



PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS INTERNOS DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL DE SAN PEDRO MÁRTIR



Estudio de las flexiones del espectrógrafo Boller & Chivens del OAN-SPM.

PTI-OAN:0042

Ilse Plauchu Frayn

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ens., B.C., C.P. 22860, Méx.

Resumen

Se presenta un estudio sobre las flexiones del espectrógrafo Boller & Chivens del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM). Los datos fueron obtenidos la noche del 23 de enero de 2025 en el Telescopio de 2.1 m, en una sesión dedicada a evaluar el instrumento. Para analizar las flexiones del espectrógrafo, se obtuvieron imágenes de la lámpara de comparación en distintos ángulos horarios y declinaciones, aplicando una metodología previamente utilizada en un estudio similar. Se encontró que el desplazamiento de las líneas espectrales sigue un comportamiento lineal con la declinación y un comportamiento cuadrático y simétrico con el ángulo horario. Se confirma la importancia de obtener una imagen tipo arco de la lámpara de comparación antes o después de cada espectro de ciencia para minimizar el impacto de las flexiones instrumentales en la calibración de la longitud de onda.

Keywords: Telescopio 2.1m, espectroscopía, Boller & Chivens, flexiones, calibración instrumental.

Recibido: 26-02-2025

Aceptado: 18-03-2025

Publicado: 20-03-2025

1

PTI-OAN:0042

PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS INTERNOS

OAN-SPM

1. INTRODUCCIÓN

Los espectrógrafos Boller & Chivens son instrumentos ampliamente utilizados en astronomía para el análisis espectral de la luz proveniente de objetos celestes: estrellas, nebulosas planetarias, galaxias y cuásares, entre otros. Estos instrumentos fueron desarrollados por la compañía Boller & Chivens, especializada en la fabricación de telescopios e instrumentos ópticos de alta precisión.

El espectrógrafo Boller & Chivens del OAN-SPM [1] fue diseñado para operar en el foco Cassegrain $f/7$ del telescopio de 1.37 m del Observatorio Astronómico de Brera. Su diseño y fabricación estuvieron orientados a proporcionar espectroscopía de resolución baja a intermedia, lo que lo hace ideal para una variedad de estudios astronómicos en el rango óptico.

Sin embargo, al estar acoplado a un telescopio, el espectrógrafo puede presentar flexiones mecánicas, lo que afecta la estabilidad de la posición de las líneas espectrales y puede impactar la precisión de la calibración en longitud de onda. Además, el detector CCD está unido al espectrógrafo mediante un soporte conocido como la mesa del CCD, el cual cuenta con tres tornillos micrométricos que permiten el ajuste fino del enfoque del espectrógrafo. Estas conexiones, aunque necesarias para la alineación y ajuste del sistema óptico, pueden ser una fuente adicional de flexiones, influyendo en la estabilidad general del instrumento y contribuyendo a desplazamientos de las líneas espectrales.

Para garantizar una calibración precisa en longitud de onda y minimizar los errores inducidos por estas flexiones, es crucial comprender y cuantificar los desplazamientos de las líneas espectrales causados por la orientación del telescopio.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar las flexiones del espectrógrafo Boller & Chivens del OAN-SPM, evaluando cómo la orientación del telescopio influye en el desplazamiento de las líneas espectrales. Un estudio similar se realizó en el año 2009 [2] y en este trabajo hemos aplicado el mismo procedimiento con el objetivo de obtener resultados comparables. Para ello, se obtuvieron datos de la lámpara de comparación en diferentes ángulos horarios y declinaciones del

telescopio, analizando el desplazamiento de una línea de referencia en el eje de dispersión.

2. IMPORTANCIA DEL PROCEDIMIENTO

El estudio de las flexiones instrumentales es fundamental para cuantificar los desplazamientos sistemáticos en los espectros obtenidos, evaluar el comportamiento del espectrógrafo ante movimientos del telescopio y proporcionar información clave para los usuarios del espectrógrafo, permitiéndoles optimizar el proceso de calibración y mejorar la precisión de sus observaciones.

3. INSTRUMENTO, ACCESORIOS Y PAQUETES

Para este estudio se utilizó el espectrógrafo Boller & Chivens acoplado al Telescopio de 2.1 m del OAN-SPM. Se empleó su lámpara de comparación CuHeNeAr, junto con la rejilla de difracción de 1200l/mm *blaze* 26° 07' a un ángulo de 19°, lo que permite una mayor resolución espectral y facilita la identificación individual y precisa de cada línea de emisión.

Para la adquisición de datos, se utilizó la cámara CCD *Spectral Instruments 2* (CCD-Sp2), con un tamaño de píxel de 13.5 micras [3]. El procesamiento de los datos se realizó dentro del paquete astronómico IRAF [4], mientras que los gráficos y la aplicación de técnicas de ajuste lineal y cuadrático para modelar el desplazamiento de las líneas espectrales se realizaron con el paquete estadístico R [5].

4. METODOLOGÍA

4.1 Obtención de los datos.

Las observaciones se llevaron a cabo bajo condiciones controladas para garantizar la estabilidad instrumental. En primer lugar, se verificó que ningún filtro

estuviera en el camino óptico, para lo cual se sacó la bayoneta de los filtros. En segundo lugar, se comprobó el enfoque del espectrógrafo midiendo el FWHM en tres líneas de emisión de la lámpara, obteniendo un valor promedio de 2.5 píxeles (*binning* 1x1), lo que indica un enfoque adecuado con el CCD-Sp2. Finalmente, se encendió la lámpara CuHeNeAr con diez minutos de antelación para asegurar su estabilización térmica antes de iniciar la adquisición de datos. La temperatura a la que se adquirieron los datos es 4.6°C. Este valor es únicamente informativo y podría utilizarse en futuros estudios similares a otras temperaturas, con el propósito de evaluar si esta tiene algún efecto adicional sobre las flexiones.

El eje de dispersión del espectrógrafo Boller & Chivens es paralelo al eje nort-sur del telescopio (declinación). Debido a esta orientación, cualquier flexión mecánica inducida por el movimiento del telescopio en declinación afecta directamente el desplazamiento de las líneas espectrales a lo largo del eje de dispersión.

Se obtuvieron imágenes de la lámpara de comparación en dos condiciones:

1. **Variando la declinación (DEC)** desde -40° hasta $+65^\circ$ en incrementos de 5° a lo largo del meridiano (AH = 00 hrs).
2. **Variando el ángulo horario (AH)** desde -5 horas hasta $+5$ horas en incrementos de una hora, para las declinaciones $+50^\circ, +30^\circ, 0^\circ, -15^\circ$ y -30° .

En cada caso, se midió el desplazamiento de una línea de emisión central de referencia (columna ~ 1056) a lo largo del eje espectral utilizando la tarea IMEXAMINE de IRAF. Además, se estableció como origen del desplazamiento la declinación $+30^\circ$ (lo más cerca del Cenit) y el ángulo horario igual a cero horas (meridiano), dado que esta posición corresponde al estado de reposo del telescopio, donde se espera que el esfuerzo mecánico sea mínimo.

En el Apéndice A se presenta la Tabla A1 con los desplazamientos a cada declinación y las Tablas A2 a A6 con los desplazamientos a cada ángulo horario para las declinaciones $+50^\circ, +30^\circ, 0^\circ, -15^\circ$ y -30° , respectivamente.

4.2 Análisis de los datos.

Los desplazamientos de la línea espectral central se analizaron mediante ajustes matemáticos, para cada una de las dos condiciones de la Sección 4.1:

- **Declinación variable:** Se aplicó un ajuste lineal, obteniendo una relación proporcional entre la declinación y el desplazamiento de las líneas espectrales.
- **Ángulo horario variable:** Se aplicó un ajuste cuadrático, el cual indica que el desplazamiento aumenta en ambas direcciones (este-oeste) respecto a la posición de referencia en el meridiano. Este efecto se observa solo para declinaciones mayores a 0° , siendo más pronunciado para la declinación $+50^\circ$.

Se calcularon los coeficientes de los ajustes y el coeficiente de determinación R^2 para evaluar la calidad de cada modelo.

5. RESULTADOS

5.2 Desplazamiento de las líneas espectrales con la declinación.

En la Figura 1 se muestra el gráfico del desplazamiento, en píxeles, de las líneas espectrales en función de la declinación del telescopio cuando este se encuentra en el meridiano (AH = 00 horas). Tomando como referencia de reposo la declinación $+30^\circ$, se observa que los desplazamientos son simétricos con respecto a dicha posición. Al realizar un ajuste lineal a los datos, se encontró que los desplazamientos varían como $0.0441 * DEC - 1.3365$ ($R^2 \sim 0.99$); es decir, que por cada 10° en declinación, las líneas espectrales se desplazan 0.44 píxeles a la izquierda en eje espectral si el telescopio se mueve al sur o a la derecha si se desplaza hacia el norte. Aunque el seguimiento de un objeto en el cielo se efectúa a lo largo del eje este-oeste, el desplazamiento encontrado en el eje norte-sur implica que no es recomendable

utilizar la imagen de arco de un objeto para calibrar los datos de otro a una declinación diferente.

Cuando el telescopio se mueve en declinación, la fuerza de gravedad actúa sobre el espectrógrafo de manera continua y predecible. Al moverse el telescopio en el eje norte-sur, la estructura del espectrógrafo experimenta una que flexión que sigue una relación proporcional con el ángulo de inclinación (norte-sur), de modo que el desplazamiento de las líneas espectrales aumenta o disminuye de forma lineal con la declinación. Como el espectrógrafo y el telescopio están alineados con el eje de dispersión, no se introducen fuerzas de torsión importantes que alteren la alineación de los elementos ópticos.

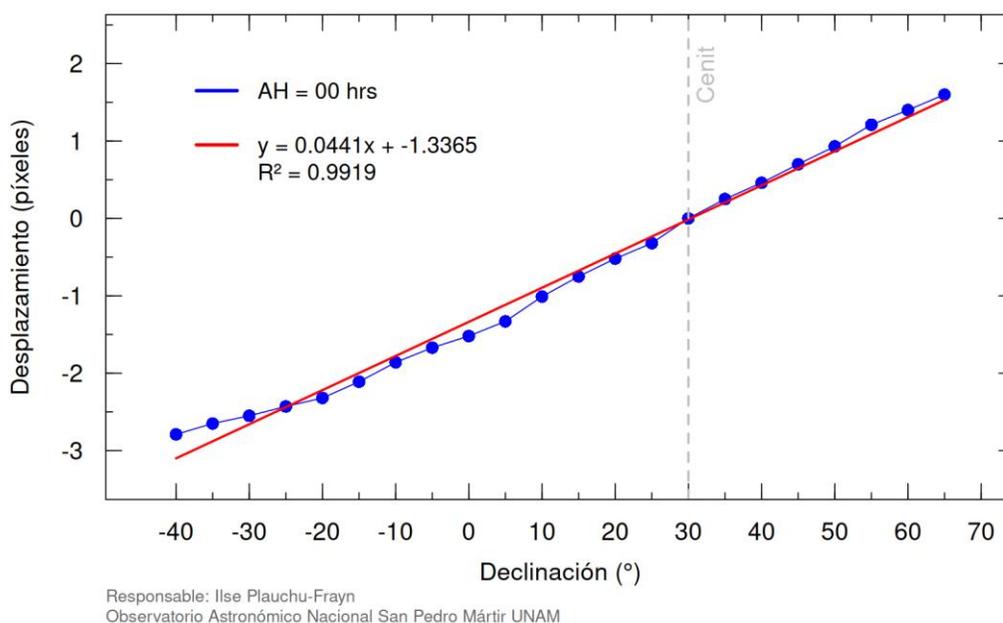


Figura 1. Desplazamiento de las líneas espectrales en función de la declinación del telescopio en el meridiano. La línea roja indica el ajuste lineal a los datos.

5.2 Desplazamiento de las líneas espectrales con el ángulo horario.

En la Figura 2 se muestra el gráfico del desplazamiento, en píxeles, de las líneas espectrales en función del ángulo horario del telescopio cuando este se encuentra a declinaciones $+50^\circ$, $+30^\circ$, 0° , -15° y -30° . Tomando como referencia de

reposo el ángulo horario (AH= 00 horas), se observa que los desplazamientos son simétricos, aunque no lineales con respecto a dicha posición. Al realizar un ajuste cuadrático a los datos obtenidos para una declinación de +50°, se encontró que los desplazamientos varían según la ecuación $-0.0740 * AH^2 + 0.00336 * AH - 0.0216$ ($R^2 \sim 0.99$), lo cual es consistente con un desplazamiento simétrico y proporcional al ángulo horario, siendo mínimo en AH = 00 horas y aumentando hacia el este y oeste. En este caso, se encuentra que en el desplazamiento de las líneas espectrales puede alcanzar hasta 2 píxeles durante un seguimiento de 5 horas, ya sea antes o después del meridiano del objeto. Asimismo, el desplazamiento de las líneas espectrales es de aproximadamente 1 píxel para declinaciones cercanas a +30° y de 0.5 píxeles para declinaciones próximas a 0°. Para declinaciones menores a 0°, el desplazamiento de las líneas espectrales encuentra que no es significativo. De cualquier manera, se recomienda adquirir un espectro de la lámpara de comparación antes o después de cada espectro del objeto de ciencia.

En este caso, donde el comportamiento de los desplazamientos es cuadrático, el telescopio gira alrededor del eje polar, lo que cambia el ángulo en el que la fuerza de gravedad actúa sobre el espectrógrafo en dos dimensiones simultáneamente. A diferencia del movimiento en declinación, aquí la dirección de la gravedad no se alinea con el eje de dispersión del espectrógrafo, sino que genera una flexión en dirección perpendicular. Esta flexión introduce una tensión y torsión en la estructura del espectrógrafo, lo que causa que las deformaciones no sean uniformes, sino que aumenten de forma acelerada conforme el telescopio se aleja del meridiano.

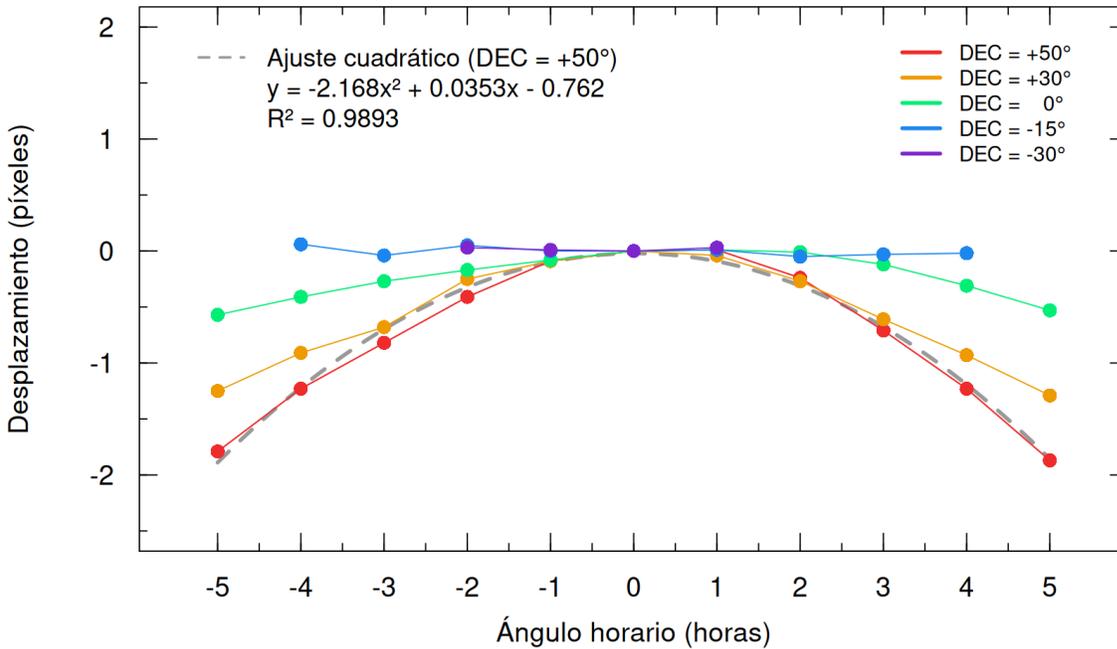


Figura 2. Desplazamiento de las líneas espectrales en función del ángulo horario para diferentes declinaciones del telescopio. La línea gris discontinua indica el ajuste cuadrático a los datos a declinación +50°.

6. DISCUSIÓN

El estudio realizado en 2009 [2] también analizó las flexiones del espectrógrafo Boller & Chivens y encontró desplazamientos de hasta cinco píxeles en la posición de una línea espectral entre posiciones extremas en declinación, así como variaciones de hasta 1 píxel/hora durante el seguimiento de un objeto. Los resultados de dicho estudio muestran que la variación con la declinación es más sistemática, lo cual concuerda con los resultados de nuestro estudio donde se observa un comportamiento lineal en función de la declinación.

Sin embargo, en cuanto a la dependencia con el ángulo horario, el estudio del 2009 reporta que la variación no es completamente simétrica con respecto al meridiano, encontrando mayores desplazamientos al oeste del mismo en sus pruebas. En el presente estudio, en cambio, se obtuvo un ajuste cuadrático simétrico respecto

a AH= 00 horas, lo cual podría deberse a diferencias en las condiciones instrumentales (diferente mesa y botella del CCD o detector) o en el análisis de los datos.

El comportamiento de las flexiones observadas en el espectrógrafo Boller & Chivens puede explicarse en función de la distribución de esfuerzos mecánicos en la estructura del telescopio y el instrumento (espectrógrafo + CCD). El ajuste lineal del desplazamiento en función de la declinación se debe a que el eje de dispersión del espectrógrafo es paralelo al eje norte-sur del telescopio. En esta orientación, la fuerza de gravedad actúa de manera directa y uniforme sobre el espectrógrafo a lo largo de eje norte-sur, lo que se traduce en un desplazamiento lineal de las líneas espectrales.

Por otro lado, el comportamiento cuadrático observado con el ángulo horario se debe a que este movimiento es perpendicular al eje de dispersión. En este caso, la gravedad no actúa uniformemente a lo largo del espectrógrafo, sino que introduce una flexión diferencial en la estructura mecánica. Esta flexión genera desplazamientos simétricos con respecto al meridiano, donde el esfuerzo mecánico es mínimo. Es por ello que el ajuste cuadrático describe mejor la variación en esta dirección, con desplazamientos que aumentan en magnitud conforme el telescopio se aleja del meridiano.

7. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que las flexiones del espectrógrafo Boller & Chivens dependen de la orientación del telescopio, presentando un comportamiento lineal con la declinación y cuadrático con el ángulo horario. Estos resultados permiten comprender mejor la naturaleza de estas flexiones y optimizar la estrategia de calibración para minimizar su impacto en los datos de ciencia.

Las flexiones del instrumento son un fenómeno inevitable, ya que están intrínsecamente relacionadas con la estructura mecánica del espectrógrafo y su acoplamiento al telescopio. Sin embargo, es posible corregir sus efectos mediante la

adquisición sistemática de imágenes de la lámpara de comparación. Por ello, se recomienda a los usuarios del espectrógrafo: 1) obtener una imagen tipo arco antes o después de cada espectro de ciencia y 2) no utilizar la imagen tipo arco de un objeto para calibrar los datos de otro objeto con una declinación diferente. Estas recomendaciones permiten compensar de manera efectiva los desplazamientos de las líneas espectrales causados por las flexiones instrumentales.

REFERENCIAS

- [1] Espectrógrafo Boller & Chivens del OAN-SPM.
<https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/instrumentos/espectroscopia/boller>
- [2] Valyavin, G., Richer, G. & Montalvo, F. (2009) *Flexiones con el espectrógrafo Boller & Chivens*.
https://www.astrossp.unam.mx/instrumentos/espectroscopia/bch/flex20090118/bch_flexiones.htm
- [3] Cámaras CCD del OAN-SPM. <https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/ccds>
- [4] Tody, D. *The IRAF Data Reduction and Analysis System*. In Proc. SPIE Instrumentation in Astronomy VI, ed. D.L. Crawford. 627, 733 (1986)
[ADS:1986SPIE..627..733T](https://ui.adsabs.org/abs/1986SPIE..627..733T).
- [5] R Core Team (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
<https://www.R-project.org/>.

APÉNDICE A

Tabla A1. Desplazamiento de las líneas espectrales en función de la declinación del telescopio (AH = 00 horas).

Declinación	Desplazamiento (píxeles)
-40°	-2.79
-35°	-2.65
-30°	-2.55
-25°	-2.43
-20°	-2.32
-15°	-2.11
-10°	-1.86
-5°	-1.67
0°	-1.52
+5°	-1.33
+10°	-1.01
+15°	-0.75
+20°	-0.52
+25°	-0.32
+30°	0.00
+35°	0.25
+40°	0.46
+45°	0.70
+50°	0.93
+55°	1.21
+60°	1.40
+65°	1.60

Tabla A2. Desplazamiento de las líneas espectrales en función del ángulo horario (DEC = +50°).

Ángulo horario (horas)	Desplazamiento (píxeles)
-05	-1.79
-04	-1.23
-03	-0.82
-02	-0.41
-01	-0.09
00	0.00
+01	0.01
+02	-0.24
+03	-0.71
+04	-1.23
+05	-1.87

Tabla A3. Desplazamiento de las líneas espectrales en función del ángulo horario (DEC = +30°).

Ángulo horario (horas)	Desplazamiento (píxeles)
-05	-0.57
-04	-0.41
-03	-0.27
-02	-0.17
-01	-0.08
00	0.00
+01	0.01
+02	-0.01
+03	-0.12
+04	-0.31
+05	-0.53

Tabla A4. Desplazamiento de las líneas espectrales en función del ángulo horario (DEC = 0°).

Ángulo horario (horas)	Desplazamiento (píxeles)
-05	-1.25
-04	-0.91
-03	-0.68
-02	-0.25
-01	-0.09
00	0.00
+01	-0.04
+02	-0.27
+03	-0.61
+04	-0.93
+05	-1.29

Tabla A5. Desplazamiento de las líneas espectrales en función del ángulo horario (DEC = -15°).

Ángulo horario (horas)	Desplazamiento (píxeles)
-04	-0.06
-03	-0.04
-02	0.05
-01	0.00
00	0.00
+01	0.01
+02	-0.05
+03	-0.03
+04	-0.02

Tabla A6. Desplazamiento de las líneas espectrales en función del ángulo horario (DEC = -30°).

Ángulo horario (horas)	Desplazamiento (píxeles)
-02	0.03
-01	0.01
00	0.00
+01	0.03