

2° CORSO DI DIDATTICA DELLA  
RADIOASTRONOMIA

MATERIALE PRELIMINARE DEL CORSO

1° PARTE

## 2° CORSO DI DIDATTICA DELLA RADIOASTRONOMIA

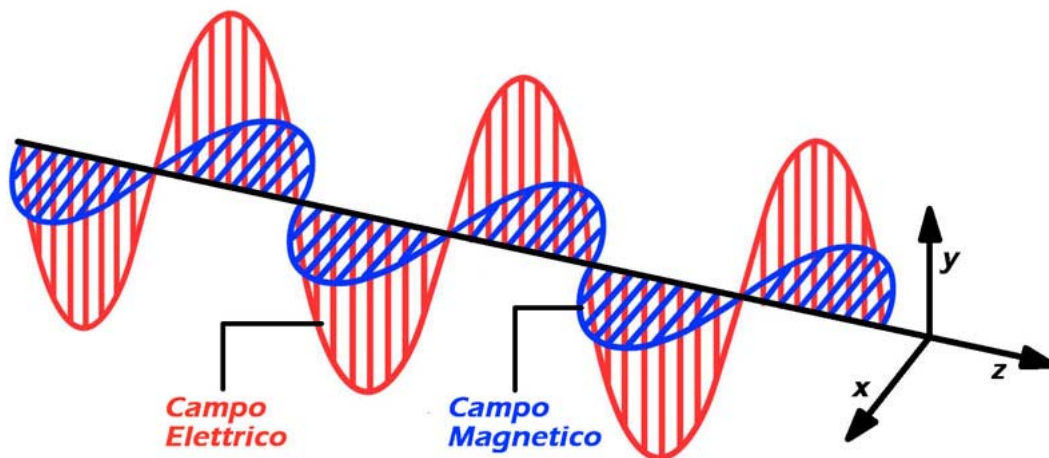
### MATERIALE PRELIMINARE: RIEPILOGO DEI CONCETTI DI BASE

## 1 Onde elettromagnetiche

Un'onda elettromagnetica è un'oscillazione del campo elettrico e del campo magnetico che si propaga nello spazio trasportando energia. Un campo, in fisica, rappresenta la distribuzione di una determinata grandezza: il campo elettrico, ad esempio, rappresenta l'influenza su una carica elettrica mediante la forza di attrazione elettrostatica. Un elettrone, in una regione di spazio dove il campo elettrico è uniforme, subirà sempre la medesima forza. Se il campo non è uniforme, invece, la forza di attrazione varierà da punto a punto. Si genera un'onda elettromagnetica quando il campo elettrico ed il campo magnetico variano periodicamente.

I parametri che identificano un'onda elettromagnetica sono l'**ampiezza** dell'oscillazione, la sua **frequenza** (ovvero il numero di oscillazioni nell'unità di tempo) e la **lunghezza d'onda** (la distanza che intercorre tra due massimi o due minimi dell'oscillazione).

Se un'onda si propaga in una determinata direzione, supponiamo la direzione z in un sistema di riferimento cartesiano, l'oscillazione avviene nelle direzioni perpendicolari.



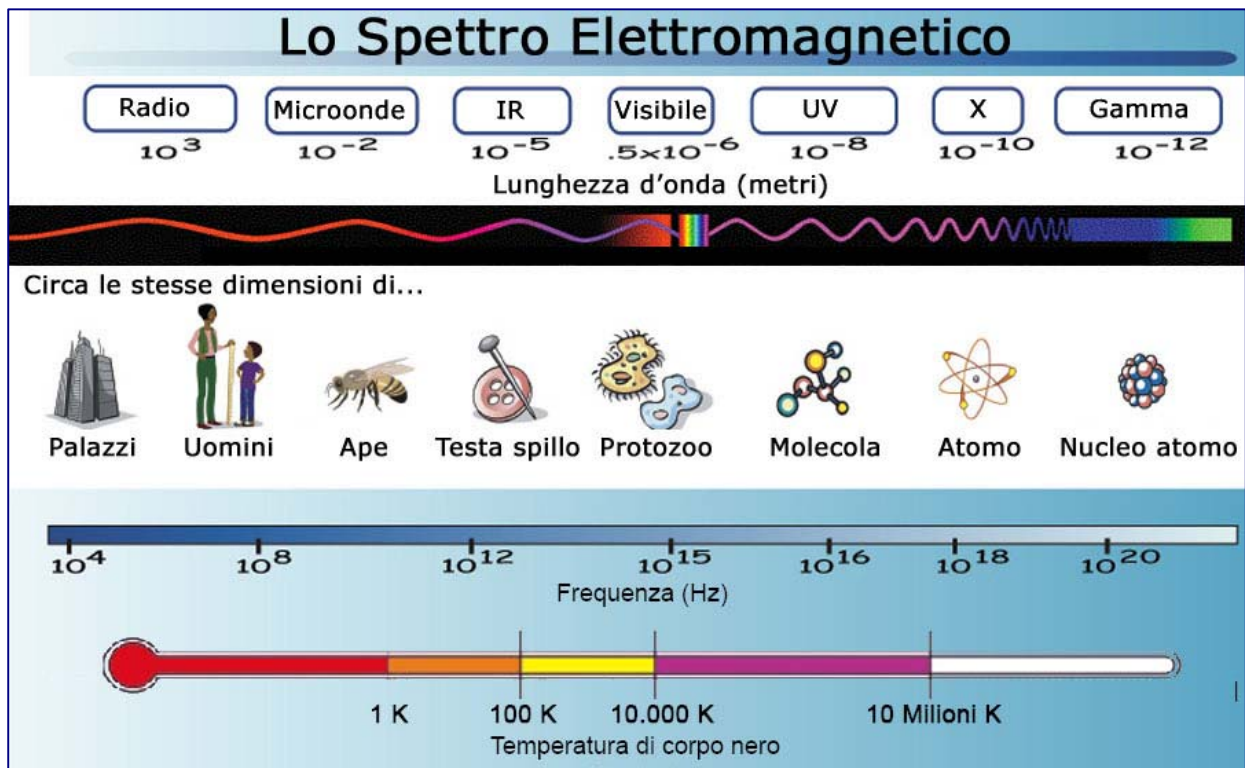
In un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto, vale la seguente relazione:

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

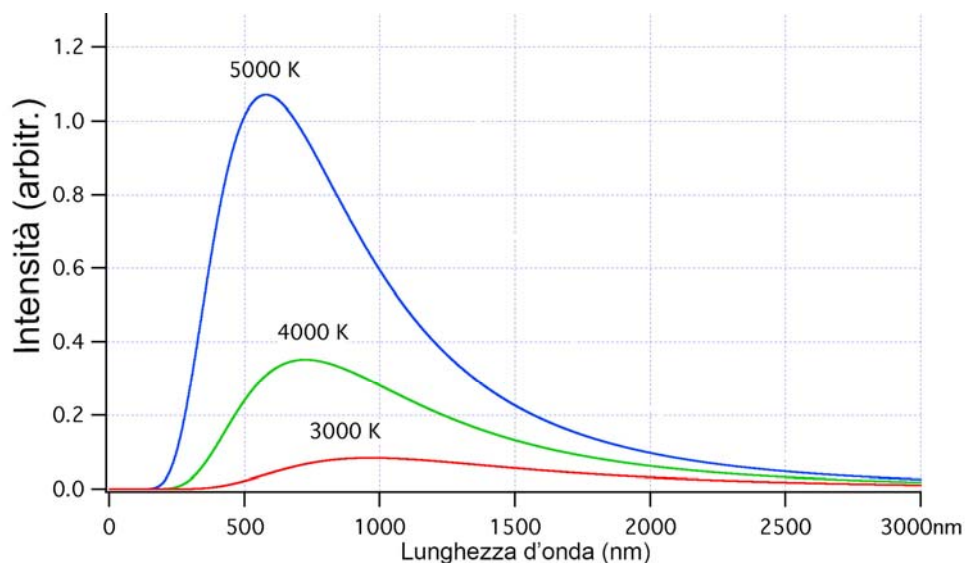
dove  $c$  è la velocità della luce,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda e  $\nu$  è la frequenza.

Nella banda radio le lunghezze d'onda vanno da centinaia di metri a pochi millimetri, le rispettive frequenze variano dalle decine di Hertz a oltre 100 GHz.

Si usa catalogare le onde elettromagnetiche in **bande**, suddividendo il cosiddetto spettro **elettromagnetico** in sezioni:



Per comprendere il significato della fascia inferiore della figura va introdotto anche il concetto di **corpo nero**: si tratta di un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente. Rappresenta uno stato in cui materia e radiazione sono in equilibrio. Le sue proprietà ne fanno una ideale sorgente di radiazione termica: un corpo nero riemette la stessa quantità di radiazione che assorbe, “spalmandola” in modo caratteristico su tutte le frequenze. La curva di radiazione caratteristica del corpo nero prende il nome di planckiana:



Ogni curva del grafico è relativa a un corpo nero di temperatura diversa, l'equazione generale è nota come **legge di Planck**:

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

dove

$I$  = brillantezza spettrale in  $J s^{-1} m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$  (energia per unità di tempo, unità di superficie, unità di angolo solido e unità di lunghezza d'onda)

$h = 6,62 \times 10^{-34} J s$  costante di Planck

$c = 2,998 \times 10^8 m s^{-1}$  velocità della luce nel vuoto

$\lambda$  = lunghezza d'onda in m

$k = 1,38 \times 10^{-23} J K^{-1}$  costante di Boltzmann

$T$  = temperatura in K

Per temperature molto alte o lunghe  $\lambda$ , il termine nell'esponenziale diventa molto piccolo e il denominatore si riduce a  $hc/\lambda kT$ , e si ottiene la **legge di Rayleigh-Jeans**, che vale appunto limitatamente alla sezione dello spettro elettromagnetico di bassa frequenza:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

Si nota come il picco della curva aumenti in intensità e venga raggiunto a lunghezze d'onda inferiori man mano che la temperatura aumenta. La **legge di Wien** mostra appunto in modo molto semplice che esiste una relazione di proporzionalità inversa tra la lunghezza d'onda del massimo della planckiana e la temperatura del corpo nero:

$$\lambda_{max} = \frac{0,2898 K \cdot cm}{T} \quad \text{dove } \lambda_{max} \text{ è espressa in centimetri e } T \text{ in K}$$

Questa legge si può applicare anche al corpo umano che, in virtù della propria temperatura, emette principalmente radiazione infrarossa.

Considerando infatti che la pelle umana ha una temperatura esterna di  $32 \text{ }^\circ\text{C} = 305 \text{ K}$  circa, il picco della radiazione cadrà alla lunghezza d'onda di:

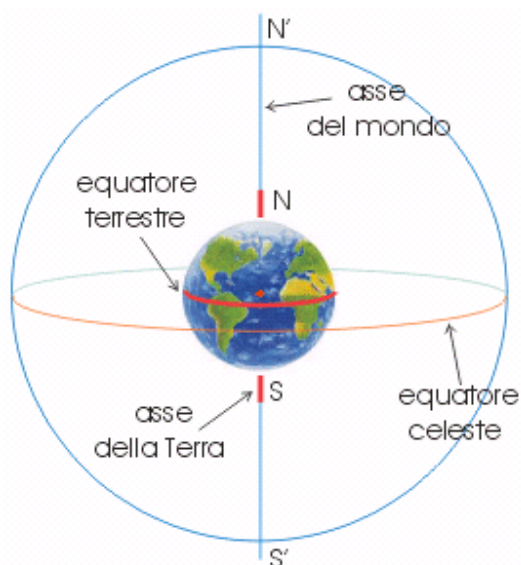
$$\lambda_{max} = \frac{0,2898 K \cdot cm}{305 K} = \frac{2,898 \cdot 10^6 K \cdot nm}{305 K} = 9500 \text{ nm}$$

L'equivalente espressione in frequenza è:

$$\frac{h\nu_{max}}{kT} = 2,821 \quad \text{da cui } \nu_{max} = 1,8 \times 10^{13} \text{ Hz}$$

## 2 Sistemi di coordinate celesti.

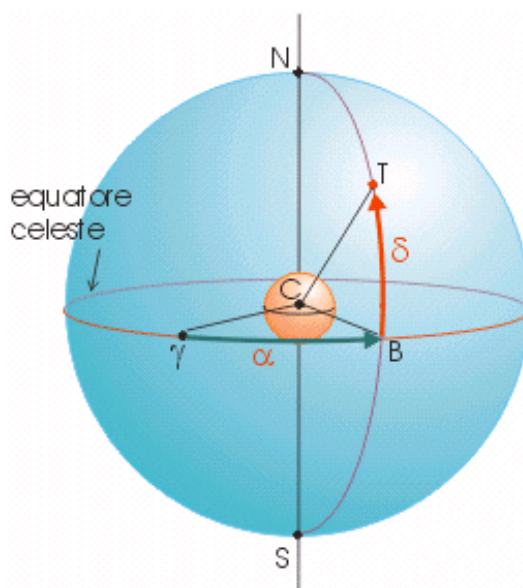
Adattato da [www.vialattea.net](http://www.vialattea.net)



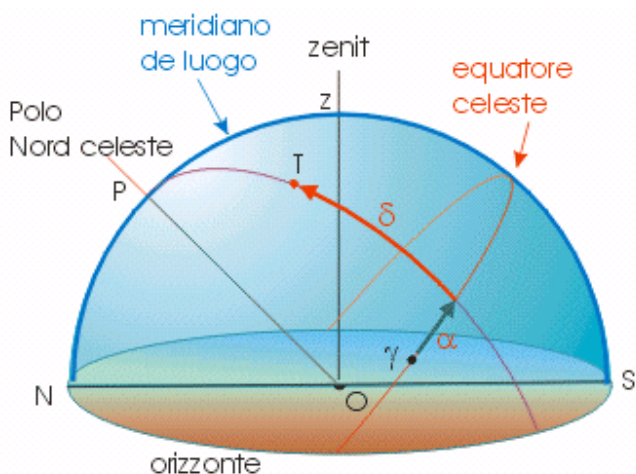
Gli astri, che ci appaiono “appesi” ad una immaginaria sfera celeste, sembrano ruotare da EST a OVEST attorno a due punti fissi, chiamati polo nord celeste (N') e polo sud celeste (S'), che sono le proiezioni dei poli terrestri su questa sfera ideale. Si chiama asse del mondo la retta che congiunge i due poli celesti. Chiaramente, il moto apparente del cielo dipende dal movimento di rotazione della Terra da OVEST verso EST attorno all'asse terrestre. Il piano perpendicolare all'asse terrestre interseca la superficie della Terra determinando un cerchio massimo chiamato equatore terrestre. Se estendiamo il piano dell'equatore fino ad incontrare la sfera celeste, su di essa si determina un cerchio massimo detto equatore celeste. L'asse del mondo e l'equatore celeste rappresentano la direzione e il piano fondamentali per il sistema di *coordinate equatoriali*.

Nel sistema equatoriale i cerchi ausiliari che passano per i poli celesti si chiamano cerchi orari o **meridiani celesti**. I cerchi minori, paralleli all'equatore, si chiamano paralleli celesti. Ogni punto sulla sfera celeste è univocamente identificato da una coppia di coordinate equatoriali: l'**ascensione retta** e la **declinazione**.

**ASCENSIONE RETTA** (AR o  $\alpha$ ): è l'ascissa sferica del sistema equatoriale. L'origine è il punto gamma ( $\gamma$ ), che è l'intersezione tra l'equatore celeste e l'eclittica (il piano dell'orbita terrestre). L'ascensione retta si misura di solito in ore, minuti e secondi, lungo l'equatore celeste, partendo dal punto gamma e con senso di percorrenza antiorario. Nel nostro disegno corrisponde all'angolo  $\gamma CB$  dove C è il centro della Terra e B l'intersezione del cerchio orario che passa per T con l'equatore celeste.



**DECLINAZIONE** (Dec o  $\delta$ ): è l'ordinata sferica di questo sistema. Rappresenta la distanza angolare tra un punto della sfera celeste e l'equatore, misurata lungo il cerchio orario che passa per tale punto. Si misura in gradi e frazioni di grado con segno positivo verso il polo nord celeste e negativo verso il polo sud. Nel nostro primo disegno la declinazione del punto T corrisponde all'angolo TCB.



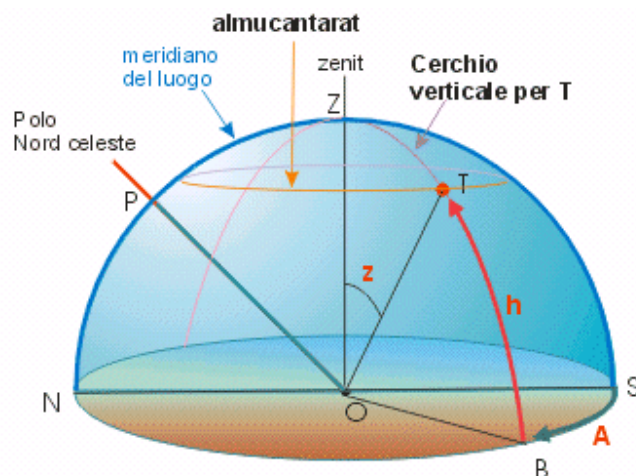
Nell'immagine a fianco è riprodotta la volta celeste sovrastante un osservatore O. L'intero sistema di riferimento equatoriale (equatore celeste, asse del mondo, punto gamma) partecipa alla rotazione diurna della sfera celeste, cioè è solidale con essa, e quindi l'ascensione retta e la declinazione di un astro sono costanti al trascorrere delle ore. Solo su tempi scala lunghi il fenomeno della precessione-nutazione, spostando l'asse del mondo e quindi l'equatore celeste, ruota la "griglia" del sistema equatoriale rispetto alle stelle, che di conseguenza cambiano coordinate.

Nell'immagine vediamo comparire i riferimenti locali solidali con l'osservatore, che non ruotano

con la volta celeste: l'orizzonte, lo zenit (il punto verticale sull'osservatore) e il **meridiano locale**, che congiunge i punti cardinali Nord e Sud passando proprio per lo zenit.

Il **sistema orizzontale** (chiamato anche altazimutale o azimutale) è un sistema di coordinate astronomiche in cui si sceglie come direzione fondamentale la verticale alla superficie terrestre passante per l'osservatore (OZ). I due poli sono quindi lo zenit e il nadir. Il piano fondamentale è il piano dell'orizzonte astronomico. I cerchi ausiliari sono chiamati cerchi di altezza o cerchi verticali.

**AZIMUT (A)**: è l'ascissa sferica di un punto sulla sfera celeste. L'azimut del punto T è l'angolo formato dal piano del cerchio verticale passante per T e il meridiano astronomico. Si misura in gradi e frazioni di grado partendo dal punto cardinale sud nel senso delle lancette dell'orologio. Esso corrisponde, nel disegno, all'angolo SOB dove O è l'osservatore e B è l'intersezione dell'orizzonte con il cerchio verticale passante per T. In realtà è sempre più diffusa la convenzione, ereditata dall'astronomia nautica, di contare l'azimut partendo dal punto cardinale nord, in senso orario, da 0° a 360°, ed è questa la convenzione in uso anche a Medicina.



**ALTEZZA o ELEVAZIONE (h)**: è l'ordinata sferica di un punto sulla sfera celeste e cioè la sua distanza angolare dall'orizzonte misurata lungo il cerchio verticale passante per quel punto. Si esprime in gradi e frazioni di grado con valore positivo verso lo zenit e negativo verso il nadir. Nel nostro disegno, l'altezza del punto T corrisponde all'angolo TOB dove O è l'osservatore e B è l'intersezione dell'orizzonte con il cerchio verticale passante per T.

L'arco complementare dell'altezza si chiama distanza zenitale e nel nostro disegno è rappresentata dall'angolo ZOT dove Z è lo zenit dell'osservatore.



La distanza zenitale si indica generalmente con  $z$ . Risulta quindi:

$$z = 90^\circ - h$$

I punti sulla sfera celeste che hanno uguale altezza formano un cerchio minore detto almucantarato. Nel sistema azimutale entrambe le coordinate (**azimut** ed **elevazione**) delle stelle variano sensibilmente con il passare del tempo a causa del moto di rotazione della Terra.

### 2.1.1 Cenni preliminari sul puntamento dell'antenna

La parabola di Medicina si muove in modo altazimutale: il suo puntamento avviene, a livello della montatura, specificando azimut ed elevazione della sorgente. Questo significa che le coordinate devono essere continuamente aggiornate per mantenere l'oggetto puntato, seguendo il suo moto apparente da est verso ovest. Questo prende il nome di **moto siderale**.

Se l'oggetto dispone di un moto proprio, cioè si sposta rispetto alle "stelle fisse", o meglio rispetto alla volta celeste la quale si muove di semplice moto siderale, la sua traiettoria deve essere appositamente calcolata. È il caso ad esempio della Luna, che in 24 ore si sposta verso est di circa  $13^\circ$ .

Il sistema di pilotaggio dell'antenna, denominato **Field System** (FS), è predisposto per puntare ed inseguire in modo automatico il moto di una sorgente siderale, di cui si specificano le coordinate celesti, nonché la Luna e i pianeti del Sistema Solare.

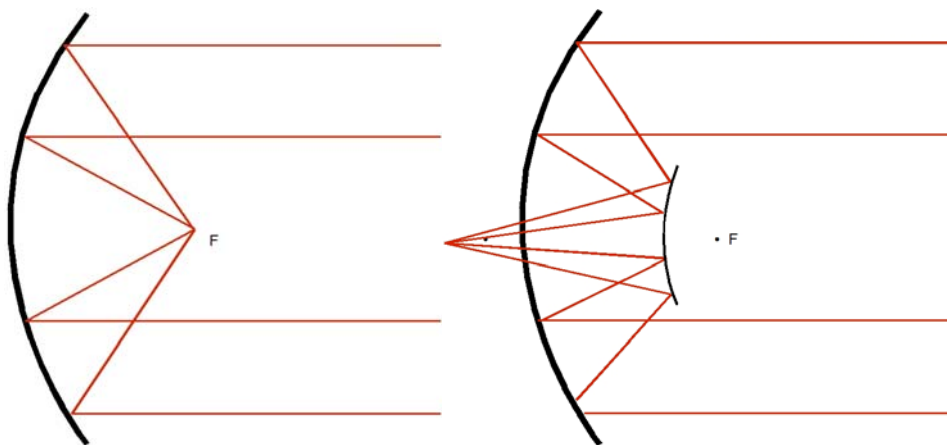
Per eseguire una **mappa** estesa, l'antenna deve spostarsi con una data velocità, impostata dall'utente, operando una "scansione" sull'area di cielo desiderata. Dunque, questa modalità osservativa non è un "inquadramento fisso" di un punto del cielo o di un oggetto celeste, ma corrisponde a una traiettoria opportunamente accelerata allo scopo di "scorrere" sulla sorgente.

### 3 Nozioni di base sul radiotelescopio

#### 3.1 Struttura del radiotelescopio: la parabola.

Un radiotelescopio intercetta la radiazione elettromagnetica e la converte in segnali elettrici misurabili. E' composto da due parti, l'ottica e la catena di rilevazione del segnale.

Lo specchio principale, di forma parabolica, intercetta la radiazione e la riflette nel fuoco principale, dove possono essere collocati i ricevitori, o, in alternativa, un secondo specchio (specchio secondario o subriflettore) che a sua volta convoglia il segnale nel fuoco secondario (Cassegrain o gregoriano).



**Schema ottico del radiotelescopio. Nella configurazione di sinistra la radiazione viene convogliata nel fuoco primario. A destra, la configurazione Cassegrain.**

Nella parabola di Medicina, dal diametro di 32 metri, lo specchio principale è costituito da pannelli di alluminio che coprono l'intera superficie. Il profilo della superficie deve essere quanto più possibile vicino alla forma teorica (una parabola perfetta), quantitativamente la deviazione media ( $\sigma_s$ ) della superficie reale da quella teorica deve soddisfare la seguente relazione:

$$\sigma_s < \frac{\lambda}{10}$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione incidente. Ad esempio, alla frequenza di 22 GHz, la lunghezza d'onda della radiazione è 1.3 cm pertanto la superficie degli specchi può deviare dalla superficie teorica entro 1.3 mm, senza perdite di efficienza. A 408 MHz, la frequenza operativa della Croce del Nord, la lunghezza d'onda è circa 73 cm, pertanto gli "errori" della superficie devono essere compresi entro 7 cm.

Non tutta la radiazione che giunge al radiotelescopio viene rivelata, vari fattori contribuiscono a far sì che solo una frazione di essa venga convertita in segnale misurabile: errori di superficie, di allineamento dei pannelli, le deformazioni dello specchio, le attenuazioni date dalla catena rivelatrice sono solo alcuni dei fattori che rendono l'efficienza della parabola di Medicina inferiore al 61%.



L'efficienza d'antenna si indica con  $\eta$  e ci permette di dedurre dall'area geometrica ( $A_g$ ), funzione del diametro  $D$ , l'area efficace ( $A_e$ ) di raccolta del segnale:

$$A_g = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2$$

$$A_e = \eta \cdot A_g$$

La radiazione, convogliata nel fuoco opportuno, viene convertita in segnali elettrici dall'illuminatore (*feed* o *horn*). Dopo una prima amplificazione, il segnale viene miscelato con quello proveniente da un oscillatore locale; in uscita dal *mixer* si ha quindi, come risultato, il segnale proveniente dall'antenna abbassato di frequenza. Dopo essere stato filtrato ed ulteriormente amplificato, il segnale giunge ad un rivelatore a legge quadratica, che offre una risposta in tensione direttamente proporzionale alla potenza del segnale in ingresso.

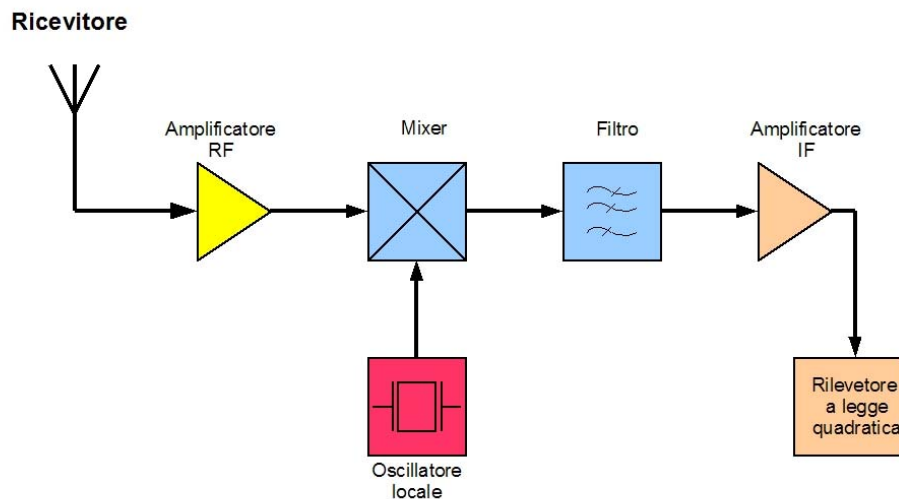
Elementi chiave di questo schema di ricevitore, chiamato "ricevitore a supereterodina" sono appunto l'oscillatore locale ed il mixer, che permettono di abbassare la frequenza del segnale.

Il segnale proveniente dall'oscillatore locale può essere sintonizzato, variandone la frequenza.

Se la frequenza del segnale che proviene dal cielo è  $\nu_{RF}$  in radiofrequenza e la frequenza dell'oscillatore locale è  $\nu_{OL}$ , allora la frequenza in uscita dal *mixer* (frequenza intermedia  $\nu_{IF}$ ) è data da:

$$\nu_{IF} = \nu_{RF} - \nu_{OL}$$

Agendo sull'oscillatore locale è possibile avere lo stesso valore di frequenza intermedia per ogni ricevitore. In questo modo, la parte finale della catena di ricezione del segnale è la stessa per tutti i ricevitori.



### 3.2 Il fascio d'antenna (beam)

La risposta dell'antenna all'onda radio incidente non avviene solo nella direzione del puntamento.

Il **diagramma d'antenna** (*antenna pattern*) visualizza graficamente la sensibilità dello strumento al variare dell'angolo di posizione rispetto all'asse ottico, e corrisponde alla figura di diffrazione dell'antenna.

Il fascio d'antenna principale (*main beam*) è orientato lungo l'asse ottico, e corrisponde per così dire al “campo inquadrato” dal radiotelescopio. Tutti gli altri fasci devono essere minimizzati, perché qualsiasi segnale da essi raccolto rappresenta un disturbo all'osservazione.

Come ampiezza del beam si prende un valore detto “ampiezza a metà altezza” (**FWHM** da Full Width Half Maximum), che è funzione delle dimensioni dell'antenna e della lunghezza d'onda osservata:

$$\Delta\theta_{FWHM} (\text{radianti}) = k \frac{\lambda}{D}$$

dove  $k$  è una costante che dipende dallo strumento (per il nostro ricevitore a 8 GHz vale 1,18).

Dunque, osservando alla frequenza di 8 GHz, ovvero con  $\lambda = 3,6$  cm, il nostro beam avrà una ampiezza di 0,00133 radianti, pari a circa 4,8 primi d'arco.

Il diametro lunare medio è pari a circa 30 primi d'arco, oltre 6 volte le dimensioni del nostro beam: dovremo quindi muovere l'antenna e operare una sequenza di acquisizioni per mappare la Luna in tutta la sua estensione.

