova branca della fisica, la meccanica quantistica.

Lo spettro di un corpo nero a temperatura T , ovvero la potenza emessa per unità di superficie alle diverse lunghezze d'onda in un intervallo di lunghezze d'onda Δ , è :

$$F(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{\Delta}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1} \quad (5)$$

dove π è pi-greco, cioè 3.14159

h la costante di Planck, l'avete vista all'inizio, e vale 6.626×10^{-34} joule per secondo

k un'altra costante fondamentale, quella di Boltzmann, e vale 1.3806×10^{-23} joule per gradi

c la velocità della luce, e quindi 2.998×10^8 metri al secondo

T la temperatura in gradi Kelvin

λ la lunghezza d'onda in metri

Δ l'intervallo di lunghezza d'onda in metri

e la base dei logaritmi naturali e vale 2.718

$F(\lambda, T)$ il flusso emesso, in Watt per metro quadro, nell'intervallo di lunghezza d'onda Δ centrato alla lunghezza d'onda λ .

Appena avrete iniziato lo studio delle funzioni, cercate di analizzare la funzione *flusso di corpo nero*, cioè la (5) con T costante, detta *funzione di Planck*.

Esempi Umani. Immediatamente risolviamo qualche esercizio insieme per riprendere, operativamente, le idee.

Supponiamo si voglia determinare la lunghezza d'onda a cui il corpo umano emette il massimo della radiazione (poniamo la temperatura a $35^\circ C$ ovvero 308.16 Kelvin):

$$\lambda_{max} = \frac{2.8979 \times 10^{-3}}{T} = \frac{2.8979 \times 10^{-3}}{308.16} = 9.41 \times 10^{-6} m = 9.41 \mu m$$

Quale è la potenza emessa complessivamente a tutte le lunghezze d'onda da $1 m^2$ di superficie umana? (cioè il flusso complessivo)

$$F = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times (308.16)^4 = 511 W m^{-2}$$

Se assimiliamo il corpo umano ad un cilindro di altezza 1.75 m e diametro 0.45 m, la sua superficie è di circa $2.45 m^2$, la potenza che emette complessivamente il nostro schematico essere umano (quella che gli astronomi chiamano luminosità) vale quindi:

$$L = F \times S = 511 \times 2.45 = 1252 W = 0.3 Cal/sec = 1080 Cal/ora = 26000 Cal/giorno$$

Giusto per un controllo, abbiamo trasformato il tutto in Calorie per giorno (le Calorie o grandi calorie sono quelle dei dietisti, = 1000 calorie = 4180 joule).

Sembra che ci sia qualcosa che non funziona: una dieta regolare prevede di immettere nel nostro organismo qualcosa dell'ordine di 3000 Cal/giorno!!! (da dove deriverebbero le altre 23000 mancanti?)

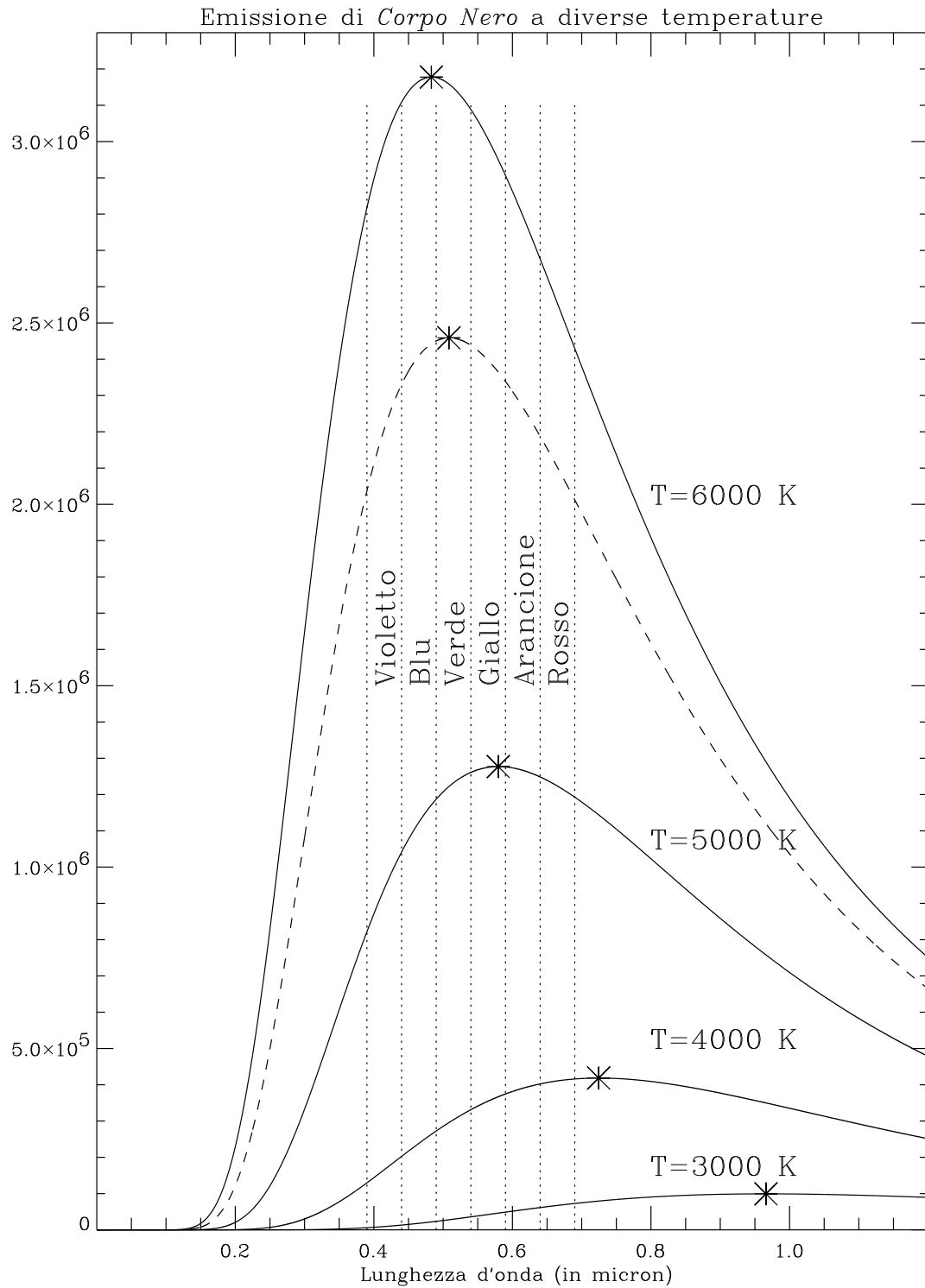


Figura 1: Emissione di *corpo nero* a 6000, 5000, 4000 e 3000 °K. L'asterisco individua la posizione del picco di emissione: si nota immediatamente che al crescere della temperatura decresce la lunghezza d'onda del picco. Un corpo nero a temperatura più alta emette molto più, **a tutte le lunghezze d'onda**, di un corpo nero a più bassa temperatura. La curva tratteggiata è l'emissione di un corpo nero a 5800 °K e riproduce abbastanza bene l'emissione del Sole.

NON ILLUDETEVI non si dimagrisce così!

Abbiamo trascurato che siamo circondati da un ambiente, alle nostre latitudini, a 20°C che ci *illumina*. Emettiamo luce ma ne riceviamo dall'ambiente, quindi occorre determinare il bilancio netto tra le due. Se T_a è la temperatura dell'ambiente, la luminosità netta sarà:

$$L_{\text{netta}} = \sigma (T^4 - T_a^4) \times S = 216 \text{ W} = 4300 \text{ Cal/giorno}$$

in realtà è ancora più bassa perché non abbiamo tenuto conto dei vestiti e dei peli!

Qual è la potenza emessa da un essere umano nell'intervallo visibile?

L'intervallo di lunghezze d'onda è tra 4.0×10^{-7} -inizio del violetto- e 7.0×10^{-7} metri -fine del rosso-, quindi $\Delta = 3.0 \times 10^{-7}$ metri, centrato alla lunghezza d'onda $\lambda = 5.5 \times 10^{-7}$ metri.

Mettendo il tutto nell'espressione (5) del flusso di corpo nero otteniamo che il corpo umano emette 3.02×10^{-28} Watt per metro quadro nel visibile.

Se assimiliamo il corpo umano al solito cilindro avente superficie di circa 2.45 m^2 , nel visibile emette complessivamente una potenza di 7.39×10^{-28} W.

Il numero di fotoni emessi al secondo nel visibile, essendo l'energia di un fotone alla lunghezza d'onda di $5.5 \times 10^{-7} \text{ m}$, $hc/\lambda = 3.617 \times 10^{-19}$ joule, è 2.05×10^{-9} : cioè un fotone visibile ogni 4.9×10^8 secondi, ovvero un fotone ogni 15.5 anni!

Diversa è la situazione nell'infrarosso, per esempio tra 7 e 11 micron $-\Delta = 4.0 \times 10^{-6} \text{ m}$. e $\lambda = 9.0 \times 10^{-6} \text{ m}$ -, il flusso emesso è di 142 Watt per metro quadro, la potenza complessivamente emessa è di 349 Watt ed il numero di fotoni emessi al secondo è di 1.58×10^{22} , essendo l'energia del singolo fotone di 2.2×10^{-20} joule.

Nelle fredde notti invernali, avere qualcuno a fianco nel letto ... non aiuta a vederci meglio ma dà la piacevole sensazione del calduccio di una stufetta!

(Risposta all'esercizio sulle macchie solari: emettono complessivamente una potenza 7.54 volte più bassa delle zone circostanti; bisogna, inoltre tener conto del fatto che a 3500 Kelvin il massimo di emissione è nel vicino infrarosso mentre a 5800 è nel visibile, questo fa sì che appaiano ancora più scure.)

Colori Riflessi. Anche se l'argomento ci porta un pò fuori dal nostro percorso, non potevo non prendere un piccolo spazio per parlarvi dei colori degli oggetti non incandescenti. Mentre il mondo degli oggetti caldi ed incandescenti può essere solo rosso, bianco o blu, il mondo freddo degli oggetti che riflettono la luce può accontentare anche le persone dai gusti più difficili in fatto di colore. Scegliendo un'auto, un vestito o lo smalto per le unghie (o la tintura per capelli!) si ha a disposizione una miriade di colori (nello stile Missoni, tutti sullo stesso capo di abbigliamento!).

La trama delle superfici, i pigmenti ed i coloranti agiscono in maniera selettiva nel riflettere un particolare miscuglio di fotoni che noi percepiamo come un colore unico. La lattuga sembra verde perché riflette solo i fotoni verdi contenuti nella luce con cui viene illuminata, i fotoni rossi, arancio, gialli, blu e violetti, contenuti all'incirca nelle stesse quantità dei verdi nella luce bianca, sono invece quasi completamente assorbiti. Illuminando la lattuga con luce rossa o blu (questo si ottiene mettendo davanti alla lampada un *filtro* che assorba la luce di altri colori e trasmetta solo il rosso o il blu) la lattuga ci apparirà nera: la lattuga non potrà riflettere fotoni verdi perché assenti nella luce incidente.

Superfici bianche ci appaiono bianche semplicemente perché riflettono tutti i fotoni visibili, quelle nere sono nere perché assorbono tutti i fotoni visibili incidenti, le grige sono quelle che assorbono la stessa frazione di fotoni a tutte le lunghezze d'onda nel visibile.

(Se si illumina con luce rossa un foglio bianco con delle scritte in rosso, si riesce a distinguere il testo? Riuscite a determinare i colori delle auto nelle gallerie autostradali illuminate dalle lampade gialle al sodio?)

Luminosità e Magnitudini Stellari. L'emissione di luce da parte delle regioni più esterne di una stella (chiamate *atmosfera stellare*) è molto simile a quella di un corpo nero avente temperatura uguale alla temperatura superficiale della stella (nella prossima chiacchierata ne analizzeremo le differenze più significative). Quindi se T_* è la temperatura superficiale della

stella il suo massimo di emissione sarà alla lunghezza d'onda data dalla (2), il flusso totale superficiale (ripetiamolo ancora: è la potenza emessa a tutte le lunghezze d'onda da una superficie unitaria) è

$$F_{\star} = \sigma T_{\star}^4 \quad (6)$$

ed il flusso superficiale alle varie lunghezze d'onda è dato dalla funzione di Planck valutata per $T = T_{\star}$.

Se R_{\star} è il raggio della stella, la sua superficie sarà $4\pi R_{\star}^2$ (è una sfera!) e quindi la potenza complessivamente emessa da tutta la superficie della stella, chiamata *luminosità* L_{\star} , è:

$$L_{\star} = 4\pi R_{\star}^2 F_{\star} = 4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{\star}^4 \quad (7)$$

Il Sole ha una temperatura superficiale di circa 5800 K ed un flusso superficiale totale di 6.3×10^7 Watt per metro quadro, un raggio R_{\odot} di 6.96×10^8 metri (cioè circa 700 mila chilometri) e, quindi, una superficie di $6.09 \times 10^{18} m^2$. La sua luminosità, L_{\odot} (ormai sapete tutti che \odot è il simbolo del Sole), è quindi di 3.8×10^{26} Watt.

(*Mediante una famiglia consuma 400 kilowattora di energia elettrica al mese -cioè 1.44×10^6 joule-, per quanti anni basterebbe a 3 miliardi di famiglie l'energia prodotta in un secondo dal Sole?*)

Come vedete, l'energia emessa in un secondo da una stella ha valori molto alti; molto spesso, per evitare di maneggiare numeri molto grandi, si usa come unità di misura delle luminosità stellari la luminosità del Sole (il Sole in questo sistema ha luminosità uguale ad 1). I parametri globali delle stelle quali raggio, massa e, appunto, luminosità sono rapportati in unità delle stesse quantità solari. Visto che ho già fornito il raggio del Sole, per completare vi do anche la sua massa che è di 1.989×10^{30} Kg.

(*La massa della Terra è 5.976×10^{24} Kg ed il suo raggio 6371 Km, la sua densità media è più alta o più bassa di quella del Sole?*)

Se prendiamo una sfera di raggio d , più grande del raggio R_{\star} della stella, e centrata nel centro della stella, l'energia che attraversa la superficie della sfera nell'unità di tempo è proprio uguale a quella che lascia la superficie della stella, ovvero L_{\star} (naturalmente facciamo l'ipotesi che tra la superficie della stella e la superficie della sfera non vi sia niente che assorba o emetta radiazione). E quindi il flusso f a distanza d dalla stella (lo ridico per l'ultima volta: la potenza che attraversa una superficie unitaria) proveniente dalla stella è dato dalla luminosità della stella diviso la superficie della sfera, cioè:

$$f = \frac{L_{\star}}{4\pi d^2} = \frac{4\pi R_{\star}^2 F_{\star}}{4\pi d^2} = \frac{R_{\star}^2}{d^2} F_{\star} = \frac{R_{\star}^2}{d^2} \sigma T_{\star}^4 \quad (8)$$

Data una stella posta a distanza d da noi, la (8) ci dice quindi quanta energia, proveniente dalla stella, attraversa nell'unità di tempo una superficie unitaria posta, sulla Terra, perpendicolarmente alla congiungente osservatore-stella. Quindi f , il *flusso a terra* o *flusso apparente*, è una grandezza della stella che noi possiamo misurare direttamente (vi è il *piccolo* problema, come abbiamo già visto, che l'atmosfera terrestre non lascia passare tutti i fotoni che arrivano sulla sua superficie, esiste una *finestra* nel visibile, una nell'infrarosso e una nel radio; trascuriamo tutto questo, dal punto di vista concettuale non cambia molto nelle cose che vi dirò).

(*Un esercizio veloce: il flusso a terra di Arturo -la stella più brillante della costellazione del Bovero- è $4.5 \times 10^{-8} W m^{-2}$, quanta energia per unità di tempo entra nel nostro occhio quando osserviamo Arturo sapendo che il diametro della nostra pupilla adattata alla visione notturna è di 7 mm?*)

(*Supponendo che siano tutti fotoni gialli -cioè a $5.5 \times 10^{-7} m$ - quanti fotoni provenienti da Arturo entrano al secondo nel nostro occhio?*)

Faccio notare che il *puntare* con un telescopio o con l'occhio una stella significa proprio mettere la sua superficie di raccolta perpendicolare alla direzione osservatore-stella.

Potete capire ora una fondamentale funzione dei telescopi: sono *anche* dei grandi imbuti per raccogliere più fotoni. Un telescopio da 4.5 m di diametro ha una superficie di raccolta che è più di 400 000 volte più grande dell'occhio umano, e quindi il numero di fotoni che cattura al secondo è 400 000 più alto di quelli raccolti ad occhio nudo!

Abbiamo detto che noi possiamo misurare solo il flusso a terra f di una stella, per conoscerne la sua luminosità L_* occorre conoscerne la distanza d e vi hanno già detto che è una quantità molto difficile da misurare direttamente. La luminosità di una stella è un parametro essenziale per discriminare tra stella e stella; l'uso del flusso a terra, ovvero del flusso apparente, non ci dice certo quale stella emetta di più e quale di meno: una piccola torcia elettrica posta vicino a noi ci sembra molto più luminosa delle fotoelettriche dei pompieri a grande distanza (eppure i pompieri pagano una bolletta salatissima!). Il Sole, la stella più vicina a noi, sembra emettere una quantità di energia enormemente più alta delle altre stelle, il flusso apparente ci porterebbe a concludere che il Sole sia l'oggetto più luminoso dell'Universo mentre il realtà è una stellina.

Fino a qualche anno fa, usando telescopi a Terra, era stata misurata la distanza di qualche migliaio di stelle; per diversi anni ha operato, nello spazio, un satellite specializzato nella misura delle distanze, *Hipparcos*, grazie ad esso è nota ora la distanza e, quindi, la luminosità di oltre un milione di stelle! (*Catalogo Tycho*)

Per avere informazione sulla sua temperatura T_* , l'espressione (8) ci dice che, oltre alla distanza, occorre conoscerne anche il raggio R_* , che è una quantità ancora più difficile da determinare! Come fare per andare avanti? I colori del corpo nero, la funzione di Planck ed un pò di algebra sono venuti in soccorso degli astrofisici all'inizio di questo secolo.

Se alla fine del telescopio, proprio davanti al rivelatore di fotoni (il *contatore* di fotoni più usato fino a qualche anno fa è stata la lastra fotografica) mettiamo un filtro che lascia passare solo un particolare colore, ad esempio il blu (o il giallo), il flusso a terra che si misura è il flusso nel blu (o giallo) e quindi, nella relazione (8), non bisogna mettere il flusso F_* emesso dalla stella a tutte le lunghezze d'onda come proviene dalla relazione di Stefan-Boltzmann (4), ma il flusso emesso dalla stella alla lunghezza d'onda λ_B trasmessa dal filtro (λ_G nel caso di filtro giallo) che ci viene data dalla funzione di Planck (5). Il flusso a terra nel blu, f_B , e nel giallo, f_G , saranno:

$$f_B = \frac{R_*^2}{d^2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_B^5} \frac{\Delta_B}{e^{(hc/\lambda_B k T_*)} - 1} \quad (9)$$

$$f_G = \frac{R_*^2}{d^2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_G^5} \frac{\Delta_G}{e^{(hc/\lambda_G k T_*)} - 1} \quad (10)$$

A questo punto, confessatelo, state pensando ... *ha solo scritto delle espressioni più complicate, tanto la distanza ed il raggio della stella non la conosceva prima e non la conosce neanche adesso*. Abbiate un pò di pazienza!

Se faccio il rapporto tra f_B e f_G ottengo:

$$\frac{f_B}{f_G} = \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_B} \right)^5 \frac{\Delta_B}{\Delta_G} \frac{e^{(hc/\lambda_G k T_*)} - 1}{e^{(hc/\lambda_B k T_*)} - 1} \quad (11)$$

A parte la difficile lettura dovuta a tutti questi simboli, certamente abbiamo fatto scomparire il raggio e la distanza della stella. L'espressione (11) dice che, se facciamo il rapporto della misura del flusso a terra nel blu e di quello nel giallo, riusciamo a determinare la temperatura di una stella !!! Infatti nella (11), f_B e f_G le misuriamo, λ_G e λ_B le conosciamo e sono noti pure Δ_B e Δ_G (sono le larghezze in lunghezza d'onda delle strisce di colore trasmesse dai due filtri, dette *bande passanti*) perché nell'acquistare i filtri siamo stati attenti ad ordinarli alla giusta lunghezza d'onda e banda passante: l'unica incognita è la temperatura della stella T_* .

Il nome di questo metodo di misura delle temperature delle stelle? ma *Temperatura di colore* ... naturalmente.

(La superficie del nostro occhio è di $3.85 \times 10^{-5} m^2$, quindi entra una potenza di $1.73 \times 10^{-12} W$. Poiché i fotoni nel giallo hanno una energia di 3.6×10^{-19} joule, entrano nell'occhio 4.8×10^6 fotoni al secondo -quasi 5 milioni!- provenienti da Arturo.)

Con questo strano *termometro* gli astronomi hanno finora misurato la temperatura di milioni di stelle.

Nota la distanza d , la luminosità L_* e la temperatura T_* , siamo anche in grado di determinare

il raggio della stella tramite la (7). (Misure dirette del raggio sono state effettuate solo per un centinaio di stelle con un metodo estremamente complesso).

Le Magnitudini. Il titolo di questo paragrafo avrebbe dovuto essere *I dolori di una scienza antica*. L'astronomia è stata tra le prime scienze, quindi nel suo linguaggio e nelle sue consuetudini c'è una stratificazione di più di 50 secoli (ed i *dolori?* ... stanno per arrivare!)

Il sistema utilizzato dagli astronomi per misurare il flusso apparente delle stelle è molto antico e, per tale ragione, molto *scomodo* (molte delle difficoltà che incontra, nelle prime applicazioni, anche uno studente universitario di Astronomia sono dovute alla attuale *innaturalità* e *irrazionalità* di tale sistema). Il suo fondamento è nel primo catalogo astronomico dovuto ad Ipparco, un grande astronomo di Alessandria, del II secolo avanti Cristo. In tale catalogo le stelle erano distribuite, in ordine decrescente, in sei classi di brillantezza o *grandezza* (nella prima le più brillanti, nella sesta le più deboli).

L'attuale sistema è dovuto principalmente al lavoro di Norman Pogson (un astronomo che ha operato intorno alla metà del diciottesimo secolo). Egli suggerì una scala logaritmica con un coefficiente opportuno in modo da essere in buon accordo con le classi di Ipparco. Se indichiamo con f_1 ed f_2 il flusso a terra di due stelle, Pogson introdusse le *magnitudini apparenti*, m , in modo tale che

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \quad (12)$$

ove m_1 e m_2 sono le magnitudini apparenti delle due stelle i cui flussi apparenti sono f_1 e f_2 , ovvero (formula di Pogson)

$$m = -2.5 \log f + c \quad (13)$$

ove c è detta *costante di zero*, da fissare in base ad una stella (o gruppi di stelle) presa come riferimento (*stelle standard*). L' *innaturalità* (e gli iniziali problemi) connessi con la definizione delle magnitudini apparenti risiede soprattutto nel fatto che stelle più brillanti hanno magnitudini più basse di stelle meno brillanti.

La ragione di tale complicato sistema è legata al fatto che la risposta dell'occhio umano alla brillantezza della luce non è lineare. Se i flussi a terra di tre stelle sono nelle proporzioni 1:10:100 la differenza di brillantezza tra la prima e la seconda *ci sembra* essere uguale alla differenza di brillantezza tra la seconda e la terza. Ugual rapporto nei flussi ci appare come ugual differenza nelle brillanze: la percezione umana della brillantezza è logaritmica.

L'introduzione operativa delle magnitudini (dal latino *magnitudo* cioè *grandezza*, anche nel nome richiama le classi di Ipparco) tramite la (13), fa sì che la scala sia continua e quindi ... non più le sei classi discrete. La differenza di una magnitudine in più o in meno vuol dire un flusso 2.51 volte più basso o più alto. Quindi una stella di magnitudine apparente 1 ha un flusso apparente 2.51 volte più grande di quello di una stella di magnitudine 2, 6.31 volte quello di una stella avente magnitudine 3, 15.81 quello di una stella di magnitudine 4, 39.81 volte quello di magnitudine 5, 100 volte quello di stelle di magnitudine 6. Con questa scala possono quindi esserci anche stelle con magnitudine 0 o negativa.

(*Determinare quante volte è più grande il flusso apparente di una stella di magnitudine 1 rispetto a quello di una stella di magnitudine 20.*)

Utilizzando come *telescopio* e ricettore l'occhio umano, si ha il sistema di *magnitudini visuali*, m_v . La costante di zero è fissata in modo che la Stella Polare (α Ursae Minoris) abbia magnitudine 2.12 (il Sole ha magnitudine visuale -26.78 e la stella più brillante del cielo, Sirio o α Canis Majoris, ha magnitudine -1.46).

Per definizione della scala di magnitudini, la magnitudine visuale limite ad occhio nudo è 6. Si può facilmente determinare la magnitudine limite di un telescopio di diametro D usando come ricettore l'occhio umano. Come abbiamo già detto, poiché la radiazione raccolta è proporzionale all'area del telescopio ed il diametro della pupilla dell'occhio umano adattato al buio è di circa 7 mm , l'intensità della radiazione che raggiunge l'occhio, nel fuoco del telescopio, è circa $2 \times D^2$ più alta che ad occhio nudo (misurando D in cm ... per i telescopi grossi, professionali, il diametro lo si misura in metri, ma volendovi dare una formula da usare velocemente prima di recarsi dall'ottico per prenotare un telescopio, conviene usare i centimetri). La magnitudine limite sarà quindi

$$m_{\text{Limite}} = 0.8 + 5 \log D + 6 = 6.8 + 5 \log D \quad (D \text{ in cm. !!!})$$

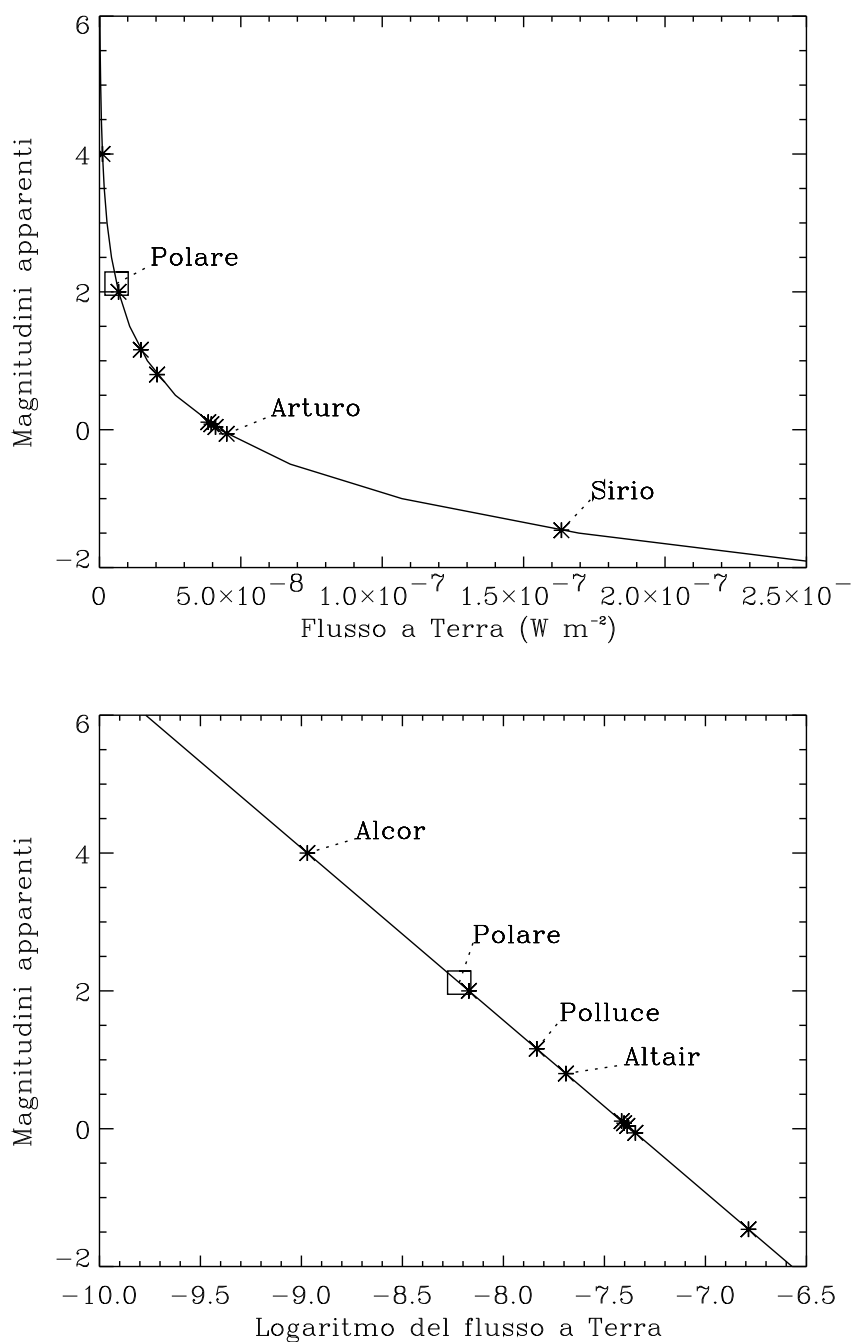


Figura 2: Relazione tra flusso a terra e magnitudine apparente. Come specificato nel testo, la relazione tra flusso a terra e risposta dell'occhio umano è proporzionale al logaritmo del flusso (figura in alto). Il sistema di magnitudini, introdotto da Pogson in modo da riprodurre le *grandezze* del catalogo di Ipparco, è legato al logaritmo del flusso (la relazione tra risposta dell'occhio e logaritmo del flusso è lineare - vedere il grafico in basso). Col simbolo costituito da un quadrato è rappresentata la magnitudine ed il flusso della Stella Polare, che serve a fissare la *costante di zero* della scala di magnitudini (le si assegna la magnitudine apparente $m = 2.12$). Gli asterischi rappresentano alcune delle stelle della tabella presentata alla fine di questi appunti. Sono stati aggiunti Mizar ($m = 2.0$) e Alcor ($m = 4.0$) che sono un sistema di stelle doppie che costituiscono una delle stelle del Grande Carro.

(Qual è la magnitudine limite di un telescopio da 10 cm e di uno da 20 cm?)

Il rapporto tra i flussi apparenti di due stelle, aventi una differenza in magnitudini di 19, è di $10^{19/2.5}$ cioè di 3.98×10^7 , quindi il flusso a terra di una stella di magnitudine 1 è circa 40 milioni di volte più grande rispetto a quello di una stella di magnitudine 20.)

Naturalmente, posizionando all'uscita del telescopio una macchina fotografica invece dell'occhio, la magnitudine limite di un telescopio cresce notevolmente per due motivi:

1. possiamo scegliere una pellicola con sensibilità molto più alta dell'occhio umano (la sensibilità è individuata dagli ASA, un 200 ASA è più sensibile di un 100 ASA, in commercio si trovano facilmente anche i 1000 ASA);
2. sulla pellicola fotografica i fotonisi si accumulano, aprendo per un tempo lungo l'otturatore della fotocamera (per quella che si chiama una posa lunga) accumulo molti fotoni (occorre, però, che il telescopio *insegu*a bene la stella nel suo moto diurno).

In ogni caso, poichè anche il cielo notturno è leggermente luminoso, la magnitudine limite finale è fissata dalla luminosità del cielo. Nei centri abitati, a causa delle luci, molto spesso ad occhio nudo non si arriva certamente alla magnitudine 6 (è questo il motivo per cui in campagna sono visibili molte più stelle in cielo). L'inquinamento luminoso è, attualmente, un gravissimo problema per gli astronomi!

Naturalmente, dopo l'obiettivo del telescopio si possono mettere filtri (ricordate il discorso sulla misura delle temperature delle stelle ?) ed avere quindi la magnitudine b col filtro blu

$$b = -2.5 \log f_B + \text{costante}$$

ed allo stesso modo quella, v , col filtro giallo (gli astronomi la indicano proprio con v invece che con g come sembrerebbe più naturale ... ogni mestiere ha i suoi trucchi ed i suoi segreti!). La quantità $b - v$ risulta essere quindi

$$b - v = -2.5 \log \left(\frac{f_B}{f_G} \right) + \text{costante} \quad (14)$$

Cioè $b - v$ è un indice della temperatura di colore, in quanto dipende solo dalla temperatura, ed è chiamato *indice di colore*. Dare la temperatura o l'indice di colore di una stella è perfettamente equivalente, gli astronomi ed i cataloghi delle stelle preferiscono l'indice di colore.

(La magnitudine limite di un telescopio da 10 cm è 11.8; per un telescopio avente, invece, un diametro di 20 cm è 13.3).

La magnitudine apparente di una stella è una misura del flusso a terra dell'oggetto (13) e, quindi, è legata sia alla sua luminosità che alla sua distanza (si veda la (8)). Sebbene dia informazioni sulla *visibilità* della stella, per quanto riguarda la costituzione intrinseca della stella non è di alcuna utilità. In quest'ottica è conveniente introdurre (utilizzando lo stesso tipo di scala usata per la definizione delle magnitudini apparenti) un parametro legato solo alla luminosità della stella. Se L_* è la luminosità della stella, se ne definisce *magnitudine assoluta*, M , la quantità

$$M = -2.5 \log L_* + C \quad (15)$$

La costante C è fissata in modo che magnitudine assoluta e magnitudine apparente coincidano per oggetti posti ad una distanza di 10 pc (ricordate pc indica la distanza in parsec, cioè la distanza alla quale il raggio dell'orbita della Terra è visto sotto l'angolo di un secondo, 1 pc è uguale a 3.26 anni-luce, ovvero 3.09×10^{16} metri) e quindi

$$M = m + 5 - 5 \log d \quad (16)$$

dove d è la distanza in parsec. La quantità $m - M = 5 \log d - 5$ è detta *modulo di distanza*. Riuscendo a determinare il modulo di distanza si ha una stima immediata della distanza. Ma questa ... è una delle cose che vedremoun'altra volta!

Esercizi Supplementari.

1. La differenza di magnitudine assoluta tra due stelle è 6. Determinare il rapporto delle loro luminosità.
2. La luminosità apparente di Saturno è 0.86×10^{-11} quella del Sole. Quanto lontano deve essere il Sole per avere la stessa luminosità apparente di Saturno (cioè come una stella di prima magnitudine)?
3. La magnitudine apparente di una stella è $m = 8$, quella assoluta $M = -2$. Qual è la distanza della stella?
4. La distanza di una stella è di 100 pc e la sua magnitudine apparente è $m = 6$. Qual è la sua magnitudine assoluta?
5. Il flusso a terra di Arturo è $4.5 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$. Il suo diametro angolare, determinato da misure interferometriche, è di $0.020''$. Determinarne la temperatura.
6. Le componenti di un sistema binario hanno magnitudini apparenti 1 e 2. Qual'è la magnitudine totale del sistema?
7. Un sistema binario ad eclisse è costituito da due stelle di ugual raggio e temperatura efficace di 10000 K e 6000 K. Determinare la profondità (in magnitudini) del minimo secondario e principale supponendo che i due dischi stellari si coprano completamente l'un l'altro.
8. La temperatura efficace dei granuli e degli intergranuli, nella granulazione solare, è di 6000 K e 5600 K, rispettivamente. Qual'è il rapporto di intensità tra granulo ed intergranulo, a 5000 \AA se essi irradiano come corpi neri ?

Per concludere, eccovi una tabella di parametri delle stelle più brillanti visibili dall'emisfero boreale. Per voi non è più un mistero, sapete benissimo ora come sono stati ricavati ... molte persone hanno speso notti (e giornate) per portarli sul vostro tavolo, trattateli con cura e profitto !

Parametri delle stelle più brillanti. Con m ed M si è indicato la magnitudine apparente e la magnitudine assoluta rispettivamente. La temperatura superficiale, T , è data in Kelvin ed il raggio, R , in unità di raggio solare. Le distanze sono fornite in anni luce (a.l.) ed in parsec (pc). E' da notare che il nostro Sole, con una magnitudine assoluta di 4.79 è proprio una stellina. Rigel e Deneb, con magnitudine assoluta -7, sono certamente le stelle più luminose dei nostri dintorni, (sono 52000 volte più luminose del nostro Sole). Alcune stelle variano, più o meno periodicamente, i loro parametri: è il caso di Betelgeuse ed Antares.

stella	m	T	distanza		M	R
			a.l.	pc		
Sole	-26.78	5800			4.79	1
Sirio α Canis Majoris	-1.46	9900	8.80	2.7	1.4	1.8
Arturo α Bootis	-0.06	4200	35.9	11	-0.3	23
Vega α Lyrae	0.04	9900	26.4	8.1	0.5	3
Capella α Aurigae	0.08	5200	45.6	14	-0.6	15
Rigel β Orionis	0.11	13400	815	250	-7.0	43
Procione α Canis Minoris	0.37	6600	11.4	3.5	2.6	1.4
Betelgeuse α Orionis	var 0.50	3200	652	200	var -6.0	var 500
Altair α Aquilae	0.80	7800	16.6	5.1	2.2	1.8
Aldebaran α Tauri	0.85	5200	68	21	-0.8	38
Antares α Scorpii	var 0.96	4400	424	130	var -4.6	var 131
Spica α Virginis	0.96	17400	260	80	-3.6	5
Polluce β Geminorum	1.16	4600	35.9	11	1.0	11
Deneb α Cygni	1.25	9100	1630	500	-7.2	101
Regolo α Leonis	1.35	13900	85	26	-0.7	2