

ISTITUTO DI RADIOASTRONOMIA DI MEDICINA

INAF - CNR
SperimEstate 2016
Tutor: ing. Germano Bianchi

Laboratorio di Radioastronomia

Umberto Arnone
4DLS - IIS F. Alberghetti
fuoconascente@gmail.com

L'ISTITUTO RADIOASTRONOMICO DI MEDICINA

L'Istituto di radioastronomia è situato nel centro di un appezzamento fuori da Medicina. I suoi due principali strumenti sono la parabola da 32m e la Croce del Nord.

La Croce del Nord è il secondo radiotelescopio di transito per area di raccolta al mondo, la sua costruzione è iniziata nel 1963 ed è stata inaugurata nel 64.



È costituita da due rami perpendicolari: Est-Ovest 564m e Nord-Sud 640m, possedendo quindi un'area di raccolta di 27000 m². La frequenza a cui lavora è quella di 408 MHz, ovvero quella di radiazione del carbonio.

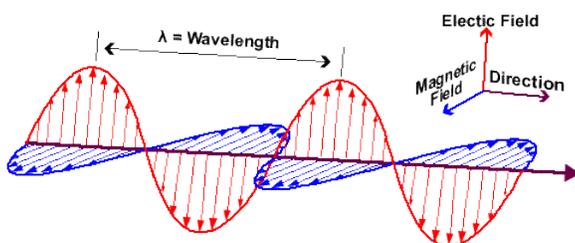
La parabola lavora invece su un campo di frequenze dai 1,4 ai 26,5 GHz può essere usata singolarmente per osservazioni astronomiche o come stazione VLBI (very large baseline interferometer). Oltre che a studi di tipo radioastronomico può compiere misurazioni geodetiche.

LA NATURA DELLA LUCE

La luce visibile è stata per lungo tempo l'unico metodo che l'uomo ha avuto per osservare l'universo. Lo strumento per indagare il cielo era l'occhio. Per colmare le incapacità visive dell'occhio fu inventato il telescopio all'inizio del 1600.

1. Newton era un convinto sostenitore della natura corpuscolare della luce. La teoria corpuscolare era in grado di descrivere fenomeni quali riflessione e rifrazione ma non era in grado di spiegare la diffrazione e l'interferenza della luce.
2. Thomas Young, tramite l'esperimento della doppia fenditura, dimostrò che la luce si comporta come un'onda.
3. Maxwell, con le sue 4 equazioni, descrisse la natura ondulatoria della luce come radiazione elettromagnetica. Tuttavia la sola teoria ondulatoria non era in grado di spiegare completamente la natura della luce.
4. Einstein riunificò le due teorie sostenendo che la luce è contemporaneamente sia radiazione che fotone (Principio di dualità onda-particella).

Le 4 equazioni di Maxwell sono un modello completo delle onde elettromagnetiche. Racchiudono la complessità di tutte le particolarità del campo elettromagnetico. I modelli ci permettono di comprendere meglio i fenomeni. Possiamo manipolare i modelli a nostro piacimento tramite i singoli parametri delle equazioni. Ogni osservazione si studia facendo riferimento ad un modello.



Maxwell sosteneva che le radiazioni elettromagnetiche sono onde trasversali caratterizzate da un'oscillazione simultanea di un campo elettrico e di un campo magnetico.

Quando accelero una particella, per esempio un elettrone, creo un campo elettrico. Il campo elettrico è "C" volte più grande del campo magnetico: $\vec{E} = C \times \vec{B}$

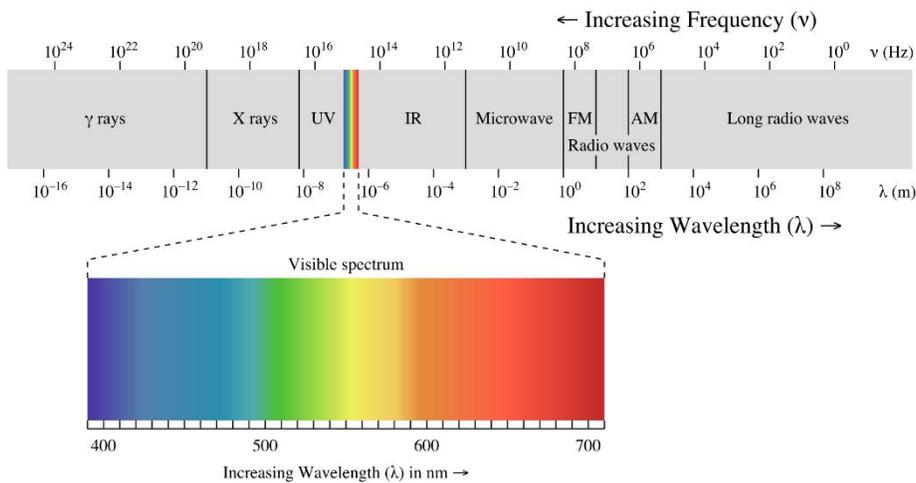
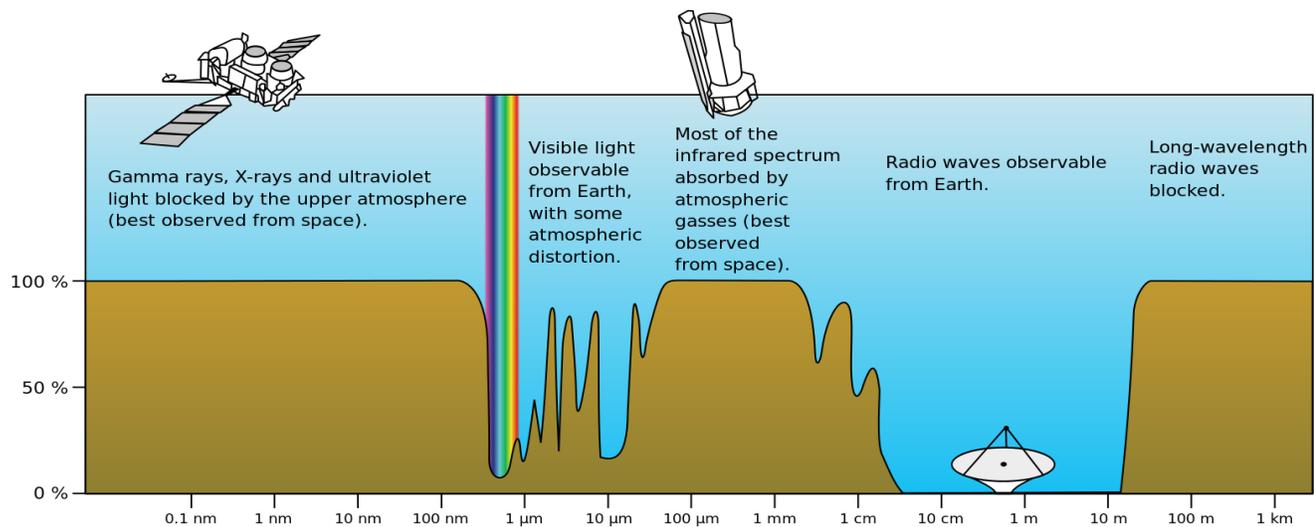


Figura 1: Spettro Elettromagnetico

La luce visibile occupa solo una parte piccolissima dello Spettro elettromagnetico

Gli scienziati si resero conto che sarebbe stato utile osservare lo spettro nella sua interezza. Ma cosa significa osservare? Noi osserviamo qualcosa solo quando la luce emessa o riflessa dall'oggetto arriva al nostro rilevatore.

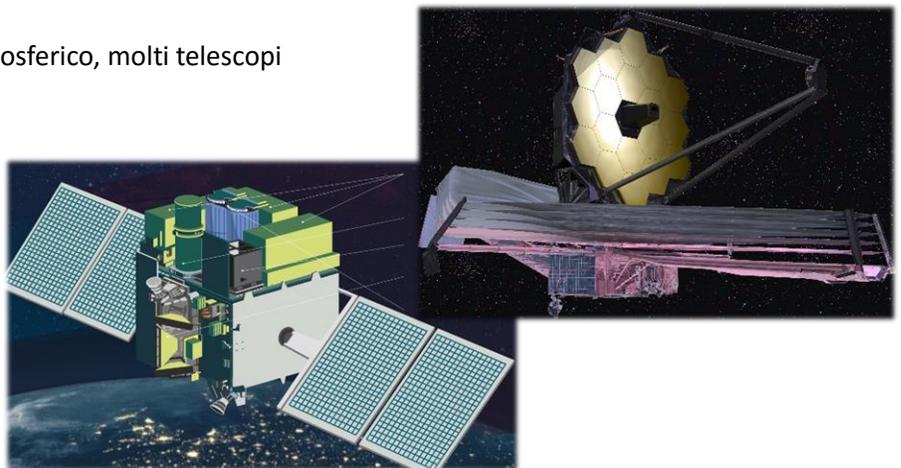
L'atmosfera assorbe gran parte della radiazione elettromagnetica, rendendo impossibile l'osservazione del cielo a certe frequenze. I responsabili principali sono la troposfera e l'umidità. Noi vediamo il cielo blu, perché la luce si diffonde attraverso le molecole d'acqua. La dispersione dei raggi causa una diffusione indiretta della luminosità in tutto il cielo. Se non ci fosse atmosfera, la terra avrebbe un cielo nero tutto il giorno e le stelle sarebbero sempre visibili.



Ci sono bande dello spettro non influenzate dall'assorbimento atmosferico. Le due finestre principali sono nel visibile e nelle onde radio. Nonostante questo, in Cile per superare la leggera dispersione della bassa atmosfera, si è costruito ALMA su un altopiano a 5000 metri di altitudine.

Per ovviare direttamente al problema atmosferico, molti telescopi vengono messi in orbita attorno alla terra:

- Fermi: Gamma
- XMM-Newton: X
- IRIS: Ultravioletti
- HUBBLE: Visibile (UV, IR)
- Kepler: Visibile
- James Webb: Infrarossi
- Planck: Microonde
- Spektr-R: Radio
- Astrosat: Multi

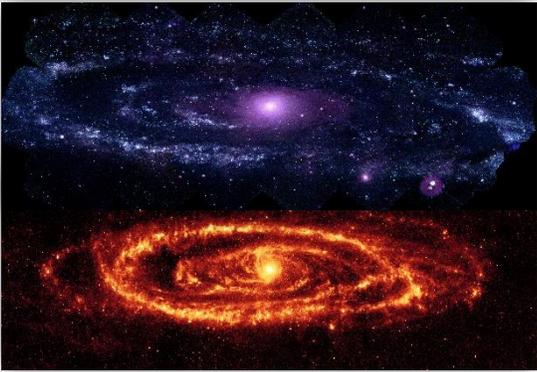


LA TEORIA RADIOASTRONOMICA

La radioastronomia riesce a rilevare solo particelle polari. Le molecole senza momento di dipolo, come l'idrogeno molecolare, non sono rilevabili. Il CO e l'H₂O sono polari e quindi emettono onde elettromagnetiche. Alcune radiazioni hanno viaggiato fino dal momento della prima ricombinazione permettendoci di vedere le prime galassie.

Altre provengono da fenomeni più recenti, rivelandoci la distribuzione della materia nell'universo, le stelle, ecc.

Il modello ondulatorio è quello più utile quando si lavora in campo radio, perché si riceve molta più energia rispetto ai singoli fotoni ricevuti nelle osservazioni a raggi x e gamma.



Osservare il cielo nelle varie frequenze permette di avere informazioni complementari sugli oggetti studiati.

Per esempio:

- Le stelle più giovani emettono negli ultravioletti.
- Il buco nero al centro emette nei raggi x.
- La polvere stellare emette negli infrarossi.
- L'Idrogeno atomico emette nel radio.
- I Gamma Ray Burst emettono nei gamma.
- Nel microonde si osserva la Radiazione Cosmica di Fondo
- Le stelle emettono nel visibile.

Un cielo in onde radio è differente dal cielo che siamo abituati vedere.

Non si vedono le solite stelle, perché la loro emissione nel radio è molto limitata.

Si vedono però bene le supernove e le nubi di formazione stellare perché emettono molto nelle onde radio. Si vedono chiaramente le densissime stelle di neutroni, i quasar, e le pulsar che ruotano migliaia di volte al secondo.

Le polveri, dovute a supernove passate, rivelano estensioni di galassie molto più grandi che nel visibile. Le galassie che emettono di più nel radio sono gli AGN (Nuclei Galattici Attivi). Il nucleo galattico emette quantità immense di energia in banda radio, "abbagliando" il resto della galassia. I buchi neri furono teorizzati per giustificare questo fenomeno.



Emissione e Assorbimento

Un oggetto che emette certe righe dello spettro elettromagnetico è anche in grado anche di assorbirle. Il corpo nero è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla e re-irradia tutta l'energia assorbita. Le stelle rispettano la definizione di corpo nero.

Le emissioni possono essere:

- Continue, cioè una fascia intera di spettro.
- Riga, cioè una striscia sottile corrispondente ad una sola frequenza principale

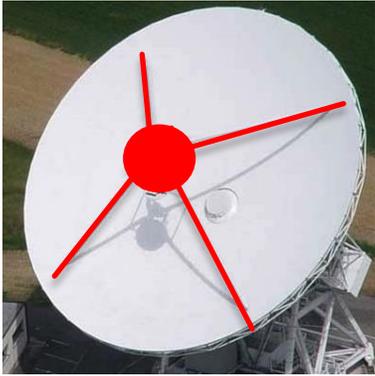
Le emissioni in riga sono le più utili per la radioastronomia, perché permettono di ottenere informazioni su distanza e velocità tramite l'effetto doppler. Le emissioni principali sono:

- L'acqua a 22 GHz.
- Il Carbonio molecolare a 408MHz.
- L'Emissione di riga 21cm dell'idrogeno atomico.

Quando Protone ed elettrone hanno spin parallelo si trovano in uno stato di energia maggiore. Pertanto l'elettrone tende a cambiare il suo stato di spin in antiparallelo. Nel farlo rilascia energia sotto forma di un fotone. Questo avviene per ogni atomo in media ogni 10⁷ anni. La presenza di tanti atomi H permette di vedere la distribuzione totale dell'idrogeno nelle galassie.

Una scienza giovane

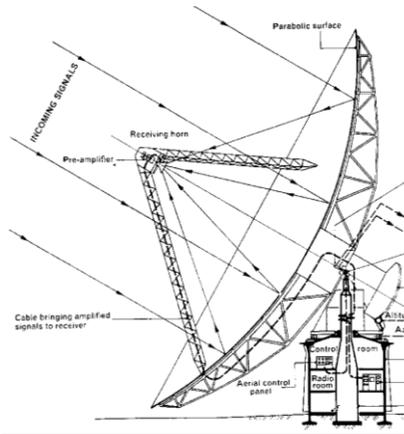
La radioastronomia è nata nel dopoguerra. Nel 1930, Karl Janski, utilizzando alcuni resti militari per l'individuazione radar, costruisce involontariamente il primo radiotelescopio. Gli strumenti principali sono le antenne e le parabole.



Le prestazioni di un radiotelescopio sono influenzate principalmente dal suo diametro:

- Potere Risolutivo: distinguere oggetti vicini $1,22 \lambda/D$
- Sensibilità: rilevare oggetti deboli D^2

Queste formule sono semplificate e valgono in linea generale. In realtà ci sono molti fattori che influenzano l'area di raccolta effettiva. Per esempio l'area coperta dalle strutture di sostegno (in rosso) degli specchi va sottratta per ottenere l'area effettiva di raccolta.



In 50 anni una parabola da 100 metri raccoglie $3 \cdot 10^{-6} J$, una quantità minuscola di energia, perché le sorgenti dello spazio sono lontanissime. Per ricevere segnali così deboli, si costruiscono antenne molto grandi: le parabole. Ogni parabola è costituita da uno specchio primario paraboloidale, che converge tutte le onde nel fuoco. Questo permette l'utilizzo di un ricevitore a singola banda. Per studiare l'universo bisogna poterlo osservare nell'intera gamma dello spettro. Tramite uno specchio secondario si può reindirizzare il flusso su ricevitori secondari che permettono di osservare ulteriori bande dello spettro.

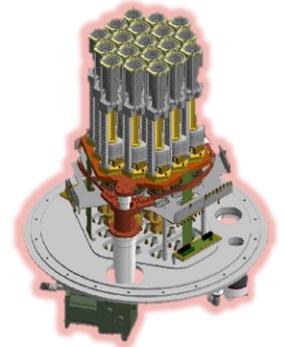
Nella parabola di Medicina è installato un ricevitore a doppio *feed* che lavora da 18 a 26.5 GHz. Il ricevitore è tenuto nel vuoto per diminuire gli scambi termici che inquinerebbero il segnale. Inoltre è raffreddato a 3 kelvin per garantire la linearità dei dati acquisiti.

Altri ricevitori installati coprono 1.4, 1.6, 2.3, 5, 6, 8.3 GHz.

Al momento sono in costruzione:

- ricevitore a doppio *feed* che lavora da 13.5 a 17.5 GHz per la parabola di Medicina
- ricevitore per la parabola in Sardegna da 33 a 50 GHz formato da 19 elementi (destra).

Salendo di frequenza gli elementi del ricevitore devono essere costruiti più piccoli, diminuendo l'area di vista del singolo elemento. Si creano ricevitori con tanti elementi perché mettendone tanti vicini, si riesce a compensare la diminuzione di area del singolo elemento



Più grande si costruisce la parabola maggiore è la risoluzione e sensibilità. Ma ci si scontra presto con limiti fisici e di budget non indifferenti. Ad esempio il costo di una parabola può aumentare del quadruplo ogni volta che raddoppio l'area di raccolta. Questo aumento non lineare è dovuto alle strutture meccaniche che tengono in piedi la parabola e i motori che le permettono di muoversi in azimut ed elevazione.

Una parabola più grande e pesante risente maggiormente della forza di gravità, della temperatura e del vento. I fattori fisici e atmosferici piegano la parabola, facendole perdere la forma paraboloidale perfetta necessaria alle osservazioni. Per questo, le parabole più grandi al mondo sono fisse e costruite in cavità naturali. La parabola di Medicina è dipinta di bianco per diminuire le variazioni termiche del metallo.

La parabola, dopo ogni osservazione, torna alla posizione verticale di standby, che le permette la maggior resistenza alla forza di gravità e la miglior trasparenza al passaggio del vento.

I più grandi radiotelescopi al mondo sono:

- SRT 64m – Sardegna
- Parkes 64m – Australia
- Lovell 76m – Inghilterra
- Effelsberg 100m – Germania
- GBT 101m – Stati Uniti
- Arecibo 300m – Portorico
- FAST 500m – Cina



Per aumentare ulteriormente la risoluzione si sfruttano più antenne distanti fra loro.

Con 2 o più antenne si parla di Interferometria. L'interferometria permette di avere immagini più risolte sacrificando sensibilità e diminuendo la zona di cielo coperta. Il diametro dello strumento virtuale diventa la distanza fra le due antenne. Aumenta la risoluzione, ma la sensibilità di un interferometro è minore rispetto a una parabola delle stesse dimensioni. L'area non è coperta completamente e nella mappa radio ottenuta ci sono punti "vuoti". Per avere abbastanza sensibilità bisogna tracciare l'oggetto per molto tempo. L'interferometria non si limita a due antenne: più ce ne sono, meglio è. Con più antenne si copre un'area più vasta di cielo e si diminuiscono i punti "ciechi" dell'osservazione.

Gli interferometri più importanti sono:

- Croce del Nord – Medicina
- VLA: Very Large Array, 27 parabole da 25m – Stati Uniti
- ALMA: Acatama Large Millimeter Array, 66 parabole da 7-12m – Cile
- SKA: Square Kilometer Array, 130000 antenne e 220 parabole – Africa e Australia

Space Debris

Space Debris è un progetto che si occupa di catalogare tutti gli oggetti in orbita attorno alla terra e tracciarne l'orbita. Il Progetto utilizza 8 antenne della Croce del Nord che hanno recentemente ricevuto un *upgrade*. L'aggiornamento ha migliorato le prestazioni e reso il sistema più veloce.

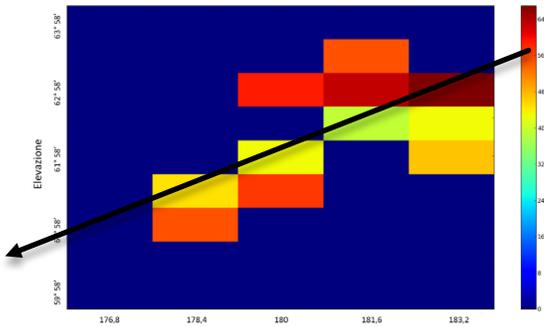
Sono stati individuati oltre 18000 oggetti più grandi di 10 cm e 350 milioni che vanno dal millimetro ad 1 centimetro. Hanno una massa totale di 6500 tonnellate.

Solo 1500, di questi, sono satelliti attivi. I restanti sono satelliti dismessi, razzi, resti da collisioni e esplosioni. Questi oggetti raggiungono velocità altissime e risultano pericolosi per i lanci e future spedizioni spaziali.

Le 2 orbite principali nelle quali si trovano gli oggetti sono:

- LEO: Low Earth orbit – entro i 2000km
Nella LEO gli oggetti viaggiano a circa 20000km/h: in 90 minuti completano un'orbita completa. Se diminuissero la velocità non riuscirebbero a contrastare la forza di gravità.
- GEO: Geostationary Earth Orbit – circa a 36000km
Nella GEO si trovano la maggior parte dei satelliti meteo. I satelliti orbitano a velocità tali da rimanere verticalmente immobili rispetto alla terra, questo permette a loro di fare misurazioni ogni giorno nello stesso punto.

La ricezione dei segnali di questi oggetti è possibile grazie ad un trasmettitore in Calabria. Il trasmettitore punta l'area del cielo che si vuole osservare e genera onde elettromagnetiche. Le onde viaggiano attraverso l'atmosfera alla velocità della luce. Quando interagiscono con un oggetto, le onde vengono bloccate e riflesse. Gli echi di queste riflessioni rendono visibili gli oggetti alle antenne.



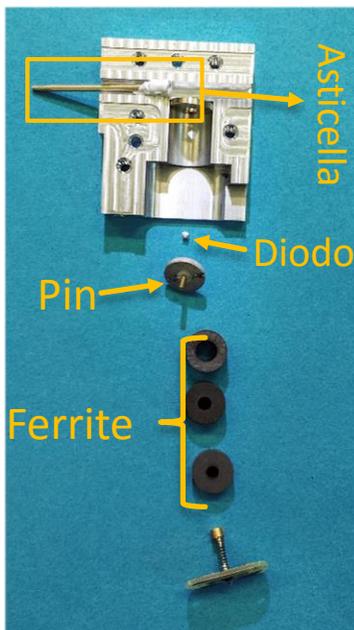
I segnali ricevuti contengono informazioni sul doppler e sulla polarizzazione delle onde e permettono di ricavare: forma, rotazione, e velocità dei singoli oggetti.

L'utilizzo delle singole antenne come "pixel" permette di calcolare la traiettoria degli oggetti tramite interpolazione del segnale.

La Croce del Nord può anche rilevare meteore. Le meteore sono visibili per la ionizzazione dell'aria nel fronte di caduta della meteora. Le particelle ionizzate sono polari e quindi diventano rilevabili nelle onde radio.

LA RICEZIONE

Presso l'area ricerca del CNR di Bologna abbiamo incontrato Sergio Mariotti che ci ha guidato nella costruzione di alcuni generatori di rumore fra i 33 e i 50GHz dello spettro.



La costruzione richiede dai 20 ai 40 minuti il pezzo. Consiste nel posizionare e fissare accuratamente tutti i singoli pezzi all'interno dell'involucro metallico.

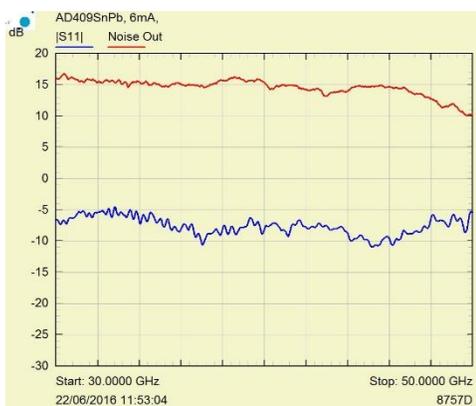
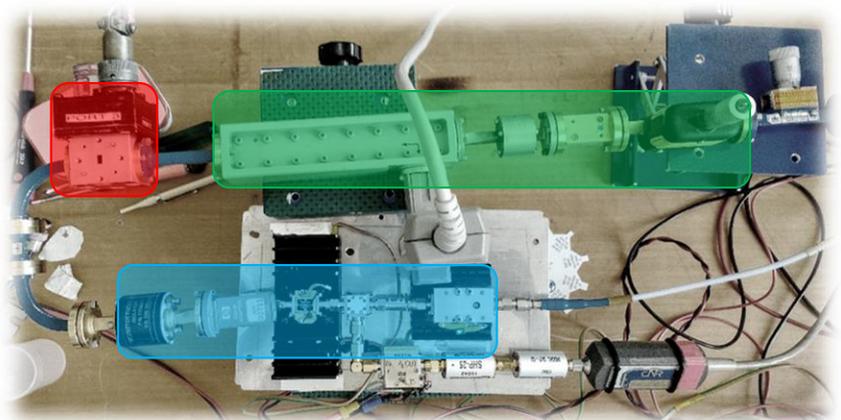
La taratura del generatore avviene collegandolo al frequenzimetro e al riflettometro. La calibrazione avviene massimizzando la potenza del rumore in uscita e la linearità su tutto lo spettro. La distanza teorica, per creare risonanza costruttiva, deve essere pari ad un quarto della lunghezza d'onda. La frequenza su cui si effettua la taratura è quindi quella a metà dello spettro utile: nel nostro caso 43 GHz. Osservando lo spettroscopio si regola la distanza dell'asticella di ottone dal pin fermo. Questa calibrazione fatta a tentativi è supportata dal riflettometro, che misura la quantità di onde riflesse. Lo strumento perfetto avrebbe 0 onde riflesse, il nostro obiettivo è averne il minimo possibile, perché le riflessioni danno interferenza distruttiva al segnale utile. Con il multimetro si controlla che ad ogni voltaggio non ci siano variazioni di linearità del generatore e si trova l'intensità di corrente che rende più stabile lo strumento (6 mA).

Il banco per testare i generatori ha un input unico per le due misurazioni.

In **rosso** l'input.

In **verde** il riflettometro

In **blu** il frequenzimetro



Nei grafici si vedono:
-in **ROSSO** il rumore generato
-in **BLU** le onde riflesse.
Due dei cinque generatori costruiti hanno prestazioni accettabili di linearità e riflessione. Gli altri generatori dovranno essere ulteriormente modificati per essere accettabili.



I generatori costruiti verranno utilizzati per la taratura dei 19 elementi del ricevitore 33-50GHz che sarà installato in Sardegna. Il segnale ricevuto dallo spazio è essenzialmente rumore senza una scala di riferimento. Gli strumenti costruiti funzionano come unità generatrici di rumore a valore noto. Il ricevitore li utilizza come riferimento per dare un valore esatto al segnale ricevuto dallo spazio.

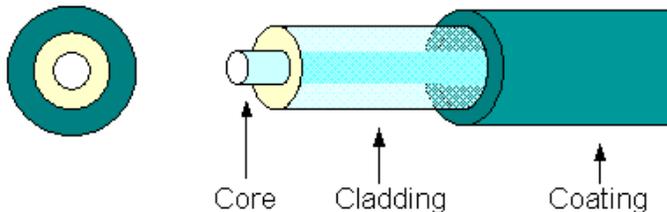
LA TRASMISSIONE

In passato si usavano cavi coassiali nel trasmettere il segnale ricevuto. I cavi coassiali hanno grossi problemi di attenuazione ed interferenza. Devono essere intrecciati assieme perché non interferiscano l'un l'altro. Vengono schermati dall'esterno con fogli coprenti di alluminio. Sono di materiali resistenti al calore e alle piegature, per mantenere la linearità al passaggio delle onde. Nonostante tutte le accortezze si perde circa 1 decibel per metro: troppo per qualsiasi progetto delle dimensioni di SKA. Richiederebbe l'utilizzo di numerosi amplificatori: che degradano il debole segnale radioastronomico e aggiungono costo.

Risulta molto meno costoso e più performante usare la fibra ottica di silicio anche per le minori dimensioni del fascio di cavi e la resistenza alle alte temperature tipiche del deserto. La fibra non risente di interferenze interne od esterne perché i materiali dielettrici, di cui è composta, non interagiscono con le onde elettromagnetiche.

Per questo si è deciso di utilizzare la fibra ottica di silicio che ha un fattore di perdita di 0,5-1dB/km.

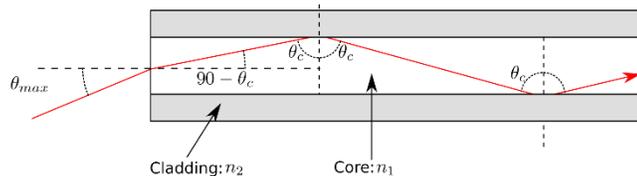
La fibra ottica è formata da *core* e *cladding*.



Il *core* è il materiale di trasmissione.

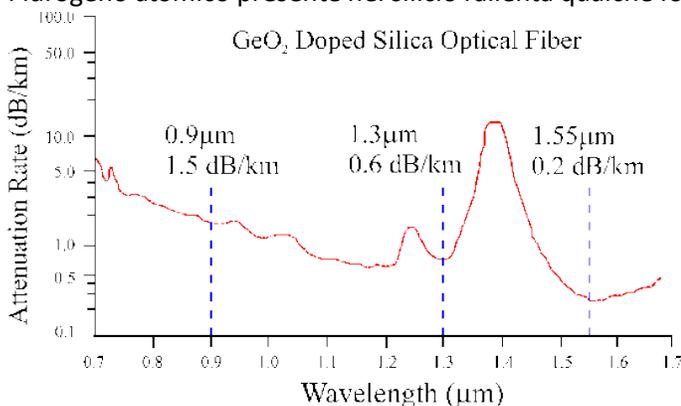
Il *cladding* è il materiale che isola la fibra da introduzione di interferenze e permette la riflessione totale.

Quando la luce passa da un materiale all'altro la sua velocità cambia secondo l'indice di rifrazione del materiale nel quale arriva. L'indice di rifrazione di due materiali permette di calcolare oltre quale angolo di incidenza la luce non riesce più a passare, ma viene riflessa.



Se l'indice di rifrazione dei due materiali è molto differente, la totalità del raggio luminoso viene riflessa, permettendo la trasmissione del segnale per distanze lunghissime senza bisogno di ripetitori.

La velocità interna è il 99% della luce. L'1% di differenza è dovuta alle attenuazioni intrinseche del materiale: l'idrogeno atomico presente nel silicio rallenta qualche fotone.



Ci sono delle lunghezze d'onda dove l'attenuazione è molto bassa. Le finestre dove trasmettere il segnale ottico si trovano a 850, 1310 e 1550 nm. Fra queste la migliore è quella 1550nm.

Per sfruttare meglio una singola fibra ottica, si può:

- Dividersi lo spettro trasmettendo su più lunghezze d'onda contemporaneamente
- Stabilire un ordine nel quale si inviano i segnali e alternandosi, mandare più segnali contemporaneamente.

La fibra è prodotta industrialmente con 2 standard:

- SM: singolo modulo (*core* 9 μm; *cladding* 125μm)
- MM: multi modulo (*core* 50 μm; *cladding* 125μm)

Con fibra MM è possibile trasmettere più segnali nello stesso momento grazie all'aumento di dimensione del *core*. I segnali vengono trasmessi distanziandoli di almeno 20nm. Per esempio, può essere trasmesso a 1270nm e 1330nm.

La vita di un segnale

La trasmissione del segnale avviene modulando la frequenza scelta con il segnale dell'antenna.

Le antenne a bassa frequenza per SKA saranno fatte da due rami perpendicolari. Ognuno raccoglierà un segnale separato. Il segnale elettrico ottenuto da un ramo viene:

1. Amplificato con un LNA (*Low Noise Amplifier*)
2. Convertito in ottico da un laser.
3. Combinato con il segnale ottico dell'altro ramo dal WDM (*Wavelength Division Multiplexer*)
4. Trasferito in una singola fibra
5. Ricevuto dallo *Splitter*
6. Diviso tramite filtri ottici (specchi selettivi) nelle due lunghezze d'onda separate
7. Amplificato e ripulito
8. Convertito in elettrico
9. Convertito in digitale dall'ADC (*Analogic Digital Converter*)
10. Elaborato dai super computer

Il rumore totale del sistema è dovuto al rumore dei singoli elementi. Ma l'importanza data a ciascuno diminuisce quasi esponenzialmente a partire dal primo elemento in cascata.

Possiamo ragionevolmente semplificare che: il rumore totale del sistema amplificato con un LNA è dato dal rumore del LNA stesso. Un LNA ha un guadagno di 30dB per un rumore di 0.82 dB dando quindi un valore di rumore molto basso all'intero sistema.

Ogni pezzo del sistema va costruito, testato, calibrato e spedito dove verrà utilizzato per SKA.

Per testare la scalabilità dell'approccio sono stati costruiti interferometri minori:

- BAD: Bologna Array Demonstrator - 16 antenne
- SAD: Sardinia Array Demonstrator - 128 antenne

Strumenti per l'analisi dei segnali e il test dei componenti:

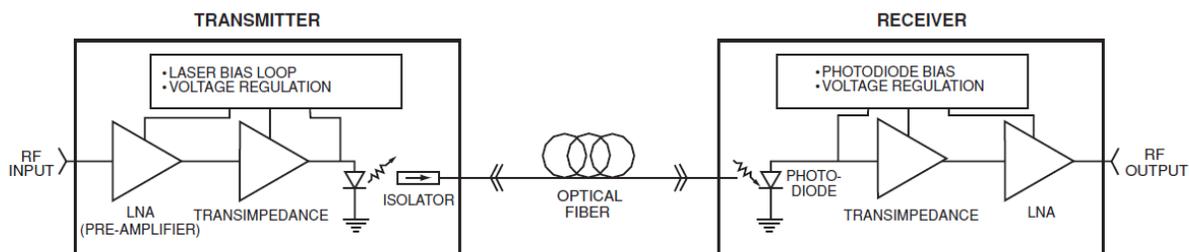
- SNA (Scalar Network Analyzer) misura onda incidente e riflettente
- VNA (Vector Network Analyzer) misura la fase e calcola il rapporto fra onda uscente e riflettente
- Oscilloscopio: variazione del segnale nel tempo
- Spettrometro: variazione del segnale nello spettro

L'ELABORAZIONE

Il segnale RF ottenuto dalle antenne va amplificato molto attentamente.

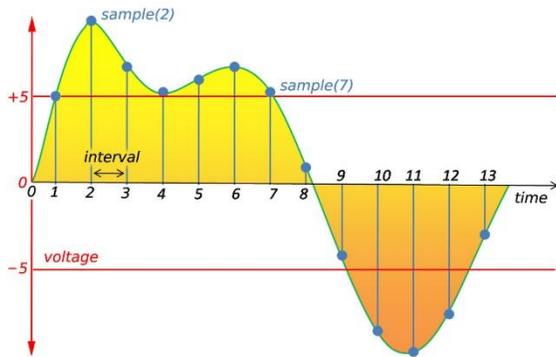
Si abbassano le temperature a circa 3K, per diminuire il rumore elettronico che affogherebbe il segnale spaziale.

Il *Front End* raccoglie il segnale, LNA lo amplifica e i filtri IF (*Intermediate Frequency*) selezionano quanto segnale e rumore tenere dalla misurazione.



Il segnale RF viene trasformato in ottico e passa attraverso fibra ottica. Arriva al foto-rilevatore dove viene riconvertito in segnale elettrico. La conversione avviene in una scheda schermata da una scatola metallica che funziona come gabbia di faraday. Il segnale analogico viene convertito in digitale dall'ADC.

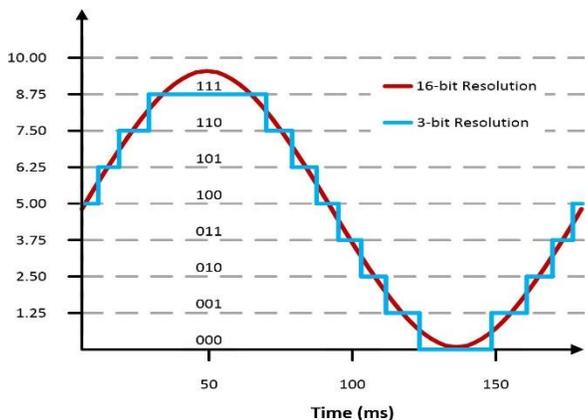
La Conversione si divide in due processi: il Campionamento e la Quantizzazione



Campionamento

Il segnale analogico entra dal coassiale e viene Campionato: le onde analogiche continue vengono misurate ad intervalli regolari. Secondo il teorema di Nyquist, per campionare bene un segnale bisogna campionarlo con una frequenza almeno doppia del segnale entrante.

Se ho un campionatore che lavora ad 1 GHz, campiono bene fino a 500 MHz. Se provo a campionare 600 MHz, mi ritrovo nel fenomeno di *aliasing*. Non ho abbastanza punti per rappresentare bene l'onda e quindi non ricaverò più il segnale originale.



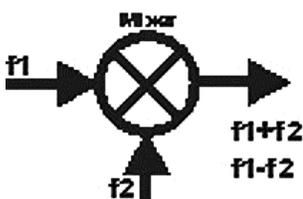
Quantizzazione

All'onda analogica viene assegnato un valore digitale esatto ogni campionamento. La quantizzazione consiste nel trasformare in bit i valori d'onda. In passato il segnale veniva campionato ad approssimazioni successive, questo metodo funzionava molto lentamente.

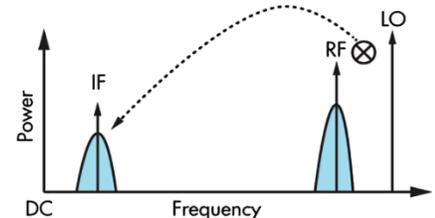
Oggi si lavora con un numero fisso di bit, perché dobbiamo elaborare una quantità molto più grande di dati. Più è alta la frequenza meno tempo ho per quantizzare accuratamente il segnale: devo lavorare con meno bit.

In genere si lavora con ADC a 8 bit.

La parabola ha un ricevitore a 22 GHz, frequenza di salto quantico dell'acqua. I dati ricevuti andrebbero campionati a 44 GHz, un lavoro non facile. Si utilizza quindi un mixer per abbassare la frequenza ad una più facilmente gestibile.



Il mixer ha due entrate e un'uscita, in RF1 entra il segnale astronomico. Si genera frequenza a 21,5 GHz all'entrata2. In uscita avremo un segnale somma $F1+F2=43.5\text{GHz}$, ed un segnale differenza $F1-F2=0.5\text{GHz}$. Filtriamo via il segnale somma, ottenendo un segnale identico a quello ad alta frequenza ma spostato nelle basse frequenze.



Funziona allo stesso modo nella radio FM. I segnali vengono distribuiti sulle frequenze da 88 a 108mhz e poi riportati in frequenza udibile (100-15000Hz). L'altoparlante vibra e produce suono.

Utilizzare l'Oscilloscopio

Si scelgono le dimensioni di scala e lo zoom per rendere visibili 2 o 3 ripetizioni dell'onda.

Tramite i cursori si seleziona il *Trigger*: il punto nel quale l'oscilloscopio scatta l'istantanea dell'onda.

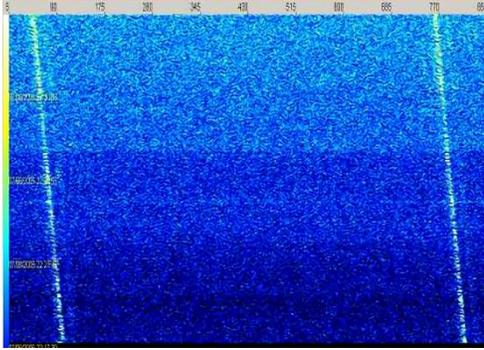
Se il *trigger* non restituisce un'immagine ferma ci troviamo in un caso di *aliasing*.

Dobbiamo campionare più velocemente per visualizzare la forma d'onda reale.

Si può impiegare il trigger per salvare in memoria gli avvenimenti più interessanti: anomalie e punti critici.

Del segnale ci interessa:

- Ampiezza (Differenza minimo-massimo)
- Periodo (Distanza picco-picco) e Frequenza (Periodi per secondo)
- RMS: valore di un segnale equivalente in corrente continua
- Fattore di forma: sinusoidale, quadra, triangolare, rampa, impulso (varia il rapporto fra onda e RMS)
- Fronte di salita e discesa (dal 10 al 90 % dell'ampiezza)



Cercare le Pulsar

1. Separare frequenze e cercare le righe di emissione
2. Cercare periodi ripetuti fra frequenze
3. Usare il periodo per fare integrazione di osservazioni nel tempo
 - A. Se c'è segnale, l'integrazione lo esalta e diminuisce il rumore
 - B. Se non c'è segnale, l'integrazione dimostra l'assenza
4. Compensare lo spostamento verso il rosso e verso il blu delle frequenze (dovuto all'avvicinamento o allontanamento della sorgente)

LE INTERFERENZE

Le frequenze della radioastronomia sono scelte per motivi di grande interesse scientifico. Fra le più importanti ci sono la ricerca dell'acqua, idrogeno e carbonio nell'universo. Per poter osservare il cielo è necessario avere un cielo pulito da interferenze, altrimenti il segnale utile viene affogato nel rumore. La protezione delle bande radio per la radioastronomia è garantita a livello nazionale ed internazionale da diversi enti:

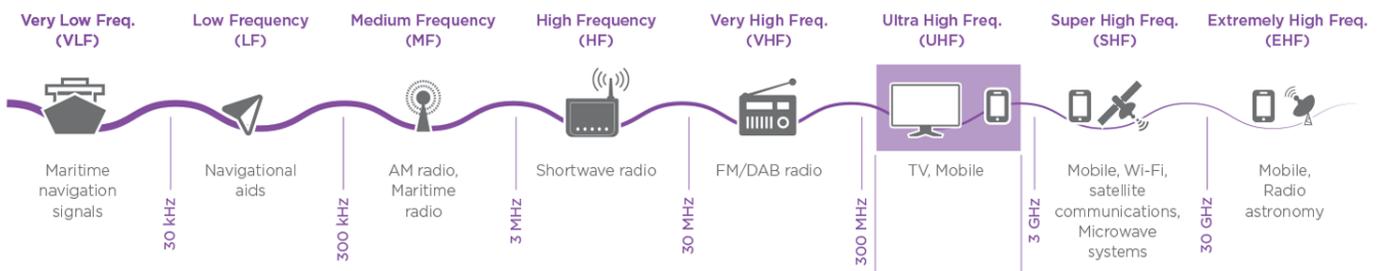
- Ministero dello Sviluppo Economico
- ITU: International Telecommunication Union
- CRAF: Committee on Radio Astronomy Frequency

Gli enti fanno da intermediari nel garantire che queste frequenze non siano utilizzate. Le specifiche di interferenza massime sopportate sono indicate nel documento ITU-R RA.769-2

Protezione nel caso le interferenze eccedano:

- 205 dB per la banda di frequenze
- 220 dB per la singola frequenza
- 211 dB per osservazioni VLBI

Ogni servizio ha una sua banda specifica di trasmissione assegnata dalle leggi nazionali ed internazionali:



Gli apparati quando sono ben tarati e schermati emettono il 90% della loro intensità nel picco centrale. Ma sono molti gli apparati vecchi e abusivi in circolazione a dare problemi. Una radio che trametteva 1W da Torino su 102 MHz creava interferenza a 408 MHz: nella sua 4° armonica. Proprio la frequenza di osservazione della Croce del Nord. La Potenza ricevuta dell'interferenza, $P = -24\text{dBm} + 4\text{dBm}$ (attenuazione cavo coassiale) = -20dBm ovvero 10^{-5} W

La maggior parte delle misurazioni si fanno in Janski. $10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}) = 1 \text{ Janski [JY]}$

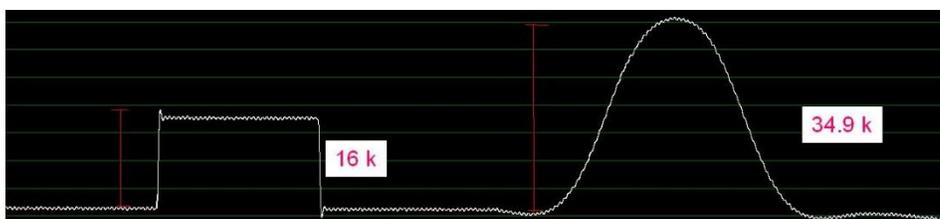
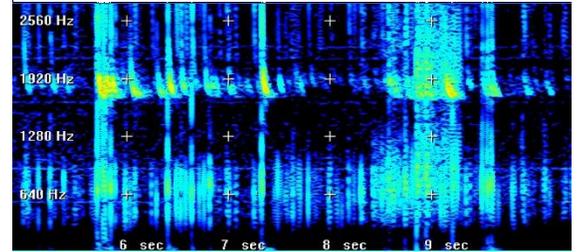


Figura 2: Un segnale digitale e uno analogico a confronto

Localizzazione

L'identificazione e localizzazione delle interferenze avviene tramite la triangolazione. I segnali fissi sono i più semplici da trovare. I segnali sporadici o in movimento sono molto più difficili da localizzare. Spesso si tratta di ponti radio per comunicazioni: sono aperti per la durata della comunicazione e poi spenti. Possono essere scariche nella rete elettrica o vecchi motori a scoppio. Ogni segnale ha una sua impronta nello spettro che lo rende riconoscibile.

Figura 3: Tempesta di fulmini



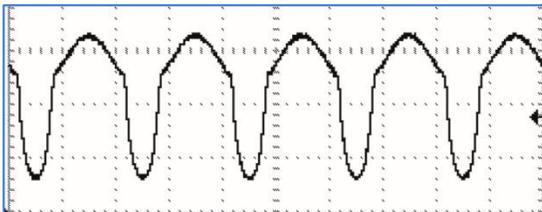
Gli strumenti utilizzati per la ricerca delle interferenze sono la torretta di controllo e il furgone con l'antenna telescopica da 11m. La torretta di controllo possiede una dozzina di antenne con ricevitori diversi per tenere sotto controllo tutte le frequenze. Nel furgone, il ricevitore dell'antenna è posizionato a 45° in modo da raccogliere i segnali polarizzati verticalmente e orizzontalmente.

Dalla stazione si cerca il segnale d'interferenza, e si identifica la direzione dalla quale proviene con maggiore intensità. Ci si sposta con il furgone di qualche chilometro, verso una zona alta e aperta. Si ripete la misurazione e la ricerca dell'interferenza. Si uniscono le due linee di direzione del segnale, trovando così l'area di provenienza. Si va in loco per accertarsi, e si segnala l'interferenza alle autorità competenti.

L'interferenza viene spenta nel giro di qualche settimana.

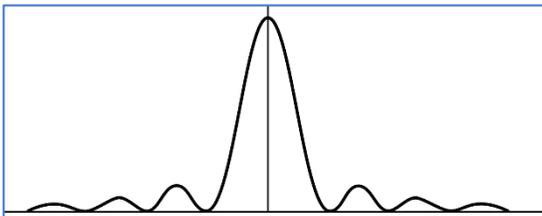


RILEVAZIONE DEL SEGNALE



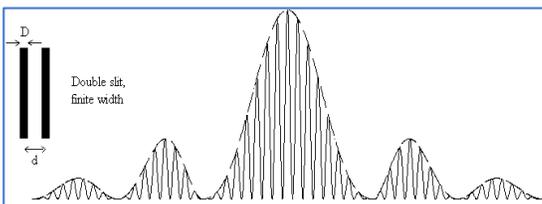
Interferenza

Quando due onde si incontrano, la loro ampiezza si somma. L'interferenza fra le due onde è costante se la distanza fra le sorgenti è molto piccola



Diffrazione

Quando la luce passa da una fenditura di grandezza simile alla sua lunghezza d'onda, crea una figura di distribuzione. Il 90% dell'energia è concentrata nel picco centrale. Il 10% è distribuita su n picchi secondari. Questi picchi sono chiamati armoniche della frequenza principale.



Le figure reali ricevute dalla radioastronomia sono più complesse: si tratta di **Interferenza modulata dalla diffrazione**. Per ottenere un segnale unico, si utilizzano algoritmi complessi che riuniscono le armoniche secondarie a quella primaria.

La coerenza del segnale

Quando si fa interferometria i segnali di più antenne vengono combinati. Le antenne devono osservare lo stesso fronte d'onda per avere segnali coerenti, altrimenti non è possibile osservare le frange. Due sorgenti puntiformi sono detti coerenti quando frequenza e differenza di fase rimangono costanti nel tempo.

La luce impiega tempo per arrivare da un'antenna all'altra. La sincronizzazione temporale è quindi necessaria per ottenere segnali coerenti. Si calcola la distanza fra le antenne con la trigonometria. Dalla distanza ottenuta si ricava il ritardo da applicare ai segnali.

Quando venne costruita la Croce del Nord si utilizzò un metodo tanto semplice quanto geniale. Si fece passare il segnale tramite il kerosene, che avendo un indice di rifrazione diverso dal rame, rallentava il segnale.

Oggi, si usano *delay* elettronici, calcolati e sincronizzati con l'orologio Maser ad Idrogeno.

Il MASER (Microwave Amplification Stimulated Emission Radiation) è l'analogo del laser. Mentre il Laser lavora in campo visibile, il maser lavora in campo microonde. Il Maser è in grado di eccitare gli elettroni degli atomi.

Se il numero di elettroni eccitati è maggiore di quelli a riposo, si ha emissione. Questa emissione è costante nel tempo: perde un secondo ogni 100 000 anni.

LABORATORIO DI INTERFEROMETRIA

Al centro di visite Marcello Ceccarelli ci siamo rimboccati le maniche e abbiamo sperimentato con mano come si eseguono misurazioni radioastronomiche.

Utilizzando un interferometro a due antenne abbiamo osservato il sole.

Le 2 antenne di tipo Yagi sono distanti circa 4 metri l'una dall'altra.

Sono costituite da 35 dipoli di dimensione crescente (Da $\frac{\lambda}{2} - 5\%$ a $\frac{\lambda}{2} + 5\%$)

Il segnale è guidato dai dipoli crescenti, che sommano il segnale ricevuto singolarmente a quello dei precedenti, fino ad arrivare al dipolo centrale.

Dopo c'è il dipolo riflettore, che scherma il dipolo centrale dal segnale proveniente dal terreno. Per puntare la sorgente, l'antenna viene orientata con il dipolo più piccolo verso il segnale, e quindi il dipolo riflettore verso il terreno.



Per prima cosa, abbiamo osservato il sole con una singola antenna.

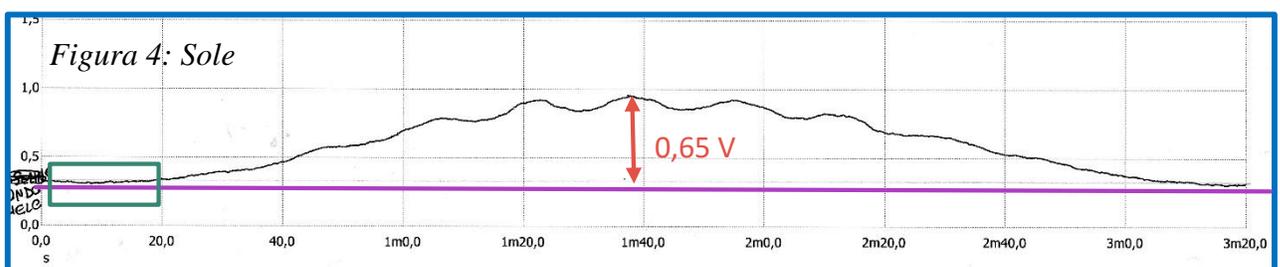
1. Al grafico (in blu) ottenuto sottendo una linea, che rappresenta il fondo cielo (in viola).
2. Misuro la differenza fra punto più alto del segnale e fondo cielo (in arancio).
3. Zoommo il grafico in un tratto piano del segnale (in verde).
4. Misuro la differenza fra minimo e massimo nel tratto piano (in azzurro).
5. Converto in Volt le misure ottenute, facendo proporzione con i valori di scala.

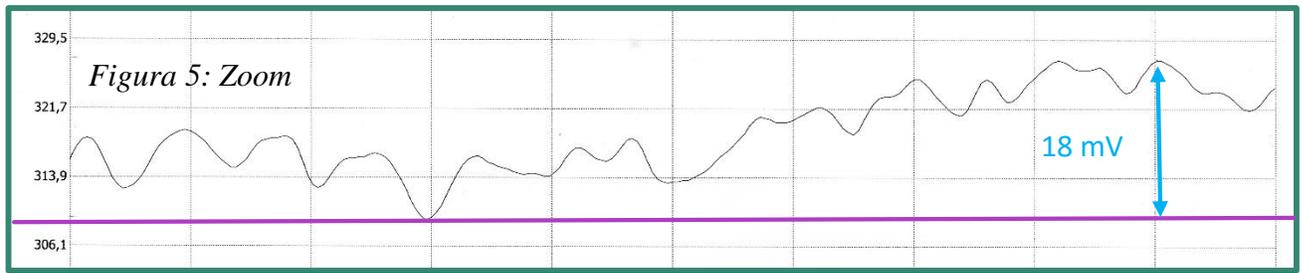
6. Calcolo la deviazione semplificata del rumore: $\frac{\Delta V}{6} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6} = 3 \text{ mV}$

7. Il *Signal to Noise Ratio* (SNR): $\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{0,65}{3 \cdot 10^{-3}} = 216,5$

8. Calcolo il fattore di conversione in Jansky: $C = \frac{\text{Intensità}_{\text{JY}}}{\text{Intensità}_{\Delta V}} = \frac{7,5 \cdot 10^5}{0,65} = 11,54 \times 10^5$

9. Calcolo il rumore del sole in Jansky: $N_j = N \times C = 3 \cdot 10^{-3} \times 11,54 \cdot 10^5 = 3462 \text{ JY}$



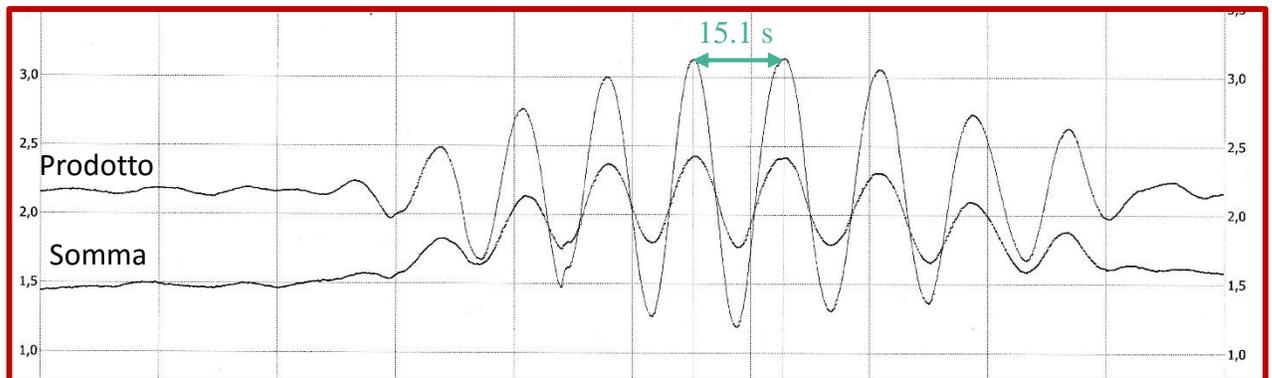


Abbiamo fatto una seconda osservazione del sole, stavolta in Interferometria, utilizzando entrambe le antenne. Si notano molto più chiaramente le frange di interferenza. Il grafico (in rosso) mostra il segnale elaborato come somma e prodotto. Il prodotto risulta più pulito rispetto alla somma, perché tiene in considerazione la coerenza dei segnali; è spesso chiamato Correlazione.

In interferometria, a frange più strette corrisponde una maggiore risoluzione. Osservando il grafico e conoscendo la velocità di rotazione angolare dell'antenna, possiamo calcolare la distanza fra le due antenne e la risoluzione dell'interferometro.

1. Misuro la distanza picco-picco di due frange (in azzurro)
2. Convento in secondi il valore ottenuto, facendo proporzione con i valori di scala.
3. Calcolo la risoluzione angolare dello strumento: $\Delta\theta = V \times \Delta T = 0,27 \times 15,1 = 4,1^\circ$
Per l'antenna risulta puntiforme qualsiasi oggetto che ha diametro angolare minore di $4,1^\circ$
4. Convento il risultato in radianti facendo una proporzione ($1 \text{ radiante} = \frac{180^\circ}{\pi}$) $\rightarrow \frac{4,1}{57,29} = 0,0712$
5. Calcolo la distanza fra le due antenne: $D = \frac{\lambda}{\Delta\theta} = \frac{23}{0,0712} = 323 \text{ cm}$

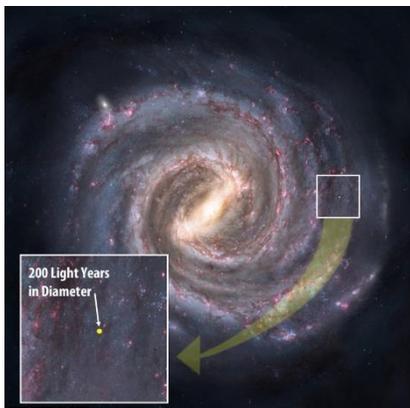
La velocità utilizzata non era quella reale: non abbiamo potuto ricavare la distanza esatta. *errore = 3 dm*



IL PROGETTO SETI

La domanda principale che si fa il Progetto SETI è: c'è altra vita nell'universo?

Molto probabilmente sì, ma l'umanità non la incontrerà mai per colpa delle immense distanze.



La Via Lattea ha un diametro di circa 80 000 anni luce. Il pianeta Terra si trova lungo uno dei rami della spirale galattica, in periferia. È quindi improbabile che ci siano forme di vita intelligente, nelle prime centinaia di anni luce attorno a noi.

L'obiettivo del Progetto è di captare segnali inviati da vita intelligente. Il campo radio è quello più adatto per questo tipo di osservazioni, perché i rilevatori radio raccolgono segnali in viaggio da migliaia di anni. Il viaggio nello spazio li indebolisce, per questo è importante avere aree di raccolta molto grandi, come quella della Croce del Nord.

La ricerca del segnale

Il progetto cerca segnali monocromatici artificiali e che non siano confondibili con segnali naturali.

La frequenza principale che si utilizza per ascoltare segnali è 1.4 GHz. Non si ha però certezza che forme intelligenti stiano trasmettendo a frequenze specifiche, perché lo spettro è divisibile in infinite frequenze. 1,4 GHz è la frequenza che utilizzeremmo noi, se volessimo comunicare con altra vita intelligente. Si può solo speculare e sperare che, esseri intelligenti evoluti in condizioni completamente diverse dalla nostra, siano arrivati alle nostre stesse conclusioni.

Se vita intelligente avesse guardato la terra, anche solo 100 anni fa, non avrebbe rilevato nulla, perché l'umanità doveva ancora cominciare ad utilizzare le trasmissioni radio. Avrebbero visto un pianeta "spento" senza alcuna attività apparente. Oggi si mandano molti segnali radio nello spazio, molti di questi involontariamente. Se alcuni alieni a 60 anni luce da noi, puntassero i loro rilevatori verso di noi, vedrebbero i primissimi programmi televisivi terrestri!

Le antenne e le strumentazioni sono costose. L'utilizzo ha un costo, perché toglie tempo ad altri progetti, per questo si è ideato un sistema da collegare in parallelo alle osservazioni. SERENDIP permette di non occupare le antenne, avendo comunque un orecchio puntato al cielo durante tutte le osservazioni.

Il nome deriva dal neologismo *Serendipity*, che significa "trovare qualcosa di bello mentre se ne cercava un'altra". A Medicina il progetto è stato in fase attiva dal 1998 al 2008, con Serendip IV.

L'interferometro SKA sarà lo strumento principale per le ricerche future del progetto SETI.

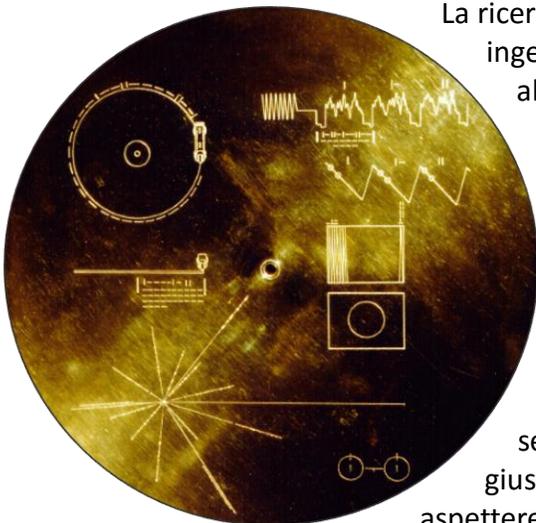
Riconoscere un segnale

Dal cielo si ricevono solitamente segnali a banda larga. Per trasmettere segnali si usano invece singole frequenze, che sono però molto difficili da individuare se si sta osservando il cielo su tutto lo spettro.

Esistono algoritmi specifici di analisi che riescono ad individuare segnali sulle singole frequenze: le Trasformate di Fourier. Le FFT (*Fast Fourier Transform*) permettono di affettare la banda dello spettro.

Analizzando singole frequenze riescono a trovare segnale anche in situazioni in cui il rumore totale è più forte del segnale ($SNR < 1$).

Società più avanzate della nostra potrebbero comunicare con segnali a noi difficilmente comprensibili, per esempio utilizzando larghe bande di spettro. Le KLT (*Karhunen-Loève Transform*) permettono di estrarre segnali di forme diverse da quelli che ci aspettiamo normalmente. Un problema delle KLT è che non funzionano su segnali deboli e sono molto più complesse da risolvere delle FFT.



La ricerca per questo progetto è molto sperimentale e richiede menti ingegnose da discipline diverse: dalla fisica alla biologia, dalla psicologia alla sociologia. SETI cerca un segnale qualsiasi, non cerca di comprenderlo né decifrarlo. Ci sono stati tentativi nel creare simboli e linguaggi universali, per esempio Lincos e le istruzioni incise sul disco d'oro "The Sounds of Earth" di Voyager 1.

La probabilità di trovare un segnale è bassissima, perché le apparecchiature hanno un campo di visione ristretto e, più guardiamo lontano nello spazio, più vediamo nel passato.

Se sapessimo che c'è vita intelligente in un pianeta a 30000 anni da noi, ci vorrebbero 30000 anni solo per fargli arrivare un primo segnale. Sperando che loro stiano osservando il cielo alla frequenza giusta, nel momento giusto e nel punto giusto, se rispondessero subito, aspetteremmo altri 30000 anni prima di ricevere la risposta!

SETI è un progetto molto "ottimistico". Trovare un segnale sarebbe di grande impatto per l'intera umanità. Aprirebbe tante domande di tipo morale, religioso, filosofico.

CONCLUSIONE

Lo stage all'Istituto di radioastronomia di Medicina mi ha insegnato molto.

La meraviglia nel vedere per la prima volta la parabola e la Croce del Nord, non la dimenticherò facilmente. Scoprire un Istituto così importante, vicino a casa mia, mi ha dato una grande carica. Mi sono reso conto di quanta normalità ci sia nel fare gli scienziati senza camici, aggiungendo ogni giorno una gocciolina nel mare del sapere: quasi non ci si accorge della differenza.

La curiosità verso il mondo e l'universo, per me, è sempre stata molta. Il vedere tante persone e tanta energia confluire per la ricerca scientifica, mi riempie di speranza. Qualsiasi cosa studierò all'università, spero mi porti ad una realtà simile a quella che ho potuto vivere a Medicina e Bologna.

Ringrazio gli organizzatori di SperimEstate per avermi dato la possibilità di partecipare ad un'esperienza unica. Ringrazio gli astronomi e gli ingegneri che hanno impiegato il loro tempo, per farci da istruttori:

F. Di Giacomo, G. Bianchi, S. Mariotti, S. Rusticelli, F. Perini, A. Maccafferri, M. Roma, C. Bortolotti, L. Gregorini, R. Ricci, S. Montebugnoli.

Ringrazio i miei professori di fisica: Dottori e Becca per avermi ricordato con pazienza, dello stage, anche quando mancava poco al termine di iscrizione.

Un ringraziamento va in particolare a Federico di Giacomo per avermi aiutato nella stesura della relazione e a Germano Bianchi per avermi accompagnato, ogni giorno, all'Istituto e a casa.

Umberto Arnone