

## 2 *Distancia al cúmulo de las Pléyades*

- OBJETIVOS**
- Observación simulada con un fotómetro fotoeléctrico.
  - Medida de magnitudes aparentes.
  - Obtención del diagrama H-R para las Pléyades.
  - Determinación de la distancia al cúmulo.

- MATERIAL**
- Programa CLEA de simulación de fotómetro.
  - Tablas de datos de estrellas de la secuencia principal.
  - Coordenadas de las estrellas del cúmulo.
  - Papel milimetrado opaco y transparente.

### 1 Introducción

En esta práctica se utiliza un fotómetro fotoeléctrico simulado perteneciente al proyecto CLEA<sup>1</sup> para medir las magnitudes aparentes  $UBV$  de estrellas del cúmulo de las Pléyades. A partir de estas medidas se construye un diagrama H-R y se compara con otro de magnitudes absolutas de estrellas de la secuencia principal. De esta manera se puede determinar el módulo de distancia a las Pléyades.

El programa de ordenador que se emplea es una simulación realista de un fotómetro colocado en un telescopio profesional de tamaño medio. Este telescopio está automatizado y el control se realiza desde un ordenador que nos permite apuntarlo al objeto de interés y efectuar seguimiento mientras realizamos medidas. Para cada observación se pueden seleccionar los filtros  $U$ ,  $B$  y  $V$  así como el tiempo de exposición o integración. El programa también convierte el ritmo de cuentas en magnitud aparente y proporciona una estimación de la calidad de la medida.

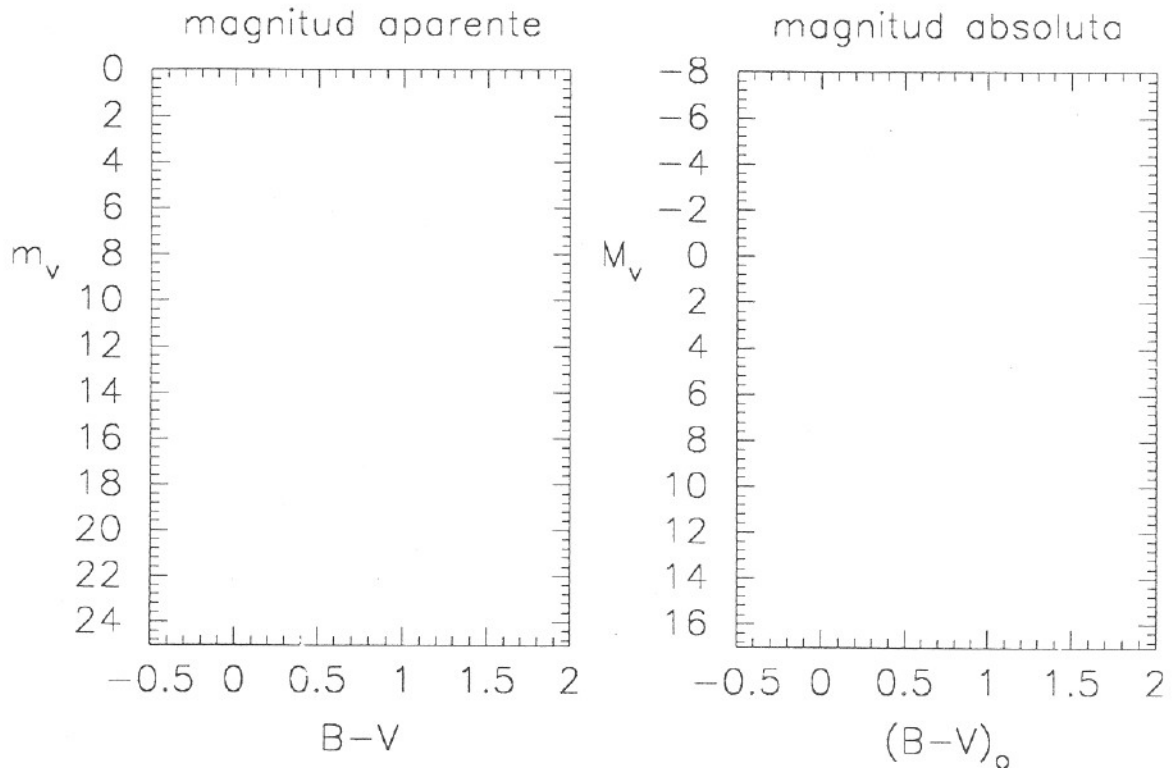
Se toman medidas de 24 estrellas en la región del cúmulo de las Pléyades. Se obtienen las magnitudes aparentes de cada estrella en cada filtro. Se asumirá que la distancia a estas estrellas es aproximadamente la misma. Este paso es necesario y razonable ya que todas las estrellas pertenecen al mismo cúmulo.

A partir de los datos obtenidos en la observación se construye un diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) que muestre la magnitud aparente de las estrellas del cúmulo  $m_v$  como función de su índice de color observado  $m_b - m_v = (B - V)$ . De momento se puede ir trazando los ejes del diagrama según el esquema de la figura 1 izda. en un papel milimetrado. Debe trazarse también

---

<sup>1</sup>desarrollado por el Department of Physics Gettysburg College bajo los auspicios de la National Science Foundation (<http://www.gettysburg.edu/project/physics/clea/CLEAhome.html>)

un diagrama similar en papel milimetrado transparente o mejor en una hoja de acetato (figura 1, dcha.). En este último representaremos un grupo de estrellas de la secuencia principal cuya magnitud absoluta  $M_v$  e índice de color intrínseco  $(B - V)_o$  son conocidos.



**Figura 1** Diagramas de Hertzsprung-Russell (H-R). En el de la izquierda se representará el obtenido para el cúmulo de las Pléyades, mientras que en el de la derecha (realizado sobre una hoja transparente) servirá para representar una secuencia principal. Nótese que los valores extremos del eje Y de los dos diagramas son diferentes pero que la escala es la misma.

Una vez contruidos los dos diagramas, si los superponemos y alineamos de forma que las estrellas de referencia de la secuencia principal se coloquen sobre la secuencia principal del cúmulo podremos determinar la relación entre magnitud aparente  $m$  y absoluta  $M$  de las estrellas del cúmulo (módulo de distancia  $m - M$ ). Esta relación nos proporciona inmediatamente la distancia  $d$  (en parsecs) ya que,

$$m - M = 5 \times \log d - 5 \Rightarrow d = 10 \times 10^{0.2 \times (m - M)}$$

por definición la magnitud absoluta es la que tendría una estrella si la observáramos a 10 pc de distancia.

## 2 Realización de la práctica

### 2.1 Manejo del programa

Se dan aquí unas instrucciones someras del uso del programa que simula el fotómetro y como obtener los datos. Si se necesita alguna aclaración o ayuda puede obtenerse del profesor. En principio el programa funciona en un ordenador PC compatible bajo MS Windows y tras ponerlo en marcha desde su icono lo primero que debe hacerse es registrarse (LOG IN). En la barra de menús puede encontrarse también un menú de ayuda (HELP) que se puede abrir y cerrar en cualquier momento.

A continuación se procede a abrir el observatorio pulsando con el ratón en la opción START del menú de inicio. Aparece una imagen central con una vista del cielo tal como se vería a través de un monitor con un telescopio profesional. A izquierda y derecha se encuentran controles y se mostrarán los resultados de nuestras medidas. Merece la pena emplear un rato en estudiar los controles disponibles:

#### Controles del telescopio

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| DOME                           | Abre y cierra la cúpula del observatorio. Si la cúpula está cerrada los controles no funcionan.   |
| TRACKING                       | Enciende y apaga el seguimiento del telescopio. Con el seguimiento en ON el telescopio gira en ángulo horario (montura ecuatorial) para contrarrestar el movimiento diurno de las estrellas debido a la rotación de la Tierra. Esto es necesario para tomar medidas porque si no el telescopio no sigue a la estrella y su luz no entra a través del diafragma del fotómetro. Apagando el seguimiento se observará que el campo al que apunta el telescopio varía y las estrellas se desplazan. |
| SLEW RATE                      | Regula la velocidad del telescopio en sus movimientos para adquirir las estrellas (apuntar el telescopio) de forma manual cuando se pulsan los controles N, E, S, W. Pulsando SLEW RATE de forma sucesiva puede seleccionarse 1, 2, 3, 4, 8 ó 16, siendo más rápido el movimiento cuanto mayor es el número: Se necesita una velocidad lenta para centrar la imagen con precisión y es más útil una velocidad rápida para cambiar de estrella.  |
| N, S, E, W                     | Son los controles de dirección. Pulsándolos una vez ( <i>click</i> ) el telescopio se pone en marcha hacia el norte, sur, este y oeste respectivamente. Un piloto rojo, cercano al botón pulsado, se enciende si el telescopio se está moviendo y este movimiento continua hasta que se vuelve a pulsar dicho botón u otro para mover el telescopio en otra dirección.  |
| RIGHT ASCENSION<br>DECLINATION | Muestra las coordenadas ecuatoriales del lugar al que apunta el telescopio, es decir del centro del campo mostrado en la imagen. La ascensión recta se muestra en horas, minutos y segundos y la declinación en grados, minutos y segundos.   |

- MONITOR** Permite cambiar la zona de cielo visible en el monitor. En modo de buscador (FINDER) tenemos un campo amplio útil para encontrar la estrella problema. El cuadradito rojo indica el campo que tendremos en el modo más reducido PHOTOMETER que permite centrar la estrella con precisión y tomar medidas. Debajo del botón MONITOR aparece el tamaño del campo mostrado en la imagen.
- SET COORDINATES** Si la cúpula está abierta se puede usar este botón para introducir unas coordenadas y apuntar el telescopio a esa posición. El telescopio se mueve al pulsar OK.

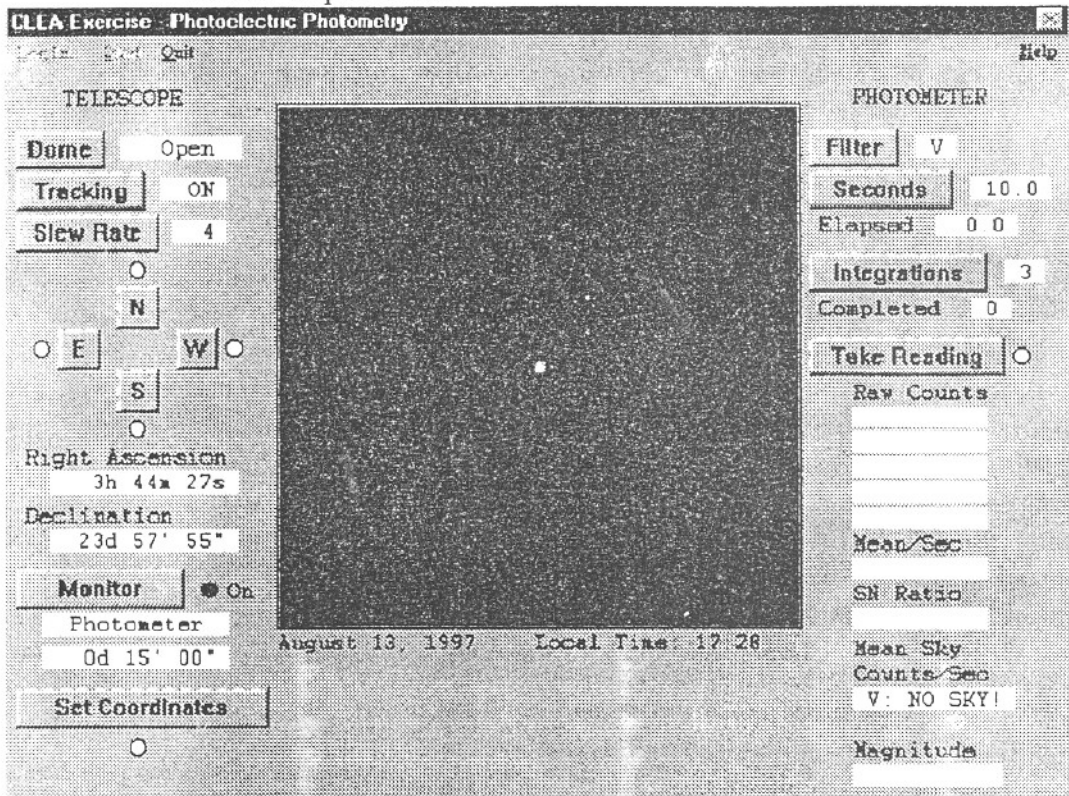


Figura 2 Ventana del fotómetro.

### Controles del fotómetro

- FILTER** Permite elegir el filtro a utilizar. Al pulsar el botón de forma sucesiva, el filtro va cambiando entre las tres posiciones *U*, *B* y *V*.
- SECONDS** Sirve para seleccionar la duración de una exposición o tiempo de integración durante el cual el fotómetro está recibiendo y contando los fotones que nos llegan de la estrella problema. Se puede variar entre 0.1 y 10 s. Cuanto más débil es una estrella se necesita un mayor tiempo de integración para obtener una medida precisa.
- INTEGRATION** Ajusta el número de medidas repetidas que se realizan. Estas medidas múltiples se promedian para dar el resultado final. Las medidas repetidas permiten mejorar la precisión.

|   |   |
|---|---|
| TAKE READING  | Pulsando el botón se comienza a tomar medidas. El número de ellas, el tiempo de cada una y el filtro a través del cual se toman ha sido determinado previamente con los controles vistos más arriba. Para tomar medidas la cúpula debe estar abierta y el modo fotómetro seleccionado. Como se verá más adelante, deben obtenerse medidas del fondo de cielo antes que de la estrella.  |
| Otra información adicional que aparece cuando se toma una medida del cielo o la estrella. |   |
| OBS UT - JD   | Tiempo universal en el momento de la exposición y fecha juliana.  |
| ELAPSED   | Tiempo transcurrido, en segundos, desde que se abrió el obturador y se empezó a integrar.   |
| COMPLETED   | Número de integraciones que se han realizado hasta el momento de la secuencia total requerida.  |
| RAW COUNTS  | Cuentas brutas: es un número proporcional al número de fotones registrados en cada integración. Se supone que el detector del fotómetro es lineal y funciona en modo cuenta de fotones.   |
| SN RATIO  | Relación señal-ruido (S/N). Se supone que la única incertidumbre en la medida de los fotones es su aleatoriedad definida por la mecánica cuántica: ruido fotónico. Como la llegada de fotones sigue una distribución de Poisson, la raíz cuadrada de la suma de cuentas (RAW COUNTS) es el error relativo de la medida. Una relación señal-ruido de 100 equivale a un error relativo del 1% o a una precisión de 0.01 magnitudes. Se consigue aumentar la S/N con mayores tiempos de integración o mayor número de integraciones. |
| MEAN SKY<br>(count/sec)   | El número medio de cuentas medidas del fondo de cielo a través de un cierto filtro dividida entre el tiempo de integración. El resultado es un ritmo de llegada de fotones en cuentas por segundo.  |
| MAGNITUDE   | Magnitud aparente de la estrella a través de un cierto filtro. Se obtiene a partir del ritmo de cuentas de la estrella al que se le sustrae la contribución del cielo.  |

## 2.2 Toma de medidas

Una vez abierto el observatorio ya se pueden emplear los controles de apuntado para mover el telescopio a una cierta zona del cielo. El rectángulo rojo en el centro del campo de visión es el campo disponible cuando se pasa a modo PHOTOMETER (pulsando una vez en MONITOR). En este modo de fotómetro el círculo rojo central es la apertura del fotómetro y muestra la zona de cielo que está siendo muestreada en la observación. Representa el diafragma del fotómetro, que se encuentra en el plano focal del telescopio, proyectado sobre el cielo. La estrella ha de ser centrada en la apertura ya que si no puede perderse parte de la luz.

Para tomar medidas debe estar conectado el seguimiento (TRACKING). Si no es así, las estrellas se mueven en el campo apuntado por el telescopio. Los controles direccionales N, E, S, W mueven el telescopio con respecto al cielo. Con el control de velocidad SLEW RATE se regula el ritmo de desplazamiento cuando se activa alguno de estos controles. Pruébese a mover el telescopio a diferentes velocidades.

### 2.2.1 Medidas del fondo de cielo

El tamaño de las imágenes de las estrellas depende del *seeing* de la noche de observación. La apertura se elige de forma que contenga toda la imagen de la estrella para no perder nada de luz cuando se tome una medida. Si las condiciones de la atmósfera en la noche de observación hace que el disco de *seeing* sea grande, entonces debemos aumentar el diafragma. Como el fondo de cielo no es completamente oscuro, éste contribuye a la señal registrada al hacer una medida de la estrella. Esta contribución debe descontarse midiendo una zona de cielo de igual extensión (y próxima a la estrella) libre de estrellas. Estas medidas a través del mismo filtro son posteriormente restadas para encontrar el flujo neto de la estrella. La medida del fondo de cielo también presenta una cierta imprecisión y por eso interesa que el diafragma sea lo más pequeño que permitan las condiciones de turbulencia de la atmósfera. En nuestro caso la apertura ya está elegida y resulta ser mucho mayor que la imagen de la estrella y esta configuración no es la idónea ya que la apertura abarca una gran cantidad de cielo.

Para obtener la medida del fondo de cielo en cada filtro se selecciona uno de ellos (FILTER), se mueve el telescopio a una zona de cielo desprovista de estrellas y se mide. Pruébese, para empezar, con un tiempo de integración de 10 s (SECONDS y 5 integraciones INTEGRATIONS). Pulsando TAKE READINGS se comienza la exposición. Al final se lee el resultado y se anota. La operación se repite para cada filtro. Si se desea detener la exposición se pulsa TAKE READINGS otra vez. Aunque en condiciones normales de observación el fondo de cielo cambia y hay que realizar una medida acompañando a cada medida de estrella en cada filtro, en este programa el fondo de cielo es constante por lo que sólo debe medirse una vez.

### 2.2.2 Medidas de las estrellas

Las coordenadas a las que apunta el telescopio se muestran en la parte inferior izquierda de la pantalla. Selecciona un filtro y un tiempo de integración: corto para estrellas brillantes para ahorrar tiempo y largo para estrellas débiles para alcanzar suficiente relación S/N. Se centra una estrella con cuidado y se toma una medida.

Esta medida consiste en una serie repetida de medidas individuales (INTEGRATIONS) y el resultado final que se muestra en la caja de la derecha RAW COUNTS son las cuentas obtenidas en cada una de ellas y la media. Al finalizar, el programa determina el flujo neto de la estrella observada descontando la contribución del fondo de cielo en el mismo filtro y muestra el resultado en forma de magnitud aparente de la estrella en la esquina inferior derecha.

También se muestra la relación S/N de la medida. Cuanto mayor sea la relación S/N más precisión tiene nuestra medida. Se exige una  $S/N > 100$  (precisión 0.01 magnitudes). La S/N aumenta con el tiempo de integración ya que es directamente proporcional a la raíz cuadrada del número total de cuentas registradas.

Para cada estrella en el formulario que aparece al final de este manual debe medirse en los filtros B y V, centrándolas con cuidado en la apertura. Las medidas se anotan redondeando a 0.001 magnitudes. Finalmente se corta el seguimiento y se cierra el observatorio. Posteriormente se calcula el índice de color B-V (redondeando a 0.01 magnitudes) y se anota en el formulario. Las estrellas más azules y calientes tienen B - V pequeño incluso negativo, mientras que las estrellas rojas (más frías) tienen valores de B - V más altos.

*Nota:* Un método para calcular de antemano el tiempo de exposición  $t$  y el número de integraciones  $N$  necesarias para alcanzar una S/N consiste en realizar una observación de  $t = 1$  s y

| $V$  | $(B - V)_o$ | Tipo<br>espectral | $V$   | $(B - V)_o$ | Tipo<br>espectral |
|------|-------------|-------------------|-------|-------------|-------------------|
| -5.8 | -0.35       | O5                | +4.4  | +0.58       | G0                |
| -4.1 | -0.31       | B0                | +5.1  | +0.70       | G5                |
| -1.1 | -0.16       | B5                | +5.9  | +0.89       | K0                |
| -0.7 | +0.00       | A0                | +7.3  | +1.18       | K5                |
| +2.0 | +0.13       | A5                | +9.0  | +1.45       | M0                |
| +2.6 | +0.27       | F0                | +11.8 | +1.63       | M5                |
| +3.4 | +0.42       | F5                | +16.0 | +1.80       | M8                |

Table 1: Magnitud absoluta de estrellas de la secuencia principal

$N = 1$  en cada filtro. Para otra exposición de  $t = t'$  y  $N = N'$  se tiene,

$$\frac{SN'}{SN} = \left( \frac{t'}{t} \times \frac{N'}{N} \right)^{1/2}$$

luego para  $S/N = 100$  necesitaremos:

$$t' \times N' = \left( \frac{100}{SN} \right)^2$$

Con estos resultados se representa el diagrama H-R del cúmulo en una hoja de papel milimetrado como se explicó más arriba. Se identifica la secuencia principal en este diagrama pintando una línea. Se marcan e identifican en el formulario tres posibles gigantes rojas y alguna enana blanca.

### 2.2.3 Distancia al cúmulo

Para determinar la distancia al cúmulo emplearemos los datos de estrellas de la secuencia principal que aparecen en la tabla. Se trazan los ejes del diagrama H-R sobre la hoja de acetato transparente colocando ésta sobre el diagrama que construimos para el cúmulo. El eje Y debe etiquetarse con un intervalo diferente (véase la figura 1). Dejando la hoja transparente sobre el papel milimetrado se facilita la representación de las estrellas de la tabla.

Desplazando arriba y abajo este diagrama sobre el del cúmulo se busca que las secuencias principales de ambos diagramas coincidan o se superpongan lo mejor posible. Este desplazamiento debe hacerse en los dos ejes para tener en cuenta el exceso de color, pero en el caso de la Pléyades este valor es muy pequeño ( $E(B - V) = 0.04$ ) y por lo tanto sólo se mueve en el eje Y (uno sobre el otro y los ejes X de los dos diagramas deben permanecer paralelos). Las estrellas rojas frías de la zona inferior derecha del diagrama del cúmulo están bastante dispersas y puede que no ajusten bien.

Parémonos a pensar lo que estamos haciendo. Tenemos dos diagramas H-R de estrellas de la secuencia principal, uno en términos de magnitud absoluta  $M$  y otro de magnitud aparente  $m$ . Cuando superponemos las secuencias principales cada estrella puede ser descrita en términos de  $m$  (primer diagrama, el del cúmulo) o de  $M$  (segundo diagrama).

Una vez encontrado el mejor ajuste, se anota la equivalencia entre magnitud absoluta y aparente simplemente leyendo las dos escalas (redondeando a 0.1 magnitudes) para un cierto valor del eje Y o para una estrella cualquiera. La relación entre magnitudes absolutas y aparentes nos proporciona inmediatamente la distancia al cúmulo por medio de la expresión proporcionada en la introducción.

Como trabajo adicional determínese la magnitud aparente del Sol si se encontrara en el cúmulo de las Pléyades, sabiendo que el Sol es una estrella G2 con  $B - V = +0.62$ .



| Estrella | A.R. |    |    | Dec. |    |    | Filtro | SEC | INT | S/N | mag    | B - V |
|----------|------|----|----|------|----|----|--------|-----|-----|-----|--------|-------|
|          | h    | m  | s  | °    | '  | "  |        |     |     |     |        |       |
| 1        | 3    | 41 | 05 | 24   | 05 | 11 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 2        | 3    | 42 | 15 | 24   | 19 | 57 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 3        | 3    | 42 | 33 | 24   | 18 | 55 | B      | 1   | 1   | 145 | 8.948  | 0.354 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 1   | 1   | 170 | 8.594  |       |
| 4        | 3    | 42 | 41 | 24   | 28 | 22 | B      | 1   | 2   | 112 | 10.252 | 0.557 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 1   | 2   | 145 | 9.695  |       |
| 5        | 3    | 43 | 08 | 24   | 42 | 47 | B      | 10  | 5   | 156 | 13.058 | 1.010 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 10  | 2   | 157 | 12.048 |       |
| 6        | 3    | 43 | 08 | 25   | 00 | 46 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 7        | 3    | 43 | 39 | 23   | 28 | 58 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 8        | 3    | 43 | 42 | 23   | 20 | 34 | B      | 10  | 3   | 123 | 13.010 | 0.984 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 10  | 2   | 159 | 12.026 |       |
| 9        | 3    | 43 | 56 | 23   | 25 | 46 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 10       | 3    | 44 | 03 | 24   | 25 | 54 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 11       | 3    | 44 | 11 | 24   | 07 | 23 | B      | 10  | 1   | 291 | 9.931  | 0.472 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 10  | 1   | 362 | 9.459  |       |
| 12       | 3    | 44 | 19 | 24   | 14 | 16 | B      | 10  | 5   | 113 | 13.783 | 1.169 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 10  | 3   | 149 | 12.614 |       |
| 13       | 3    | 44 | 27 | 23   | 57 | 57 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 14       | 3    | 44 | 39 | 23   | 27 | 17 | B      | 1   | 3   | 250 | 8.948  | 1.227 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 1   | 2   | 360 | 7.721  |       |
| 15       | 3    | 44 | 39 | 24   | 34 | 47 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 16       | 3    | 44 | 45 | 23   | 24 | 52 | B      | 1   | 3   | 158 | 9.946  | 1.147 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 1   | 2   | 219 | 8.799  |       |
| 17       | 3    | 45 | 09 | 24   | 50 | 59 | B      | 1   | 1   | 208 | 8.161  | 1.702 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 0.1 | 4   | 288 | 6.459  |       |
| 18       | 3    | 45 | 27 | 23   | 17 | 57 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 19       | 3    | 45 | 28 | 23   | 53 | 41 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 20       | 3    | 45 | 33 | 24   | 12 | 59 | B      | 1   | 1   | 343 | 7.073  | 0.125 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 0.1 | 3   | 199 | 6.948  |       |
| 21       | 3    | 46 | 26 | 23   | 41 | 11 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 22       | 3    | 46 | 26 | 23   | 49 | 58 | B      | 100 | 5   | 115 | 16.795 | 1.062 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 100 | 2   | 120 | 15.733 |       |
| 23       | 3    | 46 | 57 | 24   | 04 | 51 | B      |     |     |     |        |       |
|          |      |    |    |      |    |    | V      |     |     |     |        |       |
| 24       | 3    | 47 | 29 | 24   | 20 | 34 | B      | 1   | 1   | 275 | 7.553  | 0.138 |
|          |      |    |    |      |    |    | V      | 0.1 | 3   | 160 | 7.415  |       |