

# APPUNTI PER LA PREPARAZIONE AL LABORATORIO DI INTERFEROMETRIA

Versione 2.0 – 26 Giugno 2016

## **Introduzione**

In questa esperienza si farà uso dell'interferometro didattico a due antenne per acquisire dati e analizzarli al fine di ricavare alcune grandezze caratteristiche dell'interferometro, come ad esempio il suo potere risolutivo e la sua sensibilità.

### **Prerequisiti**

- conoscenza del grafico di una funzione (trigonometrica);
- competenze di misura diretta di quantità sul grafico di una funzione;
- competenze nell'utilizzo di formule (e loro inversione) e nella conversione tra unità di misura;
- conoscenza del concetto di "transito" di una sorgente celeste per effetto della rotazione terrestre;
- conoscenza del concetto di onda ed in particolare di onda elettromagnetica.

### **Obiettivi**

- Comprendere il funzionamento di un'osservazione radioastronomica.
- Comprendere il concetto di correlazione del segnale radioastronomico.
- Fare un'analisi qualitativa del segnale ricevuto: rumore, interferenze, ecc.
- Calcolare la sensibilità dello strumento, con riferimento a dati astronomici d'archivio.

## **IL RADIOTELESCOPIO**

Il tipo più semplice di radiotelescopio è composto da un'antenna e da un ricevitore. L'antenna può essere di vari tipi: dipolo semplice, Yagi, ecc. Il **dipolo**, realizzato con un conduttore elettrico, è in grado di trasformare le onde elettromagnetiche ricevute in corrente elettrica *misurabile* e *amplificabile*. Ponendo quindi una resistenza ai capi di un dipolo immerso in un campo elettromagnetico, si genera una corrente elettrica. Il vantaggio della conversione, già all'interno dell'antenna del radiotelescopio (e di una qualunque antenna per le telecomunicazioni) dell'onda elettromagnetica in un segnale elettrico consiste nel fatto che siamo in grado di amplificare una corrente elettrica, mentre possiamo solo deviare, riflettere, schermare o filtrare un'onda elettromagnetica, senza però aumentarne l'intensità.

In genere un'antenna per la ricezione di onde radio deboli (come l'antenna di un radiotelescopio) è costituita da uno **specchio** a forma di paraboloide che ha il compito di raccogliere tutta l'energia trasportata dalle onde e di rifletterla nel fuoco, dove è situato un dipolo che trasforma questa radiazione in corrente elettrica.

I segnali raccolti sono inviati, attraverso linee di trasmissione, a un ricevitore-amplificatore e passano da qui a un supporto che li registra e li archivia.

Importanti caratteristiche di un qualunque strumento di osservazione, e quindi anche di un radiotelescopio, sono:

**Sensibilità** = capacità di rivelare segnali deboli. Aumenta con la superficie di

raccolta, cioè proporzionalmente a  $D^2$  (diametro dello specchio al quadrato).

**Potere risolutivo** = capacità di distinguere due oggetti vicini o i dettagli di una sorgente osservata. Il potere risolutivo (o *risoluzione angolare*) che un telescopio può ottenere è determinato dal suo limite di diffrazione (proporzionale al suo diametro).

Per i telescopi radio e per quelli ottici il potere risolutivo  $\Delta\theta$  è definito come:

$$\Delta\theta \approx \lambda/D \text{ radianti}$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda alla quale si sta osservando e  $D$  è il diametro dello specchio.

In altre parole,  $\Delta\theta$  è la distanza angolare minima che possono avere due oggetti (o dettagli di una sorgente) per poterli osservare distintamente; al di sotto di questa distanza angolare gli oggetti non sono separabili. Per migliorare il potere risolutivo, ovvero diminuire il valore di  $\Delta\theta$ , ci sono due modi:

- 1) osservare a lunghezze d'onda più corte ( $\lambda \ll$ );
- 2) oppure aumentare il diametro dello strumento ( $D \gg$ ).

Per quanto riguarda la prima ipotesi, volendo rimanere nella banda radio dello spettro elettromagnetico, si è vincolati a lunghezze d'onda che non possono essere più corte di circa 1 mm.

Rimane da analizzare il secondo punto: più grande è il diametro del telescopio, migliore è la sua risoluzione. Ma anche con telescopi piuttosto grandi, come il radiotelescopio di Parkes (64 metri di diametro), osservando alla lunghezza d'onda di 21 cm si ottiene una risoluzione di 690 arcosecondi, 1/3 delle dimensioni della Luna in cielo. Le strutture più piccole di questa dimensione appaiono indistinte.



*Il radiotelescopio di Parkes, in Australia.*

Costruire telescopi più grandi comporta problemi di tipo strutturale. Il telescopio di Arecibo, che è il più grande del mondo (305 metri), è stato costruito all'interno di una dolina in una regione carsica di Porto Rico e non può muoversi per puntare in regioni diverse del cielo. Osserva solamente la parte di cielo che gli transita sopra. [Questo telescopio è stato utilizzato durante i film *Contact* e *Golden eye* (della saga di *James Bond*)]. Questa è una forte limitazione, ma un'antenna altrettanto grande ma orientabile per osservare punti diversi del cielo subirebbe, a causa del suo stesso peso, deformazioni strutturali causate dalla forza di gravità che ne altererebbero la

forma, rendendola inutilizzabile per osservazioni precise o addirittura portandola al punto di rottura. Attualmente, i radiotelescopi singoli completamente orientabili più grandi al mondo hanno un diametro massimo di circa 100 metri (ad esempio Green Bank, Stati Uniti, ed Effelsberg, Germania).



*L'antenna singola più grande del mondo, ad Arecibo, in Porto Rico.*

Bisogna infine tener conto del fatto che il costo di costruzione di un telescopio è proporzionale a più del quadrato del suo diametro (un telescopio con diametro doppio costerà quindi almeno quattro volte tanto).

Un miglioramento del potere risolutivo, senza ricorrere alla soluzione impraticabile dell'aumento del diametro dei paraboloidi, si ottiene applicando il principio dell'interferometro.

## **INTERFERENZA, DIFFRAZIONE E INTERFEROMETRIA**

### **Interferenza**

Il fenomeno dell'interferenza è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più [onde](#). Quello che si osserva è che l'intensità dell'onda risultante in quel punto può essere diversa rispetto alla somma delle intensità associate a ogni singola onda di partenza.

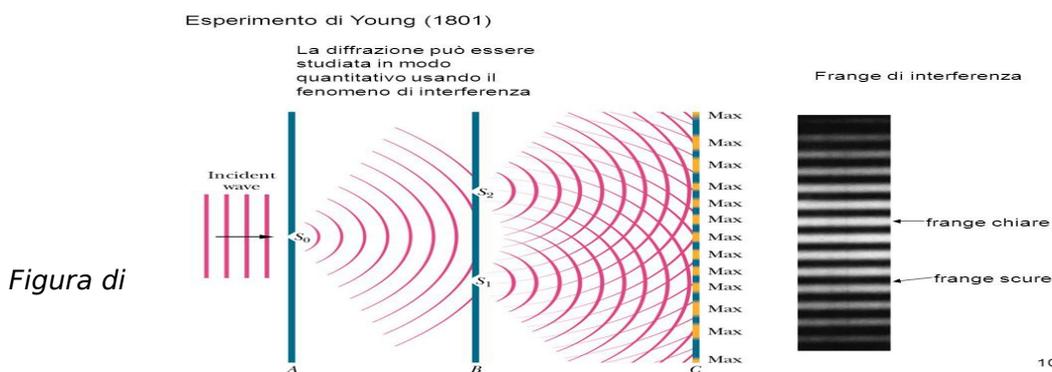
Due onde generate da sorgenti a [frequenza](#) differente non danno luogo ad interferenza, perché oscillazioni con periodo diverso sono disaccoppiate.

Consideriamo allora il caso di due onde che si sovrappongono con la medesima [lunghezza d'onda](#). L'intensità può variare tra un minimo, in corrispondenza del quale non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, e un massimo coincidente con la somma delle intensità. Si dice che l'interferenza è *costruttiva* quando l'intensità risultante è maggiore rispetto a quella di ogni singola intensità originaria, e *distruttiva* in caso contrario. I casi estremi sono due: nel primo le onde sono in concordanza di fase, cioè al massimo di un'onda corrisponde il massimo dell'altra, e si ottiene un'onda di ampiezza pari alla somma delle singole ampiezze, mentre nel secondo sono in opposizione di fase, cioè al massimo di un'onda corrisponde il minimo dell'altra, e dunque si elidono

esattamente. Si potranno osservare regioni in cui l'interferenza è totalmente costruttiva (dette massimi di interferenza, corrispondenti a frange luminose chiare) alternate ad altre in cui l'interferenza è totalmente distruttiva (dette minimi di interferenza, corrispondenti a frange scure non illuminate).

La larghezza di queste frange è legata sia alla disposizione geometrica delle sorgenti sia alla lunghezza d'onda; si capisce abbastanza facilmente che, tanto più piccola è la lunghezza d'onda, tanto più strette e ravvicinate saranno le frange. Questo è uno dei motivi per il quale non si riescono a osservare quotidianamente fenomeni di interferenza luminosa, ma non è il solo. L'altro è legato alla *decoerenza* delle sorgenti. Infatti, le più comuni fonti di luce (il [sole](#), le [lampadine ad incandescenza](#) e così via) emettono svariati pacchetti di radiazioni che si sovrappongono in maniera completamente casuale, a seconda dell'istante al quale vengono generate. In una situazione del genere quindi, la distribuzione delle frange varierà così rapidamente da non poter essere seguita dall'occhio umano (a causa del fenomeno di persistenza delle immagini sulla [retina](#)). Si osserverà quindi solo una distribuzione regolare di luminosità.

L'unico modo per osservare l'interferenza è disporre di due o più sorgenti coerenti (cioè sorgenti che emettono onde della stessa frequenza e che mantengono la differenza di fase costante); l'esperimento di Young da doppia fenditura ne è l'esempio più semplice. Su un piano sono state praticate due fenditure, che si comportano come sorgenti puntiformi di luce *coerente*, se di dimensioni sufficientemente piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Le onde sferiche emesse dalle fenditure interferiscono: su uno schermo a grande distanza dalle fenditure osserveremo una serie alternata di bande illuminate e scure, dette *frange di interferenza*, corrispondenti ai massimi e ai minimi di interferenza. Tutte le frange hanno la stessa larghezza e i massimi hanno tutti la stessa luminosità.



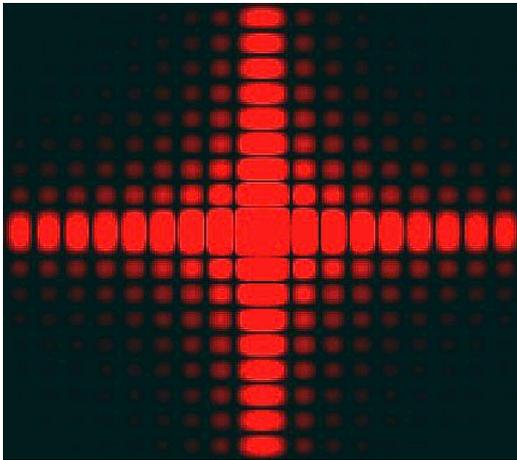
*interferenza (frange chiare alternate a frange scure) ottenuta da due fenditure che hanno dimensioni molto inferiori alla lunghezza d'onda della luce emessa dalla sorgente (esperimento di Young).*

## **Diffrazione**

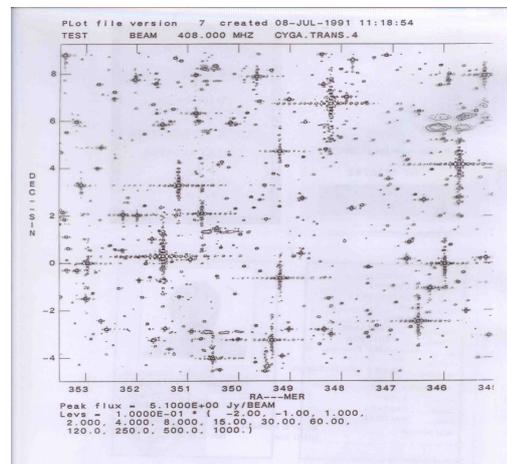
La diffrazione è il fenomeno [fisico](#) associato alla deviazione delle onde dalla

propagazione rettilinea quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino. È tipica di ogni genere di onda, come il [suono](#), le onde sulla superficie dell'[acqua](#) o le [onde elettromagnetiche](#) come la [luce](#) o le [onde radio](#). Gli effetti di diffrazione sono rilevanti quando la [lunghezza d'onda](#) delle onde incidenti è comparabile con la dimensione dell'ostacolo. In particolare per la [luce visibile](#) (lunghezza d'onda attorno a 0,5  $\mu\text{m}$ ) si hanno fenomeni di diffrazione quando essa interagisce con oggetti di dimensione sub-[millimetrica](#).

Se l'ostacolo è costituito da uno piano con un'apertura di dimensione piccola ma non puntiforme si ottiene una figura di diffrazione: frange scure si alternano a frange chiare, la cui luminosità decresce spostandosi dal centro.



*Diffrazione di un raggio laser attraverso una fenditura di forma quadrata.*

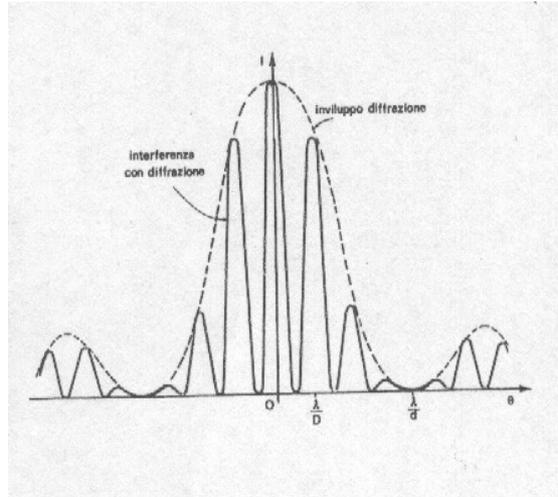


*Diffrazione prodotta dalle onde radio provenienti da sorgenti celesti osservate dal radiotelescopio Croce del Nord*

Se consideriamo più fenditure equispaziate e tutte della stessa larghezza otteniamo un reticolo di diffrazione.

### **Interferenza + Diffrazione**

Prendiamo un piano sul quale sono praticate due o più fenditure di piccole dimensioni se confrontate con la lunghezza d'onda dell'onda incidente ma non tali da poter essere considerate puntiformi. Se un'onda monocromatica incide sulle fenditure possiamo ottenere, su di uno schermo posto a grande distanza, una figura che mostra frange chiare e scure della stessa larghezza (come nell'interferenza) ma la cui intensità è modulata dalla diffrazione.



*Frange di interferenza la cui intensità è modulata dalla diffrazione*

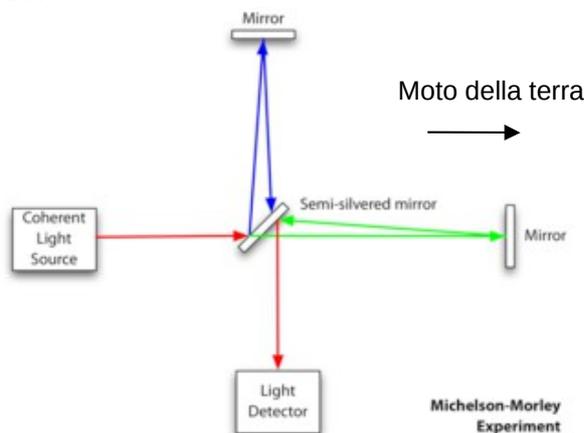
### **Interferometria**

L'interferometria, come suggerisce il nome, si basa sul principio dell'interferenza.

Il primo interferometro fu costruito da A. Michelson, per il suo esperimento sull'esistenza dell'etere, in collaborazione con il suo collega E. Morley. L'esperimento fu cruciale perché diede la prima evidenza sperimentale in favore della Relatività Ristretta, mostrando l'indipendenza della velocità della luce dal moto terrestre. A detta però del suo ideatore, che voleva fortemente trovare una prova dell'esistenza dell'etere, su cui si basava tutta la teoria sulla natura ondulatoria della luce, fu un completo fallimento. Così ne parla proprio Michelson:

*"L'esperimento è per me storicamente interessante perché è stato per risolvere questo problema che l'interferometro fu ideato. Penso che si ammetterà che il problema in questione, avendo portato all'invenzione dell'interferometro, ha più che compensato il fatto che questo esperimento particolare abbia dato un risultato negativo."*

Gli elementi basilari di un interferometro come quello di Michelson sono: una sorgente di luce monocromatica, di solito un laser, un ricevitore, due specchi più uno semitrasparente.



*L'interferometro di Michelson e Morley.*

La luce emessa dalla sorgente, una volta raggiunto lo specchio semitrasparente, segue due percorsi diversi: parte è riflessa dallo specchio, raggiunge lo specchio in alto, per essere poi riflessa e raggiungere il ricevitore; parte invece attraversa lo specchio semitrasparente, raggiunge lo specchio in fondo al percorso (a destra nella figura) e poi ritorna allo specchio semitrasparente, da cui viene mandata al ricevitore.

Se questi due percorsi differiscono di un numero intero di lunghezze d'onda, si ha interferenza costruttiva e quindi il segnale arriva forte al rivelatore. Se invece differiscono per metà di un intero (ad esempio 0.5, 1.5, 2.5 ...) si avrà interferenza distruttiva e il segnale rivelato sarà debole.

### **L'interferometria in Radioastronomia**

In radioastronomia, l'interferometria è utilizzata per aumentare il *potere risolutivo* dello strumento, mettendo in correlazione tra loro diversi radiotelescopi, che operano come le fenditure di un reticolo di diffrazione. Si riescono così a realizzare strumenti di dimensioni maggiori, che vanno da qualche km con il J-VLA (Very Large Array) a dimensioni prossime al diametro terrestre con il VLBA (Very Long Baseline Array).

In questo caso infatti il parametro  $D$  nella formula del potere risolutivo:

$\Delta\theta \approx \lambda/D$  non è più il diametro della singola antenna ma è la *distanza* tra due antenne, perciò più le antenne sono distanti, migliore sarà il potere risolutivo.

Lo scopo dell'interferometria astronomica è quindi quello di compiere osservazioni ad alta risoluzione utilizzando telescopi relativamente piccoli posti anche a grande distanza tra loro, invece che un singolo enorme telescopio di impossibile realizzazione.



La rete di telescopi European VLBI Network (EVN)

L'osservazione interferometrica permette quindi di raggiungere, costruendo

telescopi piccoli e molto lontani, la risoluzione di uno strumento con diametro pari alla massima distanza tra le antenne.

L'interferometro però non ha le stesse prestazioni di una singola antenna di queste dimensioni, perché non ha la sua stessa *sensibilità*. La sensibilità di un telescopio è infatti proporzionale all'area di raccolta dello strumento (quindi al quadrato del suo diametro). Un telescopio con diametro due volte maggiore potrà osservare, a parità di condizioni, oggetti astronomici quattro volte più deboli. Utilizzando molti telescopi piccoli, l'area di raccolta sarà data dalla somma delle superfici delle singole antenne e quindi la sensibilità dello strumento sarà tanto migliore quanto più grande è l'area delle singole antenne, indipendentemente dalla loro distanza.

L'unità fondamentale dell'interferometria astronomica è costituita da una coppia di telescopi (o antenne, nel caso radioastronomico). Ogni coppia di antenne costituisce un interferometro e la distanza tra le antenne è chiamata linea di base (*baseline*). La correlazione dei segnali acquisiti dall'interferometro può essere effettuata attraverso la somma algebrica o il prodotto dei segnali ricevuti dalle due antenne. Si parla quindi di interferometro *a somma* e *a prodotto* (o *correlazione*).

In genere l'interferometro a prodotto è preferibile a quello a somma: ciò accade perché, mentre l'interferometro a somma misura tutta la potenza di segnale disponibile (quindi segnale + rumore), l'interferometro a prodotto misura solo il *segnale coerente* (cioè quei segnali che mantengono una differenza di fase costante nel tempo). L'interferometro a prodotto elimina cioè il rumore di natura incoerente dovuto ai ricevitori e all'effetto dell'atmosfera e anche parte delle interferenze causate dall'uomo (ripetitori radio e TV, telefonini, reti wireless, ecc.).

L'interferometro didattico usato in questa esercitazione è composto da due antenne di tipo Yagi, ed effettua osservazioni alla lunghezza d'onda  $\lambda = 23$  cm, equivalente a una frequenza  $\nu = 1296$  MegaHertz (lunghezza d'onda e frequenza di un'onda elettromagnetica sono legate tramite la velocità della luce  $c$  dalla formula:  $\lambda = c / \nu$ ).

I segnali delle due antenne vengono correlati in tempo reale e il loro prodotto e la loro somma sono mostrati su un display grafico, assieme al segnale ottenuto da una singola antenna.

**Per saperne di più:**

<http://www.scienzagiovane.unibo.it/finestra-radio/>

## **Glossario dei termini utili**

**ANTENNA** Un dispositivo in grado di trasformare le onde elettromagnetiche in corrente elettrica misurabile e amplificabile. Il tipo di antenna più semplice è un *dipolo*. Mettendo una resistenza ai capi di un dipolo immerso in un campo elettromagnetico, si genera una corrente elettrica.

**ANTENNA YAGI** Si compone di un certo numero di dipoli (da 2 a 20 o più), tra loro paralleli, di lunghezza  $\lambda/2$ , assemblati su un supporto lineare.

**SEGNALE** Emissione “utile” che si intende ricevere e/o studiare con il sistema di acquisizione utilizzato. In un’osservazione astronomica, deve essere chiaramente distinta dal rumore.

**RUMORE** In astronomia, segnale di origine aleatoria, proveniente solitamente dall’interno del sistema ricevente, che si sovrappone a segnale “utile” che si intende ricevere e/o studiare.

**RAPPORTO Segnale/Rumore** spesso abbreviato con la sigla inglese SNR (Signal to Noise Ratio) o **S/N** (anche nell'uso italiano) è una grandezza numerica che mette in relazione la potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore in un qualsiasi sistema di acquisizione, elaborazione o trasmissione dell'informazione. In astronomia, un segnale si considera “sicuro” se supera di almeno 5 volte il rumore.

**SENSIBILITÀ** Capacità di rivelare segnali deboli. Aumenta con la superficie di raccolta del radiotelescopio, cioè proporzionalmente a  $D^2$  ( $D$  = Diametro). Un telescopio con diametro due volte maggiore potrà osservare, a parità di condizioni, oggetti astronomici quattro volte più deboli.

**POTERE RISOLUTIVO (o risolutore)** Capacità di distinguere oggetti vicini ovvero i dettagli di una stessa sorgente. Il potere risolutivo (o *risoluzione angolare*) che un telescopio può ottenere è determinato dal suo limite di diffrazione (proporzionale al suo diametro).

Per i telescopi radio e per quelli ottici il potere risolutivo  $\Delta\theta$  è definito come:

$$\Delta\theta \approx \lambda/D \text{ (rad)}$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d’onda alla quale si sta osservando e  $D$  è il diametro dello specchio del telescopio.

**INTERFERENZA** Fenomeno dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più [onde](#). Quello che si osserva è che l'intensità dell'onda risultante in quel punto può essere diversa rispetto alla somma delle intensità associate a ogni singola onda di partenza. In particolare, essa può variare tra un minimo, in corrispondenza del quale non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, e un massimo coincidente con la somma delle intensità. In generale, si dice che l'interferenza è *costruttiva* quando l'intensità risultante è maggiore rispetto a quella di ogni singola intensità originaria, e *distruttiva* in

caso contrario.

**INTERFEROMETRO** Unità fondamentale dell'interferometria astronomica, costituita da una coppia di telescopi (o antenne, nel caso radioastronomico). Ogni coppia di antenne costituisce un interferometro di base e la distanza tra le antenne è chiamata linea di base (*baseline*). La correlazione dei segnali acquisiti dall'interferometro può essere effettuata attraverso la somma algebrica o il prodotto dei segnali ricevuti dalle due antenne. Si parla quindi di interferometro *a somma* e *a prodotto* (o *correlazione*).

**FRANGE DI INTERFERENZA** In una *figura di interferenza* si osservano zone in cui l'interferenza tra le due sorgenti (o tra i segnali ricevuti da due antenne), è totalmente costruttiva (frange chiare, nel caso della luce, corrispondenti a massimi di interferenza) alternate ad altre in cui invece l'interferenza è totalmente distruttiva (frange non illuminate, scure, dette minimi di interferenza). Nel caso di interferenza tra onde radio ricevute da due antenne, le frange di interferenza si presentano come massimi e minimi di intensità, alternati.

**CORRELAZIONE** (definizione intuitiva) Combinazione dei segnali ricevuti dalle antenne dell'interferometro, a due a due. La correlazione si può effettuare attraverso la *somma* dei segnali, o il *prodotto* (è in questo secondo caso che si parla più propriamente di *correlazione*).

**OSSERVAZIONE OTF (On-The-Fly)** Un'osservazione astronomica OTF consiste nel muovere il telescopio (o l'interferometro) in Azimuth con una certa velocità mentre si acquisiscono i dati.

**VOLT** Unità di misura della differenza di potenziale elettrostatico. La differenza di potenziale tra due punti A e B misura il lavoro necessario per portare una carica unitaria dal punto A al punto B. In un'osservazione radioastronomica, è una misura dell'intensità del segnale ricevuto dall'antenna.

**JANSKY** Unità di misura dell'energia proveniente da una sorgente per unità di tempo, di area e di frequenza:  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ .