

# Project CLEA – Software per la didattica in radioastronomia

IARA, SdR RadioAstronomia UAI, Astronomia Valli del Noce, Società Italiana di Fisica, IMO

---

## Abstract

*Project CLEA (Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy) develops laboratory exercises that illustrate modern astronomical techniques using digital data and color images. They are suitable for high-school and college classes at all levels. Project CLEA puts to disposition of the didactic instruments dedicated to the radio astronomy. Two are the specific programs in this sense: Radio astronomy of pulsars and The rotation of Mercury by Doppler effect. For everyone they will come described to the peculiarities, the didactic fine and the procedures for the obtaining of meaningful measures. The described procedures do not differ minimally from the usual calculations carry out to you from astronomers. The didactic aspect is interlaced with the peculiarities of the official research.*

---

## Introduzione

La radioastronomia non è certamente una disciplina facile da affrontare a livello amatoriale e tanto meno lo è da un punto di vista didattico. Infatti, al suo interno, vengono convogliate diverse discipline, passando dalla fisica e dall'astronomia per giungere all'elettronica ed all'informatica, solo per fare un esempio. Dunque in radioastronomia confluiscono molte conoscenze derivanti da ambiti alquanto diversi. Se questa è una complicazione che affligge in maniera considerevole l'attività del radioastronomo amatoriale, che si potrebbe tranquillamente anche definire radioastrofilo, colpisce, in maniera altrettanto predominante l'attività didattica.

In commercio esistono dei radiotelescopi che si possono comprare ed assemblare e coi quali è possibile fare un certo tipo di ricerca amatoriale e/o professionale [1][2]. Tuttavia un tale tipo di approccio risulta inadeguato per le esigenze del docente o dell'educatore. Infatti, in questo tipo di attività ci sono degli ostacoli che necessitano di essere inevitabilmente superati.

Si immagini una qualsiasi persona che voglia ricreare un esperimento in cui, ad esempio, si voglia misurare la distanza di una pulsar. Gli strumenti amatoriali attuali non ci permettono di farlo. Necessitiamo di un sistema di acquisizione in più bande di frequenza. L'inconveniente che si aggiunge è che un tale tipo di elaborazione richiede molto tempo, che magari in una classe non si possiede.

## Il Progetto CLEA

Il Progetto CLEA (Project CLEA) [3], acronimo di Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy, sviluppa esercizi di laboratorio che illustra le moderne tecniche astronomiche utilizzando dati digitali e immagini. Esso è concepito come strumento didattico sia per la scuola secondaria superiore sia per l'università ed in generale per ogni attività didattica.

Questo lavoro racchiude in se vari moduli distinti e liberamente scaricabili:

- Radio astronomy of pulsars
- Astrometry of asteroids
- The revolution of the moons of Jupiter
- The rotation of Mercury by Doppler effect
- Photoelectric photometry of the Pleiades
- Spectral classification of stars [4]
- The Hubble redshift-distance relation
- The large scale structure of the Universe
- The flow of energy out of the Sun
- The period of rotation of the Sun using images of sunspots from the GONG project
- The quest for object X
- Transits of Venus and Mercury using images from the GONG project
- Dying stars and the birth of the elements
- The height of lunar mountains
- The virtual educational Observatory

Ogni esercizio include un programma informatico, un manuale per gli studenti e una guida per il docente e/o educatore, dove vengono descritti i formati dei file, le opzioni dei programmi e gli algoritmi usati.

## Radio astronomy of pulsars

Ovviamente non tutti i software sono adatti per didattica radioamatoriale in quanto alcuni di essi si riferiscono sono ad esperienze nel visuale. Estremamente utile ed interessante per capire il funzionamento dei radiotelescopi, ma anche di come sarebbe possibile effettuare una ricerca radioastronomia amatoriale è il software che ci permette di analizzare il comportamento delle pulsar: Radio Astronomy of Pulsars.

Gli obiettivi del programma sono:

- capire il funzionamento di un radiotelescopio e riconoscere somiglianze e differenze rispetto ad un telescopio ottico;

- capire come gli astronomi, per mezzo dei radiotelescopi, riconoscono le proprietà caratteristiche delle pulsar;
- capire il significato di dispersione interstellare e come esso ci permette di misurare le distanze delle pulsar;
- imparare a utilizzare un simulatore di radiotelescopio dotato di un apparato ricevente multicanale;
- imparare a far funzionare i comandi del ricevitore per ottenere la migliore ricezione dei segnali della pulsar;
- imparare a registrare i dati acquisiti;
- imparare a analizzare i dati per determinare le proprietà delle pulsar quali il periodo, la potenza del segnale alle differenti frequenze, i tempi di arrivo dell'impulso, la potenza relativa dei segnali.;
- imparare a capire come le differenze nei tempi di arrivo degli impulsi radio alle differenti frequenze permettano di calcolare la distanza della pulsar;
- capire il funzionamento e le caratteristiche di base di un radiotelescopio;
- confrontare i differenti periodi delle pulsar e capire il range dei periodi delle pulsar;
- capire come la potenza del segnale dipende dalla frequenza;
- determinare la distanza di parecchie pulsar.

### ***Stelle di neutroni e pulsar***

Gli astronomi credono che molte delle stelle più massive concludano la loro vita come stelle di neutroni. Questi sono oggetti bizzarri e sono così compresse che sono fatte interamente di neutroni, con così poco spazio fra loro che una stella che contiene la massa del nostro Sole occupa una sfera non più grande di circa 10 chilometri di diametro, approssimativamente le dimensioni dell'isola di Manhattan. Tali oggetti sembrerebbero molto difficili da rilevare. Le loro superfici sarebbero di parecchi miliardi di volte più piccole del Sole ed emetterebbero così poca energia (a meno che fossero incredibilmente calde) che non potrebbero essere viste a distanze interstellari.

Gli astronomi, quindi, sono stati sorpresi nello scoprire brevi, regolari aumenti di radiazione nella banda radio che provengono da stelle di neutroni - in effetti è occorso un certo tempo prima che realizzassero che cosa stavano vedendo. Gli oggetti che hanno scoperto sono stati denominati pulsar, che è l'abbreviazione per "sorgenti radio pulsanti".

La scoperta delle pulsar è stata fatta abbastanza casualmente. Nel 1967, Jocelyn Bell, che lavorava per il suo dottorato sotto la supervisione di Anthony Hewish a Cambridge, in Inghilterra, stava eseguendo un'indagine del cielo con un nuovo radiotelescopio che era stato destinato specificamente per cercare veloci variazioni nella potenza dei segnali ricevuti da oggetti distanti. I segnali di questi oggetti variavano velocemente ed in modo casuale a causa dei movimenti casuali nel gas interstellare, come le stelle scintillano a

caso a causa dei movimenti dell'aria nell'atmosfera della terra.

Bell si sorprese, una sera di novembre del 1967, di scoprire un segnale che variava regolarmente e sistematicamente, non in un modo casuale. Assomigliava ad una serie infinita di brevi impulsi delle onde radio, spazati uniformemente e precisamente di 1.33720113 secondi. Gli impulsi erano così regolari e così diversi dai segnali naturali, che, per un istante, Bell e Hewish pensavano di aver trovato una fonte artificiale di radiazione - come un radar o un elettrodomestico - che stava producendo l'interferenza. Presto risultò evidente che gli impulsi regolari si erano mossi attraverso il cielo come le stelle e dunque dovevano provenire dallo spazio. Persino gli astronomi hanno immaginato che i segnali stavano venendo "dagli omini verdi" che stavano trasmettendo alla Terra. Ma quando si scoprirono tre sorgenti con differenti periodi (tutte intorno ad un secondo di durata) e potenze del segnale in differenti parti del cielo, è risultato evidente che queste "pulsar" erano un fenomeno naturale. Quando Bell e Hewish, ed i loro collaboratori, hanno pubblicato la loro scoperta, nel mese di febbraio del 1968, hanno suggerito che gli impulsi provenivano da un oggetto molto piccolo - quale una stella di neutroni - perché soltanto un oggetto così piccolo potrebbe variare la sua struttura o il suo orientamento in pochi secondi.

Soltanto circa sei mesi dopo la loro scoperta, i teorici hanno fornito una spiegazione per tali impulsi sconosciuti: effettivamente stavano osservando l'intenso campo magnetico di una stella di neutroni che ruotava velocemente. Tommy Gold dell'università di Cornell fu il primo ad avere questa idea e, benché molti particolari siano stati compresi nel corso degli anni, l'idea di base rimane la stessa.

Resta da capire perché le stelle di neutroni ruotino così velocemente partendo da una stella progenitrice anch'essa che ruota. Quando una stella si contrae, come un pattinatore che raggruppa le braccia verso il corpo, la stella ruota più velocemente (secondo un principio denominato Principio di conservazione del momento angolare). Poiché le stelle di neutroni sono circa 100.000 volte più piccole del normale, dovrebbero ruotare 100.000 volte più velocemente di una stella normale. Il nostro Sole ruota una volta ogni 30 giorni, così potremmo aspettarci che una stella di neutroni ruoti circa una volta al secondo. Una stella di neutroni dovrebbe anche avere un campo magnetico molto forte, superiore in potenza di parecchie decine di miliardi rispetto ad una stella normale - perché la superficie ristretta della stella concentra il campo. Il campo magnetico, in un pulsar, è inclinato di un angolo rispetto all'asse di rotazione della stella.

Ora, secondo questo modello, la veloce di rotazione e il campo altamente magnetico intrappolano gli elettroni e li accelerano ad alte velocità. Gli elettroni relativistici emettono forti onde radio che sono irradiate come un faro in due sensi, allineati rispetto all'asse del campo magnetico della stella di neutroni. Mentre la stella ruota, anche i fasci ruotano ed ogni volta che uno dei fasci attraversa la nostra linea di vista (essenzialmente

una volta per rotazione della stella), vediamo un impulso delle onde radio, come succede ad un marinaio quando vede un impulso di luce dal falò di rotazione di un faro.

Oggi oltre mille pulsar sono state scoperte e conosciamo molto più di loro rispetto al 1967. Le pulsar sembrano essere concentrate verso il piano della Galassia e si trovano a distanze superiori a mille parsec. Questo è ciò che si prevede come prodotti finali dello sviluppo di stelle massive, poiché le stelle massive sono formate preferenzialmente nei bracci a spirale che si trovano nel piano della nostra Galassia. Tranne alcune pulsar molto veloci dell'ordine dei "millisecondi", i periodi delle pulsar variano da circa 1/30 di secondo a parecchi secondi. I periodi della maggior parte delle pulsar aumentano ogni anno - una conseguenza del fatto che mentre irradiano, perdono energia di rotazione. A causa di ciò, si prevede che una pulsar rallenti e invecchiando risulti invisibile in circa un milione di anni dopo la sua formazione. Le pulsar più veloci sono così le pulsar più giovani (tranne le pulsar "millisecondo", un tipo separato di pulsar, che sembrano rivitalizzarsi grazie alle interazioni con un compagno vicino).

Ad un osservatore, una pulsar compare come un segnale in un radiotelescopio; il segnale può essere monitorato attraverso una vasta gamma di frequenze. Il segnale è caratterizzato da burst corti di energia separati da lacune regolari. Il periodo di rotazione di una pulsar è indipendente dalla frequenza in cui si va ad indagare la stella, in quanto il periodo di rotazione di una stella di neutroni è uno soltanto. Ma il segnale sembra più debole alle frequenze più alte. Gli impulsi inoltre arrivano prima alle frequenze più alte, dovuto al fatto che le onde radio di frequenza più alta viaggiano più velocemente attraverso il mezzo interstellare, un fenomeno denominato dispersione interstellare. Il fenomeno di dispersione permette di determinare la distanza delle pulsar.

### ***Procedura ed esercitazioni***

Il laboratorio si articola nelle seguenti parti:

1. familiarizzazione col radiotelescopio;
2. osservazione di un pulsar con un apparecchio radioricevente ad un solo canale per imparare il funzionamento del ricevitore e le caratteristiche dei segnali radio emessi da una pulsar alle varie regolazioni del ricevitore;
3. determinazione dei periodi di parecchie pulsar;
4. la misura della distanza di una pulsar usando il ritardo nei tempi di arrivo degli impulsi alle differenti frequenze dovuto a dispersione interstellare;
5. determinazione della distanza di una pulsar usando le tecniche appena imparate.

Il software permette inoltre di effettuare delle esercitazioni supplementari che mettono in luce le difficoltà di questo tipo di ricerca in ambito professionale.

1. la distanza di una pulsar di breve periodo;

2. misurazione della larghezza del fascio del radiotelescopio.

Si misura il tempo che intercorre affinché il segnale di una pulsar si dimezzi in potenza quando il radiotelescopio non insegue l'oggetto. Poiché la terra gira un grado ogni 4 minuti, si può calcolare, con questo tempo, quanto lontana si trova la pulsar rispetto al centro che il radiotelescopio stava indicando (in gradi) quando la potenza relativa ricevuta del segnale si è dimezzata. Questo è 1/2 della "larghezza del fascio a metà potenza" (half-power beam width o HPBW) del radiotelescopio (il fattore 1/2 viene dal fatto che il HPBW è misurato rispetto a entrambi i lati del centro);

3. misurazione del rallentamento di una pulsar. Le pulsar rallentano con il tempo, perché perdono energia. Si può misurare questo effetto con questo radiotelescopio, anche se i particolari del metodo sono troppo elaborati per descriverli. L'idea di base è misurare il periodo in una certa data e successivamente in una data diversa. Si necessita di una precisione estremamente alta (circa una parte in  $10^{15}$ ) per misurare il rallentamento. Così le due date di osservazione devono essere separate da un anno o da due per permettere di rilevare l'effetto di questi piccoli cambiamenti;
4. ricerca di pulsar.

Il radiotelescopio può funzionare come strumento "di transito" - con il motore d'inseguimento non operante si lascia che la Terra sposti il radiotelescopio nel cielo e si osservano le pulsar quando entrano nella linea di vista. Se la larghezza del fascio del radiotelescopio è troppo piccola, occorrerà molto tempo per trovare le pulsar in questo modo, poiché occorrerà molto tempo per esplorare l'intero cielo. Ma si può regolare il radiotelescopio in modo che abbia una grande larghezza del fascio e poter trovare più facilmente le pulsar. Questo può essere un progetto di lunga durata. Oltre 500 pulsar sono incluse nel catalogo per questo radiotelescopio.

### ***Misura della distanza della pulsar usando la dispersione***

La maggior parte delle pulsar non possono essere viste con i telescopi ottici, cosicché non è possibile usare le loro dimensioni assolute per determinare la distanza. Come è possibile allora determinare la loro distanza? Un metodo efficace utilizza il fenomeno della dispersione. Tutte le forme di radiazione elettromagnetica, comprese le onde radio, viaggiano alla stessa velocità nel vuoto. Questa è la velocità della luce.

Tuttavia, lo spazio interstellare non è abbastanza vuoto. In media il mezzo interstellare consiste di alcuni atomi e di alcuni elettroni liberi in ogni centimetro cubo. Non è molto, ma è abbastanza per rallentare un po' le onde

elettromagnetiche. Più bassa è la frequenza, più lentamente la radiazione viaggia. Ciò significa che, benché l'effetto sia piccolo, gli impulsi di una pulsar arrivano una frazione di secondo prima alle più alte frequenze che alle frequenze più basse, perché gli impulsi di più alta frequenza viaggiano più velocemente nel mezzo interstellare. Si può vedere facilmente ciò per mezzo del radiotelescopio, poiché si può ricevere simultaneamente i segnali fino a tre lunghezze d'onda e si può confrontare i tempi di arrivo sui tre dispositivi grafici.

Misurando il tempo d'arrivo degli impulsi dalla stessa pulsar a differenti frequenze si può determinare la distanza della pulsar, conoscendo la velocità delle onde radio nel mezzo interstellare alle differenti frequenze. In effetti si conosce che la frequenza modifica la velocità della radiazione elettromagnetica e ciò lo suggerisce la teoria dell'elettromagnetismo sviluppata 100 anni fa.

Le leggi della fisica ci permettono di calcolare la velocità della radiazione elettromagnetica nel mezzo interstellare e di derivare una formula per la distanza percorsa in termini del ritardo nell'arrivo fra gli impulsi radio ricevuti alle differenti frequenze. Frequenze più basse viaggiano più lentamente, arrivando successivamente. In più, il numero di particelle cariche - la densità elettronica - del mezzo interstellare è causa del ritardo, aumentando se la densità è più alta. In generale, la velocità della radiazione elettromagnetica è proporzionale al quadrato della frequenza divisa per la densità elettronica e la teoria prevede la seguente equazione:

$$v = \frac{f^2}{4150 \cdot n_e}$$

Per gli scopi di questo laboratorio, si supporrà che la densità elettronica del mezzo interstellare sia uniforme ed abbia valore di 0.03 elettroni/cm<sup>3</sup>, un numero derivato dalle osservazioni delle pulsar alle distanze conosciute usando altri metodi. Di conseguenza,

$$v = \frac{f^2}{124.5}$$

Usando questa assunzione e osservando che  $T_1$  è il tempo d'arrivo (in secondi) di un impulso da una pulsar a frequenza radio  $f_1$  (in MHz) e  $T_2$  è il tempo d'arrivo dello stesso impulso a frequenza  $f_2$ , allora la distanza,  $D$ , della pulsar (espressa in parsec) è:

$$D = \frac{T_2 - T_1}{124.5 \left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)}$$

Così per determinare la distanza di una pulsar, si deve semplicemente misurare il tempo d'arrivo di un impulso a due differenti frequenze.

### Measurement of the rotation of Mercury by doppler radar

Un altro software che permette di fare ricerche simulate in ambito radioastronomico permette di misurare il periodo di rotazione di Mercurio. In questo caso si utilizza un radiotelescopio con funzione di radar. Le tecniche radar sono diverse da quelle normalmente utilizzate in radioastronomia. In radioastronomia tradizionale si va a catturare la radiazione emessa da una sorgente, invece in radar astronomia si va a studiare il comportamento di un segnale mandato da terra e riflesso dall'oggetto in esame.

Gli obiettivi del programma sono:

- imparare a utilizzare un simulatore di radiotelescopio per acquistare gli spettri di impulso;
- imparare a leggere lo spettro di un impulso per trovare lo spostamento di frequenza dell'impulso;
- imparare a misurare lo spostamento Doppler per interpretare il cambiamento in frequenza tra il segnale emesso e riflesso;
- si dovrebbe poter determinare la velocità radiale di Mercurio e calcolare il relativo periodo;
- si dovrebbe poter calcolare il periodo di rotazione di Mercurio.

### Basi

Poiché Mercurio è un piccolo pianeta le cui caratteristiche superficiali hanno contrasto basso ed è così vicino al Sole che raramente è visibile in un cielo buio, è difficile determinare quanto velocemente stia ruotando soltanto guardandolo dalla Terra. Negli ultimi anni, tuttavia, le tecniche radar si sono dimostrate più efficaci nella misurazione della velocità di rotazione. Il metodo impiegato qui ha applicazioni molto più ampie che la sola misurazione della rotazione di Mercurio. Può essere usato per studiare il comportamento di altri pianeti, dalle nubi che coprono Venere agli anelli dei pianeti principali, ai più piccoli asteroidi.

L'idea di base è utilizzare un radiotelescopio per trasmettere un breve impulso di radiazione elettromagnetica di frequenza conosciuta verso Mercurio e successivamente registrare lo spettro (intensità in funzione della frequenza) dell'eco di ritorno. A seconda della posizione relativa tra la Terra e Mercurio, l'impulso impiegherà fra 10 minuti e mezz'ora per arrivare e tornare.

L'impulso, nel momento in cui giunge sul pianeta, lo colpisce completamente. Poiché la superficie del pianeta è una sfera, l'impulso colpisce parti differenti del pianeta in tempi differenti. L'impulso in primo luogo colpisce il punto sul pianeta che congiunge il radar al centro del pianeta ("sub-radar point") e pochi microsecondi dopo gli altri punti, verso i bordi del pianeta. Così si attende il primo eco, dal punto del sub-radar point ed allora guardando gli echi di ritorno in tempi successivi, alcuni microsecondi dopo il precedente, si ottengono informazioni sulle differenti parti della superficie di Mercurio.

Le frequenze degli echi di ritorno sono differenti dalla frequenza dell'impulso mandato perché gli echi hanno rimbalzato sulla superficie commovente di Mercurio. Ogni volta che una fonte di radiazione si muove radialmente (in direzione o opposta all'osservatore) ci sarà una variazione nella frequenza ricevuta che è proporzionale alla velocità lungo la linea di vista.

Ci sono due movimenti di Mercurio che possono produrre un tale spostamento: la velocità orbitale intorno al Sole e la rotazione intorno all'asse. Il primo eco, dal punto del sub-radar point, è spostato in frequenza soltanto dalla velocità orbitale del pianeta. Si può calcolare quanto velocemente il pianeta si sta muovendo rispetto alla Terra dallo spostamento, ma non si può dire di quanto velocemente stia ruotando perché la componente della velocità di rotazione della superficie di Mercurio è perpendicolare alla nostra linea di vista e così non vi è spostamento supplementare in frequenza. Gli echi che arrivano dopo l'eco del sub-radar point, tuttavia, mostrano gli spostamenti supplementari perché vengono da parti in cui la velocità di rotazione non è più ortogonale seguendo la linea di vista. A causa della rotazione di Mercurio, un bordo del pianeta si sta spostando verso di noi più velocemente e l'altro bordo si sta allontanando verso di noi più lentamente. Così, a causa dell'effetto Doppler, parte dell'eco di ritorno (dal bordo commovente più veloce di Mercurio) è ad una frequenza un po' più alta e parte dell'eco (dal bordo commovente più lento) è ad una frequenza un po' più bassa.

### Calcolo della velocità di rotazione di Mercurio

Si utilizzano le seguenti procedure per tramutare i dati grezzi nei valori del periodo di rotazione di Mercurio. I primi tre passi sono termini geometrici necessari per convertire le velocità misurate, che provengono dai punti non sull'Equatore di Mercurio, in velocità all'Equatore di Mercurio. Poiché si conosce il tempo di decadimento dei quattro echi (120, 210, 300 e 390 millisecondi) si può calcolare questi termini, la  $d$ ,  $x$  e  $y$ , anche prima di aver ricevuto gli echi. Gli altri calcoli sono effettuati con i dati misurati dagli echi.

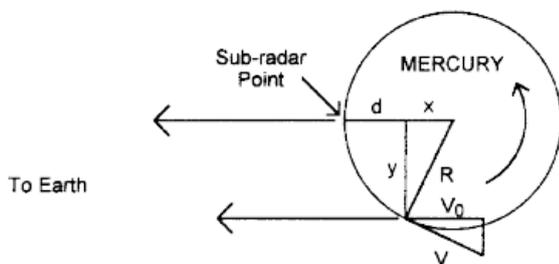


Figura 1. Geometria della rotazione di Mercurio

La velocità di rotazione di Mercurio,  $V$ , è calcolata da questi rapporti geometrici.  $R$  è il raggio del pianeta,  $d$ , è la distanza di ritardo e la  $V_0$  è la componente misurata della velocità di rotazione parallela alla linea di vista al punto.

1. Calcolo della  $d$  (in metri). Ciò è la distanza che il fascio in ritardo ha viaggiato oltre il punto del sub-radar point. Usiamo semplicemente distanza = tasso per tempo, ma poiché stiamo misurando un eco, che deve viaggiare due volte in eccedenza per lo stesso percorso (avanti ed indietro) si prende la metà di questo valore.

$$d = \frac{c\Delta t}{2}$$

Dove la  $c$  è la velocità della luce in metri al secondo ( $3 \times 10^8$  m/s) e  $\Delta t$  è il tempo di ritardo in secondi.

2. Calcolo della  $x$ . Questa è la distanza parallela alla nostra linea di vista dal centro di Mercurio al punto da cui l'eco ritorna. È uguale al raggio di Mercurio meno la distanza  $d$  calcolata nel Passo 1, dove il raggio di Mercurio è  $R = 2.42 \times 10^6$  metri.

$$x = R_{Merc} - d$$

Si noti che gli echi che misuriamo ritornano da punti non lontani (soltanto alcuni chilometri) dal punto del sub-radar point, dunque  $x$  deve essere soltanto un po' più piccolo della  $R$ .

3. Calcolo della  $y$ . Questa è la perpendicolare dalla linea di vista al bordo esterno della regione di Mercurio da cui l'eco ritorna. Si trova notando che  $y$  è un lato del triangolo di cui l'ipotenusa è il raggio di Mercurio e di cui altro lato è  $x$ .

$$y = \sqrt{R_{Merc}^2 - x^2}$$

4. Calcolo di  $\Delta f_{total}$ . Ciò è la variazione nella frequenza dovuto alla velocità di rotazione. Si deve semplicemente notare che un lato di Mercurio ruota verso noi velocemente come l'altro lato sta ruotando in senso contrario rispetto a noi. Così la differenza nella frequenza spostata dai due bordi di estremi,  $\Delta f_{right}$  e  $\Delta f_{left}$  è due volte lo spostamento dovuto alla velocità di rotazione.

$$\Delta f_{total} = \frac{\Delta f_{right} - \Delta f_{left}}{2}$$

5. Calcolo di  $\Delta f_c$ . Ciò è la variazione in frequenza corretta per il fatto che questo è un eco in cui lo spostamento è due volte quello prodotto da una fonte che sta emettendo semplicemente ad una frequenza conosciuta. Ciò è dovuto perché l'impulso che arriva a Mercurio sembra spostato in superficie ed inoltre è spostato ancora perché la superficie di Mercurio si sta muovendo rispetto alla terra.

$$\Delta f_c = \frac{\Delta f_{total}}{2}$$

6. Calcolo di  $V_o$ . Ciò è la componente della velocità di rotazione del bordo di Mercurio seguendo la linea di vista al punto da cui l'eco ritorna. Applichiamo semplicemente l'equazione Doppler allo spostamento osservato in frequenza.

$$V_o = c \frac{\Delta f_c}{f}$$

Dove, come prima,  $c$  è la velocità della luce in metri al secondo e  $f$  è la frequenza trasmessa dell'impulso ( $f$  deve essere in Hertz)

7. Calcolo della  $V$ . Ciò è la velocità di rotazione equatoriale di Mercurio ed è corretta con fattori geometrici che correggono il fatto che la velocità che si misura è soltanto la componente della velocità di rotazione diretta seguendo la linea di vista e che la perpendicolare della componente alla linea di vista non produce spostamento Doppler misurabile.

$$V = V_o \frac{R_{Merc}}{y}$$

8. Calcolo  $P_{rot}$ . Per ciascuno degli echi in ritardo si può ora calcolare un periodo di rotazione per il pianeta dividendo la circonferenza di Mercurio,  $2\pi R_{Merc}$ , per la relativa velocità e dividendo il risultato (che sarà in secondi), per il numero di secondi in un giorno: 86.400.

$$P_{rot}(s) = \frac{2\pi R_{Merc}}{V}$$

$$P_{rot}(giorni) = \frac{P_{rot}(s)}{86.400}$$

### Risultati finali

Si calcoli  $P_{rot}$  per ciascuno degli echi in ritardo, assicurandosi che i risultati siano ragionevoli. Allora è possibile calcolare il periodo medio di rotazione in giorni per Mercurio dai valori ottenuti utilizzando semplicemente la funzione media.

### La velocità orbitale di Mercurio

Si può usare il valore dello spostamento in frequenza per l'eco dal punto del sub-radar point per calcolare la velocità orbitale di Mercurio. Lo spostamento che si ottiene deve essere diviso per due per il raddoppiarsi dell'eco. Applicare la formula Doppler dello spostamento per calcolare la velocità del pianeta. Le velocità negative sono velocità di recessione e le velocità positive sono velocità di avvicinamento. La formula da utilizzare è esposta sotto, espressa in km/s se si utilizza la velocità della luce in questa unità di misura.

$$V_o = \frac{c}{2} \frac{\Delta f_{t=0}}{f}$$

### Problema supplementare

Le grandezze relative delle orbite dei pianeti sono state conosciute (dalle leggi del Keplero) molto prima che il numero reale di chilometri in un'unità astronomica fosse misurato. Il ritardo nel periodo di ritorno di un segnale radar fornisce un accurato ed esatto metodo di misurazione dell'unità astronomica (UA). I calcoli delle ephemeridi, che sono state registrate, hanno permesso di calcolare la distanza di Mercurio dalla Terra in UA e il tempo misurato per l'impulso di ritorno in minuti luce. Usare questi due valori per calcolare il numero di chilometri in una UA. A questo fine, notare che  $c$ , la velocità della luce, è  $2.998 \times 10^5$  km/s. Ricordare che  $d = c \cdot t$  e che  $t$  deve essere convertito in secondi.

### Conclusioni

Con i due software di simulazione qui sopra spiegati brevemente è possibile effettuare delle esperienze radioastronomiche di elevato livello tecnico all'interno, ad esempio, di una classe con pochissimo sforzo.

In aggiunta è possibile scaricare i manuali in italiano dalla sezione Scuole e Associazioni del sito di IARA[5].

### Ringraziamenti

È doveroso un ringraziamento a Laurence "Larry" Marschall, direttore del progetto CLEA, per la sua disponibilità e il suo aiuto e soprattutto per mettere in rete i manuali da me tradotti.

### Bibliografia

- [1] RadioJove, <http://radiojove.gsfc.nasa.gov/>
- [2] RadioAstroLab, <http://www.radioastrolab.it>
- [3] Project CLEA, <http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/CLEAhome.html>
- [4] Bernazzani M., *Astronomia UAI*, **2**, 31-33, (marzo-aprile 2006)
- [5] IARA, <http://www.iaragroup.org/scuoleeassociazioni/>