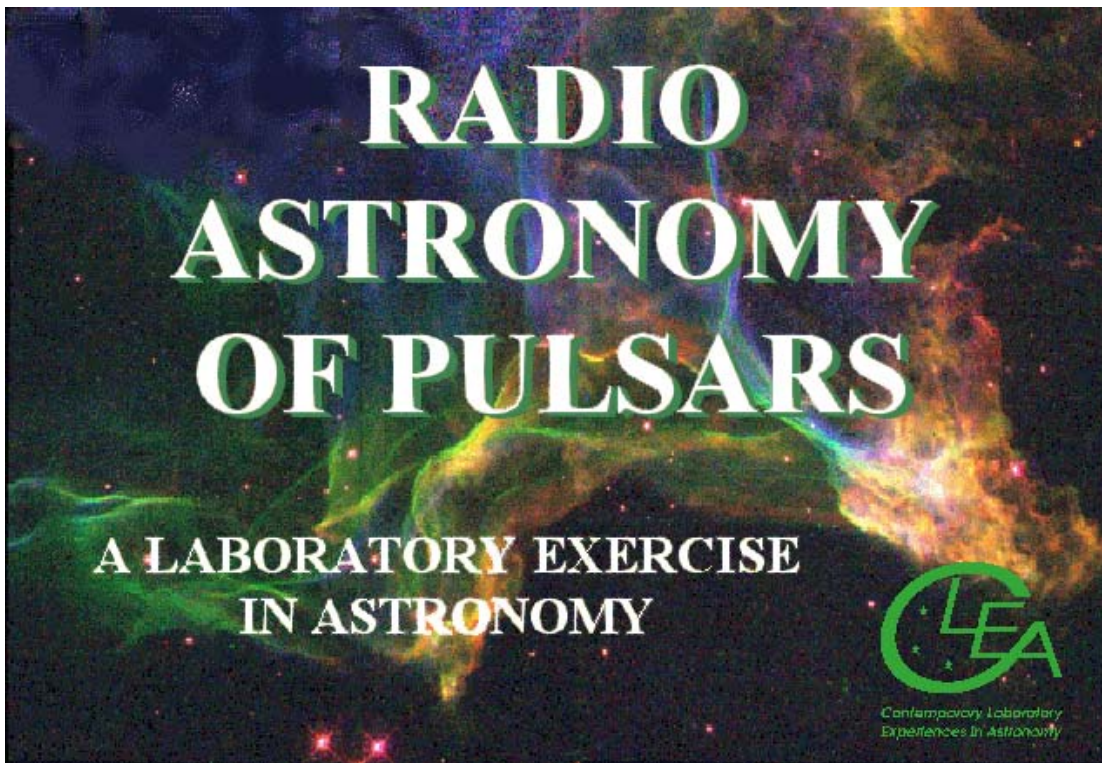


Radio Astronomía de Púlsares

(versión en idioma español del original en inglés)

Guía para estudiantes

A Manual to Accompany Software for
the Introductory Astronomy Lab Exercise
Document SM 8: Version 1.1.1 lab



Department of Physics
Gettysburg College
Gettysburg, PA 17325
Telephone: (717) 337-6019
Email: clea@gettysburg.edu

Escrito y preparado por:

Glenn Snyder y Laurence Marschall (CLEA PROJECT, Gettysburg College)
Traducido del inglés por Eduardo Manuel Alvarez (OLASU: Observatorio Los
Algarrobos, Salto, Uruguay)



Contemporary Laboratory
Experiences in Astronomy

Contenido

Propósito	3
Objetivos	3
Conocimientos previos: Estrellas de neutrones y púlsares	4
Uso de la computadora	8
Inicio del programa	8
Procedimiento	9
Parte 1: El Radiotelescopio	9
Parte 2: Observación de un púlsar con un receptor de radio monocanal	10
Parte 3: Los períodos de los distintos púlsares	14
Parte 4: Medición de la distancia a un púlsar usando dispersión	14
A. Método	14
B. Un ejemplo en nuestra vida corriente	15
C. La fórmula de la dispersión del medio interestelar.....	16
D. Medición de la distancia a los púlsares	17
E. Medición de los tiempos de arribo de los pulsos	18
Parte 5: Determinación de la distancia al Púlsar 2154+40 aplicando las técnicas que acabas de aprender	20
Ejercicios opcionales que también puedes hacer con este radiotelescopio	21
1. La distancia a púlsares de período cortos.....	21
2. Medición del ancho del haz del telescopio	21
3. Medición del decaimiento del spin de un púlsar	22
4. Búsqueda de púlsares	22

Propósito

Tú deberías ser capaz de comprender cómo funciona básicamente un radiotelescopio, y reconocer además qué similitudes y diferencias tiene con el telescopio óptico. Entenderás cómo los astrónomos, valiéndose de radiotelescopios, son capaces de reconocer las características distintivas de los púlsares. Y también conocerás qué cosa es la dispersión interestelar, y cómo ella permite medir la distancia a los púlsares.

Objetivos

Si tú aprendes cómo hacer para ...

utilizar simuladamente un radiotelescopio equipado con un receptor multi-canal;

operar los controles del receptor de forma tal de obtener la mejor visualización posible de las señales de un púlsar;

recopilar la información proveniente de tales receptores;

analizar la información obtenida para poder determinar propiedades de los púlsares, tales como sus períodos de rotación, la intensidad de sus señales a diferentes frecuencias, los tiempos de arribo de los pulsos, y la intensidad relativa de los pulsos recibidos;

comprender cómo los diferentes tiempos de arribo de los pulsos a diferentes radio frecuencias guardan relación con la distancia que los pulsos han viajado;

entonces tú deberías ser capaz de ...

comprender el funcionamiento básico y características de un radiotelescopio;

comparar entre sí los períodos de los distintos púlsares, y justificar por tanto el rango de períodos donde los astrónomos buscan nuevos púlsares;

descubrir cómo la intensidad de señal de un púlsar depende de la frecuencia;

determinar la distancia a los distintos púlsares.

Vocablos importantes que deberías revisar en tu texto

Nebulosa del Cangrejo	medio interestelar	púlsar	frecuencia	velocidad de la luz
Fecha Juliana	radio telescopio	parsecs	dispersión	campo magnético
Tiempo Universal (UT)	espectro electromagnético	período	resolución	ascensión recta
estrella de neutrones	radiación electromagnética	ondas de radio	declinación	

Conocimientos previos: Estrellas de neutrones y púlsares

Los astrónomos creen que muchas de las estrellas más masivas terminan sus vidas como estrellas de neutrones. Tales estrellas son objetos muy extraños: su masa está tan comprimida que están total y completamente constituidas por neutrones, y con tan poco espacio entre ellos que una estrella de neutrones con la misma masa que el Sol ocupa apenas una esfera de aproximadamente 10 km de diámetro (el tamaño de una gran ciudad). Uno pensaría que tales increíbles objetos serían poco menos que imposibles de ser detectados, dado que siendo su superficie total miles de millones de veces menor que la del Sol, deberían emitir tan poca energía (salvo que fuesen inverosímilmente calientes) que a distancias interestelares ya no podrían ser observados.

Es por ello que los astrónomos quedaron totalmente perplejos al descubrir cortas y regulares emisiones de radio provenientes de estrellas de neutrones (de hecho, les llevó un cierto tiempo darse verdadera cuenta de lo que estaban observando). Los objetos emisores así descubiertos fueron llamados púlsares, como abreviatura del inglés “pulsating radio sources”.

El descubrimiento de los púlsares tuvo lugar de casualidad. En 1967, cuando la estudiante Jocelyn Bell estaba llevando a cabo su doctorado bajo la tutoría de Anthony Hewish en Cambridge, Inglaterra, procedió a realizar una prospección del cielo con un nuevo radiotelescopio, específicamente diseñado para detectar rápidas variaciones en la intensidad de las señales de objetos lejanos. Las señales recibidas de tales objetos varían típicamente de manera rápida y aleatoria debido al movimiento aleatorio del gas interestelar que atraviesan en su camino hacia nosotros, de forma análoga al titileo aleatorio de la luz de las estrellas que observamos debido a la turbulencia del aire en nuestra atmósfera.

Durante una noche de Noviembre de 1967, Bell se sorprendió totalmente al descubrir una señal que no variaba aleatoriamente, sino por el contrario, *regular y sistemáticamente*. La señal consistía en lo que parecía ser en una serie interminable de cortas emisiones de ondas de radio, uniformemente separadas cada 1.33720113 segundos exactos (ver Figura 1, donde se muestra el histórico registro con el que Jocelyn Bell descubrió el primer púlsar).

La cadencia de los pulsos era tan regular, y por tanto tan distinta a cualquier señal de origen natural que, por un momento, Bell y Hewish trataron de buscar alguna fuente de interferencia artificial que fuese la verdadera causa de tales señales, como por ejemplo un equipo de radar o algún electrodoméstico cercano. Sin embargo, pronto les quedó claro que el origen de los pulsos regulares se movía en el cielo de manera igual a las estrellas, por lo que no había dudas que provenían del espacio. Incluso consideraron la idea de que los pulsos podrían provenir de “Enanitos Verdes” que pudieran estar tratando de comunicarse con la Tierra. Pero cuando fueron descubiertas otras tres fuentes de pulsos con diferentes períodos (todos ellos alrededor de un segundo de duración) y con diferentes intensidades, provenientes de diferentes lugares del cielo, entonces sí quedó claro que la señal de “púlsar” correspondía a un fenómeno natural nunca antes visto. Cuando Bell, Hewish y demás colaboradores publicaron su descubrimiento en febrero de 1968, conjeturaron que los pulsos deberían provenir de un objeto muy pequeño – como por ejemplo, una estrella de neutrones – en virtud de que solamente un objeto muy pequeño podría variar su estructura u orientación de forma tan rápida como una vez por segundo.

Tan solo seis meses después del descubrimiento de los extraños pulsos ya se disponía de una plausible explicación propuesta por el astrónomo teórico Tommy Gold de la Cornell University: debieran ser originados en estrellas de neutrones de muy rápida rotación y gran campo magnético. Cuarenta años después esta idea básica sigue siendo aun la solución del enigma, aunque obviamente perfeccionada con mejor detallismo ha medida que han pasado los años.

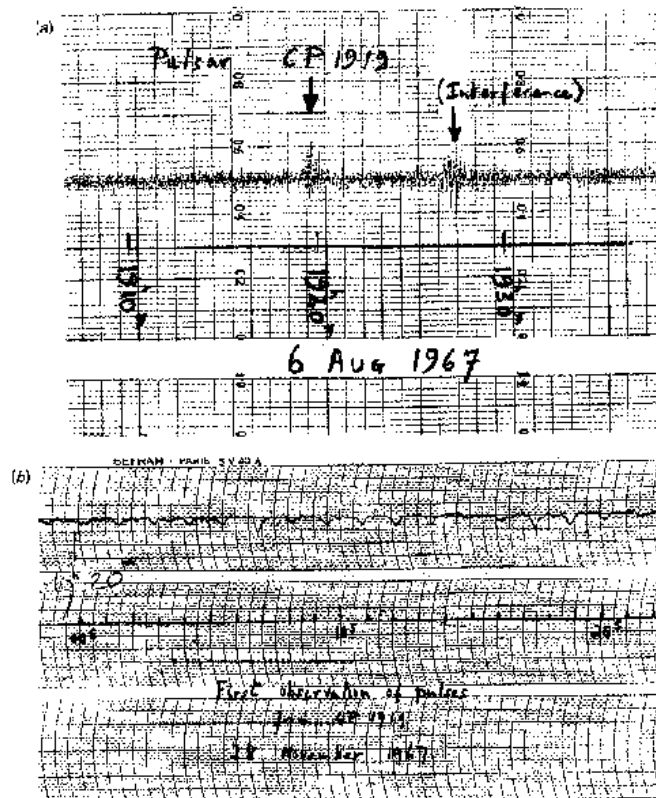


Figura 1: Registro en el que Jocelyn Bell descubrió su primer púlsar

Teniendo en cuenta que las estrellas de neutrones se forman a partir de estrellas “normales”, y que todas éstas giran, entonces resulta lógico esperar que las estrellas de neutrones giren muy rápidamente. Esto es así porque cuando una estrella se contrae comienza a girar más rápidamente (de manera análoga a lo que sucede cuando un patinador sobre hielo ubica ambos brazos sobre su pecho), según lo que se conoce como el principio de *conservación del momento angular*). Considerando que las estrellas de neutrones son unas 100.000 veces más pequeñas que las estrellas normales, entonces también deberían girar unas 100.000 veces más rápido. Nuestro Sol gira una vez cada 30 días, por lo que podríamos esperar que una estrella de neutrones gire del orden de una vez por segundo. También es dable esperar que una estrella de neutrones tenga un gran campo magnético, dado que al encogerse la estrella concentra el campo original en un área mucho más reducida, por lo que su intensidad se ve aumentada en factores de 10^{10} veces con relación al campo magnético de una estrella normal. Tal como se muestra en las Figuras 2A y 2B, el campo magnético de un púlsar normalmente forma un determinado ángulo con el correspondiente eje de rotación.

Según el modelo, una estrella de neutrones de rápido giro y gran campo magnético atrapa a los electrones y los acelera hasta que alcanzan enormes velocidades. En tal condición, los electrones emiten intensas ondas de radio como si fuesen rayos de luz emitidos por un faro, las que se alinean en dos direcciones opuestas según el eje magnético de la estrella de neutrones. A medida que la estrella rota, los rayos también se van desplazando sobre el cielo. En el caso que dicho rayo en movimiento justo acertase a pasar por sobre la Tierra, es posible detectar dichas ondas de radio en forma de un breve pulso, de igual manera como un marinero ve el haz de luz continuo de un faro apenas como un breve destello.

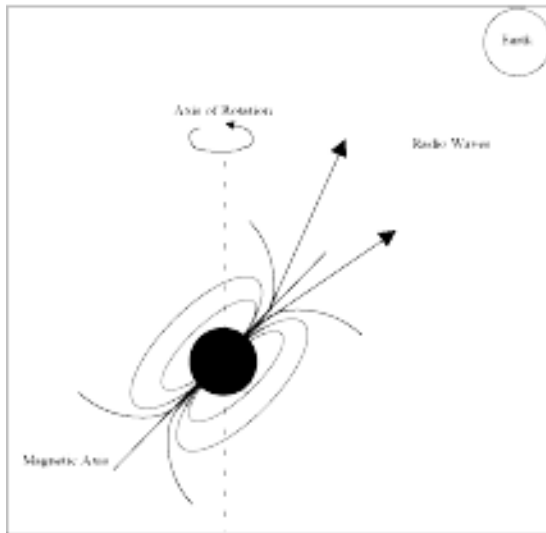
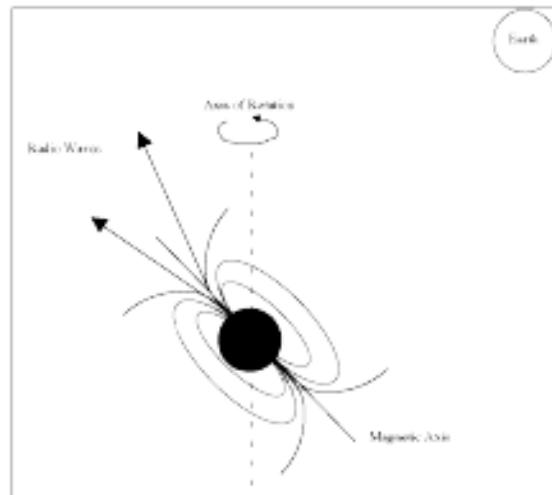


Figura 2A
El pulso está "encendido".
Desde la Tierra se lo puede detectar.

Figure 2B
El pulso está "apagado".
Desde la Tierra no se lo puede detectar.



A la fecha han sido descubiertos más de un millar de pulsares, y por supuesto conocemos mucho más de ellos de lo que se sabía cuarenta años atrás. Los pulsares parecen estar concentrados hacia el plano de la Vía Láctea, distantes varios miles de parsecs de nosotros. Esto mismo es lo que hubiésemos esperado si los pulsares efectivamente son el resultado final de la evolución de las estrellas masivas, dado que ellas se forman preferentemente en los brazos espirales del plano de nuestra galaxia. El período de rotación de los pulsares va desde 1/30 de segundo hasta varios segundos, excepto para unos pocos pulsares que son muy rápidos, con períodos en el orden de los milisegundos. Como consecuencia de la propia emisión de las ondas de radio, los pulsares van también perdiendo energía rotacional, por lo que el período de la mayoría de los pulsares se incrementa (muy levemente) año tras año. Es por ello que debemos esperar que un pulsar se vaya deteniendo y atenuando a medida que envejece, desapareciendo alrededor de un millón de años después de formado. Por lo tanto, los pulsares más rápidos (no los de períodos de milisegundos, que forman una clase de pulsares diferente, habiendo sido aparentemente acelerados y revitalizados por la interacción de otra estrella muy cercana) son también los más jóvenes.

Un pulsar aparece como una determinada y característica señal en un radiotelescopio. Se la puede obtener a lo largo de una banda de frecuencias bastante amplia (en este ejercicio, podrás sintonizar el receptor desde 400 hasta 1000 MHz). La señal se caracteriza por cortos pulsos de radio energía separados por períodos

regulares (ver Figura 3). Dado que el período de un púlsar es precisamente el tiempo que le lleva a la estrella dar un giro completo, el período es el mismo independientemente de la frecuencia sintonizada en el radiotelescopio. Pero, como verás en este ejercicio, las señales se debilitan a medida que la frecuencia aumenta. También ocurre que con el aumento de la frecuencia los pulsos arriban cada vez más temprano, debido al hecho de que las ondas de radio de frecuencias más altas se propagan más rápido a través del medio interestelar, fenómeno que se conoce como *dispersión interestelar*. Los astrónomos hacen uso del fenómeno de la dispersión interestelar para justamente determinar la distancia a los púlsares (como se describirá más adelante).



Figura 3: Señal típica de un púlsar

En este ejercicio, aprenderás primero cómo operar un radiotelescopio sencillo, con el que luego analizarás las intensidades y períodos de las señales recibidas desde varios púlsares representativos, para terminar encontrando la distancia que nos separa.

Uso de la computadora

En primer lugar, algunas definiciones:

pulsar	Apretar el botón izquierdo del ratón (a menos que otro botón distinto se indique).
soltar	Soltar el botón del mouse.
cliquear	Apretar y soltar rápidamente el botón del ratón.
doble cliqueo	Apretar y soltar rápidamente el botón del ratón dos veces.
pulsar y arrastrar	Mantener apretado el botón del ratón desde un lugar a otro de la pantalla, y luego soltarlo.
barra del menú	Estando el cursor bien arriba, al cliquear sobre una posición destacada se puede ver una serie de alternativas que se ofrecen para que el programa actúe en consecuencia.
flechas verticales	Estando el cursor sobre botones de flechas verticales, al cliquear sobre ellas se cambia aumentando (con flecha hacia arriba) o disminuyendo (con flecha hacia abajo) el valor numérico adjunto.

Inicio del programa

Tu computadora debe estar encendida y corriendo Windows. Tu instructor te indicará cómo encontrar el ícono o barra de menú para dar inicio al ejercicio *Radio Astronomy of Pulsars*.

1. Posiciona el cursor encima del ícono del programa o barra de menú y cliquea para iniciar el ejercicio.
 - Cuando el programa arranca, el logo CLEA deberá aparecer en una ventana de tu pantalla.
2. Muévete a **File** en la barra de menú de más arriba, cliquea allí, y elige **Login**.
 - Introduce tu nombre en el cuadro que aparece (como también el de tus compañeros de grupo, si tal fuese el caso). No uses signos de puntuación.
 - Luego de ingresar cada nombre, pulsa la tecla de Tab, o cliquea en cada renglón para ingresar el siguiente nombre.
 - Ingresa el número de mesa que te corresponde, si es que ese dato fuese necesario y no haya sido ya ingresado. Puedes cambiar y modificar los nombres ingresados simplemente cliqueando en el correspondiente renglón, y volviendo a escribirlos.
3. Cuando estés satisfecho con los datos ingresados, cliquea **OK** para continuar, y luego cliquea **yes** en la siguiente pregunta. De inmediato se abrirá la pantalla de inicio del ejercicio *Radio Astronomy of Pulsars*.

Procedimiento

Este ejercicio consta de las siguientes partes:

1. Familiarización con el radiotelescopio.
2. Observación de un púlsar usando un receptor de radio monocanal para aprender cómo se lo usa y ver además cómo varía la apariencia de la señal recibida según se modifican los distintos controles del receptor.
3. Determinación del período de la señal recibida de varios púlsares.
4. Descripción del método de medida de la distancia a los púlsares usando el atraso en los tiempos de arribo debido a la dispersión interestelar, según las frecuencias utilizadas.
5. Determinación de la distancia a un púlsar aplicando la técnica anterior.

Parte 1: El radiotelescopio

1. Clickea **File** en la barra de menú, selecciona **Run** y a continuación la opción **Radio Telescope**.
 - La ventana debiera mostrarte ahora el panel de control del radiotelescopio CLEA. Una ventana al centro muestra el radiotelescopio en cuestión, con una gran pantalla orientable, la que oficia de antena recogiendo las ondas de radio para enviarlas al receptor.
 - El Tiempo Universal (UT) y el Tiempo Sidéreo Local (Local Sidereal Time) para tu precisa ubicación aparecen en los grandes displays de la izquierda (ver Figura 4 en la página).
 - Las coordenadas ecuatoriales a las que el radiotelescopio apunta, ascensión recta (**Right Ascension**) y declinación (**Declination**), aparecen en los grandes displays de abajo (ver Figura 4 en la página).
2. Justo debajo del display de declinación aparece un botón con el nombre de **View** (ver Figura 4 en la página). Clickea sobre el botón **View**, y en el centro de la pantalla aparecerá un mapa de todo el cielo, con identificación de las principales coordenadas.
 - Un pequeño cuadrado amarillo te mostrará el punto adónde el radiotelescopio apunta.
3. Puedes desplazar el punto donde el radiotelescopio apunta simplemente cliqueando y manteniendo apretado alguno de los botones **N-E-S-W** que aparecen en el lado izquierdo del panel. Inténtalo y observa cómo el punto amarillo que representa adónde el radiotelescopio apunta, se va desplazando en el cielo.
 - Los displays de las coordenadas también cambiarán.
 - También puedes variar la velocidad a la que el radiotelescopio se desplaza si modificas la correspondiente velocidad de desplazamiento (**Slew Rate**) abajo a la izquierda. Intenta llevarlo a 100, y verás cuán rápido puedes mover el radiotelescopio hacia cualquier lugar del cielo.
4. Puedes mover el radiotelescopio de otras dos maneras:
 - Clickeando sobre el botón **Set Coordinates** que aparece al centro de la parte de abajo del panel.
 - Seleccionando directamente el objeto deseado a partir de abrir la opción **Hot-List** que aparece en la barra de menú en la parte de arriba de la ventana. Dado que esta última forma es muy práctica, te recomendamos que uses **Hot-List** para este ejercicio.
5. El radiotelescopio posee un motor de seguimiento (**tracking motor**) especialmente diseñado para mantenerlo apuntando al mismo punto del cielo mientras que la Tierra se mueve. Hasta ahora dicho motor permanece apagado (**off**), y aún si no estás moviendo al radiotelescopio con los botones **N-E-S-W**, igual verás que el display que muestra la ascensión recta está variando, simplemente porque la propia rotación de

la Tierra hace que el punto del cielo donde el radiotelescopio apunta se vaya desplazando. Para solucionar este inconveniente debes encender el motor de seguimiento. Debajo de los displays de los tiempos a la izquierda del panel aparece un botón denominado **Tracking**. Si cliques sobre él, verás que la palabra **on** (encendido) aparece al lado del botón, y también verás que el display de ascensión recta deja de variar. El telescopio está ahora apuntando “fijo” a cualquier punto del cielo (es decir, desplazándose de manera tal que los objetos del cielo permanecen en su mira como si no se moviesen con la rotación de la Tierra).

6. Ya estás pronto para recibir las señales de tu primer púlsar.

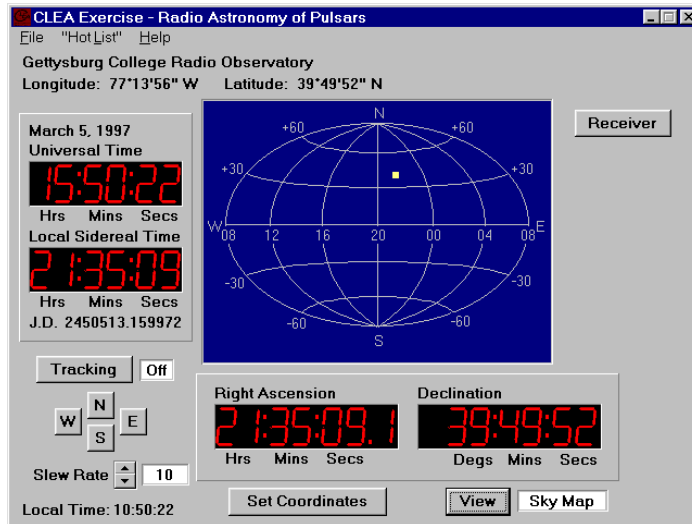


Figura 4: Vista del cielo completo

Parte 2: Observación de un púlsar con un receptor de radio mono-canal

Empezaremos por familiarizarte con el receptor y las características generales de los púlsares. En esta parte del ejercicio apuntarás el radiotelescopio a un púlsar moderadamente intenso, y mediante el uso de un receptor de radio con display gráfico, observarás la señal de radio pulsante recibida para tener una primera idea de sus características generales. Las ondas de radio que recibimos de los púlsares se caracterizan por tener pulsos escarpados de corta duración, que son muy estables en cuanto al período de repetición, y de períodos que van desde unas pocas centésimas de segundo hasta varios segundos. La intensidad de los pulsos individuales varía un poco, de manera aleatoria como luego veremos, pero la intensidad general de las señales recibidas depende fuertemente de la frecuencia a la que estamos observando. Nuestro receptor de radio puede ser sintonizado a cualquier frecuencia particular entre 400 y 1400 megahertzios (MHz). Usaremos esta posibilidad para ver, de forma cualitativa, cómo la intensidad de la señal de un púlsar varía con la frecuencia de recepción.

1. Queremos apuntar el radiotelescopio al púlsar **0628-28**. Utilizaremos la opción **Hot List** para mover el radiotelescopio a las coordenadas que corresponden. La opción **Hot List** está ubicada en la barra de menú. Cliques y aprieta sobre **Hot List** para poder ver el correspondiente menú, y elige **View/Select from List**. Cliques sobre el púlsar deseado **0628-08** (el nombre es el que aparece en la columna de más a izquierda), y luego cliques sobre el botón **OK** de más abajo.

- Luego de requerir tu aprobación, el radiotelescopio se empezará a desplazar. Verás que el punto amarillo sobre el mapa del cielo también se desplaza, y el display de las coordenadas varía hasta que el radiotelescopio queda finalmente detenido apuntando al objeto seleccionado.
- En el renglón que sigue anota la ascensión recta (**RA**) y la declinación (**Dec**) a la que el telescopio quedó apuntando:

RA _____ Dec _____

2. Ahora que la gran antena está apuntando en la dirección correcta puedes encender el receptor de radio. Clickea sobre el botón **Receiver** en la parte superior derecha del panel de control del radiotelescopio.

- Se abrirá entonces una nueva ventana rectangular que a la derecha contiene los controles de tu receptor, y a la izquierda muestra un display gráfico de la intensidad de la señal recibida versus el tiempo (ver Figura 5).
- La frecuencia del receptor es la que se indica en la ventana de más arriba (entre **Freq MHz** y **Freq Incr.**). De inicio es 600,00 MHz, y así debes dejarla por ahora. Más adelante, cuando debas sintonizar el receptor a diferentes frecuencias, usarás los botones ubicados a ambos lados. Un ajuste fino se obtiene mediante un pequeño incremento de la frecuencia, lo que se consigue con el botón de la derecha (**Freq Incr.**). El botón de la izquierda (**Freq MHz**) es el que permite el cambio de la frecuencia, según los incrementos determinados por el anterior botón. También hay botones que permiten cambiar las escalas horizontal y vertical del display gráfico.

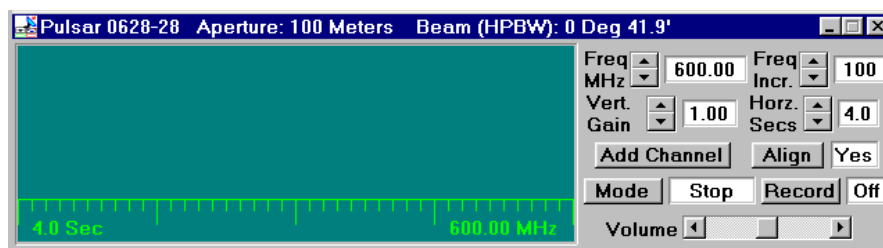


Figura 5: Panel de control del receptor

3. Vamos a observar ahora cómo luce en particular la señal del pulsar. Clickea sobre el botón **Mode** para que el receptor comience a funcionar (**Start**). Verás que a la izquierda de la ventana del gráfico comienza a aparecer un trazo continuo, representando cómo va variando en el tiempo la intensidad de la señal recibida. El trazo se compone de una señal de baja intensidad, que fluctúa aleatoriamente y corresponde al ruido estático de fondo, más algunos picos notorios de fuerte intensidad que es la propia señal del pulsar (si tu computadora es capaz de reproducir audio, entonces también podrás escuchar cómo tales pulsos suenan, como si estuvieras escuchando una estación de radio cualquiera). Pon especial atención a la regularidad con que tales pulsos se repiten (tanto en la pantalla como en el sonido).

4. Clickea de nuevo en el botón **Mode** para apagar (**turn off**) el receptor. Observa que para que el receptor efectivamente se apague se necesario que el barrido en curso se complete.

5. Veamos ahora qué hacen los demás controles. De nuevo enciende (**Start**) el receptor. Fíjate cómo va cambiando el trazo a medida que varías la ganancia vertical (**Vert. Gain**) del receptor, según clickeas sobre los botones de flechas para arriba o para abajo. Esto es muy similar al control de volumen de una radio, excepto que en este caso solo se modifica el nivel de la gráfica de la pantalla.

- Cuando la ganancia vertical aumenta (se la puede llevar hasta 8), la amplitud del trazo también es más grande, por lo que tanto el ruido estático de fondo como la señal del pulsar se amplifican.
- Cuando la ganancia vertical disminuye (se la puede bajar hasta 0,25), la amplitud el trazo se achica, y pudiera ser que los pulsos apenas se vieran. Descubrirás que el mejor valor para la ganancia vertical es el que permite tener los pulsos más altos pero sin llegar a tocar el borde superior de la pantalla.
- Anota a continuación el valor de ganancia vertical que piensas sea el mejor: . Tal valor será distinto según el pulsar observado, y también dependerá del tiempo de barrido (**Horz. Secs**) al que estés trabajando (hasta ahora, debería ser 4,0).

6. Variemos ahora el tiempo de barrido (**Horz Secs**). *Este control solo puede ser variado si el receptor está apagado.* Clickea el botón **Mode** para apagar el receptor (**Stop**), y cuando el trazo se detenga, con el botón

de la flecha para abajo lleva el tiempo de barrido a 2. Esto hará que el trazo gráfico demore 2 segundos exactos en completar el barrido horizontal en la pantalla. Enciende de nuevo al receptor.

- Verás ahora que el trazo se mueve más rápido en la pantalla (al doble de velocidad que antes).
- También verás que los pulsos parecen más débiles. Esto es debido a que ahora el receptor permanece menos tiempo recogiendo la señal de cada pulso (los astrónomos dirían que el “tiempo de integración” es ahora menor) y por tanto la intensidad obtenida es también menor.

7. Intenta ahora llevar el tiempo de barrido a 0,5 segundos. Los pulsos parecen tan anchos que hasta es dificultoso distinguirlos, y quizás tengas que aumentar la ganancia vertical para poder hacerlos aparecer.

8. Cambia el tiempo de barrido a 16 segundos. El trazo se mueve ahora más lentamente a través de la pantalla, y dado que el receptor está recogiendo *más* señal por su paso más lento, las señales aparecen más fuertes. Tendrás que bajar la ganancia vertical para evitar que los máximos de los pulsos queden fuera de la pantalla.

9. Vamos a proceder ahora a medir el período del púlsar. Posiciona la ganancia vertical en 4, el tiempo de barrido en 4 segundos, y la frecuencia de trabajo en 600 MHz. Enciende el receptor. Déjalo funcionar durante unos pocos segundos para ver los pulsos, y apágalo de nuevo. Cuando el trazo deje de moverse podrás medir en la pantalla el tiempo entre cada pulso.

- La computadora tiene cursores de medición para ayudarte. Manteniendo apretado el botón *izquierdo* del ratón aparece una línea vertical azul en la pantalla del gráfico que tú puedes mover mientras mantengas apretado tal botón. Posiciona dicha línea sobre el medio de algún pulso que aparezca en el lado izquierdo del gráfico. Observa los números azules sobre la pantalla que te van indicando el tiempo (en segundos) en el que tal pulso arribó.
- Ahora necesitas conocer el tiempo de arribo del siguiente pulso (el tiempo aumenta hacia la derecha). Para ello, manteniendo apretado el botón *derecho* del ratón, aparecerá ahora otra línea vertical en la pantalla, esta vez de color blanco. Posiciónala en el centro del siguiente pulso, y otra vez obtendrás en números blancos sobre la pantalla el correspondiente tiempo de arribo (ver Figura 6). En los renglones de más abajo anota el tiempo de arribo de ambos pulsos. La diferencia entre ambos tiempos es sencillamente el período del púlsar.

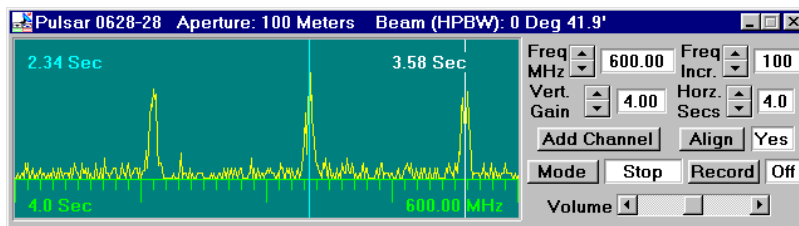


Figura 6: Medición del período de un púlsar

- Tiempo del primer pulso (T_1) _____
- Tiempo del siguiente pulso (T_2) _____
- Período del púlsar ($T_2 - T_1$) _____

10. Una manera más exacta de obtener el período del púlsar es medir el tiempo transcurrido entre la ocurrencia de varios pulsos y dividirlo por la cantidad total de pulsos recibidos durante ese lapso.

- Para poder ver muchos pulsos en la misma gráfica, posiciona el tiempo de barrido en 16 segundos, baja la ganancia vertical uno o dos escalones, y enciende de nuevo el receptor. Mide el

tiempo total que demoran 10 pulsos en aparecer, y usa este valor para calcular el período del púlsar. Verifica si obtienes el mismo valor que antes. Anota tus mediciones más abajo.

- Tiempo del primer pulso (T_0) _____
- Tiempo después de 10 períodos (T_{10}) _____
(esto es, tiempo de arribo del 11^{vo} pulso)
- Período del púlsar = $(T_{10} - T_0) / 10$ _____

11. Veamos ahora a la relación que hay entre el período del púlsar y la frecuencia de recepción. Puedes sintonizar el receptor a diferentes frecuencias y luego medir el correspondiente período (usando cualquiera de los dos métodos ya vistos). Dado que la intensidad de la señal varía con la frecuencia, quizás tengas que ir ajustando la ganancia vertical o el tiempo de barrido para que los pulsos aparezcan claramente con cada nueva frecuencia.

Con cualquiera de los métodos que uses para medir los períodos, completa la siguiente tabla:

Frecuencia	Tiempo del primer pulso	Tiempo del último pulso	Número de periodos	Período del púlsar
400 MHz				
600 MHz				
800 MHz				
1000 MHz				
1200 MHz				
1400 MHz				

12. De acuerdo a los resultados que acabas de obtener, concluye brevemente cómo varía el período de un púlsar según la frecuencia de observación:

13. ¿Cómo varía la intensidad de señal de un púlsar con la frecuencia? Ciertamente que varía, dado que para distintas frecuencias tú has tenido que ajustar la ganancia vertical y el tiempo de barrido. Pero para poder descubrir de manera sistemática cómo varía realmente, vamos a mantener dichos controles sin cambiar – por ejemplo, fijos en 4 para la ganancia vertical, y en 4 segundos para el tiempo de barrido – y solo ir disminuyendo la frecuencia desde 1400 MHz hasta 400 MHz. Responde las siguientes preguntas:

- ¿Es la señal del púlsar más fuerte a frecuencias altas o bajas? _____
- Si estamos buscando púlsares en el cielo, o queremos medir el período de un púlsar nunca antes medido, ¿cuál sería la mejor frecuencia para sintonizar el receptor? _____ MHz.
- La razón justificando esta frecuencia es:

14. Puedes ahora cerrar la ventana del panel de control del receptor (clickea sobre la **X** de arriba a la derecha) y así retornar al panel de control del radiotelescopio para poder investigar otros púlsares.

Parte 3: Los períodos de los distintos púlsares

Veremos ahora los períodos de otros púlsares. El corto período del púlsar que antes observamos es llamativo, especialmente si tenemos en cuenta que dicho período corresponde al tiempo total que le lleva a la estrella dar un giro completo. ¡Imagina lo que sería un objeto tan masivo como nuestro Sol rotando una vez por segundo! Los pulsos recibidos de cada púlsar son propios de cada uno, tanto por sus períodos como en sus intensidades.

1. Sabiendo cómo direccionar el radiotelescopio y cómo operar el receptor, mide los períodos de los distintos púlsares que aparecen listados en la tabla que sigue. También presta atención a las respectivas intensidades de señal. Intenta establecer un ranking para los púlsares observados en base a la intensidad de sus señales, ordenándolos de mayor a menor. Anota tus resultados en dicha tabla.

Púlsar	Frecuencia	Tiempo del primer pulso	Tiempo del último pulso	Cantidad de pulsos recibidos	Período	Intensidad relativa
2154+40						
0740-28						
0531+21 Nebulosa del Cangrejo						

2. De manera general, la rotación de un púlsar se va enlenteciendo a medida que envejece. Según tus propias mediciones, ordena por edad, del más joven al más viejo, los siguientes cuatro púlsares: 0628-28, 2154+40, 0740-28, y 0531+21. Anota tus resultados en el siguiente cuadro:

EL MAS JOVEN	_____
2	_____
3	_____
EL MAS VIEJO	_____

Parte 4: Medición de la distancia a un púlsar usando dispersión

A. Método

La mayoría de los púlsares no pueden ser observados con telescopios ópticos, por lo que tampoco se puede utilizar su magnitud absoluta para determinar su distancia. ¿Cómo hacemos entonces para conocer su distancia? Una forma idónea se basa en usar el fenómeno de la *dispersión*. Todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo por supuesto las ondas de radio, viajan a la misma velocidad *en el vacío*. Esta velocidad es la velocidad de la luz:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ metros/segundo}$$

Sin embargo, el espacio interestelar no es el vacío. En promedio, en cada centímetro cúbico del medio interestelar hay algunos átomos y también algunos electrones libres. Esta escasísima materia alcanza para que la propagación de las ondas electromagnéticas se enlentezca un poco. Cuanto más baja la frecuencia, menor es la velocidad a la que la radiación se propaga en el medio interestelar. A pesar que se trata de un efecto muy menor, en el caso de un púlsar ello se traduce en que los pulsos de frecuencias altas arriban una

fracción de segundo antes que los de frecuencias bajas. Podrás fácilmente ver este fenómeno usando nuestro radiotelescopio, dado que el mismo es capaz de recibir simultáneamente señales de hasta tres frecuencias diferentes, presentándolas en tres displays alineados verticalmente.

Es posible determinar la distancia a un púlsar midiendo los tiempos de arribo de sus pulsos a diferentes frecuencias, siempre y cuando la velocidad de propagación de las ondas de radio a través del medio interestelar sea conocida. De hecho, a partir de lo predicho por la exitosa teoría electromagnética hace ya más de 100 años, conocemos muy bien cómo la frecuencia afecta la velocidad de la radiación electromagnética que se propaga a través de un determinado medio.

B. Un ejemplo en nuestra vida corriente

Simplificando un caso que no tiene nada que ver con el electromagnetismo, podemos ver cómo los tiempos de arribo permiten determinar la distancia recorrida por dos atletas (A y B) durante una carrera. El corredor A corre a una velocidad constante de 5 kilómetros por hora, mientras que el corredor B lo hace a una velocidad constante de 10 kilómetros por hora.

No conocemos de antemano desde cuán lejos ellos vienen corriendo, pero en cambio conocemos sus velocidades y también que empezaron a correr al mismo tiempo. Es fácil ver que la *diferencia* en los tiempos de llegada a la meta depende de la longitud total de la carrera (ver Figura 7). Supongamos que la carrera es de 10 kilómetros: entonces el corredor A termina en 2 horas y el corredor B en 1 hora, por lo que hay una diferencia entre ambos de 1 hora. Si la carrera fuese de 20 kilómetros, el corredor A demora 4 horas y el corredor B 2 horas, por lo que ahora la diferencia entre ambos es de 2 horas. Por lo tanto, es claro que la distancia total de la carrera se puede determinar a partir de la diferencia en los tiempos de llegada.

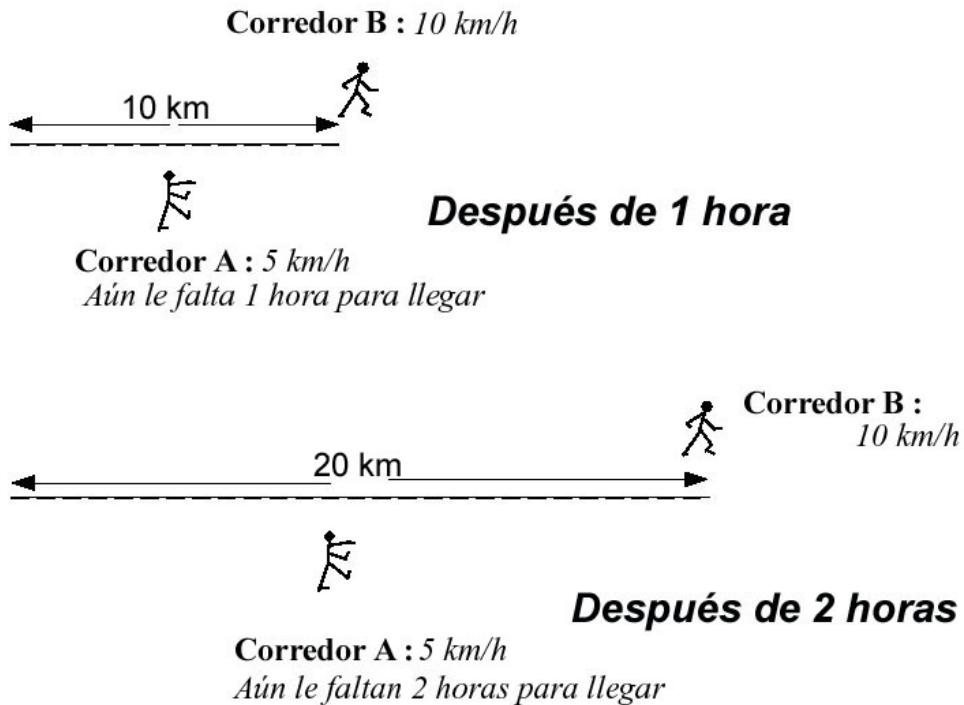


Figura 7: Ilustración del ejemplo

Para poder calcular matemáticamente la distancia total recorrida (L), es necesario expresar el tiempo total empleado por el corredor A (T_A) como el cociente entre la distancia total recorrida y la velocidad constante a la que se desplazó (V_a):

$$T_A = L/V_a$$

Análogamente, el tiempo total empleado por el corredor B (T_B) resulta igual a la distancia total recorrida dividida por la velocidad constante a la que se desplazó (V_B):

$$T_B = L/V_b$$

La diferencia de los tiempos totales empleados por cada corredor resulta entonces:

$$T_B - T_A = L/V_b - L/V_a = L\left(\frac{1}{V_b} - \frac{1}{V_a}\right)$$

Finalmente, la distancia desconocida resulta:

$$L = \frac{T_B - T_A}{\left(\frac{1}{V_b} - \frac{1}{V_a}\right)}$$

Aplica esta ecuación a los siguientes valores tomados de nuestro ejemplo de los corredores:

$$V_a = 5 \text{ km/hr}$$

$$V_b = 10 \text{ km/hr}$$

$$T_B - T_A = 1 \text{ hora en el primer caso, ó 2 horas en el segundo}$$

y para una diferencia de 1 hora obtendrás $L = 10 \text{ km}$, mientras que para 2 horas obtendrás $L = 20 \text{ km}$.

C. La fórmula de la dispersión en el medio interestelar

Las leyes de física nos permiten conocer la velocidad de la radiación electromagnética en el medio interestelar y, en consecuencia, poder obtener una fórmula similar a la que obtuvimos más arriba para calcular la distancia a un púlsar en función del retardo en los tiempos de arribo entre pulsos recibidos a distintas frecuencias. Las frecuencias más bajas viajan a velocidades menores, y por tanto arriban más tarde. Por otro lado, el número de partículas cargadas por unidad de volumen en el medio interestelar – la densidad de electrones libres – también afecta la propagación, incrementando el atraso al aumentar la densidad. En general, la velocidad de la radiación electromagnética en el medio interestelar (v) es proporcional al cuadrado de la frecuencia (f) dividido por la densidad de electrones libres (n_e), siendo la ecuación:

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

Para los propósitos de este ejercicio asumiremos que la densidad de electrones libres en el medio interestelar es uniforme y tiene el valor de $n_e = 0,03 \text{ electrones/cm}^3$ (este número ha sido obtenido a partir de la observación de púlsares cuyas distancias eran conocidas a partir de otros métodos). Por lo tanto,

$$v = \frac{f^2}{124,5}$$

En base a esta suposición, y observando que siendo T_1 el tiempo de arribo (en segundos) de un pulso recibido a la frecuencia f_1 (en MHz), y T_2 el tiempo de arribo (en segundos) de un pulso recibido a la frecuencia f_2 , entonces la distancia D al púlsar (en parsecs) resulta expresada de manera similar al caso de los corredores, reemplazando la velocidad de los mismos por la correspondiente velocidad de la radiación a través del medio electromagnético:

$$D = \frac{T_2 - T_1}{124,5 \left[\left(\frac{1}{f_2} \right)^2 - \left(\frac{1}{f_1} \right)^2 \right]}$$

Por lo tanto, para determinar la distancia a un púlsar simplemente tenemos que medir los tiempos de arribo de un pulso a dos frecuencias distintas. Esto es lo que a continuación haremos para los púlsares ya observados.

D. Medición de la distancia a los púlsares

1. Usando el panel de control de tu radiotelescopio, posicónalo hacia el púlsar **0628-28**. Abre la ventana de control del receptor, ajusta la ganancia vertical en 4, el tiempo de barrido en 4 segundos, y la frecuencia en 400 MHz. Enciende ahora el receptor y verifica que efectivamente estás recibiendo pulsos notorios.

2. Ahora apaga el receptor. Vamos a agregar un segundo receptor. Clickea sobre el botón **add channel** y el display de un segundo receptor aparecerá exactamente alineado debajo del display del receptor original. Lleva los controles de la ganancia vertical, el tiempo de barrido y la frecuencia a valores idénticos a los del primer receptor.

3. Posiciona el botón **Freq Incr.** del segundo receptor en **10 MHz**, de forma tal de posibilitar que éste receptor pueda ser sintonizado en incrementos de 10 MHz por vez.

4. Enciende ambos receptores clickeando sobre los respectivos botones **Mode** ubicados en cada receptor. Ambos receptores empezarán a recibir señales.

- Dado que ambos receptores están recibiendo la misma señal a la misma frecuencia, los dos trazos deberían ser exactamente iguales (excepto, quizás, por un muy pequeño ruido aleatorio en cada uno de los receptores por separado).

¡Cómo varían los tiempos de arribo de los pulsos con la frecuencia? Vamos a averiguarlo.

5. Con ambos receptores trabajando, sintoniza el segundo receptor a 410 MHz. ¿Notas alguna diferencia en los tiempos de arribo de los pulsos de la señal de mayor frecuencia? Espera durante unos pocos segundos.

6. Sintoniza ahora el segundo receptor a 420 MHz, y luego a 430 MHz. ¿Te resulta claro cómo los tiempos de arribo van variando con el aumento de la frecuencia?

- Sintoniza ahora el segundo receptor en incrementos de 10 MHz hasta llevarlo a 600 MHz, pero cada poco deteniéndote para ver cómo van cambiando los barridos.

¿Qué puedes decir sobre los tiempos de arribo correspondientes a pulsos de frecuencias más altas? ¿Arriban ellos más tarde o más temprano que los pulsos de frecuencias más bajas? Escribe a continuación tu propia conclusión de manera concisa.

7. Apaga ambos receptores con el botón **Mode**. Abre ahora un tercer receptor usando el botón **add channel**, sintonízalo a 800 MHz, con la ganancia vertical en 4 y el tiempo de barrido en 4 segundos.

8. Enciende los tres receptores.

¿Está el comportamiento observado en los tiempos de arribo de los pulsos para cada frecuencia en consonancia con lo que tú hubieses esperado? Explica tu respuesta.

E. Medición de los tiempos de arribo de los pulsos

Estamos ahora en condiciones de medir los tiempos de arribo de los pulsos. Lo primero que haremos es poner a resguardo los distintos registros obtenidos, y luego analizarlos en una ventana separada.

1. Apaga los receptores con el botón **Mode** y verifica que la frecuencia de cada uno sea, respectivamente, 400, 600, y 800 MHz, mientras que además en todos ellos la ganancia vertical sea 4, y el tiempo de barrido sea 4 segundos.

2. Clickea sobre el botón **Record** para habilitar el almacenamiento de los registros, y luego enciende los receptores con el botón **Mode**.

3. Permite que los receptores escaneen durante cinco o seis barridos (aunque solo los primeros cuatro serán almacenados). Apaga luego los receptores.

- La computadora te informará que 1600 valores (**data points**) han sido almacenados.
- Te dirá a continuación el nombre del objeto para que lo verifiques. Clickea sobre **OK**.
- Aparecerá entonces una nueva ventana (ver Figura 8) mostrándote información acerca del objeto que acabas de observar, incluyendo la fecha en que el registro empezó (**Data Start**) expresada en Días Julianos, las frecuencias de operación y ganancias verticales de cada receptor, y el tiempo entre cada muestreo de señal (**Delta T**) en microsegundos.
- Tú no puedes editar esta información, dado que esta ventana es solo *de lectura*.

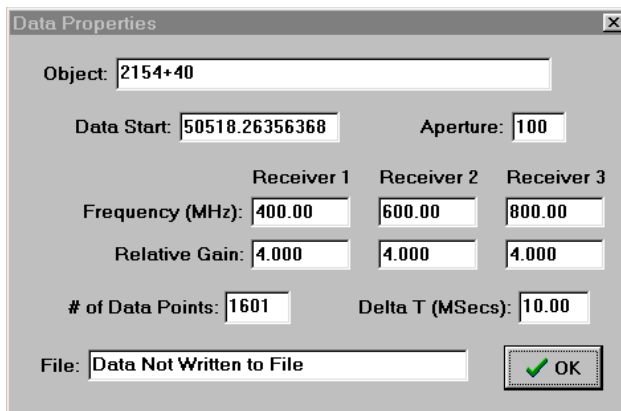


Figura 8
La ventana que aparece recopilando la información

4. Clickea sobre OK. La computadora te preguntará si deseas resguardar la información conseguida o proceder a analizarla de inmediato. Al clickear sobre el botón **yes**, la computadora te pide que le des un nombre para identificar el archivo donde almacenará la información. Si lo deseas, también puedes cambiar tal nombre. Anota el nombre del archivo que has creado en el renglón que sigue:

NOMBRE DEL ARCHIVO _____.

5. Habiendo resguardado la información en el archivo, procederemos ahora a analizarla. Primero apaga los receptores clickeando sobre la **X** en la parte de arriba a la derecha del panel.

6. En el menú **File** del panel de control principal, elige **Run...Data Analysis**. Si tú no has cerrado el archivo con la información almacenada, entonces debería aparecer una ventana mostrando la información general contenida en tal archivo (de lo contrario, se te indicará que uses el menú **Files...load** para que primero determines el archivo de dónde obtener la información, eligiéndolo por su nombre).

7. Clickea sobre el archivo que contiene la información con la que quieres trabajar. Cuando el archivo correcto esté pronto para su análisis verás que aparecerá una ventana de medición con los tres trazos identificados. Esta ventana es similar a la de los tres receptores, salvo que ahora los displays están fijos y muestran los registros ya obtenidos.

- Puedes ubicar líneas de medición, y desplazar a voluntad los displays hacia adelante y atrás.
- Experimenta con los botones de “paneo” horizontal, que son los permiten desplazar los trazos hacia la derecha e izquierda.
- Experimenta con los botones de “zoom”, que son los que permiten aumentar o disminuir la escala horizontal de los trazos.

8. Vamos ahora a medir los tiempos de arribo de los pulsos a las tres frecuencias que tú has registrado. Aumenta (**zoom in**) la escala hasta que puedas ver dos pulsos en los displays. Esta gran amplificación te permitirá medir los tiempos de arribo de manera más cómoda. Panea los trazos para que en el display que corresponde a la frecuencia de 400 MHz (el de más arriba) un pulso te quede ubicado hacia la parte derecha. Deberías ver el mismo pulso arribando antes (esto es, un poco desplazado hacia la izquierda) en el display que corresponde a 600 MHz, y arribando más temprano todavía en el display de 800 MHz.

9. Ahora podemos medir. Manteniendo apretado el botón izquierdo del ratón a la vez que desplazas el ratón sobre cualquiera de los displays verás que también se desplaza una línea vertical. Posiciona la línea en el centro del pulso de la frecuencia de 400 MHz. El correspondiente tiempo de arribo aparece expresado en la ventana azul a la derecha del display. De igual forma, coloca líneas verticales en el centro de los pulsos de los displays de 600 y 800 MHz.

10. Anota el tiempo de arribo del mismo pulso a las tres frecuencias observadas en la tabla que sigue.

Púlsar 0628-28 - Información de la dispersión medida

T ₄₀₀	
T ₆₀₀	
T ₈₀₀	

11. Usando la fórmula antes obtenida para la dispersión de las ondas de radio, estamos ahora en condiciones de calcular la distancia al púlsar, a partir de la *diferencia* en los tiempos de arribo para dos frecuencias distintas. Como en realidad dispones de tres pares distintos de frecuencias (400 y 600 MHz, 400 y 800 MHz, y 600 y 800 MHz) puedes calcular la distancia mediante cualquiera de estas tres alternativas por separado, y así verificar que lo hiciste bien.

$$D = \frac{T_2 - T_1}{124,5 \left[\left(\frac{1}{f_2} \right)^2 - \left(\frac{1}{f_1} \right)^2 \right]}$$

Púlsar 0628-28

Medición de la distancia mediante el método de la dispersión

f_1	f_2	$T_2 - T_1$	$(1/f_2)^2 - (1/f_1)^2$	D (pc)
600	400			
800	400			
800	600			

Si no has cometido ningún error numérico, entonces tus tres resultados deberían coincidir en al menos las dos primeras cifras significativas, y andar en el orden de los 1000 parsecs. Verifica tus cálculos y tus mediciones en caso de que apareciese alguna discrepancia.

Parte 5: Determinación de la distancia al Púlsar 2154+40 aplicando las técnicas que acabas de aprender

A continuación determinemos la distancia al Púlsar 2154 +40 (cuyas coordenadas están guardadas en el menú **hot list**). Apunta con el radiotelescopio a dicho púlsar. Obtiene los correspondientes registros a tres frecuencias a tu propia elección, y resguarda la información obtenida. Analiza los datos para determinar la distancia al púlsar. La siguiente tabla te ayudará a organizar y analizar tu información.

Nombre del archivo con la información de 2154+40 _____.

Frecuencias utilizadas (MHz)

1. _____
2. _____
3. _____

Púlsar 2154+40 - Información de la dispersión medida

$T_{\text{freq 1}}$ _____
 $T_{\text{freq 2}}$ _____
 $T_{\text{freq 3}}$ _____

$$D = \frac{T_2 - T_1}{124,5 \left[\left(\frac{1}{f_2} \right)^2 - \left(\frac{1}{f_1} \right)^2 \right]}$$

Púlsar 2154-40

Medición de la distancia mediante el método de la dispersión

f_1	f_2	$T_2 - T_1$	$(1/f_2)^2 - (1/f_1)^2$	D (pc)

Ejercicios opcionales que también puedes hacer con este radiotelescopio

1. La distancia a púlsares de período cortos

Usando el método de la dispersión, mide la distancia a la Nebulosa del Cangrejo (**Crab Nebula**) y al Púlsar 0740-28. Puedes aplicar el método que has aprendido en este ejercicio, pero presta especial en no perder de vista la dispersión del *mismo* pulso a distintas frecuencia – es decir, en no confundir un pulso con otro. Sugerencia: empieza sintonizando los tres receptores a la misma frecuencia, y luego ve variando gradualmente la frecuencia en dos receptores en pequeños incrementos (10 MHz o menos) de forma tal de no perder de vista cómo los pulsos se van dispersando.

2. Medición del ancho del haz del radiotelescopio

Simplemente medimos qué tiempo le lleva a la señal de un púlsar decrecer a la mitad cuando el motor de seguimiento (**tracking**) del radiotelescopio ha sido apagado. Sabiendo que la Tierra gira un grado cada 4 minutos, a partir de tal tiempo medido puedes entonces conocer el ángulo que el púlsar tuvo que desplazarse en relación al centro del radiotelescopio para que la intensidad de la señal recibida decayese al valor de “mitad de potencia”. Este ángulo es la mitad del *ancho del haz de mitad de potencia* (**half-power beam width**) del radiotelescopio, dado que tal atributo se mide simétricamente a ambos lados del centro del mismo.

Procedimiento

- Elige un púlsar intenso y de período relativamente corto, como por ejemplo 0740-28.
- Apunta el radiotelescopio al púlsar y verifica que el motor de seguimiento está encendido (**tracking on**).

- Enciende el receptor y ajusta la ganancia vertical de forma tal que la señal *promedio* del púlsar alcance un valor alrededor de la mitad de altura del display (como la altura de los pulsos varía de manera aleatoria, tendrás que juzgar esto directamente “a ojo”).
- Luego apaga el motor de seguimiento y toma debida nota (en tu propio reloj) del momento exacto en que lo hiciste.

Horario en que el motor de seguimiento se apagó (**Tracking off**): _____.

- Observa cuidadosamente y también “a ojo” estima el momento en que la señal promedio de los pulsos alcanza la mitad de su valor original. Toma debida cuenta del momento exacto en que esto ocurrió. Puedes luego encender nuevamente el motor de seguimiento.

Horario en que la señal alcanzó la mitad de su valor original: _____.

- Usa estos dos horarios para calcular el ancho del haz de mitad de potencia del radiotelescopio, en minutos de arco ($60' = 1^\circ$).
- Ancho del haz de mitad de potencia (**half-power beam width**): _____.

3. Medición del decaimiento del spin de un púlsar

A medida que los púlsares van envejeciendo también su rotación se va haciendo cada vez más lenta, como consecuencia de la pérdida de energía que experimentan. Con el radiotelescopio de este ejercicio puedes medir este efecto, aunque los detalles del método son demasiados complejos como para describirlos aquí. La idea básica es medir el período del púlsar en un determinado momento (el que se puede determinar usando el menú **Files...Date/time**), y luego volverlo a medir para un momento posterior. Dado que para medir el decaimiento del spin necesitas altísima precisión (del orden de una parte en 10^{15}), los dos momentos de medición deberán estar separados como mínimo por un año, de forma tal que los efectos acumulativos de tan minúsculos cambios puedan llegar a ser observables. Además, para obtener el período en cada uno de estos dos momentos con la exactitud requerida, no alcanza con calcular el promedio correspondiente a algunos pulsos sino entre varias decenas de miles de ellos. Esto solo puede ser hecho abarcando un tiempo total de observación de varios días, midiendo precisamente los tiempos de arribo, y calculando el número total de pulsos recibidos. En caso que tu instructor desee que tú lleves adelante este experimento, él te deberá proveer los particulares detalles del procedimiento.

4. Búsqueda de púlsares

El radiotelescopio puede ser operado en la modalidad de “tránsito”, esto es, con el motor de seguimiento apagado, de forma tal que el lugar del cielo al que el radiotelescopio apunta va variando según la rotación de la Tierra. De esta manera se podría ver cómo los púlsares aparecen y desaparecen cuando alguno de ellos “acierta” a pasar delante del radiotelescopio. Si el ancho del haz del radiotelescopio es demasiado pequeño, entonces le llevará mucho tiempo barrer todo el cielo en “tránsito” y por tanto encontrar púlsares de esta forma también será muy lento (y aburrido). Pero tu instructor puede hacer que el ancho del radiotelescopio tenga un ancho de haz bastante grande, y así tiene más sentido tratar de “descubrir” tantos púlsares como puedas. Esto puede ser un proyecto de largo plazo, dado que llevará más que el corto tiempo de un ejercicio normal de laboratorio. Más de 500 púlsares están incluidos en el catálogo de este ejercicio. A partir del conocimiento aproximado de las coordenadas de los púlsares que vayas “detectando”, podrás graficarlos en un mapa del cielo. ¿Están tales púlsares concentrados en alguna región particular del cielo? ¿Cuál es el significado de tal distribución?