

Le onde e il potere risolutivo

di Daniele Gasparri

In questo articolo parlerò brevemente di una proprietà fondamentale nelle riprese ad alta risoluzione dei corpi del sistema solare che deve essere ben conosciuta e compresa.

Dato l'alto numero di variabili in gioco potremmo dare solamente delle indicazioni generiche e non spingerci troppo oltre con le previsioni.

Il potere risolutivo è in generale la capacità di qualsiasi strumento ottico, compreso il nostro occhio, di mostrare separati due dettagli posti l'uno vicino all'altro. A questa definizione viene dato anche il nome di risoluzione di un sistema ottico.

Possiamo anche definire, forse impropriamente, il concetto di nitidezza, che rappresenta il dettaglio più piccolo che uno strumento può mostrarci. Possiamo parlare di nitidezza per un singolo corpo o dettaglio, al contrario del potere risolutivo che ci indica come appaiono due particolari vicini: i due concetti sono diversi e diversi sono i limiti raggiungibili.

Facendo qualche approssimazione andiamo ora a cercare di spiegare da cosa dipende la risoluzione e la nitidezza di un telescopio e quali sono i limiti della strumentazione amatoriale.

Per capire in fondo il significato di queste due proprietà occorre considerarle isolate dal contesto reale con il quale dovremmo successivamente fare i conti; questo significa trascurare la turbolenza atmosferica e l'eventuale scarsa qualità delle ottiche, così come un campionamento* troppo modesto.

Consideriamo uno strumento ottico qualsiasi sotto condizioni di osservazione perfette, composto da ottiche perfette, a prescindere dal rivelatore usato (occhio o CCD). Ogni sistema ottico, a causa della natura ondulatoria della luce, ha un certo limite nel risolvere due oggetti posti l'uno vicino all'altro. Capire la causa di questo comportamento non è facile e richiede concetti ed elementi di fisica ondulatoria; noi ci accontenteremo di una spiegazione approssimata.

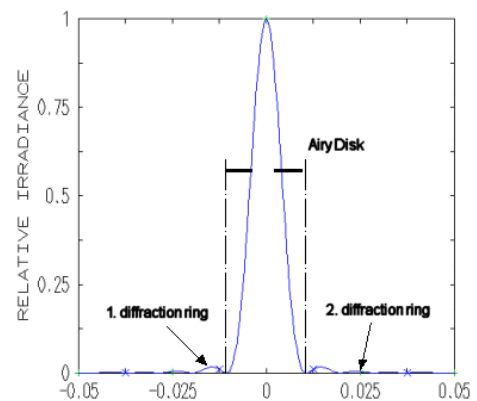
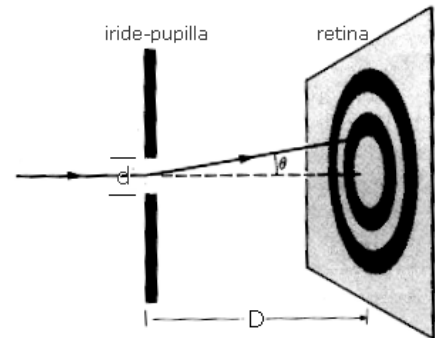
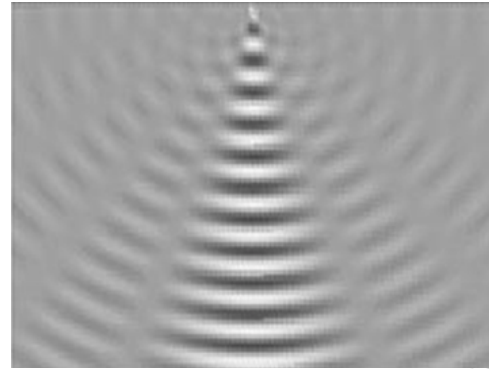
Con il termine potere risolutivo sappiamo che si intende la capacità di separare due oggetti vicini. Se ad esempio consideriamo due sottili linee distanti 1 cm poste a 100 metri di distanza, possiamo affermare che, osservandole ad occhio nudo non saremo in grado di separarle: le due linee ci appariranno come una singola, o in altre parole non saranno risolte dal nostro occhio. Se ora utilizziamo un telescopio, sicuramente saremo in grado di risolvere le loro immagini e vederle separate.

* Il campionamento esprime la scala dell'immagine in secondi d'arco su ogni pixel. Dipende dalla focale e dalle dimensioni dei pixel. Per sfruttare tutto il potere risolutivo occorre che il campionamento utilizzato sia almeno la metà della risoluzione teorica. Per uno strumento da 25cm, con risoluzione di 0,50", occorre un campionamento di almeno 0,25"/pixel (criterio di Nyquist)

Chi di voi saprebbe dirmi il perché? Se pensate che sia una questione di ingrandimento, bè vi sbagliate di grosso. E' vero che il telescopio mostra un'immagine ingrandita, ma l'ingrandimento non aumenta il potere di risoluzione dello strumento: se i nostri occhi potessero ingrandire gli oggetti anche di 100 volte, quelle due linee lontane apparirebbero sempre non risolte. Il potere di separazione di qualsiasi strumento ottico dipende unicamente dal diametro del suo obiettivo: il potere risolutivo dell'occhio umano quindi è funzione del diametro della pupilla, quello di un telescopio del diametro delle sue lenti o dello specchio principale.

Per capire questo concetto poco intuitivo dobbiamo considerare la natura della luce: essa infatti si comporta come un'onda e non come delle piccole particelle che viaggiano in linea retta. Come ogni onda quindi è soggetta a dei fenomeni particolari, chiamati diffrazione ed interferenza. Quando un raggio di luce deve attraversare una piccola fenditura oltre la quale è posto uno schermo, la sua luce si sparpaglia oltre l'ombra geometrica della fenditura (diffrazione) e forma delle strane figure modellate dall'interferenza; la diffrazione è sostanzialmente la proprietà che le onde hanno di aggirare un ostacolo e propagarsi anche dietro di esso, mentre l'interferenza è il risultato della combinazione di due o più onde. L'esperienza è analoga a quando si osserva il moto ondoso in un piccolo porticciolo o una stretta insenatura: le onde, nonostante un ostacolo naturale o artificiale riescono a propagarsi anche oltre esso, formando una figura piuttosto strana, frutto della loro combinazione.

Vale la pena indagare a fondo questo importantissimo comportamento di ogni onda, aiutandoci con qualche nozione elementare di fisica.



La diffrazione è un fenomeno che interessa qualsiasi onda, da quelle sulla superficie dell'acqua (in alto), alla luce. Qualsiasi fenditura è responsabile della formazione dell'immagine di diffrazione, compreso il nostro cocchio (al centro). In basso il profilo della diffrazione causata da una generica apertura circolare

Onde

Le onde sono delle perturbazioni periodiche che si propagano nello spazio; quasi sempre (tranne nel caso della luce) si ha un mezzo che permette la loro propagazione, come l'aria per il suono o l'acqua per le onde del mare. In questi casi si parla di onde elastiche, in quanto la loro esistenza è direttamente legata alle proprietà del mezzo che le trasporta.

Ma cosa è in pratica un'onda? Possiamo descriverla in diversi modi, attraverso degli esempi.

Prendiamo l'estremità di una lunga corda e facciamola oscillare in alto e in basso in modo costante. Il nostro movimento in alto e in basso produce un'onda, la cui forma è perfettamente visibile, che si muove lungo tutta la corda. La perturbazione, in questo caso l'oscillazione provocata dalla nostra mano, si propaga; mano a mano tutti i punti della corda oscillano con la stessa ampiezza, anche quelli molto lontani dall'estremità della corda che abbiamo realmente fatto oscillare. L'informazione del nostro movimento si propaga, con una certa velocità, lungo tutta la corda, fino all'altro estremo. Questa è un'onda: una perturbazione, come un'oscillazione, che si propaga nel mezzo.

Le onde trasportano energia e si propagano ad una velocità ben definita che dipende dalle proprietà del mezzo (aria, acqua...) e sono generalmente fenomeni periodici nel tempo e nello spazio. Le onde non trasportano mai materia.

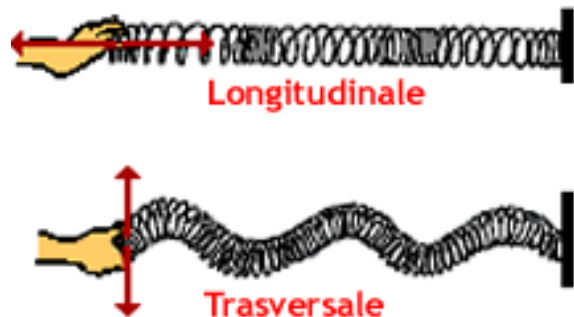
Molto importante è capire che la propagazione di un'onda non è associata al moto delle particelle del mezzo: esse infatti si limitano ad oscillare ma non seguono il percorso dell'onda, la quale interessa quindi sempre nuove particelle.

Onde trasversali e longitudinali

Esistono 2 tipi di onde, che si differenziano per la direzione di oscillazione.

Le onde del mare sono un esempio di onde trasversali: l'oscillazione dell'acqua avviene in senso verticale, mentre la propagazione è in orizzontale: la direzione di oscillazione è perpendicolare a quella di propagazione.

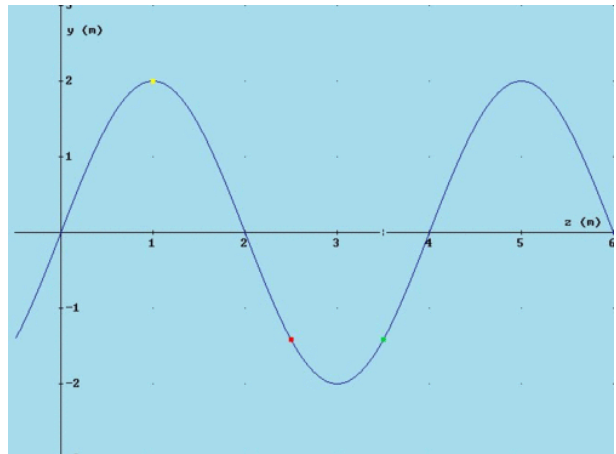
Le onde sonore invece sono un esempio di onde longitudinali: la direzione di oscillazione è la stessa di quella di propagazione. Anche in questo caso le particelle non seguono l'onda ma si limitano ad oscillare avanti e indietro attorno alla loro posizione naturale (di equilibrio)



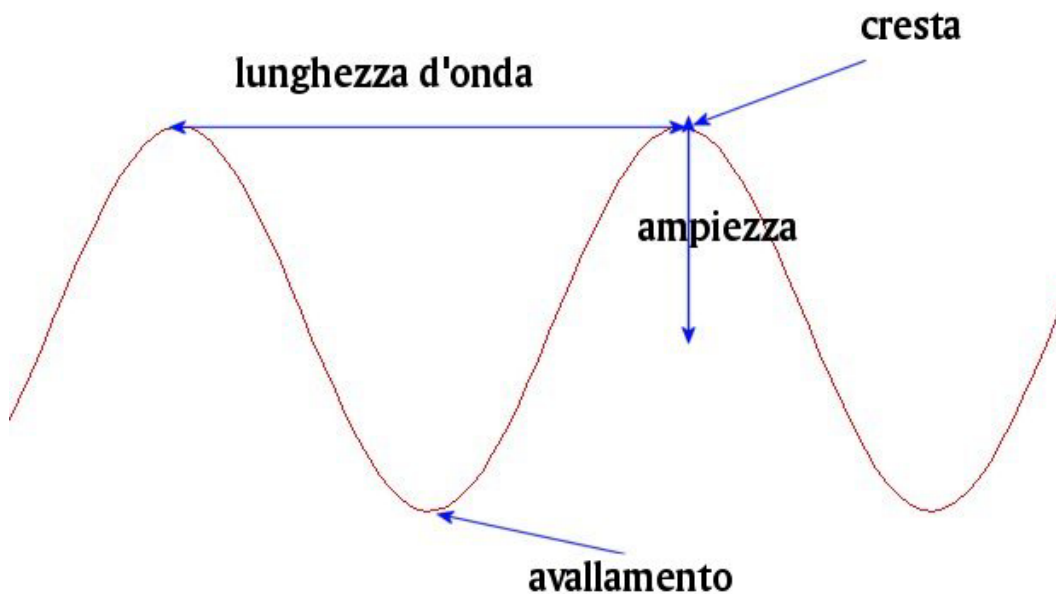
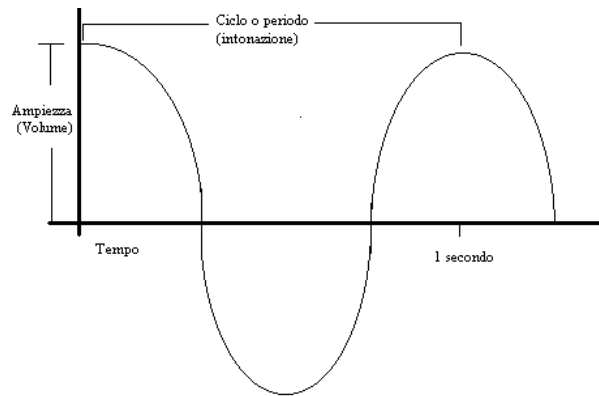
Grandezze caratterizzanti le onde

Un'onda è un fenomeno periodico nel tempo e nello spazio che si propaga. A prescindere dal tipo di onda, longitudinale o trasversale, ci sono delle grandezze e delle convenzioni che accomunano tutti i fenomeni ondulatori. Possiamo rappresentare un'onda in 2 diversi modi:

- 1) caso statico: si tiene fisso il tempo e si disegna l'onda in un grafico XY. Nel caso di un'onda longitudinale il grafico è lo stesso solamente che in ordinata si trova la pressione o la densità (nel caso delle onde sonore). La coordinata X rappresenta la direzione di propagazione, mentre in ordinata vi si trova l'ampiezza delle oscillazioni.



- 2) Caso dinamico: si tiene fissata la coordinata che rappresenta la direzione di propagazione (in generale X) e si fa variare il tempo; in ordinata è rappresentata l'ampiezza dell'onda, cioè le oscillazioni (longitudinali o trasversali) che essa compie



Una generica onda è formata da dei punti di massimo, chiamati creste e dei punti di minimo chiamati avvallamenti.

- Ampiezza: il valore di massima oscillazione dell'onda
- Lunghezza d'onda (λ): è lo spazio tra due creste successive, si misura in metri o sottomultipli. Si può misurare direttamente in un grafico che mostra l'ampiezza in funzione della direzione di propagazione
- Frequenza (f): è il numero di creste che attraversano un punto (fissato) in un secondo. In altre parole è il numero di oscillazioni in un secondo. Si legge nel grafico dinamico, contando il numero di creste nell'intervallo di un secondo
- Frequenza e lunghezza d'onda sono legate dalla relazione: $\lambda f = v$, cioè il loro prodotto è uguale alla velocità di propagazione dell'onda.

Equazione di un'onda

Abbiamo visto il grafico di una generica onda, e sappiamo che essa è un fenomeno che si ripete uguale nello spazio e nel tempo; queste due periodicità sono definite dalla lunghezza d'onda, che rappresenta lo spazio percorso prima che l'onda si ripeta uguale a se stessa, e dalla frequenza, che ci da informazioni sul tempo dopo il quale l'onda si ripete uguale a se stessa.

Ma quale relazione matematica ci consente di disegnare il grafico di un'onda? Sicuramente dovremmo utilizzare le grandezze fisiche coinvolte, quali l'ampiezza, la lunghezza d'onda e la

frequenza, da abbinare ad un'opportuna funzione periodica, che si ripete uguale. In matematica le funzioni periodiche più semplici ed intuitive sono le sinusoidi (o cosinusoidi), cioè funzioni del tipo: $f(x) = \text{sen}(x)$.

L'equazione di un'onda è in effetti di questo tipo:

$$y(x,t) = A \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(x - \lambda \frac{t}{T} \right) \right] = A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right)$$
 dove T è il periodo, legato alla frequenza dalla

relazione: $T = 1/f$. La funzione così scritta rappresenta un'onda che si ripete uguale per valori interi di λ e T .

Onde sonore

Le onde sonore sono onde longitudinali che si propagano in un mezzo qualsiasi, dall'aria, ai metalli, agli spazi interstellari; ogni luogo contenente materia è adatto alla propagazione delle onde sonore. Si tratta di compressioni e rarefazioni del mezzo che si propagano con velocità dipendente dalle proprietà del mezzo stesso, come la temperatura e la densità. Come ogni onda, le singole particelle del mezzo non si muovono con l'onda ma oscillano attorno alle loro posizioni di equilibrio. Le onde sonore si possono immaginare agevolmente come una molla che viene mossa (leggermente) avanti e indietro: si formano in questo modo delle zone più dense ed altre meno dense che si propagano lungo tutta la molla. Nell'aria, alle condizioni di pressione atmosferica di 1 bar (livello del mare) e temperatura di 25°C il suono si propaga alla velocità di 343m/s. La velocità di propagazione è fissata e dipende dalle caratteristiche del mezzo e non dalla velocità di chi la emette. Questo fatto è molto importante quando analizzeremo l'effetto doppler.

All'aumentare della densità del materiale aumenta la velocità delle onde sonore; nell'alluminio ad esempio il suono si propaga alla velocità di 6420 m/s!

La frequenza di un'onda sonora è direttamente collegata al tono (acuto o grave) del suono che il nostro orecchio è in grado di sentire. Frequenze basse indicano suoni gravi, frequenze alte indicano suoni acuti; il nostro orecchio è sensibile per un grande intervallo di frequenze, comprese tra 20 e 20000 Hz, cioè onde che oscillano tra 20 e 20000 volte ogni secondo. Naturalmente le onde sonore esistono oltre questi confini anche se il nostro orecchio non è in grado di udirle. Suoni con frequenze superiori ai 20000 Hz sono detti ultrasuoni, mentre frequenze inferiori ai 20 Hz indicano infrasuoni.

Intensità

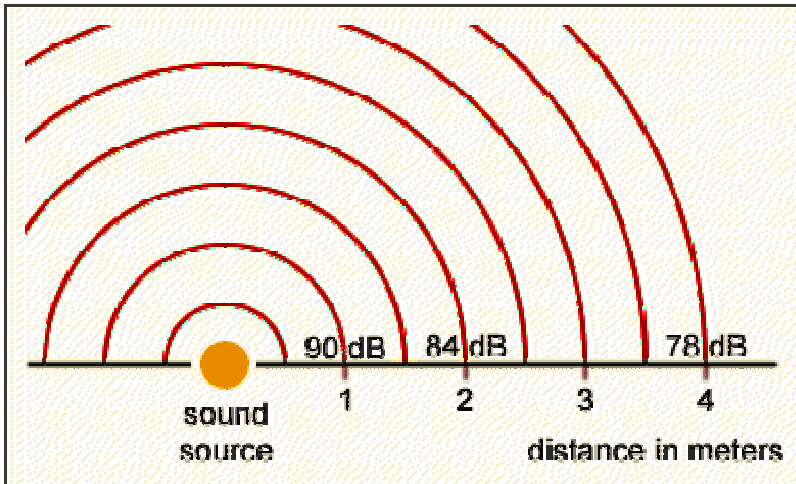
L'intensità di un suono è collegata al volume che noi effettivamente riusciamo a sentire. Le onde, comprese quelle sonore, trasportano energia, e l'intensità è definita proprio come la quantità di energia che attraversa una certa superficie in un certo intervallo di tempo, in formule: $I = \frac{E}{At}$;

l'energia divisa per un tempo definisce la potenza, quindi possiamo scrivere: $I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A}$. Le unità

di misura sono Watt per la potenza e $Watt / m^2$ per l'intensità

Come varia l'intensità in funzione della distanza?

Possiamo immaginare un suono come un insieme di tante onde che si propagano in ogni direzione dello spazio e l'intensità come il numero di onde che attraversa, in un secondo, una determinata area. Osserviamo ora la figura in basso:



Se la distanza dall'oggetto che emette il suono aumenta, allora le singole onde, che si propagano in ogni parte dello spazio, saranno "meno concentrate"; in altre parole, il numero di onde che intercetta un'area in un'unità di tempo è minore quanto maggiore è la distanza alla quale ci troviamo, quindi risulta minore l'energia e quindi minore è l'intensità del suono che riceviamo.

Le onde si propagano come se fossero delle sfere; mano a mano che ci si allontana, tutta la potenza si sparpaglia su sfere via via maggiori. In effetti l'intensità, ad una distanza r dalla sorgente diventa:

$$I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$
 dove alla generica area ho sostituito l'area della circonferenza il cui raggio è la distanza tra l'osservatore e la sorgente.

Il decibel

Nelle applicazioni di tutti i giorni, si definisce il volume di un suono, riferito al nostro orecchio, in relazione alla sua intensità: $\beta = 10 \log(I/I_0)$ dove I è l'intensità del suono ed I_0 è una costante e rappresenta l'intensità minima udibile dall'orecchio umano; sperimentalmente si è trovato: $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. E' bene non confondere l'intensità di un suono con il tono; l'intensità ci dà direttamente il volume che percepiamo, mentre il tono ci dice se il suono è acuto o grave e dipende dalla frequenza delle onde che riceviamo.

Effetto doppler*

Spesso sarà capitato di sentire lo strano comportamento di sorgenti sonore che si avvicinano e si allontanano da noi. L'esempio tipico è il suono di una sirena (polizia, ambulanza...): quando essa si avvicina a noi, magari a velocità sostenuta, il suono ci sembra piuttosto acuto; nel momento in cui essa ci supera e comincia ad allontanarsi da noi, il tono del suono cambia rapidamente, facendosi decisamente più grave rispetto a prima. Questa differenza di toni è legata alla differenza di frequenze che riceviamo: quando la sirena si avvicina la frequenza del suono da essa emessa ci appare maggiore rispetto a quella che riceviamo quando essa si allontana. Questo è l'effetto Doppler: il moto di una sorgente di onde o di un osservatore, modificano la frequenza del suono.

Vediamo di analizzare il perché di questo strano comportamento e come quantificarlo.

* In questo paragrafo parlerò e dimostrerò la formula classica dell'effetto Doppler, valida solamente per velocità relative molto più piccole di quelle della luce. Quando la velocità relativa sorgente-osservatore è maggiore di 100000 Km/s occorre utilizzare la formula relativistica.

Il suono si propaga con una velocità fissa rispetto al mezzo, cioè l'aria, di 343m/s; questo fatto è molto importante: se ad esempio noi ci muoviamo alla velocità di 100 m/s ed emettiamo un suono, esso si propagherà a 343m/s rispetto all'aria, ma a soli 243m/s rispetto a noi che ci muoviamo a 100 m/s rispetto all'aria. Abbiamo anche definito la frequenza come il numero di creste che riceviamo in un secondo; la frequenza è direttamente legata al tono (grave o acuto) che possiamo udire.

Osservatore in movimento (e sorgente ferma): Consideriamo una sorgente sonora fissa che emette il suono ad una frequenza fissata. Ad un certo punto cominciamo a correre verso la sorgente; cosa succede? La nostra velocità ha verso contrario a quella di propagazione del suono, che ha una velocità fissa di 343m/s; tuttavia, se ci muoviamo a 100 m/s in direzione contraria, dal nostro punto di vista, l'onda sonora si muove molto più velocemente, precisamente a $343+100=443$ m/s!. Poiché la frequenza è il numero di creste che ricevo in un secondo, muovendomi riceverò in un secondo molte più creste dell'onda: la frequenza quindi, per un osservatore che si avvicina alla sorgente, sembra aumentare: il suono si fa più acuto. In modo analogo se ci allontaniamo dalla sorgente: in questo caso la velocità alla quale si muove l'onda sonora a noi sembra essere minore: se ci allontaniamo a 100 m/s noi misuriamo una velocità dell'onda sonora di $343-100=243$ m/s e quindi, in un secondo misureremo meno creste dell'onda, cioè avremo una frequenza minore e qui percepiremo un suono più grave. Di quanto varia la frequenza? Basta fare un semplice calcoletto; sappiamo infatti che lunghezza d'onda e frequenza sono legate dalla relazione: $\lambda f = v$ e quindi si

ha: $f = \frac{v}{\lambda}$. La lunghezza d'onda del suono non cambia poiché lo spazio tra due creste resta costante; cambia solo l'intervallo di tempo n cui l'osservatore vede passare le creste, cioè la frequenza. Chiamiamo f' e v' la nuova frequenza percepita dall'osservatore in moto e la velocità con la quale

si muove l'onda, sempre rispetto all'osservatore; si ha: $f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v+u}{\lambda}$ dove la velocità di propagazione dell'onda, rispetto all'osservatore è data dalla somma tra la velocità dell'onda rispetto all'aria e dell'osservatore rispetto all'aria. Se l'osservatore si allontana dalla sorgente, la velocità dell'onda da lui misurata sarà inferiore rispetto a quella a riposo e quindi: $f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v-u}{\lambda}$;

modificando un po' queste espressioni, ricordando che $\lambda = \frac{v}{f}$ si trova:

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v \pm u}{\lambda} = (1 \pm u/v)f$$

Sorgente in movimento (ed osservatore fermo): Analizziamo il caso in cui l'osservatore è fermo ma la sorgente si muove; in questo caso l'effetto non è causato dal fatto che l'onda sonora, rispetto all'osservatore sembra avere velocità maggiore (o minore) e quindi frequenza maggiore (o minore): l'osservatore è fermo rispetto all'aria, quindi misurerà sempre una velocità del suono fissa, pari a 343 m/s; il problema sta nella sorgente in movimento. Consideriamo ad esempio la solita macchina della polizia con la sirena accesa, in moto verso di noi. Le onde prodotte da essa viaggiano a 343 m/s rispetto all'aria, a prescindere dal moto della sirena. Analizziamo le onde, considerando solo i punti di massima densità, cioè le compressioni. All'istante T la sirena emette una compressione che si propaga a 343 m/s; all'istante $T+1$, cioè dopo un ciclo completo, si ripeterà l'emissione della stessa compressione, che si propagherà sempre alla velocità di 343 m/s; tuttavia in questo lasso di

tempo la sirena ha percorso uno spazio, dato dalla velocità per il tempo; la nuova compressione si troverà quindi più vicino alla prima. Vediamo di quantificare meglio quanto detto.

Considero una sorgente che si avvicina all'osservatore (fermo) a velocità u ; la sorgente emette onde sonore con frequenza f e periodo $T = 1/f$, cioè l'onda si ripete uguale dopo T secondi (ad esempio si ripete una cresta, o meglio, una compressione). Durante 1 periodo la distanza percorsa dalla compressione sarà data da: $d = vT$; tuttavia, nello stesso tempo T , la sorgente si muove con velocità u , e percorre una distanza: $d' = uT$ nel verso di propagazione dell'onda. Di conseguenza, quando la sirena emette una nuova compressione dopo T secondi, essa viene emessa ad una distanza pari a $D = d - d' = vT - uT = T(u - v)$: la lunghezza d'onda del suono cambia, in particolare si comprime e cambia anche la frequenza in questo caso. Sappiamo che esse sono legate dalla relazione: $v = \lambda' f'$ e quindi possiamo risolvere rispetto ad f' che è la nuova frequenza:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{(v-u)T}. \text{ Dopo qualche passaggio matematico otteniamo: } f' = \left(\frac{1}{1-u/v} \right) f.$$

Stesso discorso per la sorgente che si allontana dall'osservatore; in questo caso la lunghezza d'onda aumenta poiché la sorgente "scappa" dall'onda e quindi si ha: $f' = \left(\frac{1}{1+u/v} \right) f$; nel caso generale

quindi si ha: $f' = \left(\frac{1}{1 \pm u/v} \right) f$: la frequenza aumenta se la sorgente si avvicina all'osservatore (e quindi diminuisce la lunghezza d'onda), mentre diminuisce se la sorgente si allontana dall'osservatore (aumenta la lunghezza d'onda).

Caso generale: I due casi visti, in cui l'osservatore o la sorgente sono in movimento, rappresentano situazioni particolari; nella realtà si avrà il contributo di entrambi i casi, per questo è utile unirli ed ottenere finalmente la formula completa per l'effetto doppler: $f' = \left(\frac{1 \pm u_o/v}{1 \mp u_s/v} \right) f$ dove f' è la

frequenza che misura l'osservatore, f è la frequenza "originale" dell'onda sonora, u_o è la velocità dell'osservatore ed u_s la velocità della sorgente (entrambe riferite al mezzo di propagazione, cioè all'aria)

Doppler Effect: Police Siren

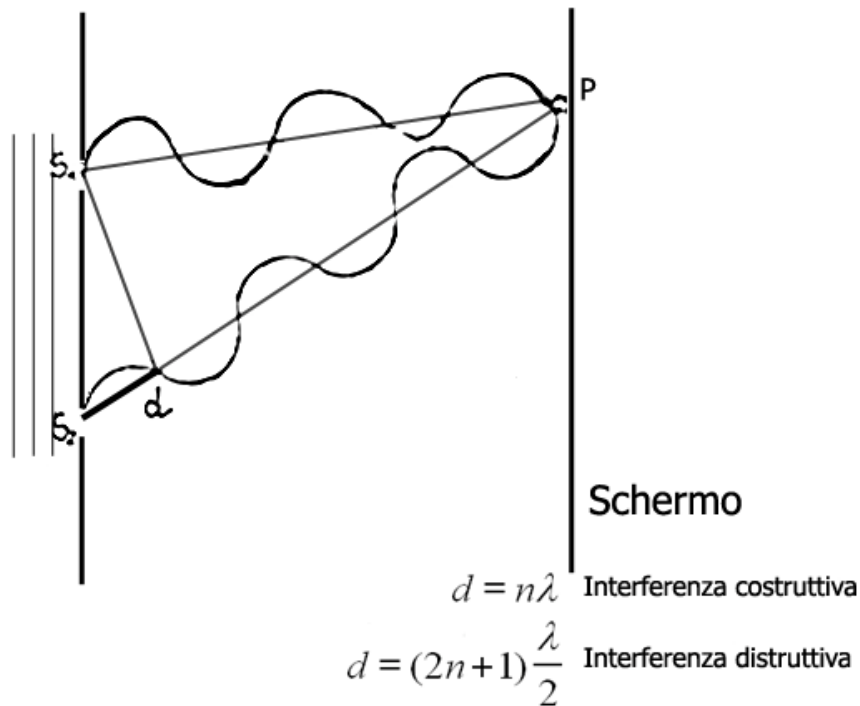


La luce è un'onda: diffrazione ed interferenza

Il potere risolutivo di qualsiasi strumento ottico usato per l'osservazione del cielo è in generale la capacità di separare distintamente due punti vicini tra di loro; esso viene in genere espresso in sottomultipli del grado (minuti d'arco e secondi d'arco), unità di misura usata per gli oggetti appartenenti alla sfera celeste. Utilizzando l'approssimazione dell'ottica geometrica, che considera la luce corpuscolare e il suo tragitto descritto da rette e segmenti di rette, appare chiaro che il potere risolutivo dipenda unicamente dall'ingrandimento dell'immagine. Secondo questa trattazione infatti, la luce di due stelle distanti nel cielo x secondi d'arco viene focalizzata dall'obiettivo nel suo punto focale; i due punti, assumendo le stelle oggetti puntiformi a causa della distanza, appariranno altrettanto puntiformi sul piano focale. Siccome le stelle non appaiono puntiformi, ma hanno un (sia pur piccolissimo) diametro apparente (le più grandi e vicine hanno dimensioni di qualche millesimo di secondo d'arco), è chiaro che nell'approssimazione dell'ottica geometrica, sul piano focale (ammettendo un'ottica perfetta, che concentri perfettamente la luce) avremo un'immagine del diametro apparente della stella. Questa immagine, ingrandita migliaia di volte attraverso un oculare (nel caso di diametro stellare di 0,1 secondi d'arco questo significa ingrandire almeno 2000 volte) permetterà all'occhio umano di vedere il disco stellare risolto, a prescindere dallo strumento utilizzato. In effetti, nell'approssimazione dell'ottica geometrica, l'unico fattore che governa il potere risolutivo è l'ingrandimento, mentre esso è indipendente totalmente dal diametro dell'obiettivo del telescopio, in quanto la luce è composta da corpuscoli che viaggiano in linea retta. In realtà però le cose non stanno così perché l'ottica geometrica è un'approssimazione che serve solamente a capire come funzionano gli strumenti ottici, ma che non può rispondere a domande di ordine superiore come il caso del potere risolutivo. Se la luce fosse composta da particelle e si comportasse come tale, allora ogni telescopio avrebbe un potere risolutivo dipendente solamente dall'ingrandimento (nel caso di osservazione visuale) o dalla dimensione dei pixel e dalla focale equivalente (nel caso di strumenti fotografici digitali). Siccome, almeno teoricamente, l'ingrandimento visuale ottenibile attraverso gli oculari, è molto alto (alche diverse migliaia di volte con uno strumento modesto), se ne deduce che anche con uno strumento da 10cm posso riuscire a risolvere oggetti che appaiono piccolissimi come le stelle o asteroidi di qualche metro di diametro. Le cose tuttavia sono molto diverse dal caso dell'ottica geometrica; già nei secoli passati fu chiara la particolare natura della luce: essa infatti si comporta sia come un'onda che come una particella. Il suo comportamento è simile a quello di una particella massiva quando ad esempio urta gli elettroni e vi trasferisce del momento, proprio come una palla da biliardo ne urta un'altra, mentre essa assume il comportamento di un'onda quando attraversa strette fenditure, producendo fenomeni di interferenza e diffrazione.

Non discuteremo a fondo di interferenza e di diffrazione, ma ci limiteremo solamente ad elencare gli effetti osservabili.

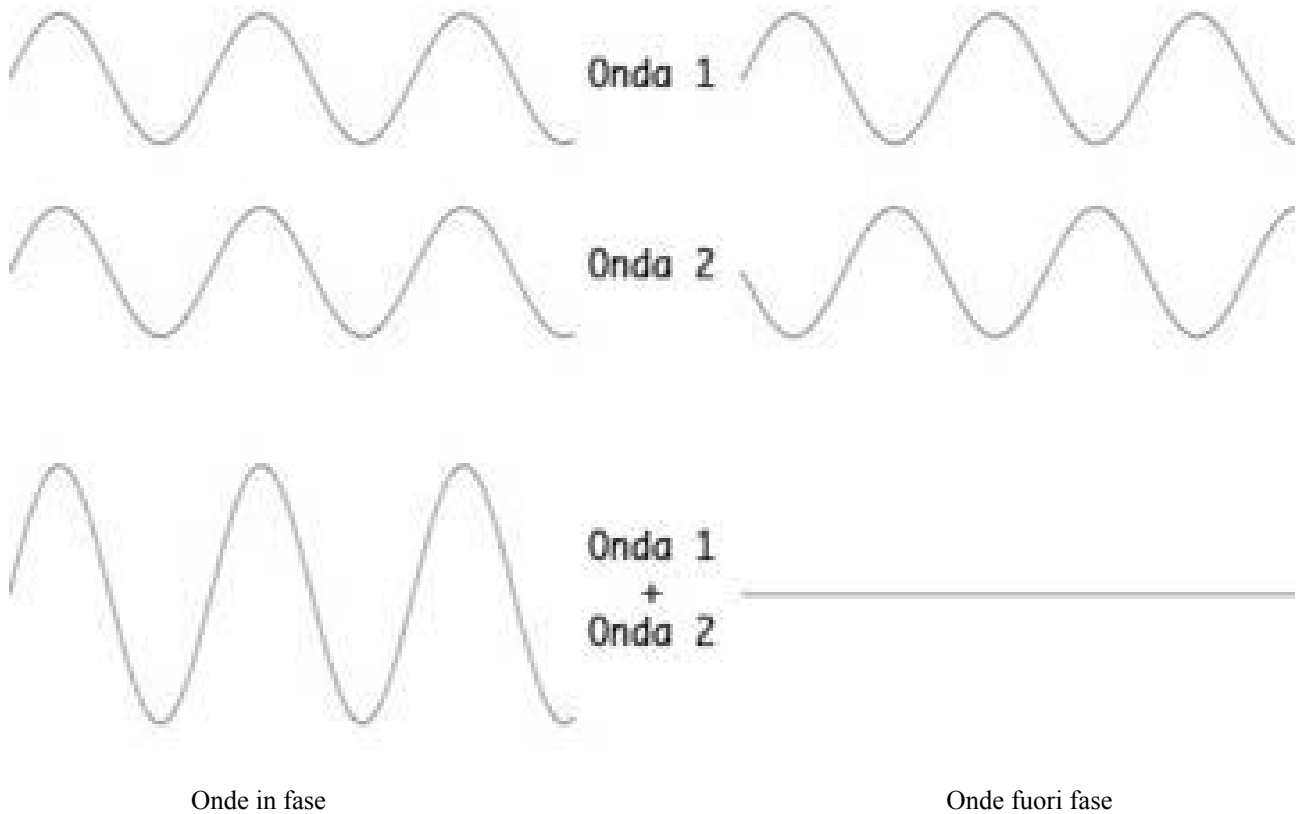
L'interferenza della luce è quel fenomeno per il quale facendo passare due raggi luminosi attraverso due fenditure e ponendo in lontananza uno schermo, si osserva un andamento molto particolare; la luce risultante non è semplicemente la somma algebrica delle intensità dei singoli raggi, ma una figura chiamata figura di interferenza, che mostra dei massimi in cui la luce totale è data dalla $luce_1 + luce_2$, e dei minimi, in cui la luce totale è zero. Questo comportamento non può spiegarsi in altro modo se non con il considerare la luce come un'onda. Analizziamo la seguente situazione:



Interferenza. La luce che proviene da due strette fenditure si comporta in modo particolare quando colpisce uno schermo. Poiché essa è un'onda, che si propaga a velocità fissata, le due sorgenti colpiscono lo schermo con diverse intensità. Se le due onde sono sfasate di un cammino detto (d) pari ad un multiplo intero della loro lunghezza d'onda, si ha interferenza costruttiva; in caso contrario è distruttiva: i valori del campo elettromagnetico sono uguali ma di segni opposti e l'intensità risultante è nulla

Un'onda, analogamente a quanto succede nell'acqua del mare, è un fenomeno che trasporta un qualche tipo di informazione, periodico nel tempo, che comporta l'oscillazione di un qualcosa (acqua nel caso di onde marine, campo elettrico e magnetico nel caso della luce) nello spazio; se potessimo analizzare ad esempio le onde del mare fissando un sistema di riferimento e stando fermi, vedremo che il livello dell'acqua in quel punto cambia periodicamente con il tempo; esso aumenta, raggiunge un massimo, poi diminuisce fino a raggiungere un valore minimo, per poi risalire nuovamente e compiere altri cicli. La luce si comporta nello stesso modo; un campo elettrico ed uno magnetico, tra di loro perpendicolari, variano periodicamente con il tempo in un punto fissato, o in alternativa (invece di prendere un punto fisso nello spazio e vedere l'onda passare, scegliamo una porzione d'onda e seguiamola attraverso lo spazio) il valore dell'onda si propaga nello spazio ad una certa velocità caratteristica, che nel caso della luce, nel vuoto è una costante della natura, chiamata appunto velocità della luce. Tutte le onde hanno dei comportamenti che differiscono a volte sensibilmente dal comportamento di una particella materiale, come può essere ad esempio una molecola, o anche una semplice palla da biliardo. In particolare quando due onde monocromatiche della stessa lunghezza d'onda si combinano insieme, l'effetto risultante è l'interferenza e la diffrazione. Osserviamo la figura: una sorgente luminosa monocromatica emette radiazione i cui raggi sono perpendicolari allo schermo contenente due piccole aperture; solo una porzione della luce riesce a giungere alle fenditure, che agiscono a loro volta come sorgenti di luce indipendente (principio di Huygens); a causa del fenomeno della diffrazione, che vedremo in seguito, la luce delle due fenditure si propaga in ogni parte sullo schermo, e in alcuni punti la luce proveniente dai due punti si sovrappone, come ad esempio succede nel punto P. Cosa succede all'intensità? Quale sarà l'intensità risultante per esempio nel punto P dove giunge luce da entrambi i fori? Se la luce non fosse stata un'onda, avremmo detto che l'intensità risultante è data dall'intensità della luce che arriva dal foro 1 + l'intensità che arriva dal foro 2, ma siccome la luce è un'onda, questo non si può dire. L'intensità risultante dipende dall'intensità dell'onda mentre essa colpisce lo schermo; abbiamo infatti visto che l'intensità, essendo la luce un'onda, varia tra un massimo, un minimo, passando per un valore nullo; se consideriamo il massimo = 1 e il minimo = -1, allora, se nel punto P l'onda proveniente da S1 ha intensità 1, ma l'onda proveniente da S2 ha intensità -1, l'intensità risultante sarà data da $+1-1=0!$; Se, l'intensità delle due onde nel punto in cui colpiscono lo schermo è concorde, ad esempio +1, allora l'intensità risultante sarà $1+1!$ Usando un linguaggio più tecnico,

possiamo affermare che quando due onde sono perfettamente in fase, l'intensità finale è il doppio dell'intensità che si misura da una sola sorgente, mentre se le onde sono fuori fase, allora l'intensità risultante è zero:



Fasi di due onde generiche. Un'onda è un fenomeno oscillatorio, periodico. Nel caso della luce, il campo elettromagnetico oscilla tra un valore massimo (A) ed uno minimo ($-A$). Per sommare due onde occorre capire se esse sono in fase, cioè se i massimi dell'una coincidono con i massimi dell'altra. L'intensità risultante sarà $A+A=2A$. Se sono fuori fase il massimo dell'una coincide con il minimo dell'altra e l'intensità risultante sarà $A+(-A)=0$

La domanda che potrebbe sorgere è la seguente: cosa determina il fatto che le onde siano in fase o fuori fase? In fondo le sorgenti S_1 e S_2 sono illuminate dalla stessa sorgente, come è possibile una tale differenza? Chi sfasa le onde?

È la loro velocità, che è finita e ben determinata; Entrambe le onde che partono dalle sorgenti S_1 e S_2 e che si dirigono in ogni punto dello schermo, hanno tutte la stessa velocità (oltre alla stessa lunghezza d'onda e stessa intensità), ma il percorso che devono compiere per raggiungere lo schermo cambia. Nella figura 1, l'onda proveniente da S_2 deve fare un tragitto più lungo rispetto ad S_1 , per raggiungere il punto P ; questa differenza di tragitto (d) determina il possibile sfasamento dell'onda. Per calcolare lo sfasamento, oltre alla differenza di tragitto, occorre conoscere la lunghezza d'onda della luce (che è la distanza tra due massimi consecutivi di un'onda, o in generale tra due punti che hanno lo stesso valore); conoscendo questi due dati siamo in grado di prevedere per ogni punto dello schermo quale sarà l'intensità risultante. Se la differenza di tragitto sarà uguale a mezza lunghezza d'onda o ad un suo multiplo intero: $d = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$, allora il massimo dell'onda

1 coinciderà sempre con il minimo dell'onda 2; le due onde assumono quindi stessi valori, ma di segno opposto, e si dice che l'interferenza è completamente distruttiva, perché il risultato è un'intensità=0; se invece la differenza di cammino è di un multiplo intero della lunghezza d'onda: $d = n\lambda$, avrò sempre interferenza costruttiva, e un'intensità doppia rispetto alla singola fenditura.

Tra questi due casi limite, ho un'infinità di casi intermedi, in cui le onde non interferiscono ne totalmente costruttivamente, ne totalmente distruttivamente, dando luogo ad intensità intermedie. Seguendo questo ragionamento per il punto P e per tutti i punti dello schermo, posso arrivare a completare una mappa delle intensità, ed il risultato è dato dalla seguente figura:

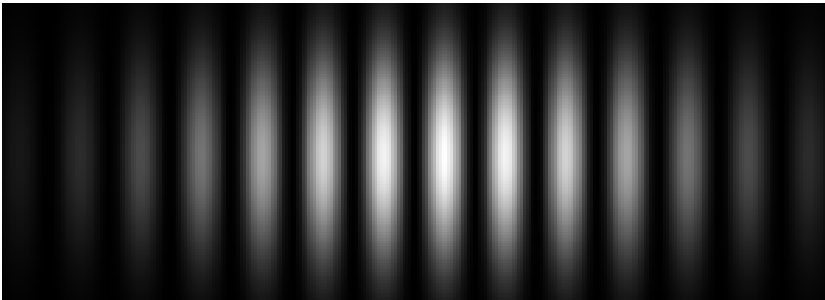


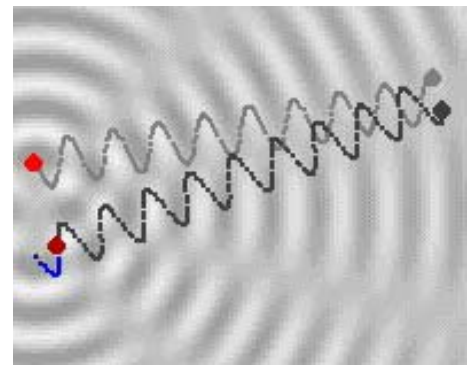
Figure di interferenza prodotte da una fenditura rettangolare. L'intensità massima si ha per onde perfettamente in fase, quella nulla quando sono perfettamente fuori fase. La variazione non è continua e forma le tipiche frange.

Questo è un risultato generale e interessa ogni onda.

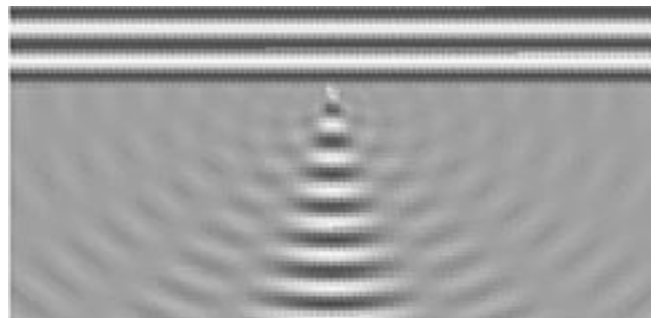
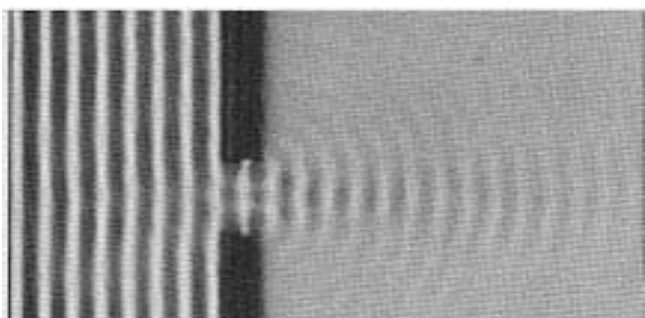
Per provare questo, potete fare un semplice esperimento: gettate contemporaneamente due piccoli sassolini in una sorgente d'acqua in quiete ad una distanza di una decina di cm l'uno dall'altro e osservate cosa succede alle onde superficiali da loro prodotte; analogamente al caso appena visto per la luce, anche le onde così formate interferiranno tra loro, dando origine ad una propria figura di interferenza:

Per quanto riguarda la luce, l'esperienza non è altrettanto facile da effettuare, perché l'interferenza si manifesta evidente solamente quando le dimensioni delle fenditure sono dell'ordine della lunghezza d'onda della luce.

La diffrazione è un fenomeno simile, che evidenzia la natura ondulatoria della luce; essa nella vita di tutti i giorni si manifesta con la possibilità, per onde la cui lunghezza d'onda è confrontabile con le dimensioni di oggetti della vita comune, di attraversare ostacoli e propagarsi anche oltre il cammino geometrico seguito da rette e semirette. La diffrazione è evidente in mare, quando le onde si propagano oltre barriere naturali o artificiali, o nel caso delle onde acustiche, grazie alla quale possiamo sentire suoni di oggetti con i quali non siamo in comunicazione diretta.

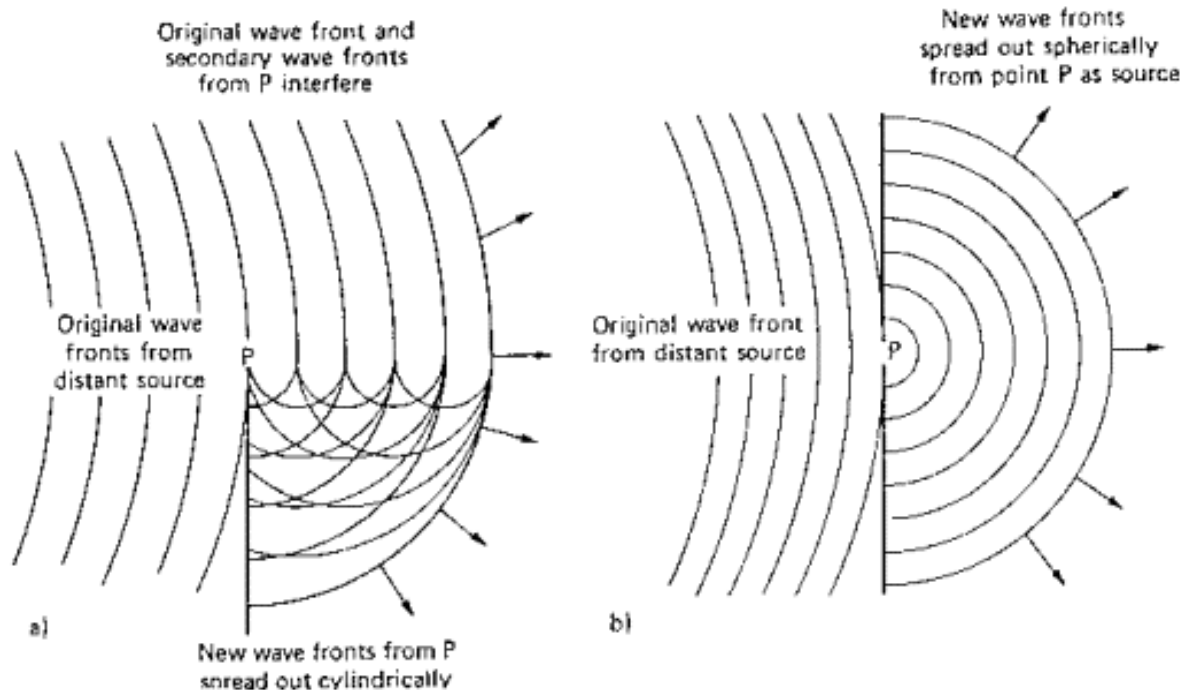


Interferenza tra due onde (sferiche) in acqua: ad ogni fenomeno ondulatorio è associato questo fenomeno.



Possiamo immaginare la diffrazione come lo sparpagliamento di un'onda che passa attraverso una fenditura, oltre il confine geometrico proiettato dai suoi confini. La singola fenditura si comporta come un insieme di doppie fenditure viste nel caso dell'interferenza

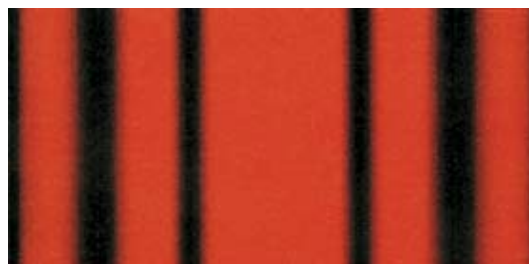
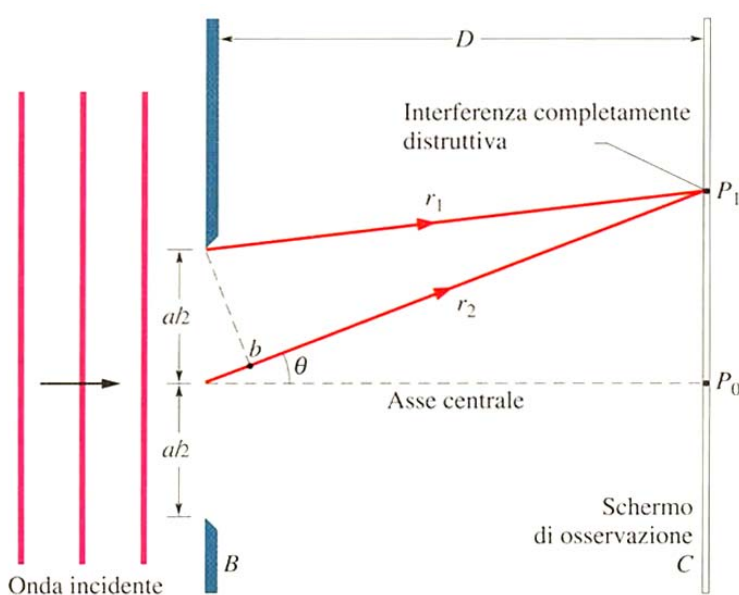
La diffrazione è più precisamente lo sparpagliamento che subisce un'onda che attraversa una sottile fenditura; nell'attraversare un tale ostacolo, si formano i cosiddetti fronti d'onda di Huygens, cioè la fenditura si comporta come una sorgente di onde, che si propagano ben oltre il suo confine geometrico.



Due classici esempi di diffrazione. Un fronte d'onda (cioè una successione di onde) che attraversa una fenditura si comporta esattamente come se nella fenditura ci fosse una sorgente di onde sferiche. Ogni onda sferica provoca poi dei fenomeni di interferenza e forma la classica figura di diffrazione.

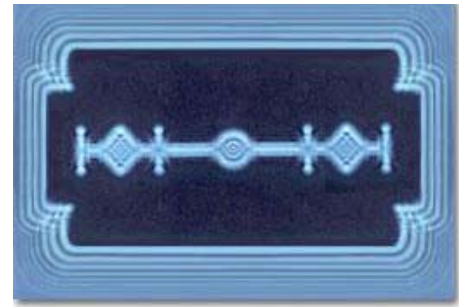
A questo punto interviene l'interferenza; siccome la luce si sparpaglia su un'area maggiore della superficie della fenditura, che ha una sezione (diametro) confrontabile con quello della lunghezza d'onda, onde che si producono in posizioni diverse della fenditura e vanno ad incidere su un punto P posto su uno schermo lontano, possono essere in fase o no, a seconda della differenza di cammino percorso. Se suddividiamo l'apertura in elementi elementari di area dA , possiamo assumere che ogni superficie elementare emette un'onda i cui fronte si espande in tutte le direzioni e va ad illuminare lo schermo; naturalmente tutte le sezioni elementari dA si comportano così, con la differenza che le loro posizioni all'interno della fenditura cambiano e il cammino percorso non è lo stesso.

Ripetendo il ragionamento per ogni punto dello schermo, siamo in grado di costruire la figura di diffrazione completa, dove i due effetti (1) sparpagliamento della luce e 2) interferenza) si sommano:



Schema di diffrazione (a sinistra) e figura di diffrazione attraverso un'apertura circolare (sopra). Un'onda piana, incidente su una fenditura, forma tanti fronti d'onda sferici, come se fossero ognuna generata da delle fenditure. L'interferenza tra i fronti d'onda genera la figura sopra.

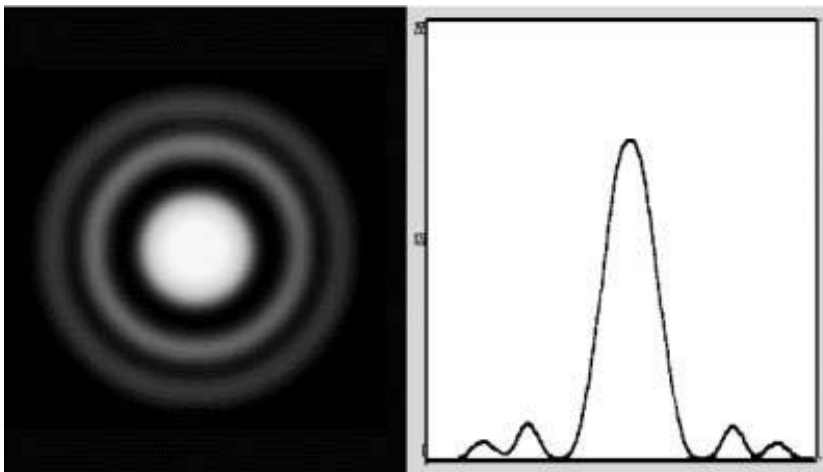
La diffrazione della luce si nota molto bene anche nelle situazioni quotidiane; per esempio basta stringere due dita, in modo da formare una stretta fessura tra di loro e guardare una sorgente luminosa, come un paesaggio di giorno o la luce di una lampadina; noterete delle linee scure nella fessura, che sono dovute proprio alla diffrazione. Anche le cosiddette mosche volanti sono effetti della diffrazione. Essa non sono altro che punti che appaiono alla vista quando si guarda uno sfondo illuminato uniformemente e privo di dettagli, come il cielo di giorno lontano dal Sole. Guardando con attenzione noterete dei piccoli punti che sembrano muoversi nel cielo; questi sono dovuti alla presenza di piccoli grumi o frammenti di qualsiasi tipo depositati nell'umor vitreo dell'occhio; quello che si vede in realtà è una figura di diffrazione, spesso di forma circolare, proiettata sulla retina.



La diffrazione è visibile anche nelle situazioni quotidiane, come questa ombra di un rasoio da barba, colpito da luce monocromatica

La diffrazione della luce si mostra anche per oggetti comuni come per esempio con una lametta illuminata da luce monocromatica:

Nel caso di aperture circolari, la diffrazione si manifesta con un figura circolare ma il principio è lo stesso di un'apertura rettangolare; è chiaro che maggiore sarà l'apertura, minore sarà l'effetto della diffrazione, e anche la lunghezza d'onda della luce è molto importante: maggiore sarà la lunghezza d'onda e maggiori saranno gli effetti:



Ogni apertura, di ogni dimensione, produce diffrazione. Le aperture circolari, proprie di ogni telescopio astronomico, non fanno eccezione e producono una figura di diffrazione come quella a lato, con profilo di luminosità gaussiano. La macchia centrale si chiama disco di Airy. Il diametro della macchia di diffrazione centrale dipende dal diametro dell'apertura, cioè dal diametro del telescopio

L'andamento tipico è rappresentato nell'immagine a destra della figura; il disco centrale contiene circa l'85% della luce totale e il suo profilo è rappresentato da una curva gaussiana, che rappresenta l'andamento dell'interferenza con la distanza dal centro. Al centro si ha interferenza puramente costruttiva, mentre la percentuale cala al crescere della distanza, fino ad arrivare ad un punto in cui tutte le onde sono fuori fase e la luce risultante è zero. La figura centrale è chiamata disco di Airy.

La dimensione del disco di Airy per un'apertura circolare è data sostanzialmente dalla lunghezza d'onda che provoca le diffrazione e la larghezza dell'apertura; in particolare la relazione che

intercorre è: $\sin \theta = 2,44 \frac{\lambda}{D} \approx \theta$ (per angoli piccoli $\sin \theta \approx \theta$). Questa formula ci fornisce il

diametro angolare del disco di Airy per qualunque apertura di diametro D e lunghezza d'onda λ ; il risultato, riportando D e λ in unità uguali, da un valore in radianti; per trovare il corrispettivo valore in secondi d'arco occorre moltiplicare per il numero di secondi d'arco contenuti in un radiante, e cioè 206265.

Siccome le regole viste valgono per qualunque apertura, devono valere anche per un telescopio e in generale qualsiasi strumento astronomico, compresi i radiotelescopi e i telescopi infrarossi (e tutti gli altri!).

La diffrazione è l'elemento che determina il potere risolutivo di ogni telescopio.

La risoluzione di uno strumento ottico

Con la luce e i telescopi accade questo: quando un raggio di luce entra nel telescopio, a prescindere dalla sua apertura, esso subisce il fenomeno della diffrazione e dell'interferenza e forma una strana figura la cui forma ed estensione non dipendono dalla sorgente ma dal diametro (e dalla forma) dell'obiettivo del telescopio.

Questa situazione si presenta nella realtà quando si osservano sorgenti di luce (quasi) puntiformi come possono essere le stelle: l'immagine restituita dal telescopio non è più un punto ma assume una forma strana, chiamata figura di diffrazione, dal diametro ben determinato e che prescinde totalmente la reale natura della sorgente. Nel caso dei telescopi e di tutti gli strumenti con aperture circolari, tale figura ha la tipica forma circolare, con una macchia centrale detta disco di Airy e una serie di anelli esterni di intensità rapidamente decrescente. Possiamo affermare che la macchia di diffrazione è il minimo diametro angolare di una sorgente che il telescopio ci fornisce: una sorgente di luce assolutamente puntiforme e quindi di dimensioni (teoricamente) nulle apparirà di dimensioni diverse nel telescopio, uguali a quelle della macchia di diffrazione.

Analogamente, un oggetto le cui dimensioni angolari sono inferiori a quelle della macchia di diffrazione apparirà, a prescindere dalla sua forma e dimensione reale, come una macchia di diffrazione uguale a quella di qualsiasi altra sorgente di diametro angolare minore o uguale.

Il diametro della macchia centrale, detta disco di Airy, dipende dal diametro del telescopio e dalla lunghezza d'onda di osservazione secondo la relazione (approssimata): $\vartheta = 2,44 \frac{\lambda}{D}$. Adesso

diventa relativamente facile dare una prima definizione di potere risolutivo. Consideriamo un telescopio da 100 mm di apertura operante alle lunghezze d'onda visibili (550 nm). Osservando una stella con ingrandimento elevato, noterò la macchia di diffrazione con il disco di Airy dal diametro di 2,77". Se in prossimità della stella ce n'è un'altra, anche essa produrrà una macchia di diffrazione delle stesse dimensioni.

Se la distanza angolare tra le componenti è di molto inferiore alle dimensioni della singola macchia di diffrazione esse non mi appariranno separate nello strumento ma potrò vedere solo un unico disco di Airy, o al limite una sua leggera elongazione: le due componenti al telescopio non mi appaiono separate.

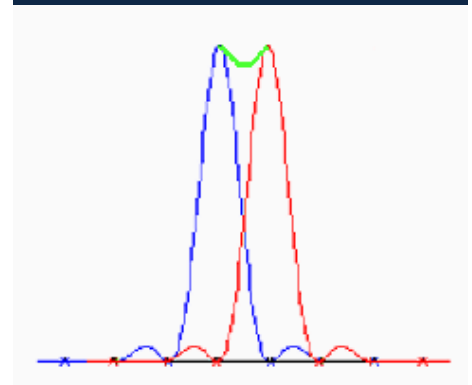
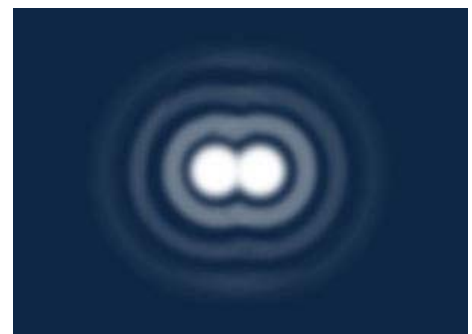
Se la distanza reale è uguale a quella del diametro del disco di Airy, allora vedrò due distinte macchie di diffrazione.

Fino a quale distanza angolare posso affermare di vedere separate le due stelle?

Data la natura della distribuzione della luce nel disco di Airy (gaussiana) non c'è un limite univoco per determinare il potere risolutivo. Storicamente il più comune è il criterio di Dawes: il potere risolutivo massimo di un telescopio nell'osservazione di due stelle di uguale luminosità è dato dalla relazione semplice $\vartheta = \frac{115}{D}$. La formula afferma che la

distanza minima alla quale le sorgenti appaiono ancora separate all'osservazione visuale è quando la loro distanza angolare è di poco inferiore al raggio del disco di Airy. Un altro criterio, detto di Rayleigh, afferma che due sorgenti puntiformi (di uguale luminosità) risultano risolte fino a quando la loro distanza angolare è pari al raggio del disco di Airy: $\vartheta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$. Questo è un criterio fisico basato sulla

forma e distribuzione di luce nella figura di diffrazione, mentre quello di Dawes è più empirico, anche se i valori



Criterio di Rayleigh: due sorgenti puntiformi, di uguale intensità, risultano separate se la distanza tra i centri di diffrazione è pari al raggio del disco di Airy. In alto una simulazione. In basso, il profilo di luminosità.

restituiti sono simili. Sostanzialmente il criterio di Rayleigh si basa sul fatto che due immagini risultano ancora separabili quando i picchi massimi dei dischi di Airy non sono ancora completamente uniti, come mostra la figura della pagina precedente. I due criteri sono validi per osservazioni visuali alle lunghezze d'onda visibili e con componenti stellari di uguale luminosità; facendo cadere queste approssimazioni possiamo complicare a piacere il problema, anche se il potere risolutivo non può variare di molto poiché le dimensioni del disco di Airy sono fissate, senza approssimazioni, dalla natura ondulatoria della luce

La prima variabile di cui dobbiamo tenere conto è l'eventuale ostruzione del sistema ottico utilizzato: nonostante il diametro del disco di Airy dipenda unicamente dalle dimensioni dell'obiettivo, l'ostruzione distribuisce parte della sua luce negli anelli esterni. Questo fatto si rivela un'arma a doppio taglio:

- da una parte le dimensioni del disco di Airy diminuiscono anche di un 10-15%, aumentando il potere risolutivo teorico.
- dall'altra si ha più luce negli anelli esterni e si perde del contrasto, altro fattore determinante per il potere risolutivo: due dettagli possono essere potenzialmente separabili, ma se la loro luminosità è troppo debole rispetto allo sfondo essi non saranno neanche visibili, figuriamoci risolti.

Un ruolo importantissimo è giocato anche dal rivelatore utilizzato, soprattutto dopo queste considerazioni sul contrasto dell'immagine: se due dettagli planetari distano al limite del potere risolutivo dello strumento e possiedono una luminosità 1/300 volte maggiore dello sfondo (un contrasto estremamente basso!) essi sono risolvibili? Se si utilizza come rivelatore l'occhio umano la risposta è negativa, poiché non riesce a percepire contrasti così bassi; la risposta è negativa anche nel caso delle webcam, la cui dinamica ad 8 bit permette di mettere in luce solamente 255 livelli di grigio e quindi insufficienti per mostrare i dettagli. Se si utilizza invece una camera con dinamica a 16 bit, cioè 65536 livelli di grigio, allora i due dettagli saranno registrati e probabilmente risolti. La dinamica di un sensore è quindi molto importante anche per il potere risolutivo, oltre che per la magnitudine limite,.

Nitidezza

Il potere risolutivo si riferisce alla possibilità di separare o meno due oggetti vicini. Tuttavia questo non significa che un oggetto le cui dimensioni siano inferiori alla macchia di diffrazione non possa essere visto: il caso eclatante è dato dalle stelle, visibili nonostante abbiano dimensioni molto inferiori al potere risolutivo di qualsiasi strumento. La capacità di poter vedere dettagli di piccole dimensioni viene definita nitidezza ed essa non ha nulla a che vedere con il potere risolutivo: due stelle poste molto vicino l'una all'altra possono non essere separate ma questo non vuol dire che non riesca a vedere la loro immagine, anche se unita. D'altra parte deve risultare chiaro che, nonostante una stella sia visibile, la sua forma non è comunque risolvibile: quello che vedo è solamente la sua presenza attraverso la macchia di diffrazione, ma non possiedo alcuna informazione sulla sua reale dimensione e forma. Nel caso di dettagli planetari, specialmente quelli ad alto contrasto, succede la stessa cosa: un dettaglio le cui dimensioni sono inferiori al potere risolutivo può essere visto lo stesso anche se non avremmo alcuna informazione circa la sua forma o dimensione. Dare in questo caso dei limiti non è assolutamente facile perché tutto dipende dal contrasto dell'immagine, dalla sua luminosità, dal rivelatore utilizzato, dallo strumento, dalla forma del dettaglio stesso (ad esempio una lunga e sottilissima linea è meglio rilevabile di un piccolo segmento). Per dare qualche numero, sebbene approssimato, occorre riferirci a delle prove concrete. Esempi classici sono le divisioni negli anelli di Saturno e i piccoli crateri lunari nei pressi del terminatore, dettagli che possiedono il massimo contrasto.

Consideriamo ad esempio gli anelli di Saturno e le due principali divisioni: quella di Cassini e quella di Encke (da non confondere con il minimo di Encke). La prima ha un'ampiezza massima (presso le anse) di 0,68", al di sotto del potere risolutivo di telescopi con diametro inferiore a 170 mm; eppure è facilmente visibile e fotografabile anche attraverso uno strumento di 60mm di

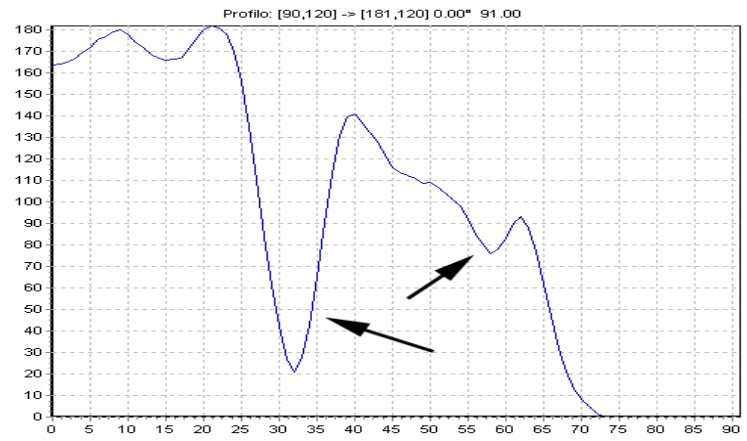
diametro. La divisione di Encke fornisce una prova ancora più impressionante, essendo ampia alle anse degli anelli solamente 325 Km, cioè 0,005" (alla distanza media di Saturno), al di sotto del potere risolutivo di qualsiasi strumento, anche dei grandi telescopi professionali. Eppure questa sottile divisione è relativamente facile da riprendere anche con strumenti minori di 200mm. Un altro esempio si ha sulla Luna, all'interno della Vallis Alpes, una frattura tra la catena montuosa delle Alpi, all'interno della quale si trova un'altra piccola e lunga frattura larga circa 300 metri, cioè 0,17", facilmente fotografabile con telescopi da 20 cm. Come si spiega la presenza di questi dettagli, le cui dimensioni sono al di sotto del potere risolutivo? La risposta è relativamente semplice:

- 1) come già accennato la loro visibilità non è in relazione diretta con il potere risolutivo come è stato in precedenza definito, poiché esso si riferisce alla possibilità di separare due dettagli (o risolvere la forma di uno).
- 2) analogamente a quanto succede per la visione delle stelle è assolutamente possibile vedere certi piccoli dettagli che però si presentano sotto "mentite spoglie" rivelando la loro presenza attraverso la comparsa di una figura di diffrazione che cela completamente informazioni in merito alla loro reale dimensione e forma.
- 3) Un ruolo importantissimo nelle riprese digitali è svolto dal contrasto delle immagini, dalla dinamica del sensore e dal campionamento utilizzato.

Continuiamo a considerare ancora la divisione di Encke negli anelli di Saturno perché la sua analisi ci permette di stabilire qualche altro punto fermo. Abbiamo già dimostrato il punto 1). Per avere la conferma di quanto affermato al punto 2), basta analizzare un'immagine della divisione e capire che in effetti la sua estensione angolare non è quella reale (0,005") ma è modellata dalla diffrazione: analogamente all'immagine puntiforme di una stella, anche tale divisione mostra una macchia di diffrazione, dalla forma diversa poiché una delle due dimensioni è risolta.

Nella pratica

La realtà è, come sempre, ben più complicata del già non facile caso ideale; nelle situazioni reali dobbiamo fronteggiare altre variabili tra cui la collimazione (vedi 5.4) e la qualità ottica (già discussa) e la famosa e temibile turbolenza atmosferica definita in inglese seeing. In realtà, per chi utilizza telescopi di 20 o più cm dal suolo italiano, la gran parte delle sessioni di ripresa saranno limitate proprio dalla turbolenza atmosferica piuttosto che dalla risoluzione teorica dello strumento, a prescindere da tutte le altre variabili. E' comunque indubbio che in occasione di quelle rare serate (una ventina l'anno di media) con turbolenza minima, lo strumento di ripresa debba essere assolutamente perfetto, con ottiche collimate e stabilizzate termicamente (questo significa porre il telescopio fuori almeno 1-2 ore prima di effettuare le osservazioni). Fortunatamente, grazie alla tecnica webcam che consente di riprendere un grande numero di immagini con esposizioni di frazioni di secondo, è possibile raggiungere i limiti strumentali effettuando un'attenta scelta, nella successiva fase di elaborazione, delle immagini non rovinate dalla turbolenza. Nonostante questo comunque, non tutte le immagini a volte riescono; in queste pagine avete avuto una carrellata solo delle migliori, quasi tutte ottenute limitando al massimo l'effetto deleterio della turbolenza, ma per un'immagine buona ce ne sono altre, spesso molte, completamente rovinate; sta nella bravura (e nella fortuna) dell'astrofilo capire, cogliere e riuscire a sfruttare i momenti di calma atmosferica (spesso della durata di pochi minuti) per immortalare un'immagine al massimo delle potenzialità ottiche dello strumento. Solo in queste particolari (e rare) occasioni, i limiti appena visti nei casi ideali possono essere presi come esempio.



Le immagini delle divisioni negli anelli di Saturno sono in realtà frutto della diffrazione. Grazie all'elevato contrasto il nostro telescopio mostra il dettaglio ma non ci consente di dire nulla sulle reali dimensioni, che sono modellate completamente dalla diffrazione. La dimostrazione si ha nel profilo di luminosità (a destra): la divisione di Cassini e quella di Encke hanno la tipica forma gaussiana (invertita) di una figura di diffrazione, non un andamento netto come ci si aspetterebbe da delle divisioni nette.