



Monitoreo espectral de la Nova V5668 Sgr

por

Lic. en Ing. Física José de Jesús Robles Pérez

Tesis

sometida a la Universidad de Guanajuato
para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Astrofísica)

Supervisor: Dr. Dennis Jack, *Co-Supervisor:* Dr. Klaus Peter Schröder

División de Ciencias Naturales y Exactas

Departamento de Astronomía

Agosto 2016

Universidad
de Guanajuato

Resumen

Cuando se detectó una nova clásica muy brillante en la constelación de Sagitario el 15 de Marzo de 2015 se comenzaron a hacer muchas observaciones en diferentes longitudes de onda como en el cercano infrarrojo, en rayos gamma, en ultravioleta por el telescopio Hubble y con resoluciones muy altas de $R = 270,000$ y de $R = 60,000$ ¹ aunque con un solo espectro. Solo un telescopio óptico en el mundo, el TIGRE, pudo realizar observaciones espectroscópicas casi diariamente hasta el 10 de Octubre del 2015. Las campañas de observaciones fueron diseñadas para obtener un denso número de observaciones con el propósito de entender con más detalle la física de la explosiva eyección de gas en una Nova, debido a que los rápidos cambios en la curva de luz de una nova deben tener efectos directos en sus espectros en escalas de tiempo cortas. También se pueden observar detalles en las características de absorción y emisión de las líneas espectrales.

En 72 días se tomaron espectros iniciando el 19 de Marzo y terminando el 15 de Octubre del 2015. En total se identificaron 73 diferentes líneas espectrales la mayoría de las cuales se obtuvieron en el primer máximo el 20 de Marzo. Las líneas de Hidrógeno están presentes en todos los espectros así como varios elementos tales como: Mg II, Cr, Ti II, Na I, N II, y He I entre otros. Aparecieron líneas prohibidas de Oxígeno [OI] y [OII]. Se muestran las líneas espectrales observadas el 20 de Marzo, 10 de Mayo, 12 de Junio y el 20 de Septiembre. Posteriormente se hace una descripción de las características generales de las líneas espectrales para las 4 fechas en que se identificaron.

La curva de luz de la Nova V5668 Sgr fue dividida en 5 máximos que corresponden a las partes más variantes de la Nova en los primeros 90 días. Para cada caída de la curva de luz partiendo de su máximo se observó que cuando hay disminución de brillo los rasgos de absorción de los perfiles de línea se mueven a velocidades de expansión cada vez mayores hacia nosotros. Para el tercer mínimo los rasgos de absorción de Fe II 4233.2 Å entre otros desaparecen. Finalmente la línea que resultó mas fácil de analizar comparado por ejemplo con las líneas de Hidrógeno que tienen varios subrasgos en sus perfiles de línea y muchos mínimos fue la correspondiente a la línea de Oxígeno O I 7773.0 Å que tiene rasgos más simples y definidos. Se obtuvieron las velocidades mínimas de expansión para cada perfil de línea de observación comenzando con el 19 de Marzo y finalizando con el 12 de Junio que comprenden los primeros 90 días donde ocurren las oscilaciones, 46 perfiles de línea diferentes en total. Para describir el comportamiento de todos los mínimos de los rasgos de absorción se graficaron todas las posiciones de todos los puntos con los que se puede observar que la velocidad del rasgo de absorción que es un mínimo también en la gráfica ha saltado a velocidades de expansión más negativas. Por otro lado, cuando se incrementa el brillo de la curva

¹La resolución tiene unidades de *radianes*, a menos que se multiplique por un factor de 206,265 para obtener segundos de arco.

de luz de la Nova V5668 Sgr el rasgo de absorción regresa a velocidades menos negativas. A partir de esto se puede deducir que lo que se ve durante las fases mínimas son capas de la envoltura que yacen mucho más lejos y por lo tanto muestran velocidades de expansión más elevadas ocultando las capas y cualquier otra contribución de línea menos corrida de las capas inferiores. Cuando la curva se dirige hacia su profundo mínimo las velocidades de expansión se siguen haciendo más negativas. En general este comportamiento para cada fase es semejante. Al compararse la curva de luz de la Nova V5668 Sgr con los puntos de los mínimos de absorción de OI 7773.0 Å se ve que concuerdan con el comportamiento particular para cada caída de brillo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Historia	2
1.2.1. ¿Qué es una Nova?	2
1.3. Definición de novas clásicas	4
1.4. Clasificación de las novas	4
1.4.1. Comportamiento típico de la curva de luz de una Nova	5
1.4.2. Comportamiento típico de las Novas	7
1.4.3. El espectro de las Novas	9
1.5. Las fases espectroscópicas	11
1.5.1. Fase 1: La bola de fuego	11
1.5.2. Fase 2: La cortina de hierro	13
1.5.3. Fase 3: El levantamiento de la cortina de hierro	15
1.5.4. Fase 4: El estado de transición	15
1.5.5. Fase 4a: Formación de polvo	15
1.5.6. Fase 5: Los espectros nebulares y coronales	16
2. Observaciones de la Nova V5668 Sgr y resultados	17
2.1. Instrumentos	17
2.2. Tiempos de exposición y espectros	18
2.3. Curva de luz y definición de fases	22
2.4. Perfiles de línea	24
2.4.1. Medida de la velocidad de expansión	24
3. Identificación de líneas espectrales de la Nova V5668 Sgr	29
3.1. ¿Porqué identificar líneas espectrales?	29
3.2. Características generales de las líneas espectrales	39
3.3. Fase de emisión	44

4. Estudio de rasgos característicos en las fases de declinación	47
4.1. Segunda caída de la curva de luz HI 4101.7 Å	47
4.2. Tercera caída de la curva de luz HI 4861.3 Å	48
4.3. Cuarta caída de la curva de luz OI 7773.0 Å	49
4.4. Quinta caída de la curva de luz HI 4101.7 Å	51
4.5. Rasgos del FeII	52
4.6. Evolución del OI 7773.0 Å	53
5. Conclusiones	59

Índice de figuras

1.1.	Imagen artística de Helena Uthas.	3
1.2.	Oscilaciones 50 días después de su máximo durante 120 días en la curva de luz de la nova Persei, 1901.[18]	6
1.3.	Oscilaciones en la curva de luz de la nova Delphini, 1967. Tuvo su máximo por 8 meses y duró 7 años en llegar a la luminosidad de su estrella progenitora.[18]	6
1.4.	Curva de luz de la nova DQ Herculis descubierta en 1934. En 94 días decae 3 magnitudes desde su máximo en 1.5 mag, seguida de una estrepitosa caída de 8 mag.[18]	7
1.5.	Envolturas gaseosas en expansión. Nova Cygni, 1992. Se utilizó la cámara de objeto tenue de la agencia espacial europea (ESA) usando la óptica correctiva COSTAR (Corrective Optics Space Telescope Action Replacement) de la NASA.	9
1.6.	Espectro Óptico de la Nova V5588 Sgr con líneas espectrales identificadas tomado con el telescopio KANATA para estrellas variables en Japón.[19]	10
1.7.	Esquema tomado de Steven N. Shore. Spectroscopy of novae-a user's manual. Aparición de la bola de fuego (2012).	12
1.8.	Evolución de las componentes estrechas mientras que la masa expulsada se recombina primero y luego se adelgaza en la expansión. En el eje X la velocidad radial esta en km/s del Fe II 4923.9 Å primera columna, Fe II 5018.4 Å segunda columna y Fe II 5169.0 Å tercera columna. El tiempo se incrementa de arriba hacia abajo. Durante la explosión de T Pyx 2011. El tiempo entre la recombinación y el adelgazamiento se da en los próximos 5 días. .	14
2.1.	Fotografía del TIGRE y su espectrógrafo HEROS.	18
2.2.	Canal azul del espectro del 20 de Marzo del 2015. Donde se pueden apreciar varias líneas espectrales en el rango de 3800 Å a 5600 Å. Se pueden apreciar las líneas de Balmer H_β 4861 Å, H_γ 4101.7 Å y varias líneas de Fe en el rango de 4900 a 5200 Å.	20
2.3.	Canal rojo del espectro del 20 de Marzo del 2015. Aquí se pueden apreciar menos líneas espectrales que en canal azul y la aparición de muchas líneas telúricas como en el rango de 6800 Å a 7400 Å, y otras líneas telúricas que son muy delgadas. Se puede apreciar notablemente la línea H_α 6562.7 Å, la línea de O I 7773.0 Å y algunas líneas de Paschen en el rango de 8400 a 8700 Å.	21
2.4.	Curva de luz para la Nova V5668 Sgr obtenida de la AAVSO. Las bandas usadas fueron: Visual, B, V y R.	22

2.5.	La línea continua representa la curva de luz tomada de la AAVSO y los triángulos las observaciones tomadas con el TIGRE. Las líneas punteadas representan los días en los que se realizó una exhaustiva identificación de líneas espectrales. Cuadro tomado de [13].	23
2.6.	Se definen 5 máximos con sus respectivas 5 fases de decaimiento. La curva de luz fue obtenida de la AAVSO y el cuadro de [13].	24
2.7.	Esta figura muestra la capa en expansión tomada con el telescopio Hubble. Cubierta en el centro está la estrella variable supergigante B2 Ia P Cygni. El diagrama muestra la formación del perfil P Cygni que se muestran en la región violeta del espectro de 2800 Å a 4100 Å con el espectrógrafo DADOS 900 L/mm.	25
2.8.	Aquí se muestra la diferencia medida pico a pico para la línea H_α donde $\Delta\lambda = \lambda_{azul} - \lambda_{rojo} = 6557,7 \text{ \AA} - 6562,2 \text{ \AA} = -4,5 \text{ \AA}$ con $\lambda_o = 6562,8 \text{ \AA}$ y $c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$, $V_r = -2066 \text{ km/s}$. El mismo concepto se puede aplicar para medir la velocidad radial de la línea He I, [20].	26
2.9.	Geometría de los perfiles de línea para H_β H_γ . El perfil P cygni está bien definido. La velocidad mínima para H I 4861.3 Å es de aproximadamente -700 km/s y la velocidad de expansión mínima para H I 4340.5 Å es de -580 km/s	27
2.10.	Geometría de los perfiles de línea para el Fe II 4923.9 Å y particularmente el perfil de línea para el Na I 5889.9 Å que muestra un par de líneas de absorción interestelar. La velocidad mínima de expansión del Fe II 4923.9 Å es de -530 km/s . El perfil de línea del Na I viene de la combinación de dos líneas de Na I.	27
3.1.	Líneas espectrales identificadas entre 3800 Å y 3968 Å de la Nova V5668 Sgr. Las líneas de Ca II muestran rasgos de absorción interestelar.	32
3.2.	Líneas espectrales identificadas entre 3968 Å y 4360 Å del 20 de Marzo. Entre ellas 3 líneas de Balmer, Si II y cinco líneas de Fe II.	33
3.3.	Líneas espectrales identificadas entre 4360 Å y 4800 Å. Principalmente líneas de Fe II, y particularmente Mg II y Ti II.	33
3.4.	Líneas espectrales identificadas entre 4800 Å y 5400 Å. H_β , Cr II, N II y 8 líneas de Fe II.	34
3.5.	Líneas espectrales identificadas entre 5500 Å y 9000 Å. El doblete de Na I, 2 líneas de Fe II, 2 líneas de Si II, H_α , una línea de Paschen, dos de NI, dos de O I y dos de Ca II del 20 de Marzo.	34
3.6.	Líneas espectrales identificadas mas específicamente en el rango de 8400 Å a 8900 Å, cuatro líneas de Paschen, una de O I y dos de Ca II. Las líneas muy delgadas entre 8100 Å y 8360 Å son líneas telúricas.	35
3.7.	Aquí se muestran las mismas líneas que en la figura 3.3 pero se resalta la línea de Fe II 4416.8 Å del 10 de Mayo que no aparece el 20 de Marzo.	35
3.8.	Líneas espectrales diferentes detectadas el 10 de Mayo en el rango de 7000 Å a 7500 Å, C I y N I.	36
3.9.	Líneas espectrales diferentes identificadas el 12 de Junio en el rango de 3950 Å a 5100 Å. Aparecen N II, Sr, C II, He I, N III y O III como se muestra.	36
3.10.	Única línea espectral diferente identificada el 12 de Junio entre 5500 Å y 6000 Å He I 5875.6 Å.	37

3.11. Línea espectral diferente identificada unicamente el 20 de Septiembre entre 4500 Å y 5000 Å: He II 4865.8 Å. La línea de O II fue identificada también el 12 de Junio y mas claramente el 20 de Septiembre.	38
3.12. Líneas espectrales diferentes identificadas el 20 de Septiembre entre 6000 Å y 8500 Å. Aparecen por primera vez tres líneas de O I, una línea de O II y el He I 7065 Å, H_{α} 6562.7 Å es común a todas las fechas.	39
3.13. En el primer máximo de la curva de luz del 20 de Marzo los perfiles de las líneas de Balmer están muy bien definidos como P Cygni igual que para las líneas de Fe II.	40
3.14. Perfil de la línea correspondiente a H I 4340.5 Å. El perfil P Cygni está bien definido. . .	41
3.15. Los rasgos de emisión son más anchos, por ejemplo las líneas 4861.3 Å H I y 4340.5 Å H I son más anchas que sus respectivas en la figura 3.13.	42
3.16. Líneas espectrales 12 de Junio 2015.	42
3.17. A los 189 días d.d. solamente hay rasgos de emisión, en las líneas espectrales ya no hay rasgos de absorción en absoluto.	43
3.18. Hay muy poco rasgo de absorción como para H_{α} . Las líneas muy delgadas y estrechas son líneas telúricas.	44
3.19. Evolución de la línea de emisión solamente para H_{α} . La línea de emisión para el 1 de Octubre es practicamente la misma que la del 20 de Septiembre pero a escala y la línea del 20 de septiembre tiene solo pico de emisión comparada con la del 12 de Junio que todavía tiene rasgos de absorción entre -600 km/s y -1000 km/s	45
4.1. Perfiles de línea de HI 4107.7 Å. A medida que va cayendo el brillo las velocidades de expansión aumentan como lo resume la figura 4).	48
4.2. Perfil de línea de HI 4861.3 Å. Después del tercer máximo las velocidades de expansión aumentan como lo muestra la figura 4).	49
4.3. Para el 10 y 11 de Mayo se muestran los cambios de velocidad de expansión de los mínimos de absorción de -1200 km/s a -1300 km/s con una diferencia de solo 100 km/s y más espaciados los días se puede ver que para el 15 de mayo las velocidades de expansión crecen considerablemente a menos de -2000 km/s	50
4.4. Perfiles de línea para HI 4101.7 Å. Nuevamente las velocidades de expansión aumentan conforme disminuye el brillo como lo demuestra la figura 4).	51
4.5. Perfiles de línea para FeII 4233.2 Å. El rasgo de absorción en el máximo, figura 1) se nota y conforme cae el brillo de la curva se va borrando el rasgo de absorción hasta desaparecer y quedar como una línea en la figura 4).	52
4.6. Perfiles de línea de OI 7773.0 Å en la parte mas variante de la curva de luz hasta los 90 días después del descubrimiento. Como se puede ver algunos rasgos tienen uno, dos, tres o cuatro velocidades de expansión diferentes.	55

- 4.7. Posiciones de los mínimos de los rasgos de absorción de la línea espectral O I 7773.0 Å para todas las observaciones hechas con el TIGRE hasta el día 89 d.d.. En el eje X aparecen los días después del descubrimiento (d.d.) y en el eje Y la velocidad de expansión en km/s . Se distinguen dos grupos: el rojo que presentaba poca variación (alrededor de $-500 km/s$) y el azul que tiene el mismo comportamiento de todas las caídas. 57
- 4.8. Gráfica de curva de luz en las etapas mas variantes. Tomada de [13]. Si se traslapa esta gráfica con la anterior (4.7) se ve que coinciden los puntos con el comportamiento discutido. 58

Índice de cuadros

2.1. Fechas y tiempos de exposición de los espectros reducidos.	19
3.1. Espectros y fechas de captura.	31
4.1. En este cuadro se muestra para la línea O I 7773.0 Å la primera parte de los mínimos de las velocidades de expansión para cada día de observación del Tigre. La columna 1 indica el día d.d. y las columnas 2, 3, 4 y 5 los mínimos respectivos.	53
4.2. En este cuadro se muestra para la línea O I 7773.0 Å la segunda parte de los mínimos de las velocidades de expansión para cada día de observación del Tigre. La columna 1 indica el día d.d. y las columnas 2, 3, 4 y 5 los mínimos respectivos.	54

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Cuando se detectó una nova clásica muy brillante en la constelación de Sagitario el 15 de marzo del 2015 se comenzaron a hacer numerosas observaciones en diferentes longitudes de onda como en el cercano Infrarrojo con el propósito de estudiar la formación de polvo [1, 2] en donde también se detectó monóxido de carbono. También fue observada en rayos X para monitorear el brillo durante la última fase de la nova [3, 4, 5] y en rayos gamma [6, 7]. El telescopio espacial Hubble lo hizo en longitudes de onda del ultravioleta [8] e incluso datos de polarimetría se obtuvieron también [9]. Inclusive la Nova V5668 Sgr ha sido observada con una resolución alta de $R = 60,000$ [10] con solo un espectro que se enfoca en el decaimiento del Berilio a Litio y también con una resolución muy alta de $R = 270,000$ con el espectrógrafo PEPSI [11], formando conjuntos de pocos espectros durante un par de días. Observaciones espectroscópicas abundantes casi diariamente no fueron realizadas con ningún telescopio óptico del mundo, excepto con el TIGRE.

El propósito de este trabajo es arrojar luz a la complicada Física de la explosiva eyección de gas en novae del tipo clásica DQ Herculis. Un propósito específico es averiguar si a través de cambios temporales en la velocidad de expansión del gas se pueden explicar fenómenos sincronizados por algún proceso físico durante la caída de brillo de la nova. Para cumplir dichos objetivos es indispensable tener un gran número de espectros obtenidos casi diariamente durante las oscilaciones más variables de la curva de luz.

Debido a la afortunada posición del telescopio en Guanajuato con relación a la Nova V5668 Sgr, cuya declinación es $-28^{\circ} 55' 40''$ y ascensión recta $18h 36' 56,8''$ (J2000), se hicieron observaciones desde el 19 de Marzo del 2015 hasta el 11 de Octubre del mismo año. Tiempo y cantidad de observaciones fueron diseñados para obtener una densa cantidad de espectros. De esta manera también se pueden observar detalles en las características de ab-

sorción y emisión de las líneas espectrales. Aunque el telescopio TIGRE no fue diseñado para novas, resultó ser un instrumento muy poderoso y útil para el monitoreo espectroscópico de eventos astrofísicos de alta energía como las novas [12] y también para supernovas [13].

1.2. Historia

Reseñar los eventos del cielo fue una prohibición en Europa y los textos que nos describen la aparición de estrellas nuevas solo se consiguen en el lejano oriente, en China y en Japón. Por ejemplo, el registro más antiguo que se tiene de la explosión de una nova es en 532 a.c. en la constelación del Águila en los Anales de bambú. El término *Nova* es un vocablo que viene del latín y significa *nueva*, su plural nuevas es *Novae*. Así se les denominó a las “estrellas nuevas”. En 1572 Tycho Brahe reporta la aparición de una “estrella nueva” en la constelación de Casiopea aunque en realidad era una supernova¹

En 1902 Agnes Clerke en su tratado “*Problems in Astrophysics*” [14] promovió el crecimiento de investigaciones astronómicas basadas en análisis espectroscópicos fundando publicaciones académicas periódicamente, promoviendo conferencias y sociedades nacionales e internacionales. En dicho tratado describió la brillante nova galáctica T Aur 1892. Esta nova fue descubierta en explosión con un espectro que se asemejaba al de una gigante roja, dominado por líneas de absorción y emisión Balmer. Luego dejó de observarse por la conjunción solar y cuando volvió a emerger Clerke se dió cuenta que su espectro había cambiado totalmente, parecía el de una nebulosa pero la anchura de las líneas se asemejaban a las de una estrella Wolf-Rayet sin los valles de absorción. Estos cambios se repitieron en los espectros de otras novas como la nova Q Cyg y GK Per. En 1957 Cecilia Payne-Gaposchkin produjo su “*vade mecum The Galactic novae*” que resumía los diferentes estudios de objetos individuales en diversos observatorios y publicados muy parcialmente.

1.2.1. ¿Qué es una Nova?

En general, una nova es un sistema cerrado binario, formado por una enana blanca y una estrella que ha dejado la secuencia principal y en el cual se produce transferencia de masa de un lóbulo de Roche² de la estrella acompañante a la enana blanca.

¹Las novas se caracterizan por explotar con mucho menor brillo que las supernovas, además de que se piensa que solo pueden ocurrir a partir de enanas blancas y pueden ser recurrentes, contrario al caso de las supernovas.

²El *lóbulo de Roche* es la región del espacio alrededor de una estrella en un sistema binario en la que el material orbitante está ligado gravitacionalmente a dicha estrella. Si la estrella se expande más allá de su lóbulo de Roche, entonces el material exterior al lóbulo es atraído por la otra estrella donde puede caer formando un disco de acreción.

Aproximadamente todas las novas tienen el mismo mecanismo en general: una enana blanca recoge gas principalmente Hidrógeno de una estrella compañera cercana que se sitúa en los límites gravitacionales de la enana blanca y que atrapa un chorro de gas que atrae hacia sí misma. Conforme el Hidrógeno se va acumulando sobre la superficie de la enana blanca, la parte más inferior de esta capa se llega a comprimir más intensamente por la poderosa gravedad de la enana blanca. Eventualmente dicha capa llega a ser más densa y lo suficientemente caliente para iniciar una reacción de Hidrógeno la cual rápidamente se esparce en toda la estrella. La capa llega a ser una bomba de Hidrógeno en la forma de un caparazón delgado. El material caliente se expande hacia afuera y permanece opaco por pocos días viéndose desde fuera como si toda la estrella se hinchara enormemente. El brillo típicamente aumenta en 10 magnitudes pero el caparazón contiene solamente 1/10,000 de la masa solar. En los próximos días o semanas el creciente caparazón se enfría, se adelgaza y llega a ser transparente permitiendo que el sistema en su centro brille nuevamente. La enana blanca eventualmente vuelve a su estado previo, la estela de gas de su compañera vuelve a dirigirse por atracción gravitacional hacia la enana blanca y el ciclo comienza una nueva construcción hacia la próxima explosión que puede comenzar en pocos años o en varios miles de años. Entre más masiva sea la enana blanca y más poderosa su gravitación más rápido ocurrirán las explosiones y se repetirán terminando finalmente como una supernova Ia³. Las novas pueden tener un mecanismo muy parecido pero sus curvas de luz a menudo se comportan muy diferente. La repentina caída de brillo como la que sucede en la Nova V5668 Sgr no es común dicha caída. Podría detenerse o más aun invertir su brillo en cualquier momento. La Nova V5668 Sgr se clasifica como una nova Clásica. La figura artística de Helena Uthas sintetiza el mecanismo general de una nova. Ver fig. 1.1

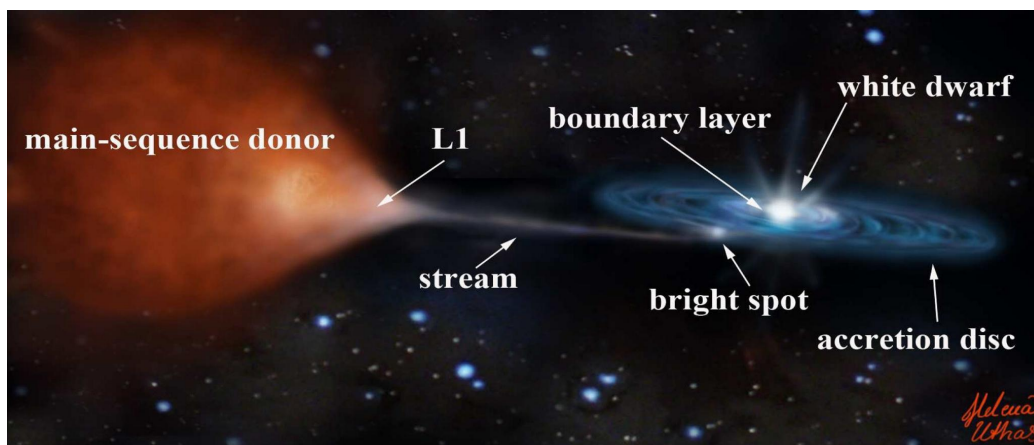


Figura 1.1: Imagen artística de Helena Uthas.

³Una supernova tipo Ia es un tipo de supernova que ocurre en un sistema binario en el cual una de las estrellas es una enana blanca, la otra estrella puede ser desde una estrella gigante hasta una enana blanca de menor tamaño y liberan en las reacciones de fusión mucha energía si sus temperaturas se elvan lo suficiente.

1.3. Definición de novas clásicas

Las novas clásicas son fenómenos de expulsión explosiva de masa causada por la ignición de una reacción nuclear en la superficie de una enana blanca que acreta masa de una estrella compañera bajo condiciones degeneradas⁴. Las reacciones nucleares principales, el consumo de CNO-Hidrógeno, ocurren en la forma de una fusión termonuclear desenfrenada ya que el ambiente no puede inicialmente responder dinámicamente al incremento bastante rápido en la generación de energía y el calentamiento consecuente. La reacción termonuclear, lejos de estar en equilibrio sobreproduce isótopos β inestables de vida media corta, el más importante de los cuales es el O^{15} . Estos isótopos decaen en aproximadamente 100 segundos y calientan el gas acretado mucho más efectivamente que los procesos radiativos y conductivos. Cuando la temperatura finalmente sobrepasa la línea degenerativa, la capa sobre la zona nuclear es expulsada. La máxima luminosidad y la nucleosíntesis dependen de la masa de la enana blanca y su composición. En este modelo estándar, entre más masiva sea la enana blanca requerirá una menor masa acumulada para alcanzar la presión crítica de la envoltura a la cual la reacción termonuclear se prende y consecuentemente, las más altas luminosidades, las masas expulsadas más bajas y las velocidades más altas deberían ser de estados degenerados cerca del límite de Chandrasekhar. Estas enanas blancas pueden considerarse como las precursoras de las supernovas Ia dependiendo del cataclismo de su sistema binario y estas son las novas recurrentes que tienen sus intervalos de explosiones de décadas en lugar de milenios [21]. Un modelo dimensional de la acreción e ignición muestra que la masa expulsada puede ser tan grande como 10^{-5} masas solares con velocidades de unos cuantos miles $km\ s^{-1}$. El conocimiento esencial de la ignición inicial está bien establecida [22]. Además ya que este proceso no destruye a la enana blanca, las explosiones se repetirán una vez que haya suficiente masa acumulada.

1.4. Clasificación de las novas

Los diferentes tipos de nova dependen de las siguientes características [17]: Componentes del sistema, distancia que las separa, masa de la enana blanca y ritmo de transferencia de materia entre la estrella donante y la enana. Se encuentran clasificadas en 4 clases:

- **Na:** Novas muy rápidas o rápidas. La caída de magnitud visual para un lapso de 100 días debe ser igual o mayor que 3 magnitudes.
- **Nb:** Novas lentas. La caída de 3 magnitudes ocurre sobre un lapso de 200 días.
- **Nc:** Novas muy lentas. La caída de 3 magnitudes ocurre transcurridos 1000 días.

⁴Las condiciones degeneradas se refieren al estado de la materia en que, debido a la presión tan alta, los átomos se descomponen en subpartículas.

- **Nr:** Novas recurrentes. Aquí se presentan erupciones cada determinado tiempo. Cada erupción produce un incremento aproximado de siete magnitudes en la estrella. El periodo de una nova recurrente depende de las características intrínsecas de la estrella progenitora. Dichos periodos son normalmente de decenas de años.

1.4.1. Comportamiento típico de la curva de luz de una Nova

En Astronomía, una curva de luz es una gráfica de la intensidad de luz de un objeto celeste o región, en función del tiempo. La curva de luz se suele construir a partir de luz de una región particular del espectro o banda fotométrica: por ejemplo banda B, con filtro azul o banda V, con filtro verde. El estudio de las curvas de luz, junto con otras observaciones, puede proporcionar gran cantidad de información sobre los procesos físicos que las producen o constreñir teorías físicas sobre ellas.

1. En la fase inicial, la magnitud visual produce un salto entre 7 y 10 magnitudes.
2. En la segunda fase, la magnitud visual de la estrella se estabiliza o incluso desciende un poco en magnitud.
3. En la tercera fase se produce un salto de dos magnitudes adicionales, transcurridos entre 1 a 7 días, después de la explosión.
4. Ya en su máximo, la nova puede caer rápida o lentamente según sea su clasificación.
5. Hay que tomar en cuenta la oscilación de la nova ya que puede aparecer en cualquiera de sus tipos.

Un ejemplo clásico lo representa la nova Persei 1901. Es una nova de comportamiento rápido y presentó oscilaciones 50 días después de su máximo las que se prolongaron por unos 120 días. En promedio las oscilaciones eran de una magnitud, ver figura 1.2.

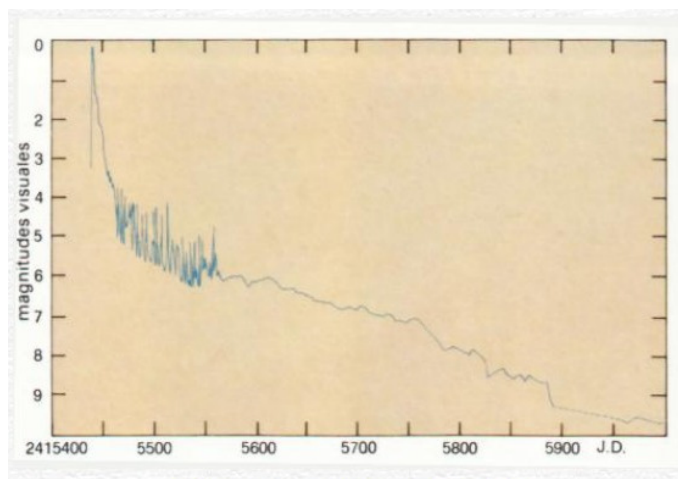


Figura 1.2: Oscilaciones 50 días después de su máximo durante 120 días en la curva de luz de la nova Persei, 1901.[18]

Las novas de comportamiento lento pueden tener como ejemplo a la nova Delphini 1967. Tuvo su máximo por 8 meses aproximadamente en los que se presentaron 5 picos para después comenzar a descender hasta llegar a la luminosidad de su estrella progenitora después de 7 años, observe la figura 1.3.

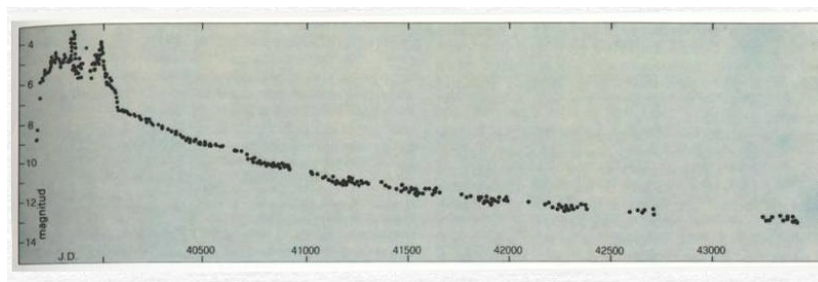


Figura 1.3: Oscilaciones en la curva de luz de la nova Delphini, 1967. Tuvo su máximo por 8 meses y duró 7 años en llegar a la luminosidad de su estrella progenitora.[18]

El ejemplo más importante por ser muy parecido a la Nova V5668 Sgr es el de la nova DQ Hércules descubierta el 12 de diciembre de 1934 con una magnitud de 3.4. 9 días después tuvo su primer máximo a una magnitud de 1.5. Durante 94 días tuvo un lento desvanecimiento decayendo 3 magnitudes seguida de una rápida declinación de 8 magnitudes hasta llegar a tener una magnitud de 13 en un mes. DQ Her brilló una vez más hasta alcanzar un segundo máximo a 6.5 magnitudes seguida de una muy lenta declinación hacia su mínimo, fue monitoreada por 5000 días hasta 1949. Observe figura 1.4.

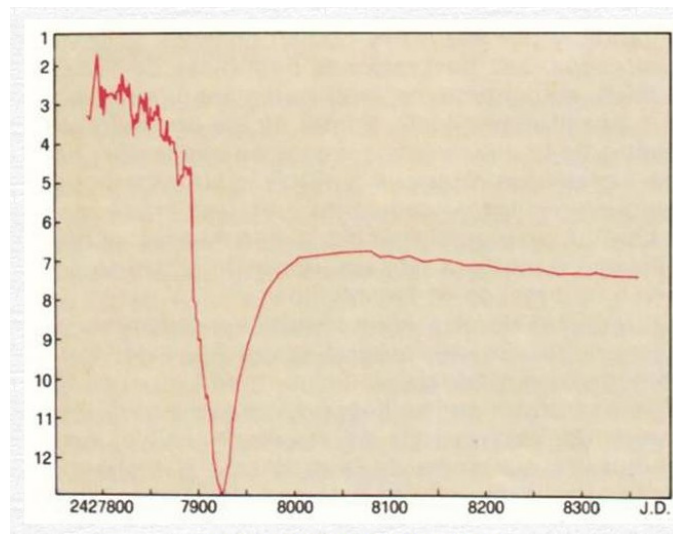


Figura 1.4: Curva de luz de la nova DQ Herculis descubierta en 1934. En 94 días decae 3 magnitudes desde su máximo en 1.5 mag, seguida de una estrepitosa caída de 8 mag.[18]

1.4.2. Comportamiento típico de las Novas

Las novas tipo Na son las que presentan las explosiones más violentas. El cambio total de magnitud es del orden de 15 magnitudes aproximadamente. El ritmo de acreción es bajo y gran cantidad de materia se va acumulando con el transcurrir del tiempo. En la explosión, prácticamente todo el material acumulado es eyectado al espacio. Esta es una de las razones por las que la caída de brillo es rápida. Los sistemas que dan origen a una nova tipo Na están compuestos por una enana blanca y una estrella enana amarilla en secuencia principal. Las estrellas se encuentran muy cercanas entre si y la enana en secuencia principal puede verter su atmósfera a la enana degenerada.

Para las Novas tipo Nc el cambio de magnitud está entre 7-10 magnitudes por las siguientes razones:

1. El sistema está compuesto por una gigante roja y una enana blanca. Las gigantes rojas son más brillantes que las enanas y contribuyen con su luz haciendo que el mínimo sea más brillante.
2. La explosión es menos energética, ya que la eyección de materia es solo parcial, parte de la materia eyectada vuelve a caer en la enana blanca y este es el motivo de que estas novas tarden tanto en bajar de brillo ya que el combustible regresa para seguir quemando durante más tiempo.

Las novas recurrentes Nr, se clasifican en general en dos tipos:

1. Las NrA, que están relacionadas a las novas clásicas. Ocurre una explosión termonuclear en la enana blanca. Aquí el ritmo de acreción es alto y la masa de la enana blanca se encuentra cerca del límite de Chandrasekar o 1.44 masas solares. La enana blanca es más luminosa y masiva por lo que necesita poca transferencia para alcanzar la presión crítica. En consecuencia las explosiones están espaciadas por periodos tan cortos de tiempo. La amplitud es menor que en las novas tipo Na porque a semejante ritmo de acreción, el disco formado por el material acretado es más brillante.
2. Las NrB tienen erupciones como producto de inestabilidades en el disco pero aquí hay eyección de material y el periodo orbital es mayor que el de las NrA.

La Nova V5668 Sgr se encuentra a 1,6 *kpc* en la constelación de Sagitario y es una nova clásica lenta tipo Nb.

1.4.3. El espectro de las Novas

El espectro de las novas describe envolturas gaseosas en expansión, por lo que las líneas de absorción aparecen desplazadas hacia el violeta. Las envolturas pueden ser fotografiadas, como para la Nova Cygni 1992 que fueron fotografiadas por el Hubble año y medio después de la explosión. Primero se observa una mota de gases en expansión violenta y 7 meses después se logra apreciar el anillo de materia circundante a la estrella. Las velocidades de estos gases en expansión pueden alcanzar entre 50 y 4000km/s .

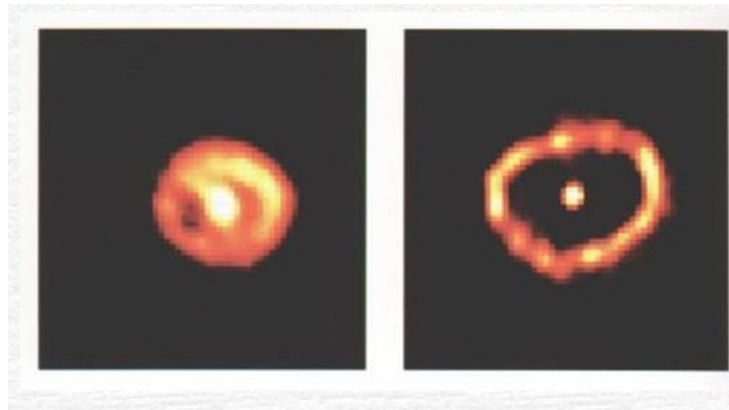


Figura 1.5: Envolturas gaseosas en expansión. Nova Cygni, 1992. Se utilizó la cámara de objeto tenue de la agencia espacial europea (ESA) usando la óptica correctiva COSTAR (Corrective Optics Space Telescope Action Replacement) de la NASA.

Como las capas exteriores de la nova han sido expulsadas de la misma, al realizar un estudio espectral cuando la estrella se encuentra en su fase expansiva, se va a observar que estas líneas disminuyen su grosor. Al comienzo, como las capas se encuentran muy densas, no permiten observar el espectro real de la estrella. A medida que la materia expulsada se expande, pierde densidad y comienza a detectarse el espectro real de la estrella.

A continuación se puede apreciar un ejemplo de espectro óptico con líneas identificadas para la nova clásica V5588 Sgr el día 12 de Abril del 2011. El espectro exhibe algunas líneas de emisión de Balmer, He I, O I, Ca II y Fe II. Posiblemente la línea de emisión C II a 7234Å haya sido identificada. La identificación de He I y C II indica que la fotosfera de la nova evolucionó después de los reportes iniciales. Las observaciones fueron hechas con el telescopio KANATA de $1,5\text{m}$ en la Universidad de Hiroshima, Japón. Observe figura 1.6

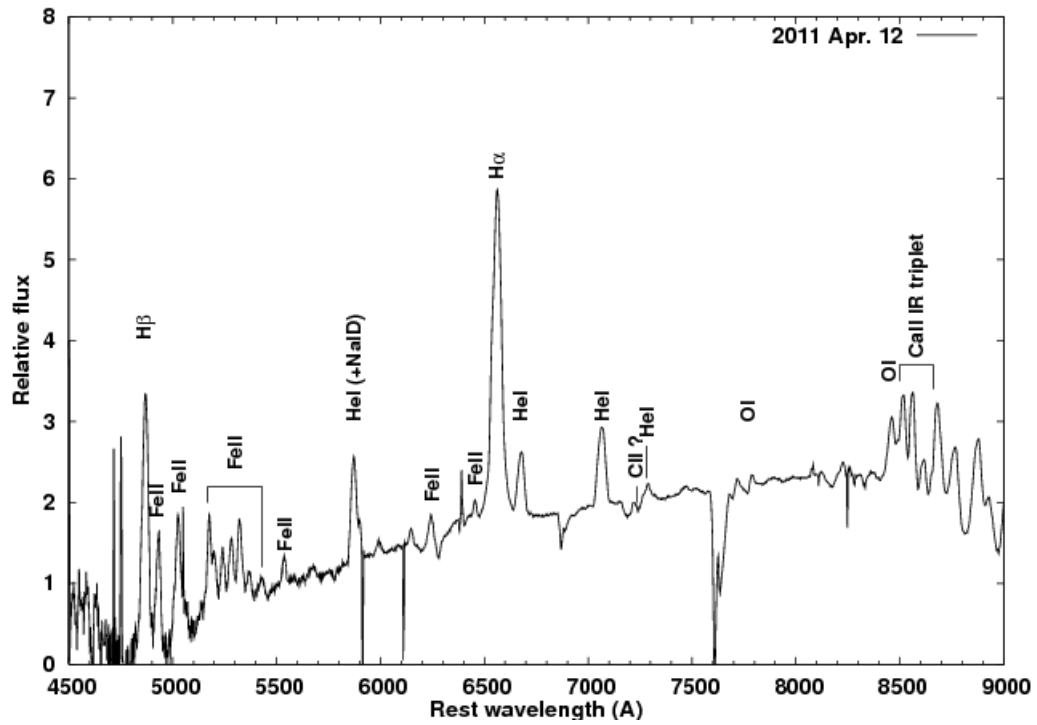


Figura 1.6: Espectro Óptico de la Nova V5588 Sgr con líneas espectrales identificadas tomado con el telescopio KANATA para estrellas variables en Japón.[19]

1.5. Las fases espectroscópicas

Las novae son muy complicadas de estudiar por una razón principal: la masa eyectada está en expansión libre y la densidad sistemáticamente está cambiando con el tiempo y por lo tanto la ionización y la temperatura. Esta fenomenología está íntimamente conectada con la evolución del espectro de la masa eyectada, por lo que se puede discutir el análisis sin ahondar en los detalles de la curva de luz. Se consideran en general 5 fases espectroscópicas: la bola de fuego, la cortina de hierro, el levantamiento de la cortina de hierro, el estado de transición y los espectros nebulares y coronales.

1.5.1. Fase 1: La bola de fuego

El primer estado de la expansión, la bola de fuego que puede durar un día, tiene su analogía más cercana a una explosión nuclear terrestre que puede durar unos cuantos segundos (entre 0,5s y 10s). El medio es calentado por el paso de una onda de choque y a su más alta temperatura mientras que al mismo tiempo ocurre una expansión libre e inmediatamente después un enfriamiento rápido. Dependiendo de la temperatura inicial, el tiempo de expansión es mucho más corto que el enfriamiento radiativo de manera que la expulsión de la masa es esencialmente adiabática. Sea cual sea la temperatura inicial, la razón de expansión depende solamente de la máxima velocidad de la onda de choque y la profundidad óptica viene de la radiación libre - libre y la dispersión electrónica a profundidad óptica. Esta fase ha sido directamente observada en muy pocas novae, se requiere de una alerta mientras la nova está alcanzando su máxima luz. Consecuentemente, su conexión con la curva de luz no se entiende muy bien. Algunas novae muestran un alto pre máximo antes del rápido final máximo. Posiblemente este sea el punto en el cual la bola de fuego se enfría a una temperatura crítica en la cual una recombinación comienza, disponiendo el estado para la próxima transición espectral. En la figura 1.7 se muestra una ilustración de V1974 Cyg tomada de Steven N. Shore Spectroscopy of novae a user's manual [16] que incluye una secuencia registrada de manera única que muestra el espectro de la bola de fuego en el primer día (un día después del descubrimiento óptico) y el efecto dramático de la "cortina de hierro" en menos de un día.

Ya que la opacidad predominante en longitudes de onda del radio, cm y mm no sigue la línea la transferencia radiativa es especialmente simple. La evolución de la intensidad monocromática es independiente del gradiente de velocidad. En su lugar, la razón es determinada por la velocidad de expansión máxima y la profundidad óptica por el gradiente de densidad. La emisión es caracterizada por una ley de potencias inversa y parte de un espectro de cuerpo negro. Su tiempo de desarrollo sin embargo es dependiente de la recesión de la fotosfera en la masa expulsada mientras cae la densidad. Si el medio es isotérmico, el cambio de la profundidad óptica radial equilibra la expansión continuada de la envoltura más exterior.

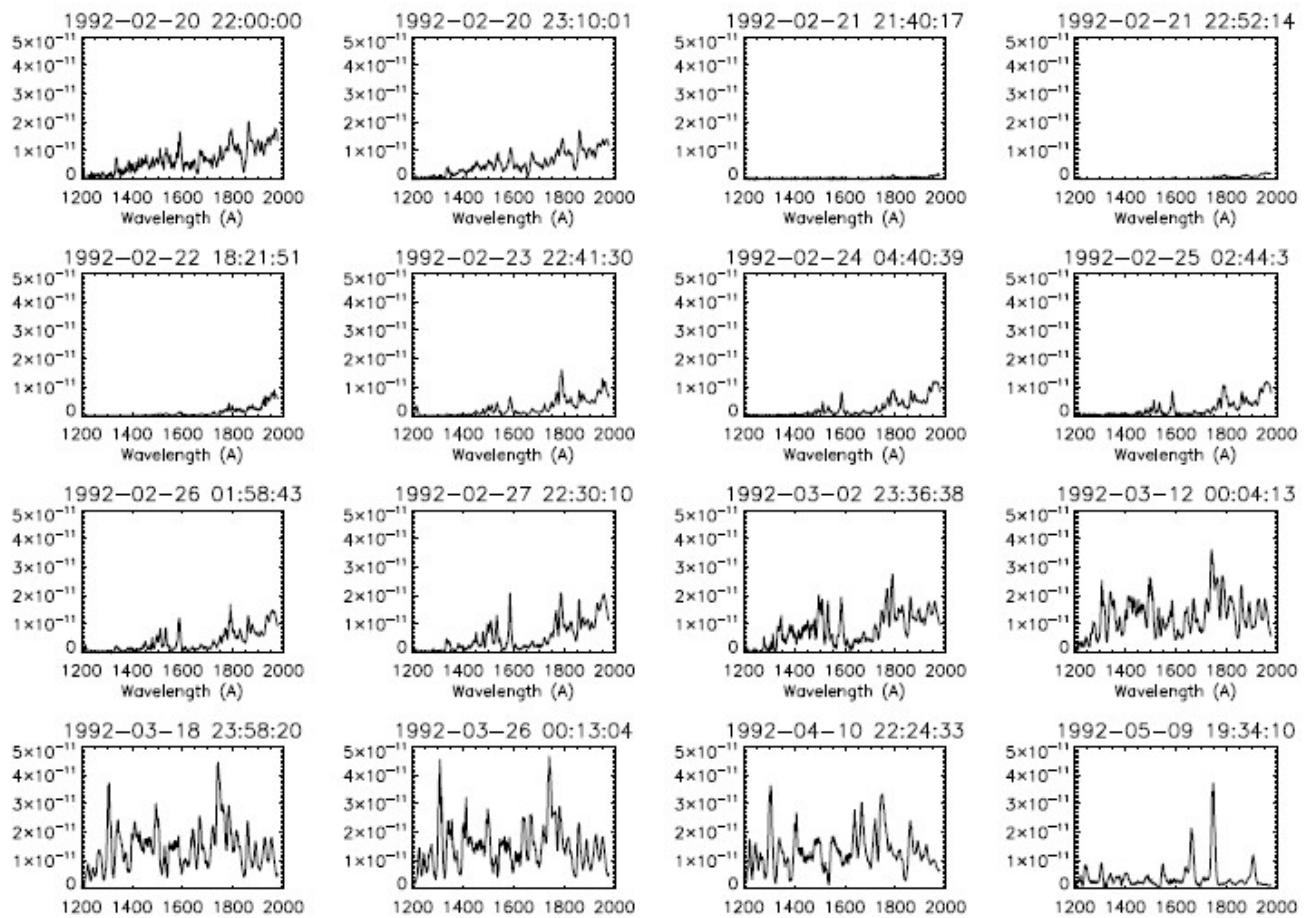
Spectroscopy of novae

Figura 1.7: Esquema tomado de Steven N. Shore. Spectroscopy of novae-a user's manual. Aparición de la bola de fuego (2012).

1.5.2. Fase 2: La cortina de hierro

Durante el estado de enfriamiento, cuando el espectro óptico es más brillante, la emisión ultravioleta repentinamente llega a ser ópticamente gruesa. El medio se ha recombinado en este estado y la principal fuente de opacidad, las líneas de metales complejos en el continuo de Balmer ahora son opacas. Estas circunstancias conectan con cientos de niveles superiores, todos los cuales pueden radiativamente desexcitarse a través de millones de líneas. Lo mismo sucede para un viento estelar pero aquí el medio es dependiente del tiempo de manera que la profundidad óptica del continuo del volumen entero cambia sistemáticamente en los intervalos de tiempo. Para complicar las cosas aún más hay también pares colisionales entre estos niveles de manera que se requiere un análisis completo para modelar bajo condiciones NLTE⁵. Observaciones de T Pyx 2011 parecen revelar la clave del fenómeno [24]. En esta nova, cuando primero se observa en el incremento al máximo de luz, el óptico desplegó líneas He I P Cyg con la serie de Balmer. Mientras el óptico continuó incrementándose el He I desapareció y fue reemplazado por anchos picos de línea de hierro cuyos perfiles P Cyg tenían absorción a bajas velocidades como se ilustra nuevamente mostrando la evolución de las componentes estrechas mientras que la masa expulsada se recombina primero y luego se adelgaza en la expansión, como se muestra en la figura 1.8, donde en el eje x se encuentra la velocidad radial en km/s del Fe II 4923.9Å, Fe II 5018.4 Å y Fe II 5169.0 Å

⁵NLTE significa equilibrio termodinámico no-local por sus siglas en inglés (Non - Local Thermodynamical Equilibrium).

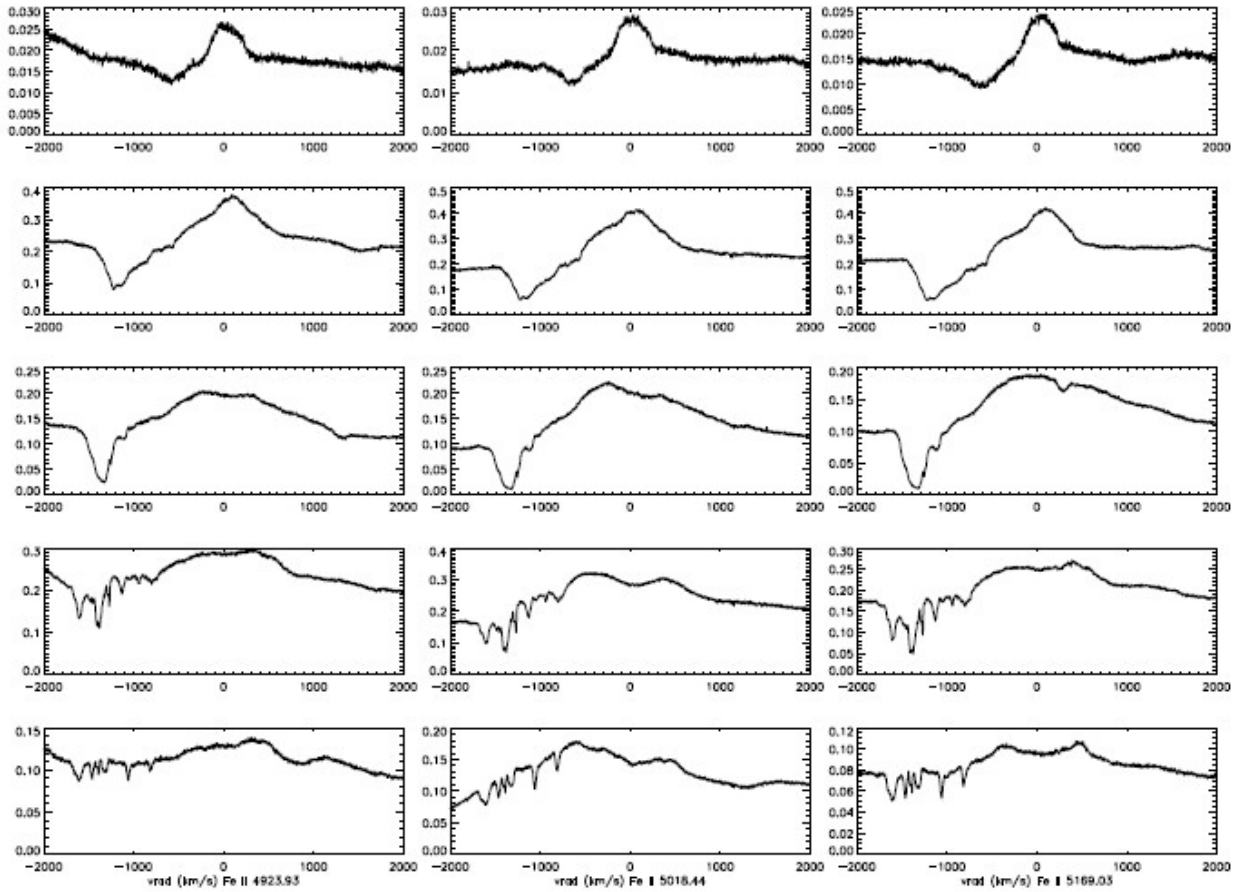


Figura 1.8: Evolución de las componentes estrechas mientras que la masa expulsada se recombina primero y luego se adelgaza en la expansión. En el eje X la velocidad radial está en km/s del Fe II 4923.9 Å primera columna, Fe II 5018.4 Å segunda columna y Fe II 5169.0 Å tercera columna. El tiempo se incrementa de arriba hacia abajo. Durante la explosión de T Pyx 2011. El tiempo entre la recombinación y el adelgazamiento se da en los próximos 5 días.

Estos componentes de absorción empiezan alrededor $-800 km s^{-1}$, y muestran un desplazamiento sistemático hacia mayores corrimientos al azul y un fortalecimiento de la emisión en los estados de baja ionización.

1.5.3. Fase 3: El levantamiento de la cortina de hierro

El próximo estado, conectado con un momento distinto en la fotometría óptica, es cuando el UV se vuelve ópticamente delgado en las líneas. La pérdida de absorción en el ultravioleta significa que el material expulsado está expuesto a un campo de radiación progresivamente más intenso. Esto no es sólo de las líneas, sin embargo, la ionización se incrementa porque la absorción en el continuo del ultravioleta lejano disminuye con el decremento de la densidad. Esto conduce a un frente de ionización a través del material expelido ionizando la masa expulsada y removiendo las especies responsables de la cortina. También la razón de recombinación cae ya que la ionización se desequilibra con la recombinación. Esto improvisa la ionización y la transición progresa rápidamente. La masa expulsada lenta le toma algo de tiempo para esto, también la masa expulsada se mantiene opaca sistemáticamente por más tiempo.

1.5.4. Fase 4: El estado de transición

Una vez que el ultravioleta se vuelve transparente las líneas nebulares tan familiares en los últimos estadios de la expansión aparecen [25]. Acompañando la transición hacen presencia las líneas [O III] 4363, 4959, 5007 Å que son acompañadas por sus contrapartes isoelectrónicas [N II] 5755, 6548, 6583 Å. Aunque las dos últimas líneas se pueden mezclar con H_α . En la fase nebulosa y también de transición la profundidad óptica del material es pequeña y por lo tanto los perfiles de línea indican variaciones en la densidad a una velocidad dada.

1.5.5. Fase 4a: Formación de polvo

El polvo es complejo. Consiste de manojos de átomos y moléculas no tan diferente de las partículas microscópicas que constituyen la niebla por ejemplo. El tamaño típico del polvo interestelar es aproximadamente de $10^{-7} m$ por lo que los granos son comparables en tamaño a la longitud de onda de la luz visible. Solamente las partículas que tienen diámetros comparables iguales o mayores a la longitud de onda puede influenciar el rayo de luz significativamente y la cantidad de dispersión producida por partículas de un tamaño dado aumenta con la disminución de la longitud de onda. Así las regiones de polvo de las novae son transparentes a longitudes de onda muy largas de radio y a la radiación infrarroja pero opacos a la longitud de onda más corta en el óptico, ultravioleta y radiación X. Un cilindro imaginario de $1 m^2$ de sección transversal que se extienda de la tierra hasta Alfa centauri

contendría más de 10,000 millones de partículas de polvo. Las partículas de polvo son básicamente silicatos, grafito y hierro con algunas trazas de amonio, metano y otros componentes químicos. Las partículas de polvo son elongadas y esto se puede inferir porque la luz emitida por las novae es parcialmente polarizada y la polarización en consecuencia provee otra forma de estudiar el medio interestelar.

Una característica distintiva se vincula a la espectroscopía. Como se forma el polvo es un tópico aparte [26]. Empíricamente pasa típicamente durante el estado de transición, aproximadamente 100 días después del pico óptico como en DQ Her. En las supernovas II esto es acompañado por un debilitamiento o desaparición de la porción corrida al rojo de las líneas del material expulsado. Esto ha sido observado en escaso número de novae clásicas.

1.5.6. Fase 5: Los espectros nebulares y coronales

Las apariciones de especies de alta ionización como por ejemplo [Fe VI], [Fe VII], [Ca V], señala la fase coronal que es así llamada por la presencia de líneas familiares de la corona solar. El término se puede mal interpretar ya que las condiciones son significativamente diferentes. La corona es una atmósfera magnetostática, mantenida en círculos y en la base del viento solar por mecanismos de calentamiento no termal. En el material expulsado de las novae el principal agente son los rayos X y la emisión ultravioleta lejano de la enana blanca en un medio dinámico. El gas, que puede capturar cualesquiera fotones que lo ionizen, será débilmente balanceado por la recombinación controlada en un medio continuamente rarificante. Hay dos fases que no están bien establecidas en el presente. En rayos X la emisión inicial siempre es fuerte más allá de los 10 KeV . Esto tiene un tiempo finito, quizás varias semanas. La componente llamada supersuave que se pensó era debido a un proceso nuclear continuo en la envoltura de la enana blanca del Hidrógeno no es expulsado en la explosión, es fuertemente modulada por el cambio en la densidad columna con el tiempo. La ionización del material expulsado se incrementa y la opacidad disminuye, una repetición de la fenomenología de la cortina de hierro y al pasar varios meses la fuente domina el estado del gas que se expande.

Capítulo 2

Observaciones de la Nova V5668 Sgr y resultados

2.1. Instrumentos

El 15 de Marzo UT del 2015 una nova clásica muy brillante apareció en la constelación de Sagitario [27] y se le denominó como Nova Sagittarii 2015 No. 2 y a partir del 19 de Marzo UT del 2015 se registraron espectros de esta nova también conocida como PNV J18365700-2855420 o también formalmente como Nova V5668 Sgr. Los espectros fueron tomados con el telescopio robótico de 1.2m el TIGRE (Telescopio Internacional en Guanajuato Robótico y Espectroscópico) fundado por las Universidades de Hamburgo(Alemania), Guanajuato (México) y Liege (Bélgica) situado en la comunidad de la Luz cerca de Guanajuato equipado con el espectrógrafo échelle HEROS (Espectrógrafo óptico de Rango Extendido Heidelberg) que provee una resolución de 20 000 en el rango del espectro visual de 3800 a 8800 Angstroms con un pequeño espacio entre 5600 a 5730 Angstroms. Los espectros son obtenidos en dos canales simultáneamente: el rojo y el azul. Es importante señalar que los espectros observados no pueden ser calibrados para flujos absolutos pero si se pueden obtener con flujos relativos. Para una mayor descripción técnica e instrumental del TIGRE refiérase a [28]. Ver figura 2.1.

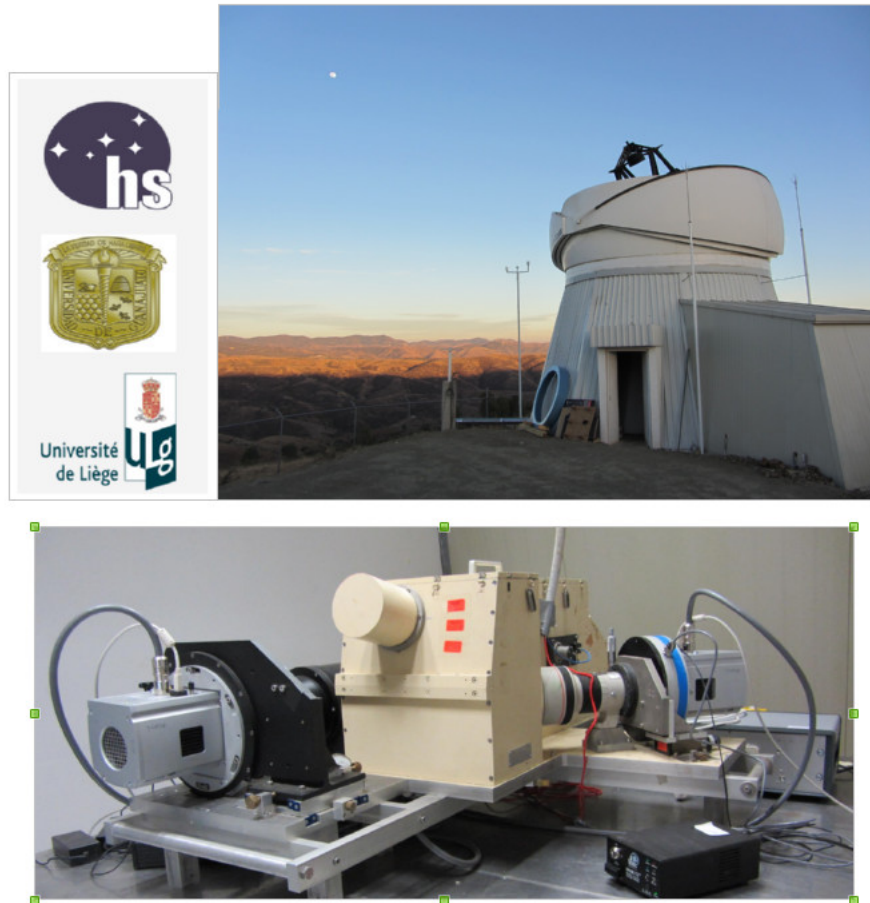


Figura 2.1: Fotografía del TIGRE y su espectrógrafo HEROS.

2.2. Tiempos de exposición y espectros

Se tomaron los espectros reducidos en las fechas señaladas: 0319, por ejemplo, debe interpretarse como el mes de Marzo (03), día 19. Los tiempos para cada exposición fueron de 600 segundos o 10 minutos, así que, después del carácter “/” el tiempo total está dado en minutos. 50’, por ejemplo, se debe leer como 50 minutos de exposición total. El número de exposiciones por consiguiente varió. El máximo de exposiciones fue de 11 y el mínimo de 1. El tiempo total fue para ambos canales, el rojo y el azul. Así se puede leer correctamente el cuadro 2.1

Fecha	Tiempo de exposición	Fecha	Tiempo de exposición
0319	60'	0508	80'
0320	50	0509	30'
0321	60'	0510	30
0324	40'	0602	30'
0325	30	0603	60'
0326	50'	0604	30'
0327	20'	0605	30'
0330	60'	0608	20'
0331	60'	0610	20'
0401	60'	0612	40'
0402	70'	0725	10'
0403	50'	0728	30'
0404	30'	0729	30'
0405	60'	0730	30'
0407	80'	0806	40'
0408	80'	0815	60'
0409	80'	0826	10'
0410	80'	0827	60'
0411	90'	0828	60'
0414	60'	0829	60'
0415	100'	0830	60'
0417	110'	0902	30'
0419	60'	0905	70'
0421	60'	0906	30'
0422	60'	0908	30'
0423	60'	0919	60'
0425	60'	0920	60'
0426	60'	0921	60'
0427	60'	0922	60'
0428	60'	0923	60'
0430	60'	0924	80'
0501	60'	0925	10'
0503	80'	0926	60'
0504	30'	0929	50'
0505	60'	1001	60'
0507	30'	1010	30'

Cuadro 2.1: Fechas y tiempos de exposición de los espectros reducidos.

Originariamente el archivo está dado en FITS¹ y deben convertirse los datos a archivos ASCII. Se obtuvieron espectros en 72 días. Como se registraron varias exposiciones en general para cada día y con el objeto de reducir la señal a ruido se sumaron los espectros con el método de interpolación.

En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran como ejemplos los espectros respectivos obtenidos en el canal azul y el canal rojo para el 20 de Marzo del 2015, 5 días después del descubrimiento (d.d.). En el eje X se da la longitud de onda en Angstroms y en el eje Y el flujo relativo.

El rango para el canal azul es de 3800 Å a 5500 Å. La línea más pronunciada es H_β 4861 Å y de 4900 Å a 5200 Å son líneas de FeII como después se detallará en el capítulo 3. En el canal rojo se pueden observar menos líneas espectrales, la mayor pronunciada es H_α y luego la línea OI 7773.0 Å. En dicho espectro se pueden apreciar líneas telúricas de 6800 Å a 7400 Å, de 7600 Å a 7700 Å y 7800 Å a 8360 Å mas notablemente. El rango del canal rojo va de 5500 Å a 8800 Å.

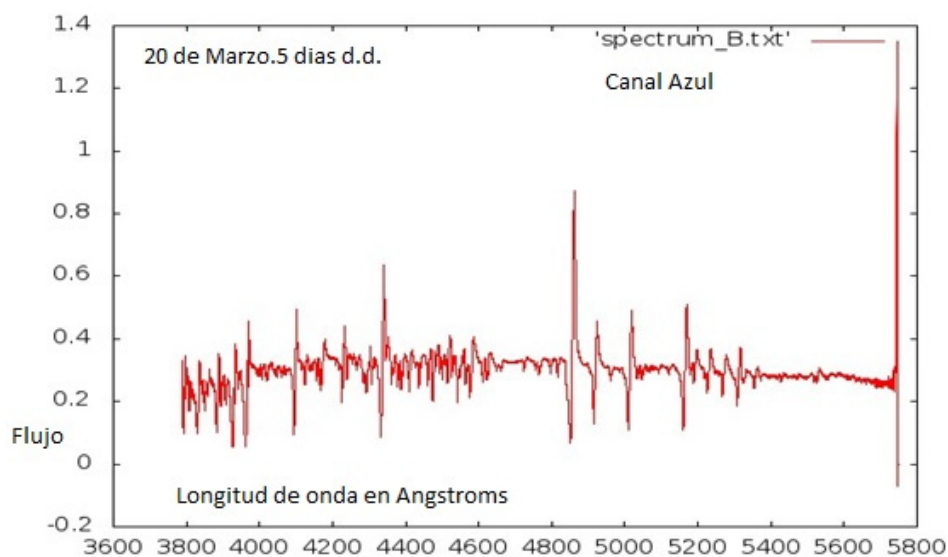


Figura 2.2: Canal azul del espectro del 20 de Marzo del 2015. Donde se pueden apreciar varias líneas espectrales en el rango de 3800 Å a 5600 Å. Se pueden apreciar las líneas de Balmer H_β 4861 Å, H_γ 4101.7 Å y varias líneas de Fe en el rango de 4900 a 5200 Å.

¹FITS significa Sistema de Transporte de Imagen Flexible por sus siglas en inglés (Flexible Image Transport System).

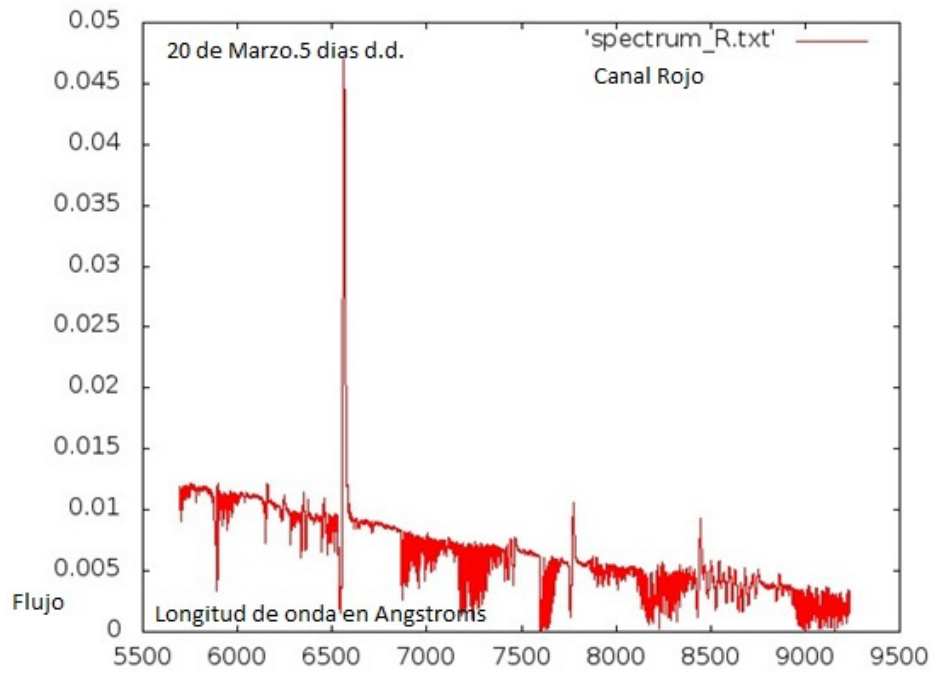


Figura 2.3: Canal rojo del espectro del 20 de Marzo del 2015. Aquí se pueden apreciar menos líneas espectrales que en canal azul y la aparición de muchas líneas telúricas como en el rango de 6800 Å a 7400 Å, y otras líneas telúricas que son muy delgadas. Se puede apreciar notablemente la línea H_{α} 6562.7 Å, la línea de O I 7773.0 Å y algunas líneas de Paschen en el rango de 8400 a 8700 Å.

Debido a la localización del TIGRE y a las coordenadas de V5668 Sgr cuya declinación es -28 grados 55 min 40 seg y ascensión recta 18 h 36 m 56.8 s (J2000), se pudieron obtener espectros casi diariamente hasta inicios de Octubre del 2015.

2.3. Curva de luz y definición de fases

La curva de luz para la Nova V5668 Sgr fue obtenida de los bancos de datos de la AAVSO (American Association of Variable Star Observers), desde el primer día de su descubrimiento el 15 de Marzo del 2015. Como se puede observar las partes más variables ocurren hasta aproximadamente los primeros 90 días después del descubrimiento, 12 de Junio, donde la magnitud de la curva de luz se mantuvo entre 4 y 7 mag. Después se observa un gran mínimo donde la magnitud decae hasta 13.4 mag aproximadamente y finalmente retorna a una magnitud casi estable de entre 9 y 10 mag. Ver figura 2.4

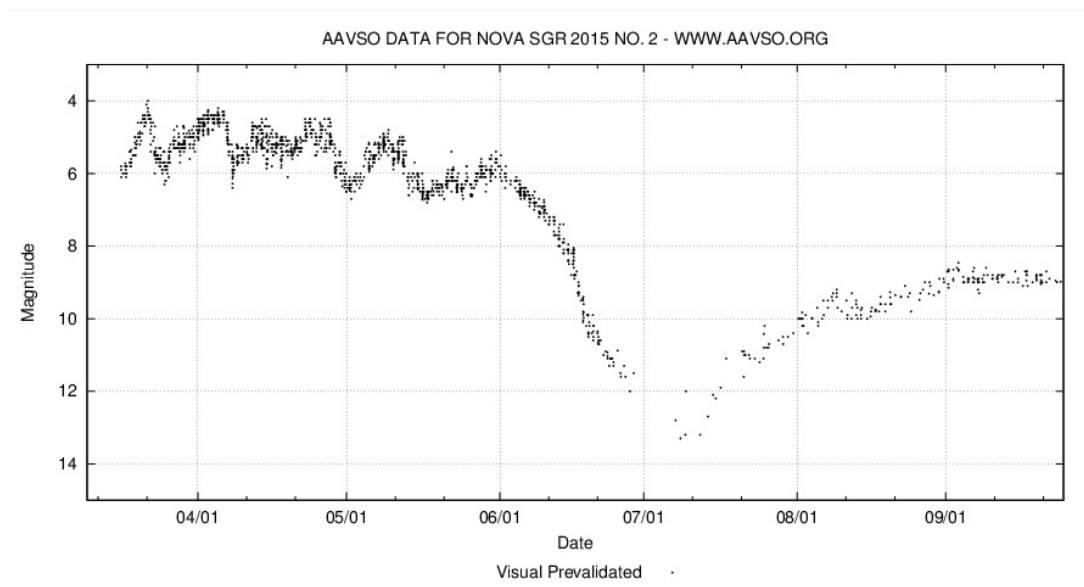


Figura 2.4: Curva de luz para la Nova V5668 Sgr obtenida de la AAVSO. Las bandas usadas fueron: Visual, B, V y R.

Entre el 19 de Marzo y Junio 17 se obtuvieron 46 espectros y después del 26 de Julio hasta el 11 de Octubre del 2015 se obtuvieron otros 26 espectros. La brecha entre ambas observaciones justo cuando ocurría el gran mínimo fue interrumpida debido al mantenimiento del TIGRE y a que no se pudieron hacer observaciones por estar fuera del alcance en magnitud. En la siguiente figura se muestra la curva de luz tomada de la AAVSO con línea continua y con triángulos las observaciones tomadas con el TIGRE. Las líneas punteadas

indican los días en los que se hizo una revisión exhaustiva de líneas espectrales. Dichos días fueron: 20 de marzo del 2015 a 5 días d.d., 10 de Mayo a 56 días d.d., 12 de Junio a 89 días d.d. y 20 de Septiembre a 189 días d.d.

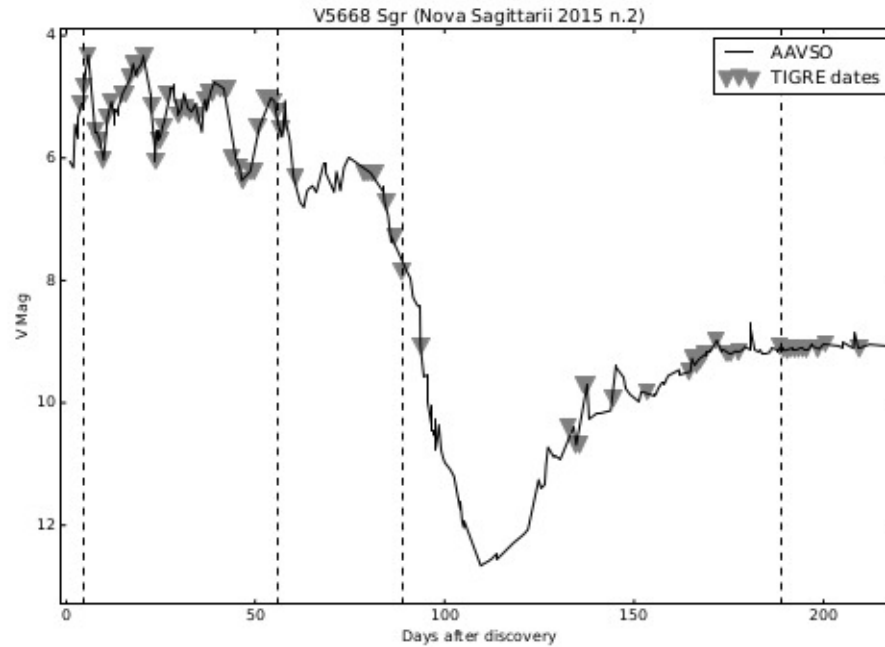


Figura 2.5: La línea continua representa la curva de luz tomada de la AAVSO y los triángulos las observaciones tomadas con el TIGRE. Las líneas punteadas representan los días en los que se realizó una exhaustiva identificación de líneas espectrales. Cuadro tomado de [13].

Finalmente se definieron 5 fases de declinación. Como se observa en la figura 2.6 ocurre un primer máximo 6 días d.d. Un segundo máximo 20 días d.d. y después en 2 o 3 días un decaimiento de la magnitud de aprox. 2.5 mag hasta su correspondiente mínimo a 24 días d.d para luego incrementarse hasta el tercer máximo. Un tercer máximo ocurre a los 41 días aprox. Y se tiene un decaimiento de aprox. 2 mag hacia el día 48 d.d donde ocurre el mínimo correspondiente. El cuarto máximo ocurre al día 56 aproximadamente y decae 1.5 órdenes de magnitud aproximadamente hasta el mínimo correspondiente en el día 60 d.d. El último máximo ocurre en el día 78 d.d. aprox. Y a partir de ahí decae hasta su profundo mínimo en la curva de luz hasta los primeros días de Julio para posteriormente incrementarse hasta sus fases estables a partir de Agosto.

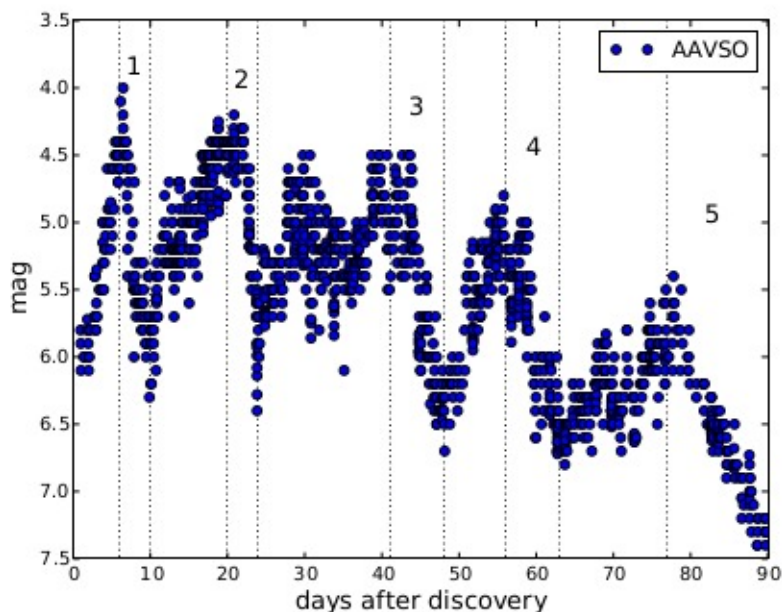


Figura 2.6: Se definen 5 máximos con sus respectivas 5 fases de decaimiento. La curva de luz fue obtenida de la AAVSO y el cuadro de [13].

2.4. Perfiles de línea

Hay muchos casos donde las líneas de emisión y absorción aparecen juntas en el mismo espectro. El ejemplo más conocido es el de P cygni que es una supergigante inestable y variable del tipo espectral B2 Ya. En el siglo XVII apareció como una estrella de 3ra magnitud por 6 años y después aparentemente desapareció. En el siglo XVIII ganó otra vez luminosidad hasta que llegó a su actual valor de 4.9 magnitud aproximadamente. En el área de la flecha azul una pequeña sección de la capa, que consiste de gas delgado, se mueve exactamente hacia la tierra y genera una línea de absorción corrida hacia el azul. Las flechas rojas simbolizan la luz, emitidas por secciones de la capa, que se expanden hacia los lados, produciendo líneas de emisión. En la combinación resulta una línea de emisión ancha y una línea de absorción corrida hacia el azul generalmente menos intensa. Los perfiles P Cygni están presentes en casi todos los tipos espectrales y son un signo confiable de un movimiento masivo radial de masa eyectada de una estrella. Vea figura 2.7. El objeto que se muestra es la Variable supergigante B2 Ia P Cygni, tomada desde el telescopio Hubble. Figura tomada de [20].

2.4.1. Medida de la velocidad de expansión

Diferentes tipos de estrellas expulsan, en ciertos estados de su evolución, fuertemente más o menos materia. El rango de velocidades va de muy lentas que son entre $20 - 30 \text{ km/s}$

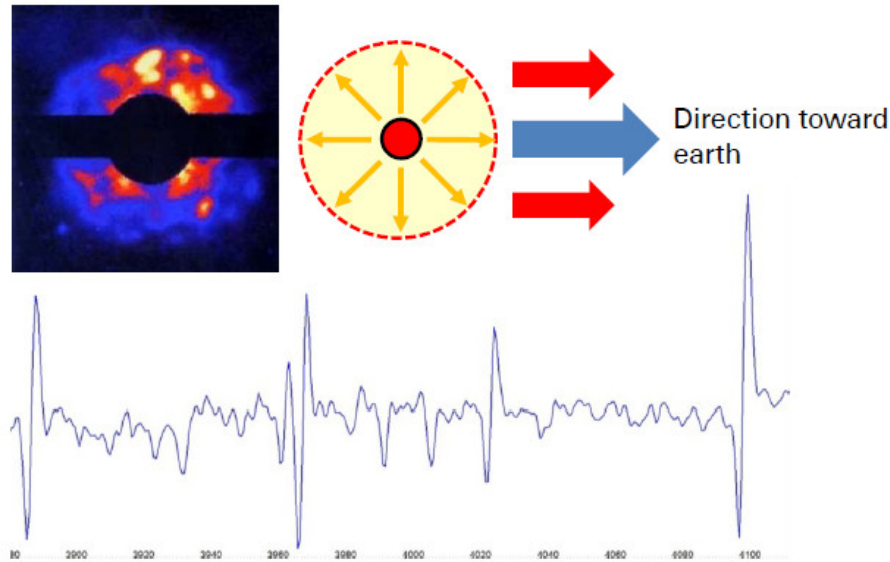


Figura 2.7: Esta figura muestra la capa en expansión tomada con el telescopio Hubble. Cubierta en el centro está la estrella variable supergigante B2 Ia P Cygni. El diagrama muestra la formación del perfil P Cygni que se muestran en la región violeta del espectro de 2800 Å a 4100 Å con el espectrógrafo DADOS 900 L/mm .

como típicamente es para una nebulosa planetaria hasta varios 1000 km/s para novae y hasta 30000 km/s para supernovas. Este proceso se manifiesta así mismo en diferentes síntomas espectrales que dependen principalmente de la densidad del material expulsado. La evaluación de este efecto con la fórmula Doppler se define enseguida a la velocidad de expansión de la envoltura estelar de P Cygni:

$$V_r = (\Delta\lambda/\lambda_o)c \quad (2.1)$$

Como una burda aproximación $\Delta\lambda$ medida en Angstroms se mide entre los picos de la emisión y de la parte del perfil P Cygni de absorción corrida hacia el azul. Dicha medida depende de la forma del perfil particular. Ver figura 2.8. El mismo concepto puede aplicarse a He I como se indica en la figura o a cualquier otra línea.

Una vez que se obtuvieron todos los espectros sumados por interpolación, el siguiente paso fue el de encontrar las velocidades de expansión de algunos elementos como, líneas de Hidrógeno: H I 6562.7 Å, H I 4861.3 Å, H I 4340.5 Å, H I 4101.7 Å, H I 3970.1 Å; líneas de Fe II como: Fe II 4233.2 Å, Fe II 4923.9 Å, Fe II 5018.4 Å, Fe II 5169.0 Å; líneas de Sodio como: Na I 5889.9 Å, Na I 5895.9 Å; líneas de Oxígeno como: O I 5577.3 Å, O I 7773.0 Å. En las siguientes figuras solo se muestra la geometría de los perfiles de líneas para el primer día de observaciones que fue el 19 de Marzo como en la fig. 2.9 para H_β y H_γ . Y en la figura 2.10 el perfil de línea del Fe II 4923.3 Å y el perfil de la línea de sodio que presenta

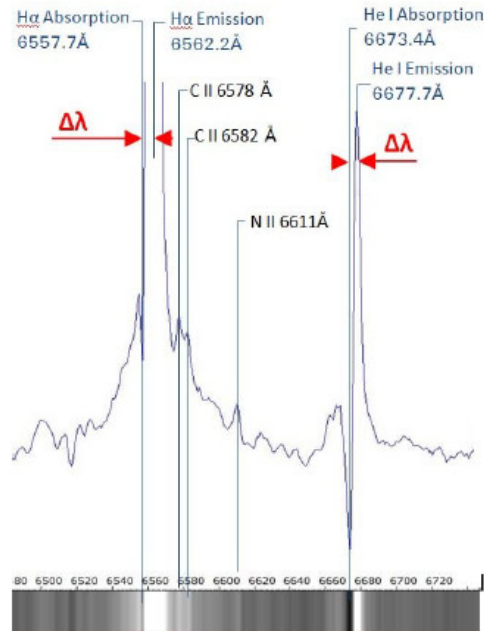


Figura 2.8: Aquí se muestra la diferencia medida pico a pico para la línea H_{α} donde $\Delta\lambda = \lambda_{azul} - \lambda_{rojo} = 6557,7 \text{ \AA} - 6562,2 \text{ \AA} = -4,5 \text{ \AA}$ con $\lambda_o = 6562,8 \text{ \AA}$ y $c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$, $V_r = -2066 \text{ km/s}$. El mismo concepto se puede aplicar para medir la velocidad radial de la línea He I, [20].

absorción interestelar denotado por los prolongados rasgos de absorción. La característica de estos perfiles de línea como por ejemplo para el perfil de línea de H_{β} (figura 2.9) es que su pico de emisión se encuentra en la longitud de onda de reposo del elemento que corresponde a 0 km/s , el perfil es P Cygni donde se nota un corrimiento hacia el azul y en algunos casos con varios rasgos de absorción bien definidos en este dominio.

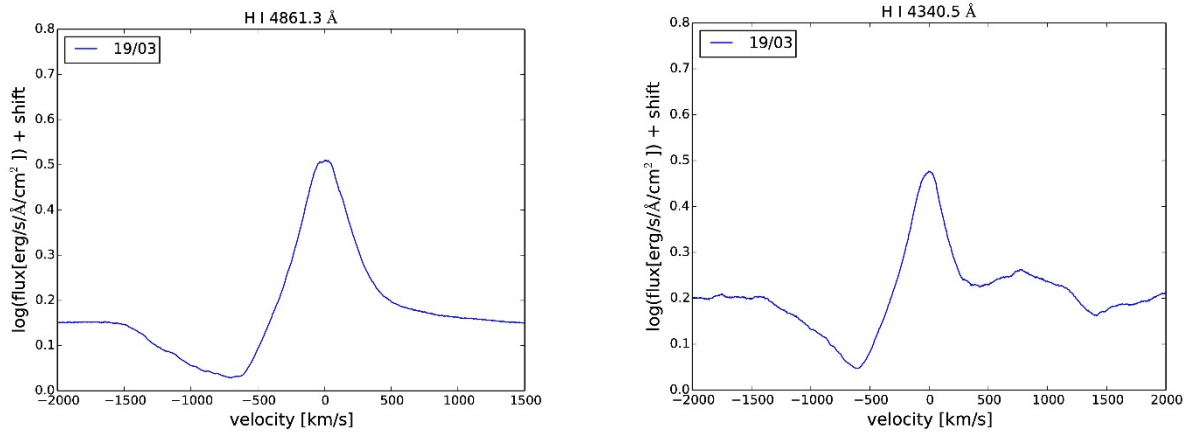


Figura 2.9: Geometría de los perfiles de línea para H_β H_γ . El perfil P cygni está bien definido. La velocidad mínima para H I 4861.3 Å es de aproximadamente -700 km/s y la velocidad de expansión mínima para H I 4340.5 Å es de -580 km/s .

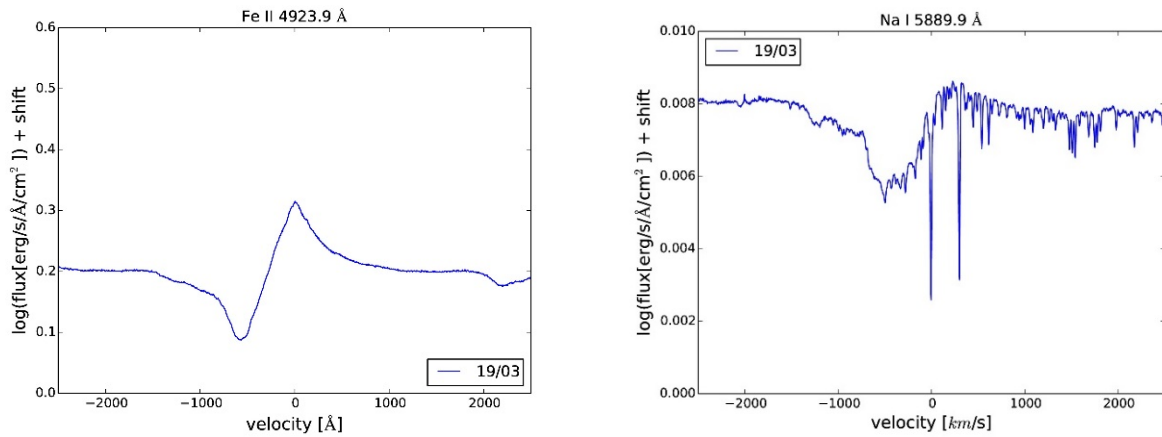


Figura 2.10: Geometría de los perfiles de línea para el Fe II 4923.9 Å y particularmente el perfil de línea para el Na I 5889.9 Å que muestra un par de líneas de absorción interestelar. La velocidad mínima de expansión del Fe II 4923.9 Å es de -530 km/s . El perfil de línea del Na I viene de la combinación de dos líneas de Na I.

Capítulo 3

Identificación de líneas espectrales de la Nova V5668 Sgr

3.1. ¿Porqué identificar líneas espectrales?

Después del pico de la explosión o primer máximo, la estrella se calienta pero mantiene su luminosidad notablemente constante ya que, pasado dicho pico, continúa la combustión del Hidrógeno a un ritmo uniforme, hasta que se agota. El aumento de la temperatura, por su parte, hace que la mayor cantidad de la radiación emitida por la enana blanca se desplace a longitudes de onda ubicadas entre el ultravioleta y los rayos X. Estos fotones de alta energía incrementan el nivel de ionización del gas. La identificación de los mecanismos que generan los cambios reflejados en las líneas espectrales permitiría estimar la composición química del gas y su masa total. La energía luminosa emitida por iones en la frecuencia correspondiente a determinada línea depende de la abundancia de estos, de la temperatura y de la densidad del gas.

Tales líneas son producidas por los átomos del gas: el cambio en la energía orbital de los electrones cuando realizan una transición toma valores específicos que pueden calcularse valiéndose de la física cuántica.

Inversamente, observando las líneas de emisión en el espectro de la luz de una estrella, es posible inferir qué substancia química las produjo y en qué condiciones físicas.

Como caso particular las líneas de recombinación de Hidrógeno se producen por captura de electrones por parte de protones y posterior decaimiento de estos, con emisión de fotones, hacia órbitas más próximas al núcleo. Por lo tanto, la temperatura del gas es el principal parámetro que determina la intensidad de la línea, ya que controla la población de los niveles orbitales. En otras palabras, ¿Cuántos átomos están en condiciones de generar en un mo-

30CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESPECTRALES DE LA NOVA V5668 SGR

mento dado la línea observada?. Si la temperatura fuese demasiado alta, los electrones se mantendrían mucho más lejos del núcleo y no podrían formar dicha línea; Si fuese demasiado baja, tampoco. La densidad del gas influye, aunque en menor medida.

Las fechas en las que se identificaron todas las líneas que presentan rasgos espectrales en el rango de 3800 Å a 8800 Å, son: 20 de Marzo del 2015 que corresponde al primer máximo de la curva de luz, 5 días después del descubrimiento; 10 de Mayo del 2015 que corresponde al cuarto máximo de la curva de luz, 56 días después del descubrimiento; Junio 12 del 2015 que corresponde al inicio de la prolongada caída profundo mínimo de la curva de luz, 89 días después del descubrimiento y 20 de Septiembre del 2015 que corresponde a la fase de emisión, 189 días después del descubrimiento. Para este análisis detallado se utilizó el atlas espectral presentado en De Gennaro Aquino et al (2015). Para el día 20 de Marzo se obtuvieron la mayor cantidad de líneas espectrales. La clasificación se hace respecto a la longitud de onda en reposo. En cada cuadro se indica el elemento y su estado de ionización marcado por una cruz para las fechas en las que fue detectado. Ver cuadro 3.1

	0320	0510	0612	0920		0320	0510	0612	0920
HI 3835.4	X	X	X	X	FeII 5018.14	X	X		
SiII 3856.0	X				NII 5045.1	X			
SiII 3862.6	X				FeII 5169.0	X	X		
HI 3889.1	X	X	X		FeII 5197.6	X			
TiII 3900.5	X				FeII 5234.6	X	X		
FeII 3906	X				FeII 5276.0	X	X		
TiII 3913.5	X				FeII 5316.6	X	X		
CaII 3933.7	X	X	X		FeII 5362.8	X			
CaII 3968.5	X	X		X	FeII 5532.1	X			
HI 3970.1	X	X	X		HeI 5875.6			X	
NII 3995.0			X		NaI 5889.9	X	X	X	X
SrII 4077.7			X		NaI 5895.9	X	X	X	X
HI 4101.7	X	X	X	X	FeII 6247.6	X			
SiII 4130.9	X	X			[OI] 6300.3	X	X	X	
FeII 4173.5	X				SiII 6347.1	X			
FeII 4178.9	X				[OI] 6363.7				X
FeII 4233.2	X	X	X	X	SiII 6371.4	X			
CII 4267.2			X		FeII 6456.4	X	X		
FeII 4303.2	X	X			HI 6562.7	X	X	X	X
HI 4340.5	X	X	X	X	HeI 7065.2			X	X
HI 4101.7	X	X	X	X	FeII 6247.6	X			
FeII 351.8	X	X			CI 7115.0		X		
FeII 4385.4	X				[OII] 7320				X
FeII 4416.3	X				NI 7442.3	X			
FeII 4416.8		X	X		NI 7468.2		X		
HeI 4471.5			X		OI 7773.0	X	X	X	
MgII 4481.2	X	X	X		OI 8446.3	X	X	X	X
NIII 4514.9			X		CaII 8498.0	X	X		
FeII 4491.4	X	X			CaII 8542.1	X	X		
FeII 4522.6	X				HI 8598.4	X			
FeII 4549.5	X				NI 8629.2	X			
FeII 4555.8	X	X			HI 8750.5	X			
TiII 4572.0	X	X			HI 8862.8	X	X		
FeII 4583.8	X	X							
FeII 4629.3	X	X							
HeII 4685.8				X					
CrII 4824.1	X								
HI 4861.3	X	X	X	X					
FeII 4923.9	X	X	X						
OIII 5006.8			X	X					

Cuadro 3.1: Espectros y fechas de captura.

32CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESPECTRALES DE LA NOVA V5668 SGR

Para el primer máximo que ocurre el día 20 de Marzo, 5 días d.d. se identificaron la mayoría de líneas espectrales que se mostrarán en orden según la longitud de onda. En el eje X se tienen las longitudes de onda en Angstroms y en el eje Y el flujo. Para poder apreciar las líneas espectrales se mostrarán en diferentes intervalos. El primer intervalo corre de 3800 \AA a 3968 \AA y se encontraron líneas de Balmer: H_η , 3835 \AA y 3889 \AA H_ζ ; 2 líneas de Si I: 3856.0 \AA Si I y 3862.6 \AA Si I; dos de Ti: 3900.5 \AA Ti I y 3913.5 \AA Ti II; 1 línea de Fe II 3906.0 \AA y dos de Ca II: 3933.7 \AA y 3968 \AA que presentan absorción interestelar mostrada por la prolongada línea. Ver Figura 3.1.

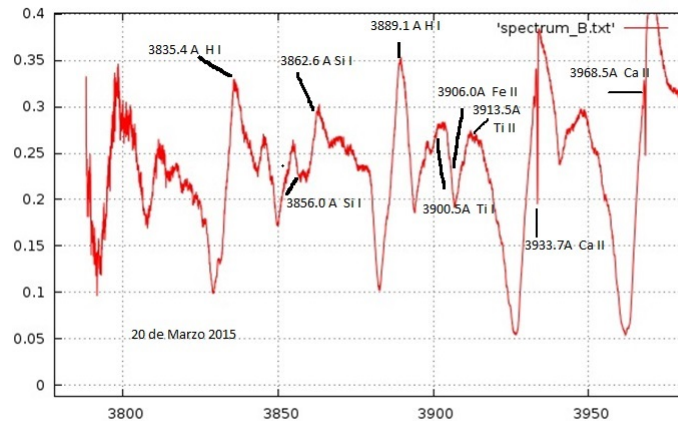


Figura 3.1: Líneas espectrales identificadas entre 3800 \AA y 3968 \AA de la Nova V5668 Sgr. Las líneas de Ca II muestran rasgos de absorción interestelar.

En la figura 3.2 se identifican las siguientes líneas espectrales para el 20 de marzo del 2015: Ahora el rango de longitudes de onda corre de 3968 \AA a 4360 \AA y se identificaron 3 líneas de Balmer: H_ϵ o HI 3970.1 \AA , H_δ o HI 4101.7 \AA y H_γ o 4340.5 \AA ; 5 líneas de Fe II: 4173.5 \AA , 4178.9 \AA , 4233.2 \AA , 4303.2 \AA y 4351.8 \AA ; y Si I 4130.9 \AA .

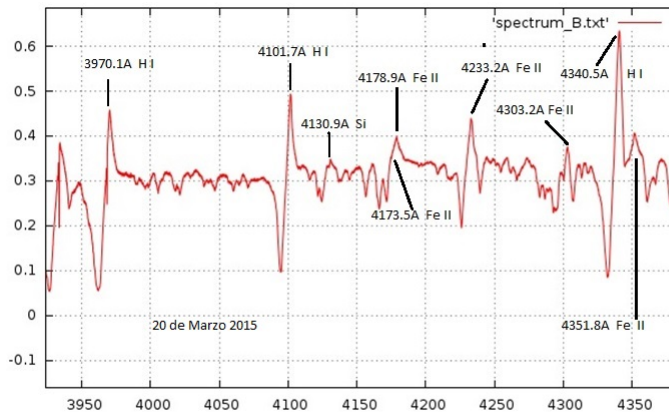


Figura 3.2: Líneas espectrales identificadas entre 3968 Å y 4360 Å del 20 de Marzo. Entre ellas 3 líneas de Balmer, Si II y cinco líneas de Fe II.

En la Fig. 3.3, se identificaron las siguientes líneas espectrales para el 20 de Marzo del 2015, en el rango de 4360 Å a 4800 Å: 4385.4Å Fe II, 4416.3 Å Fe II, 4481.2 Å Mg II, 4491.4 Å Fe II, 4522.6 Å Fe II, 4549.5 Å Fe II, 4555.8 Å Fe II, 4572.0 Å Ti II, 4583.8 Å Fe II y 4629.3 Å Fe II.

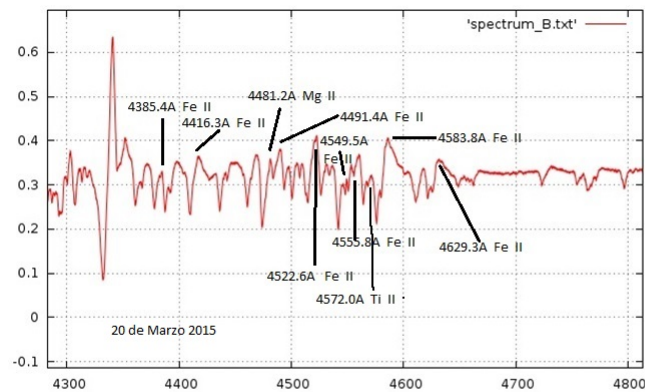


Figura 3.3: Líneas espectrales identificadas entre 4360 Å y 4800 Å. Principalmente líneas de Fe II, y particularmente Mg II y Ti II.

En la figura 3.4 se muestran para el 20 de Marzo las siguientes líneas espectrales, en el rango de 4800 Å a 5400 Å: 4824.1 Å Cr II, 4861.3 Å HI, 4923.9 Å Fe II, 5018.4 Å Fe II, 5045.1 Å NII, 5169.0 Å Fe II, 5197.6 Å Fe II, 5234.6 Å FeII, 5276.0 Å Fe II, 5316.6 Å Fe II y 5362.8 Å Fe II.

34CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESPECTRALES DE LA NOVA V5668 SGR

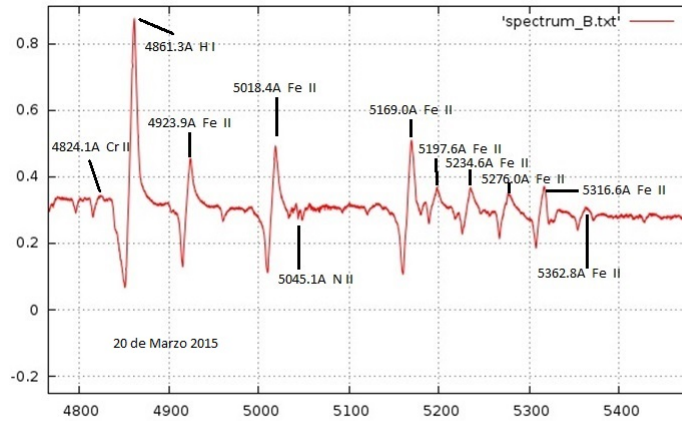


Figura 3.4: Líneas espectrales identificadas entre 4800 Å y 5400 Å. H_{β} , Cr II, N II y 8 líneas de Fe II.

En la figura 3.5 se muestran las líneas identificadas para el día 20 de Marzo en el canal rojo. En el rango de 5500 Å a 9000 Å. Una línea de Paschen fue identificada: 8598.4 Å HI 5889.9 Å y 5895.9 Å para el doblete de sodio Na I, 6247.6 Å Fe II, 6347.1 Å SiII, 6371.4 Å Si II, 6456.4 Å Fe II, 6562.7 Å HI, 7442.3 Å N I, 7468.2 Å N I, 7773.0 Å O I, 8446.3 Å O I, 8498.0 Å Ca II, 8542.1 Å Ca II y 8598.4 Å H I.

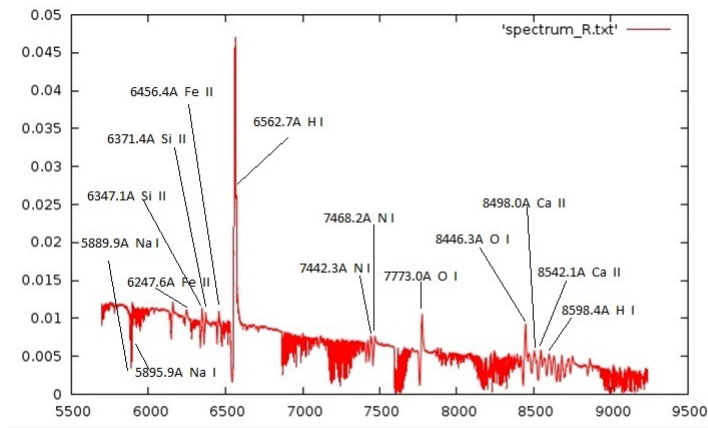


Figura 3.5: Líneas espectrales identificadas entre 5500 Å y 9000 Å. El doblete de Na I, 2 líneas de Fe II, 2 líneas de Si II, H_{α} , una línea de Paschen, dos de NI, dos de O I y dos de Ca II del 20 de Marzo.

En la Fig. 3.6 se muestran las últimas líneas espectrales identificadas para el 20 de Marzo en el canal rojo, entre 8400 Å y 8900 Å ya que aquí aparecen líneas de Paschen y puede apreciarse a su vez la gran cantidad de líneas telúricas en los siguientes rangos: 6750 Å a 7400 Å y de 7800 Å a 8360 Å mas notablemente: 8446.3 Å O I, 8498.0 Å Ca II, 8542.1 Å Ca

II, 8598.4 Å H I, 8629.2 Å H I, 8750.5 Å H I y 8862.8 Å H I.

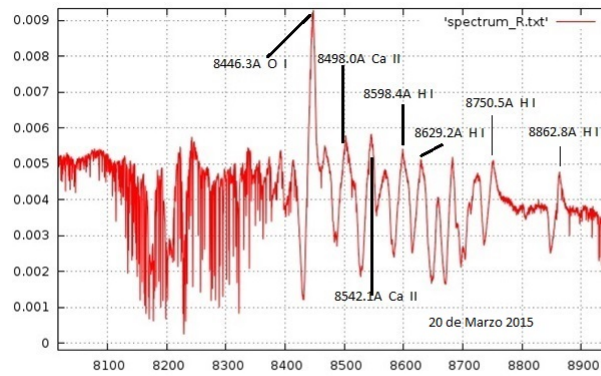


Figura 3.6: Líneas espectrales identificadas más específicamente en el rango de 8400 Å a 8900 Å, cuatro líneas de Paschen, una de O I y dos de Ca II. Las líneas muy delgadas entre 8100 Å y 8360 Å son líneas telúricas.

En la figura 3.7 se muestra además de algunas líneas espectrales comunes con las respectivas del máximo del 20 de Marzo, la aparición de la línea espectral 4416.8 Å Fe II para el 10 de Mayo del 2015. En el canal azul.

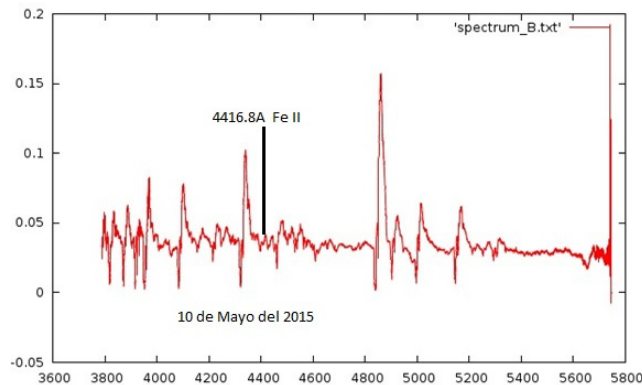


Figura 3.7: Aquí se muestran las mismas líneas que en la figura 3.3 pero se resalta la línea de Fe II 4416.8 Å del 10 de Mayo que no aparece el 20 de Marzo.

36CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESPECTRALES DE LA NOVA V5668 SGR

En la figura 3.8 se muestran las líneas espectrales propias del 10 de Mayo del 2015 en el canal rojo, a saber : 7115.0 \AA C I, 7468.2 \AA N I. El rango ahora es de 6000 \AA a 8500 \AA y las líneas diferentes solo son estas dos. H_{α} se puede notar en todos los espectros 6562.7 \AA y también se pueden apreciar líneas telúricas entre 6800 \AA a 7400 \AA , entre 7600 \AA y 7700 \AA y entre 8200 \AA y 8400 \AA .

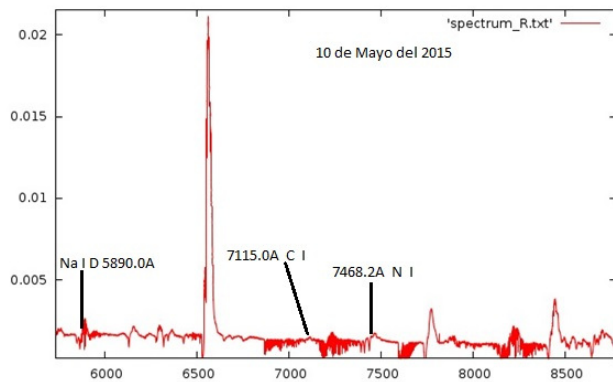


Figura 3.8: Líneas espectrales diferentes detectadas el 10 de Mayo en el rango de 7000 \AA a 7500 \AA , C I y N I.

En la figura 3.9, se muestran las líneas espectrales identificadas propias del 12 de Junio del 2015, entre 3800 \AA y 5100 \AA . Aparece por primera vez la línea 5006.8 \AA O III. 3995.0 \AA N II, 4077.2 \AA Sr, 4267.2 \AA C II, 4471.5 \AA He I, 4514.9 \AA N III y 5006.8 \AA O III.

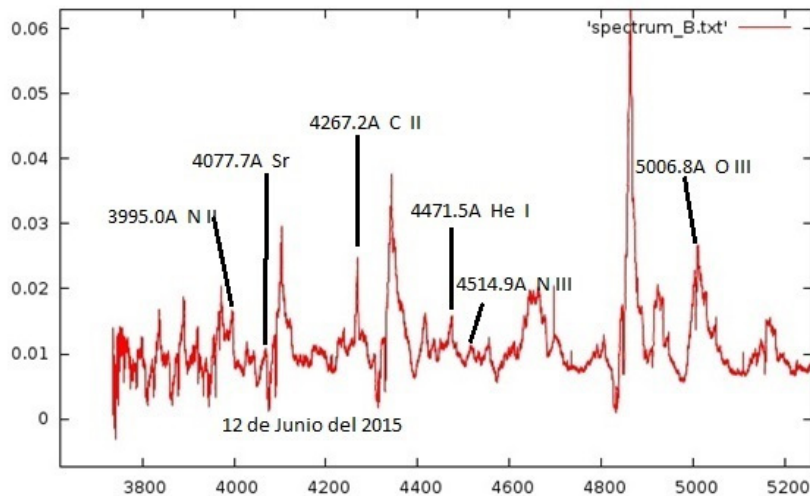


Figura 3.9: Líneas espectrales diferentes identificadas el 12 de Junio en el rango de 3950 \AA a 5100 \AA . Aparecen N II, Sr, C II, He I, N III y O III como se muestra.

En la figura 3.10, se muestra la línea propia del 12 de Junio del 2015 en el canal rojo:

5875.6 Å He I. El rango va de 6000 Å a 8600 Å. Como después se analizará, las líneas espectrales ahora tienen menos características de absorción y más de emisión como lo muestra H_α 6562.7 Å y OI 7773.0 Å. Aquí solo se muestra la línea diferente que apareció en esta fecha: He I 5875.6 Å.

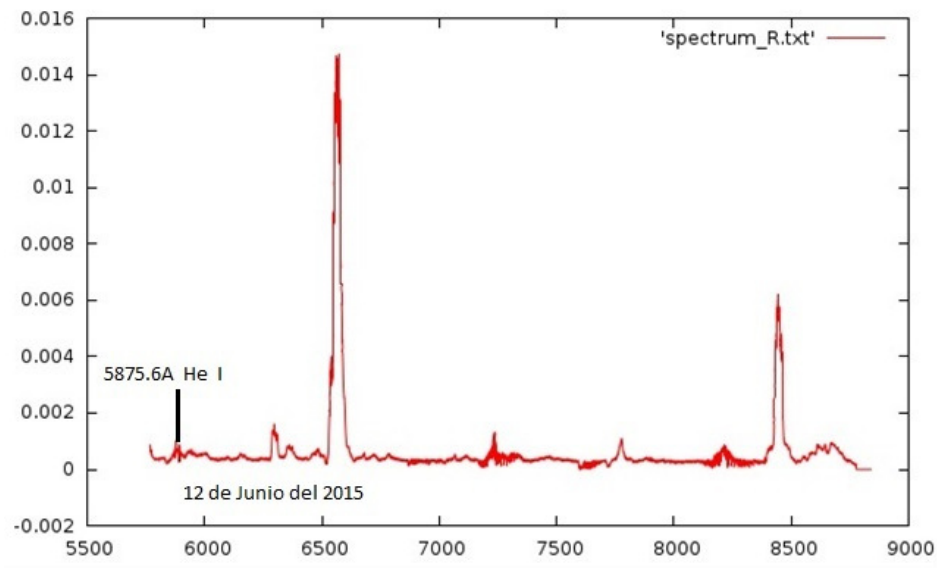


Figura 3.10: Única línea espectral diferente identificada el 12 de Junio entre 5500 Å y 6000 Å He I 5875.6 Å.

38CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESPECTRALES DE LA NOVA V5668 SGR

En la figura 3.11, se muestra la línea espectral propia identificada el 20 de Septiembre del 2015: 4685.8 \AA He II y también se muestra la línea común 5006.8 \AA O III, en el rango de 4500 \AA y 5100 \AA más específicamente. Línea propia es la línea que fue diferente de las líneas identificadas en anteriores fechas. La línea 5006.8 \AA O III fue detectada con anterioridad y por eso se muestra como una línea común.

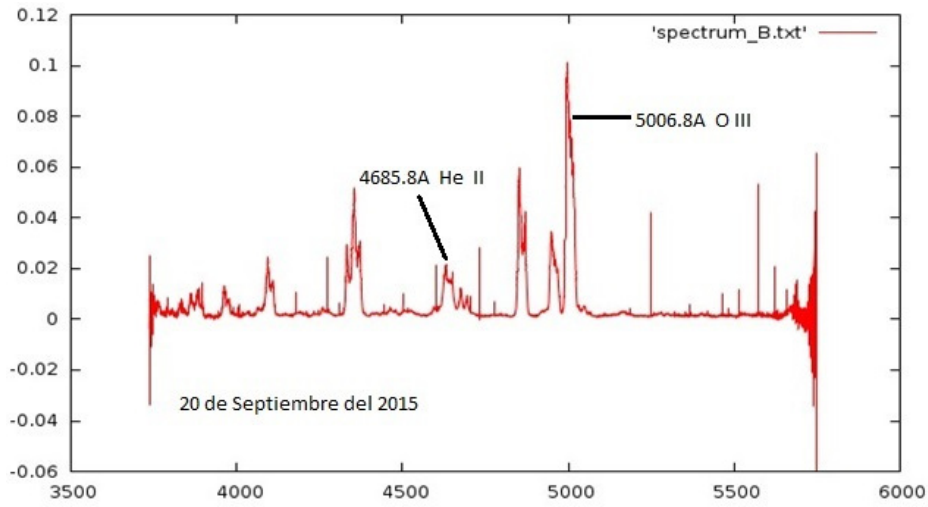


Figura 3.11: Línea espectral diferente identificada unicamente el 20 de Septiembre entre 4500 \AA y 5000 \AA : He II 4865.8 \AA . La línea de O II fue identificada también el 12 de Junio y mas claramente el 20 de Septiembre.

Finalmente en la figura 3.12 se muestran las líneas espectrales propias del 20 de septiembre del 2015 en el canal rojo: 6300.3 \AA O I, 6363.7 \AA O I, 7065.2 \AA He I, 7320.0 \AA O II y 8446.3 \AA O I. En el rango de 6000 \AA a 8500 \AA aparecen por primera vez las líneas prohibidas de Oxígeno O [I] y O [II] y se puede resaltar la línea común más pronunciada presente en todos los espectros H_{α} 6562.7 \AA solo en emisión practicamente.

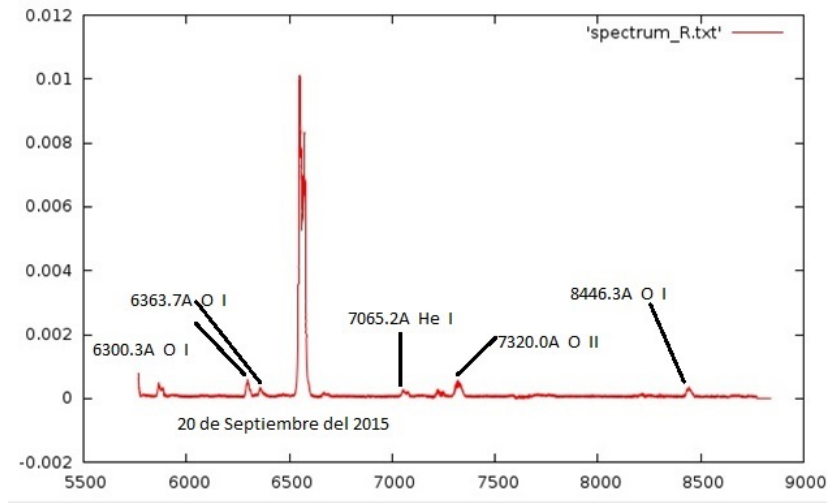


Figura 3.12: Líneas espectrales diferentes identificadas el 20 de Septiembre entre 6000 Å y 8500 Å. Aparecen por primera vez tres líneas de O I, una línea de O II y el He I 7065 Å, H_{α} 6562.7 Å es común a todas las fechas.

3.2. Características generales de las líneas espectrales de V5668 Sgr

Cuando la Nova V5668 Sgr estuvo en su primer máximo el 20 de Marzo del 2015 los perfiles de las líneas fueron P Cygni. Entonces todos los perfiles mostraron el pico de emisión en la longitud de onda en reposo y un rasgo de absorción corrido hacia el azul que corresponde a una velocidad de expansión negativa que es provocado por el gas expulsado y que se mueve hacia el observador. Se pueden observar algunas líneas de Balmer y algunas líneas de Hierro como se muestra en la figura 3.13. En la figura 3.14 se muestra la curva de velocidad correspondiente a H I 4340.5 Å con su perfil P Cygni bien definido.

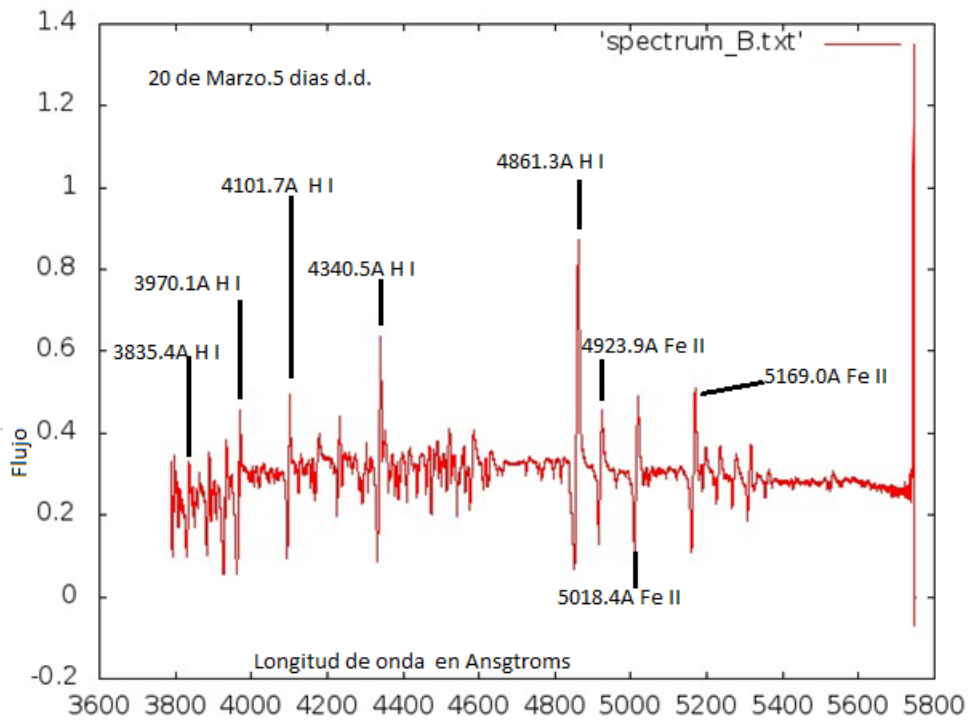


Figura 3.13: En el primer máximo de la curva de luz del 20 de Marzo los perfiles de las líneas de Balmer están muy bien definidos como P Cygni igual que para las líneas de Fe II.

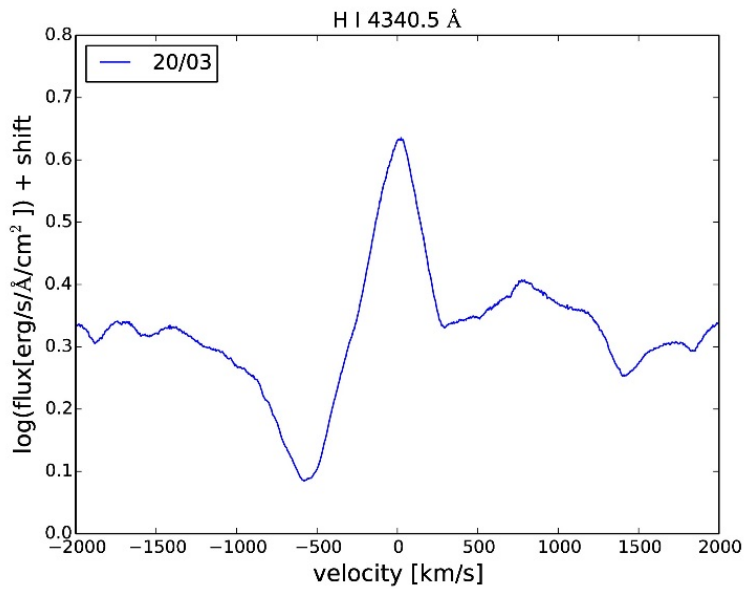


Figura 3.14: Perfil de la línea correspondiente a H I 4340.5 Å. El perfil P Cygni está bien definido.

En Mayo 10, cerca del cuarto máximo, las líneas espectrales de Balmer siguen estando presentes. La característica más especial ahora es que los rasgos de emisión son más anchos como se puede ver en la figura 3.15. Si se comparan una a una cualesquiera líneas de espectro con las líneas espectrales correspondientes de la figura 3.13 se verá que estas son más anchas entre 3800 Å a 5500 Å.

42CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS ESPECTRALES DE LA NOVA V5668 SGR

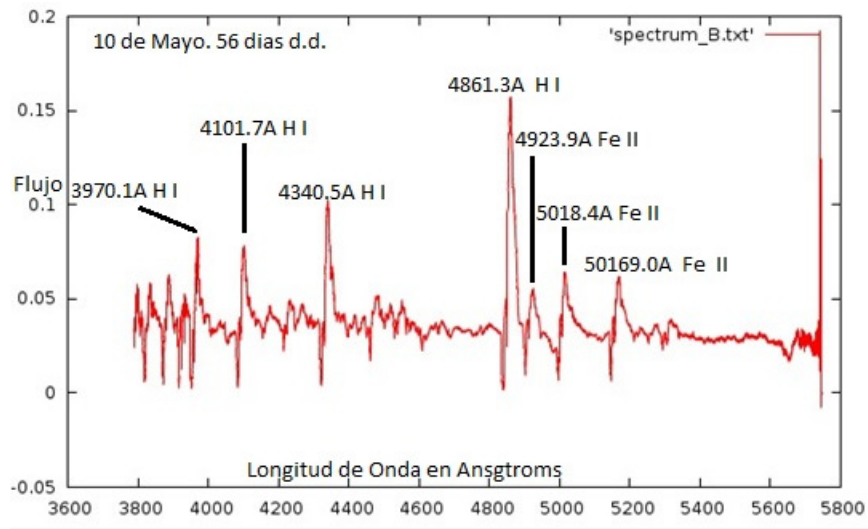


Figura 3.15: Los rasgos de emisión son más anchos, por ejemplo las líneas 4861.3 Å H I y 4340.5 Å H I son más anchas que sus respectivas en la figura 3.13.

Hacia el mínimo profundo de la curva de luz se registró el 12 de Junio del 2015 el espectro correspondiente. Ahora las líneas de Balmer muestran principalmente características de emisión pero todavía tienen muy poco rasgo de absorción en la figura 3.16 mientras que las líneas espectrales del hierro solamente están en emisión en cualquier rango.

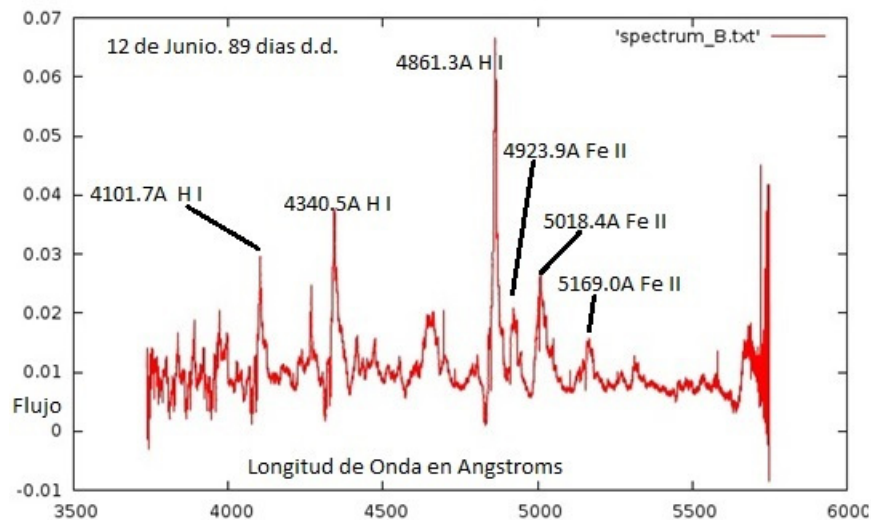


Figura 3.16: Líneas espectrales 12 de Junio 2015.

Después del profundo mínimo en la curva de luz, el 20 de Septiembre a los 189 días d.d. se obtuvo el correspondiente espectro. Se pueden observar solamente rasgos de emisión en cualquier rango. Ya no hay rasgos de absorción en absoluto y aparecen algunas nuevas líneas como 4638.0Å N III. Ver figura 3.17.

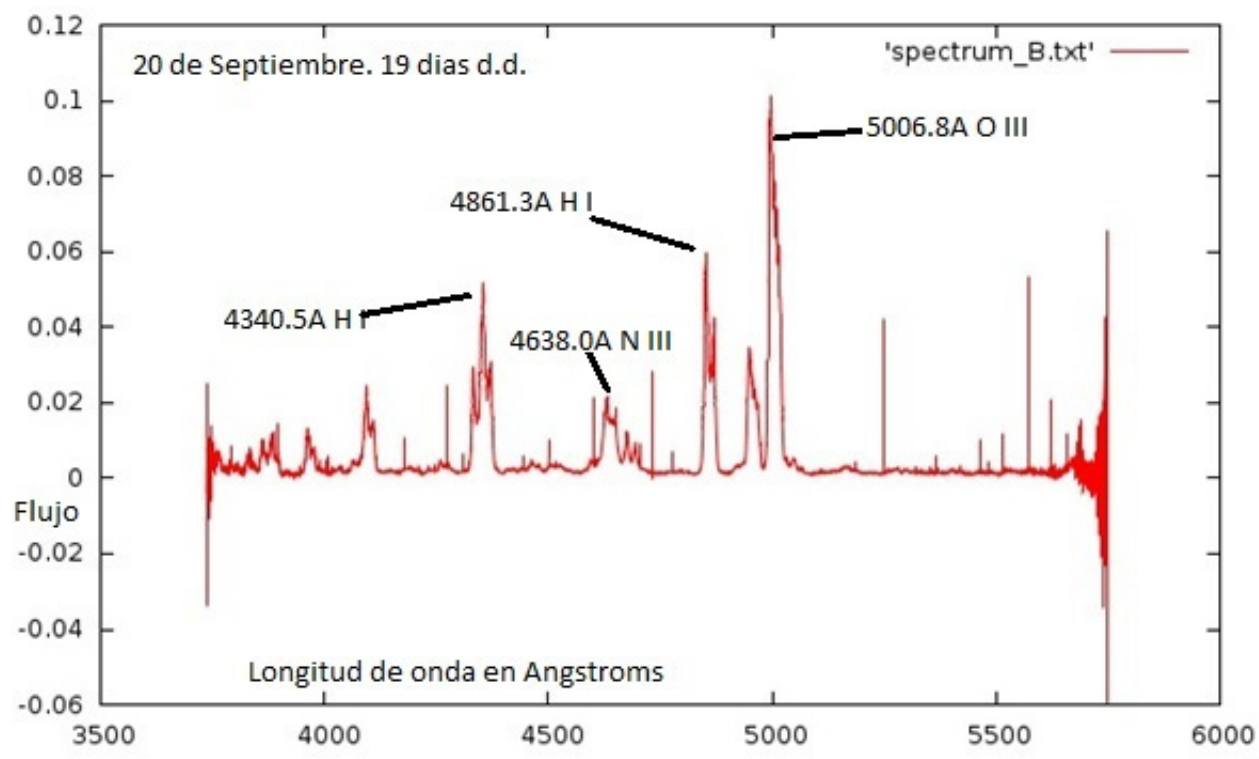


Figura 3.17: A los 189 días d.d. solamente hay rasgos de emisión, en las líneas espectrales ya no hay rasgos de absorción en absoluto.

3.3. Fase de emisión

Como se muestra en la figura 3.18 hay muy poca absorción antes de la gran caída hacia el mínimo de la curva de luz. Las líneas muy estrechas realmente son líneas telúricas. El 12 de Junio ha iniciado la caída hasta el gran mínimo de la curva de luz y la evolución de los espectros también cambia a su fase final que es la de emisión para cualquier rango en cualquier canal rojo o azul.

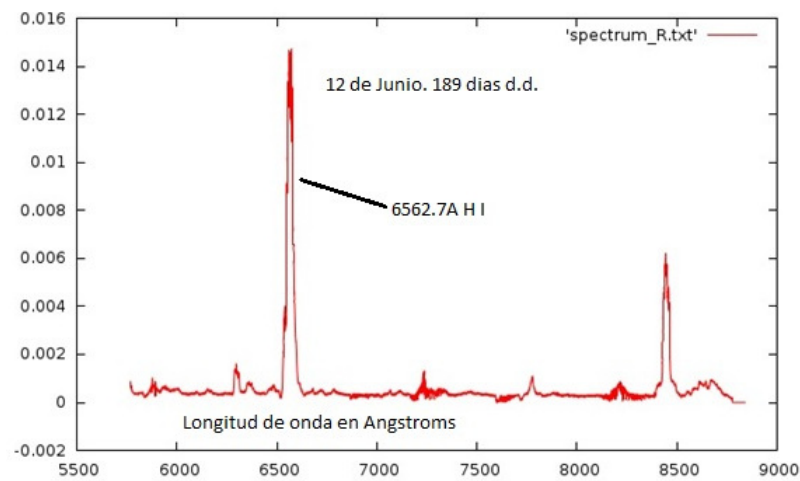


Figura 3.18: Hay muy poco rasgo de absorción como para H_{α} . Las líneas muy delgadas y estrechas son líneas telúricas.

Para apreciar la evolución de la fase de emisión se muestra el perfil de línea de expansión para H I 6562.7 Å el día 12 de Junio donde se pueden distinguir los picos de emisión y el rasgo de absorción aproximadamente entre -1000km/s y -600km/s .

Cuando la curva de luz regresa de su profundo mínimo hacia la fase constante se nota una estructura de doble pico como la mostrada en la fig. 3.19 que en su forma es idéntica a la curva de velocidad de expansión de la misma línea para el 1 de Octubre del 2015 como se muestra en la fig. 3.19

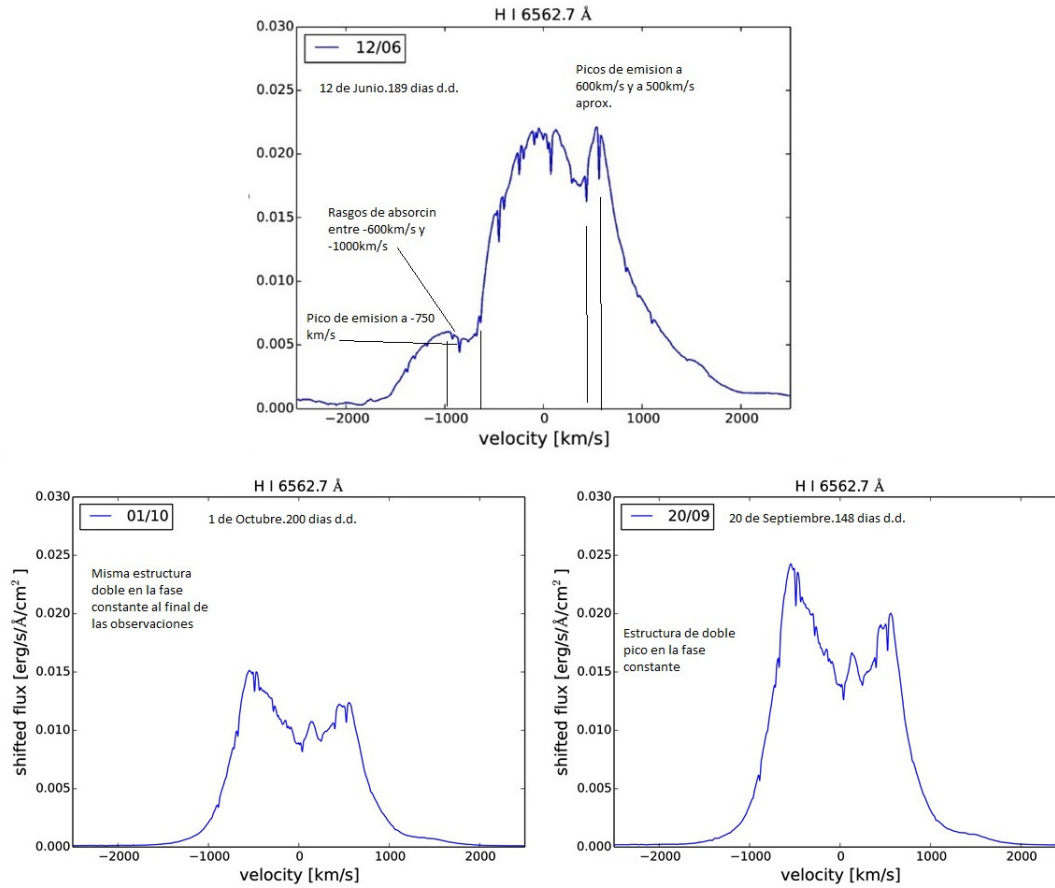


Figura 3.19: Evolución de la línea de emisión solamente para H_{α} . La línea de emisión para el 1 de Octubre es prácticamente la misma que la del 20 de Septiembre pero a escala y la línea del 20 de septiembre tiene solo pico de emisión comparada con la del 12 de Junio que todavía tiene rasgos de absorción entre -600 km/s y -1000 km/s .

Capítulo 4

Estudio de rasgos característicos en las fases de declinación de la curva de luz de la Nova V5668 Sgr

En la curva de luz de la Nova V5668 Sgr se definieron 5 fases de declinación o caída de brillo para las partes más variantes de las curvas de luz que ocurren en los primeros 90 días. Un primer máximo ocurre a los 6 días d.d.; el segundo máximo a los 20 días d.d.; el tercero máximo a los 41 días d.d.; el cuarto máximo a los 56 días d.d. y el quinto máximo a los 78 días d.d. El objetivo ahora es analizar la conducta de las velocidades de expansión para algunos perfiles de líneas que faciliten el análisis. Antes del primer máximo la envoltura de la nova parece cambiar a fase de transición mostrando sus espectros más complejos con perfiles de emisión.

4.1. Segunda caída de la curva de luz HI 4101.7 Å

Si ignoramos la parte de la emisión de la línea cuyo máximo está en la longitud de onda en reposo a $0km/s$ y nos concentramos en la parte negativa de la velocidad de expansión del perfil de línea para todas las caídas se observará que para HI 4101.7 Å a los 21 días d.d. se encuentra en su segundo máximo y solamente se encuentran rasgos de absorción a una velocidad de expansión aproximada a $-900km/s$, gráfica 1, fig. 4.1, y 3 días después dichos rasgos se encuentran entre $-1500km/s$ y $-900km/s$ donde la curva ya está decayendo a su segundo mínimo que se llega a los 24 días aproximadamente, gráfica 2, fig 4.1. Durante la siguiente fase hacia el tercer máximo, por ejemplo para el día 26 d.d., la velocidad de expansión cambia ligeramente a velocidades de expansión menores a $-1500km/s$, gráfica 3, fig. 4.1. Conforme el brillo va disminuyendo los rasgos de absorción se van moviendo a velocidades mayores de expansión hacia nosotros. Esto se muestra en la gráfica 4, fig. 4.1. Hay un grupo de velocidades de expansión que no varían significativamente a $-500km/s$.

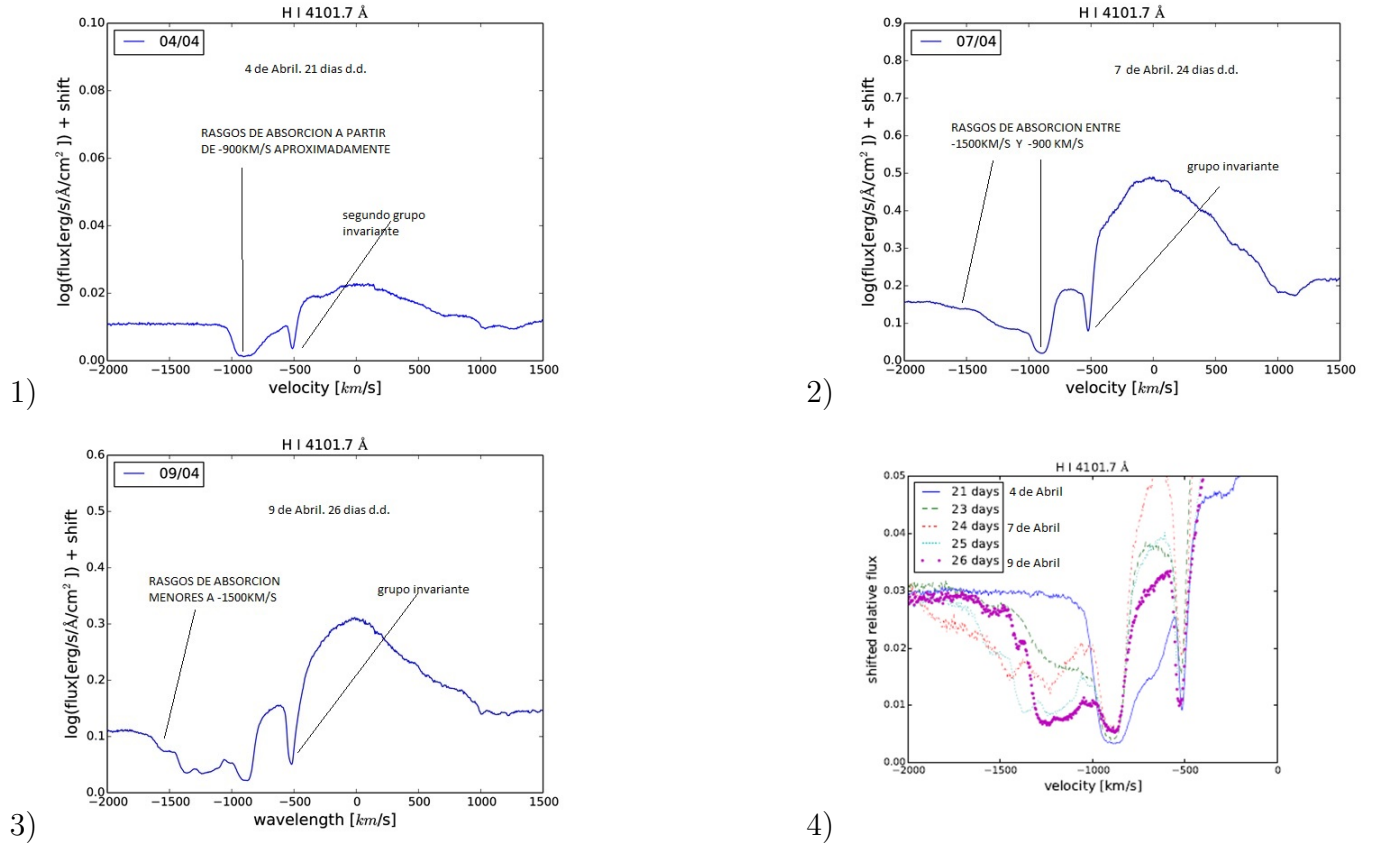


Figura 4.1: Perfiles de línea de HI 4107.7 Å. A medida que va cayendo el brillo las velocidades de expansión aumentan como lo resume la figura 4).

4.2. Tercera caída de la curva de luz HI 4861.3 Å

Haciendo la misma consideración respecto a la línea HI 4101.7 Å concentrándonos solamente en la parte de la velocidad negativa de expansión tendremos que para el tercer máximo que ocurre a los 41 días d.d. el espectro muestra solamente rasgos de absorción para velocidades menores a -1400km/s aproximadamente, gráfica 1, figura 4.2; 46 días d.d. los rasgos de absorción se dan entre -1500km/s y -1000km/s , gráfica 2, figura 4.2, y finalmente en el tercer mínimo de la curva de luz los rasgos de absorción están entre -1800km/s y -1000km/s , gráfica 3, figura 4.2. Para los subsiguientes 52 y 54 días d.d. también se puede notar un cambio en la velocidad de expansión rumbo al cuarto máximo de la curva de luz. Se observa nuevamente que cuando hay disminución de brillo los rasgos de absorción se mueven

a velocidades de expansión cada vez mayores hacia nosotros. En la gráfica 4, figura 4.2 se puede observar este comportamiento de forma general.

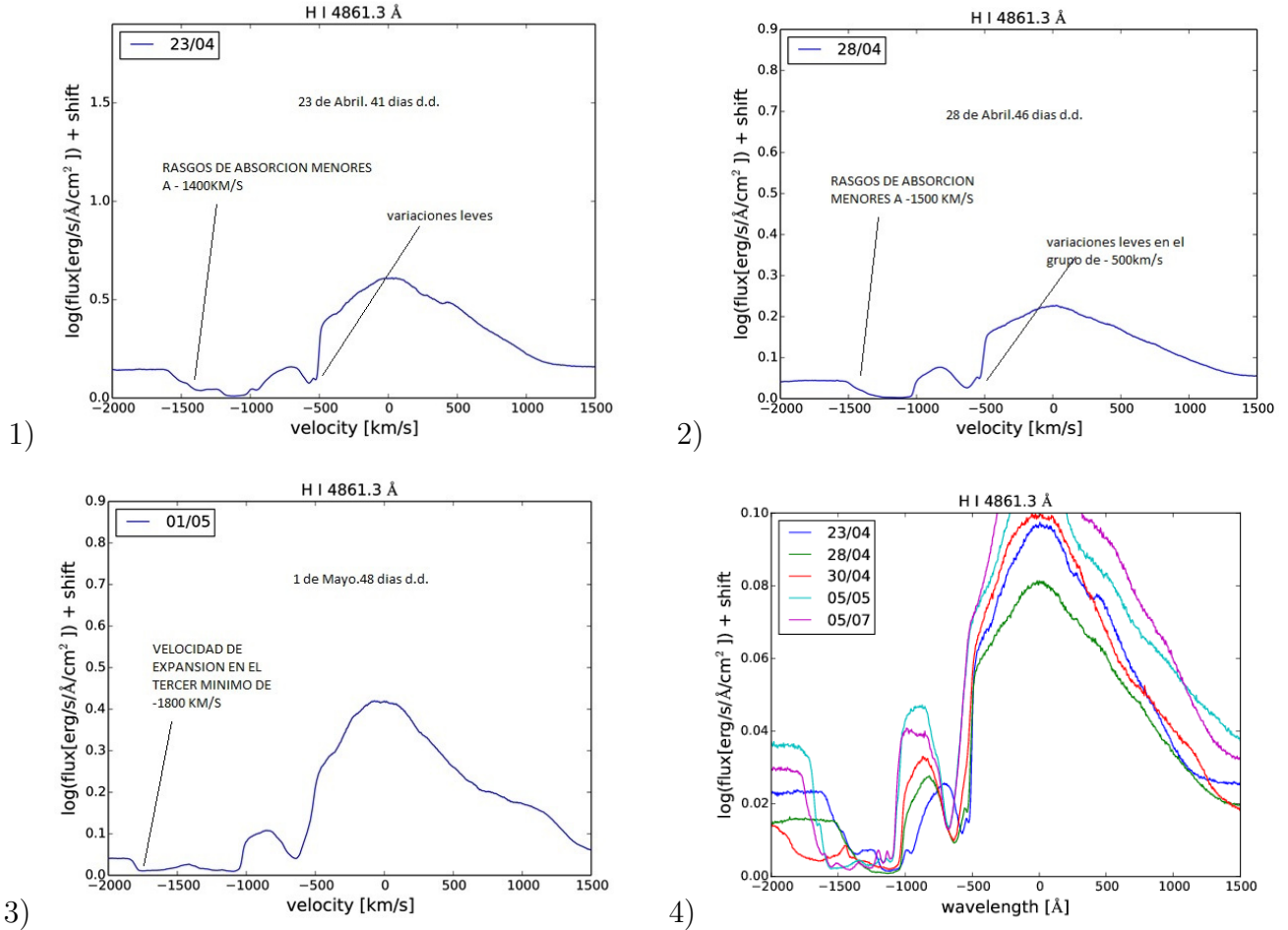


Figura 4.2: Perfil de línea de HI 4861.3 Å. Después del tercer máximo las velocidades de expansión aumentan como lo muestra la figura 4).

4.3. Cuarta caída de la curva de luz OI 7773.0 Å

Durante la cuarta caída cuyo máximo ocurre a 56 días d.d. Se registraron solamente dos espectros consecutivos correspondientes al 10 de Mayo donde ocurre el cuarto máximo y al 11 de Mayo y 4 días después un último espectro correspondiente a la fase de decaimiento, el 15 de Mayo. Después hubo mantenimiento del TIGRE y no se pudo analizar ningún comportamiento posterior a la fase de decaimiento así como a la fase de crecimiento después del

gran mínimo de la curva de luz hacia la curva estable de luz. Se puede observar la evolución de las velocidades de expansión en las gráficas 1 y 2 de la figura 4.3 y se puede apreciar en la gráfica 3 que los rasgos de absorción aparecen entre -2500 km/s y -2000 km/s .

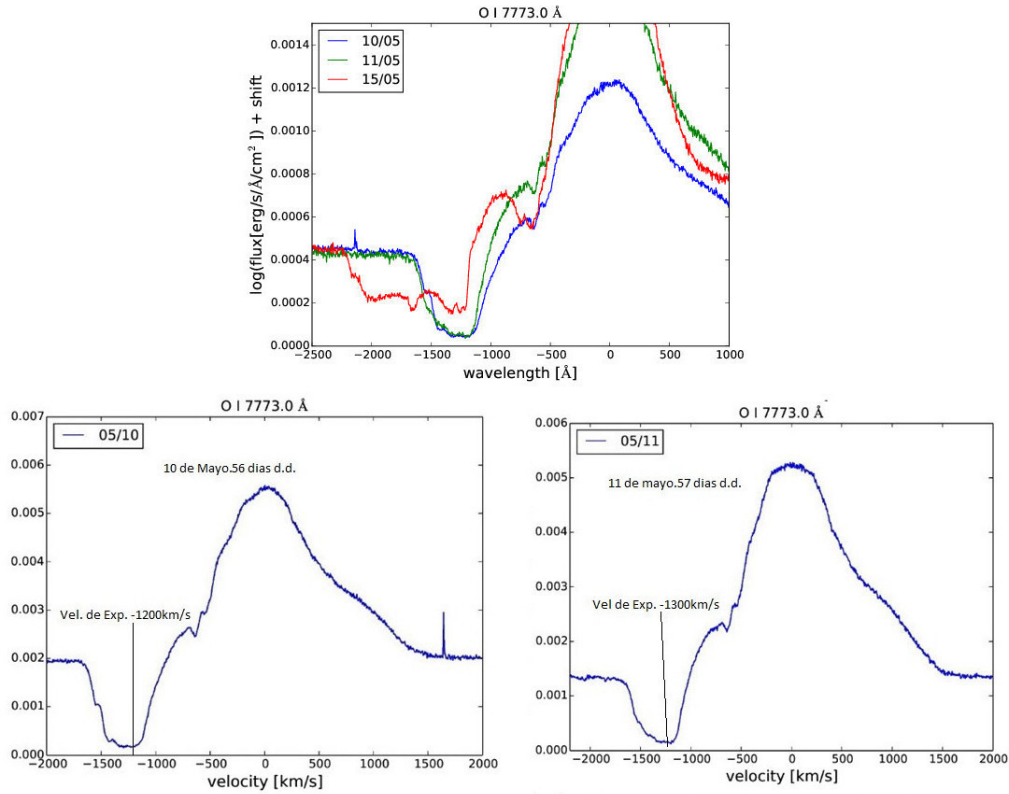


Figura 4.3: Para el 10 y 11 de Mayo se muestran los cambios de velocidad de expansión de los mínimos de absorción de -1200 km/s a -1300 km/s con una diferencia de solo 100 km/s y más espaciados los días se puede ver que para el 15 de mayo las velocidades de expansión crecen considerablemente a menos de -2000 km/s .

4.4. Quinta caída de la curva de luz HI 4101.7 Å

A los 81 días después del descubrimiento la curva de luz se encuentra en su último máximo o quinta caída. El espectro muestra solamente rasgos de absorción ligeramente mayor a la velocidad de expansión aproximada de -1500 km/s (gráfica 1, figura 4.4), a los 83 días d.d. los rasgos de absorción aparecen entre las velocidades de expansión -1600 km/s aproximadamente, gráfica 2, figura 4.4, y finalmente a los 88 días d.d. en caída hasta el mínimo total de la curva de luz con su velocidad de expansión ligeramente menor a -1900 km/s , gráfica 3. En la gráfica 4 se puede apreciar este comportamiento de manera general a saber cuando el brillo disminuye los rasgos de absorción se mueven a velocidades de expansión mayores hacia nosotros.

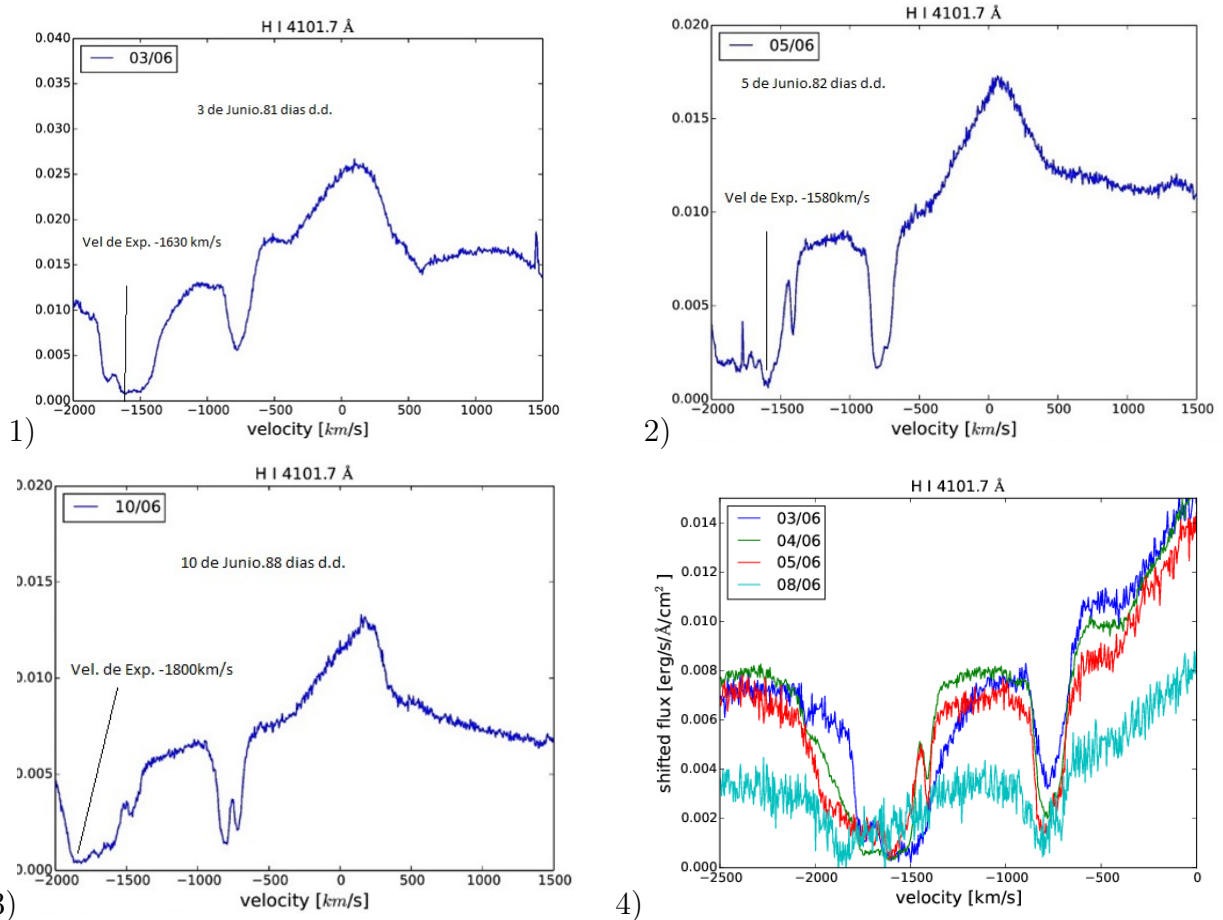


Figura 4.4: Perfiles de línea para HI 4101.7 Å. Nuevamente las velocidades de expansión aumentan conforme disminuye el brillo como lo demuestra la figura 4).

4.5. Rasgos del FeII

Los rasgos de absorción de varias líneas de Fe II como 4233.2 Å, 5018.4 Å, 5169.0 Å, 5234.6 Å y 5276.0 Å aparecen durante el tercer máximo en 44 días d.d. muy claramente y desaparecen durante el tercer mínimo de la curva de luz que ocurre aproximadamente a los 50 días después del descubrimiento (d.d.). En particular para la línea Fe II 4233.2Å se pueden observar los valles de las curvas de velocidades de expansión de aproximadamente -1100 km/s y apreciar los rasgos de absorción que van desapareciendo conforme transcurren los días hasta acercarse al tercer mínimo donde eventualmente el rasgo de absorción desaparece (gráfica 4, figura 4.5). Estas curvas se ajustaron a estos valores (0,6) para poder apreciar como el rasgo de absorción se va desvaneciendo eventualmente a una línea como se puede apreciar en la última figura.

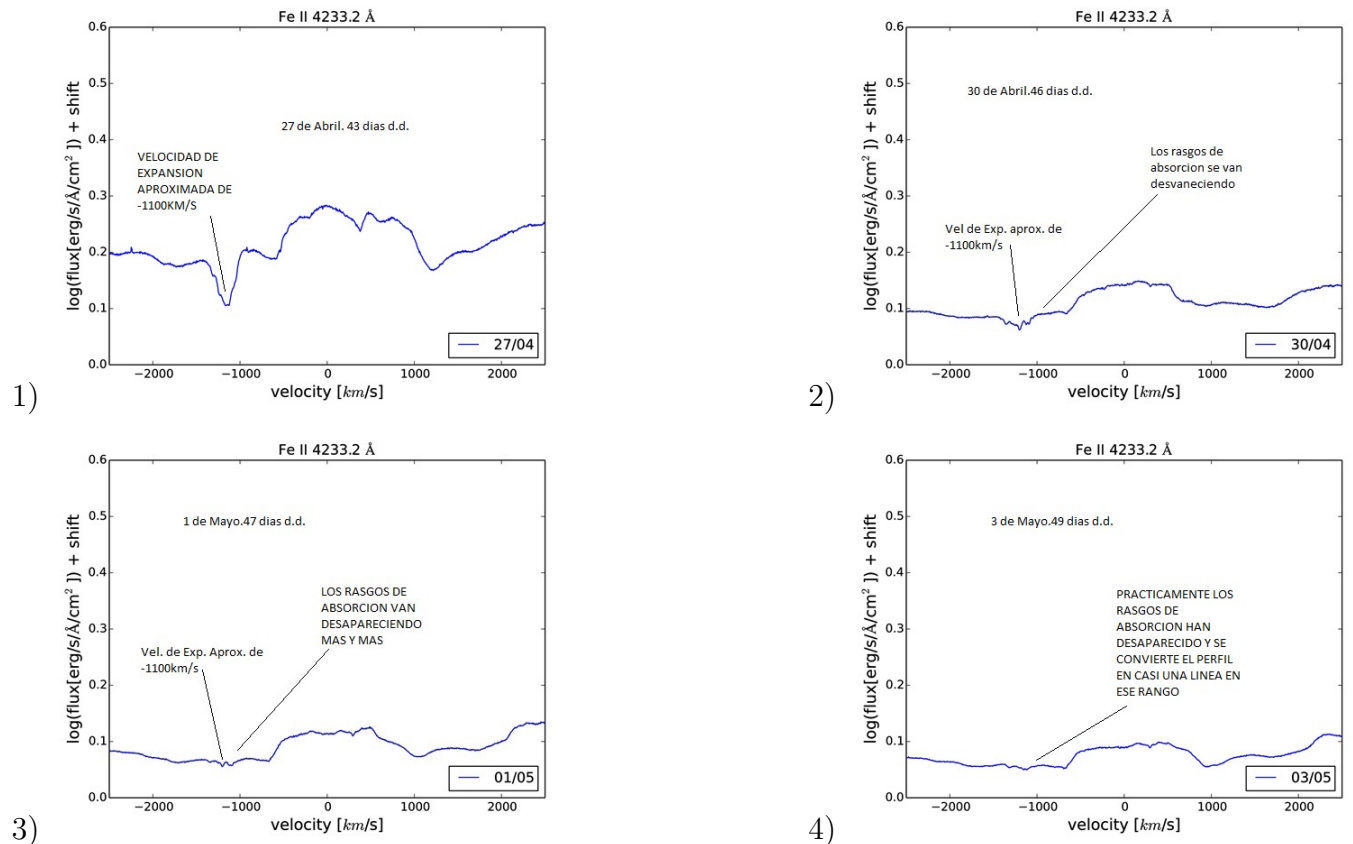


Figura 4.5: Perfiles de línea para FeII 4233.2Å. El rasgo de absorción en el máximo, figura 1) se nota y conforme cae el brillo de la curva se va borrando el rasgo de absorción hasta desaparecer y quedar como una línea en la figura 4).

4.6. Evolución del OI 7773.0 Å en toda la curva de luz de la Nova V5668 Sgr

La línea que resultó ser más fácil de analizar fue la de Oxígeno O I 7773.0 Å que tiene rasgos más simples y definidos. Para cada día de observación iniciando el 19 de Marzo del 2015 hasta el 12 de Junio del 2015 se estudiaron los perfiles de línea de expansión y para cada perfil de línea se encontraron las velocidades de los mínimos de absorción encontrando los mínimos relativos con un programa en PYTHON en el rango de absorción del perfil de línea. Algunos espectros tenían hasta 4 mínimos. A continuación se muestra en los cuadros 4.1, 4.2 los mínimos obtenidos en el rasgo de absorción para las primeras 46 observaciones después del descubrimiento. La primera columna indica el día después del descubrimiento en que se obtuvo la observación con el TIGRE y en las columnas 2, 3, 4 y 5 las velocidades mínimas de expansión correspondientes al día de observación. Se obtuvieron en total 46 espectros durante los primeros 90 días de observación donde ocurren las fases mas variantes de la Nova V5668 Sgr.

#N	vel	vel2	vel3	vel4
5	-5.35E+02			
6	-5.20E+02			
7	-4.29E+02			
10	-3.73E+02			
11	-3.72E+02			
12	-3.89E+02			
13	-3.92E+02			
16	-9.84E+02	-5.27E+02	-4.35E+02	
17	-9.35E+02	-5.30E+02	-4.32E+02	
18	-8.99E+02	-5.40E+02	-4.39E+02	
19	-8.60E+02	-5.38E+02	-4.39E+02	
20	-8.55E+02	-5.55E+02	-4.40E+02	
21	-8.44E+02	-5.51E+02	-4.33E+02	
22	-8.50E+02	-5.60E+02	-4.75E+02	-4.32E+02
24	-8.65E+02	-5.63E+02	-4.47E+02	
25	-8.47E+02	-5.38E+02	-4.46E+02	
26	-1.34E+03	-8.76E+02	-5.60E+02	-4.48E+02
27	-1.28E+03	-8.15E+02	-5.69E+02	-4.47E+02

Cuadro 4.1: En este cuadro se muestra para la línea O I 7773.0 Å la primera parte de los mínimos de las velocidades de expansión para cada día de observación del Tigre. La columna 1 indica el día d.d. y las columnas 2, 3, 4 y 5 los mínimos respectivos.

#N	vel	vel2	vel3	vel4
28	-1.22E+03	-8.76E+02	-5.71E+02	-4.88E+02
31	-1.03E+03	-5.71E+02	-4.92E+02	-4.49E+02
32	-1.04E+03	-5.80E+02	-5.01E+02	5.00E-03
34	-1.03E+03	-5.87E+02	-4.95E+02	
36	-1.06E+03	-6.00E+02	-5.15E+02	
38	-1.10E+03	-6.06E+02	-5.18E+02	
39	-1.11E+03	-6.08E+02	-5.15E+02	
40	-1.07E+03	-6.11E+02	-5.19E+02	
42	-1.08E+03	-6.28E+02		
43	-1.09E+03	-6.40E+02		
44	-1.14E+03	-6.26E+02		
45	-1.11E+03	-6.28E+02		
47	-1.14E+03	-6.22E+02		
48	-1.15E+03	-6.19E+02		
50	-1.55E+03	-6.28E+02		
51	-1.50E+03	-6.28E+02		
52	-1.33E+03	-6.37E+02		
54	-1.36E+03	-6.41E+02		
55	-1.32E+03	-6.40E+02		
56	-1.31E+03	-6.47E+02		
57	-1.30E+03	-6.41E+02		
80	-1.51E+03			
81	-1.55E+03			
82	-1.54E+03			
83	-1.65E+03			
88	-1.80E+03			
90	-2.00E+03			

Cuadro 4.2: En este cuadro se muestra para la línea O I 7773.0 Å la segunda parte de los mínimos de las velocidades de expansión para cada día de observación del Tigre. La columna 1 indica el día d.d. y las columnas 2, 3, 4 y 5 los mínimos respectivos.

A continuación se muestran algunos perfiles de líneas de expansión para diferentes días donde se muestran los valores de los mínimos desde los primeros días de la observación hasta los últimos días de observación antes del gran mínimo de la curva de luz.

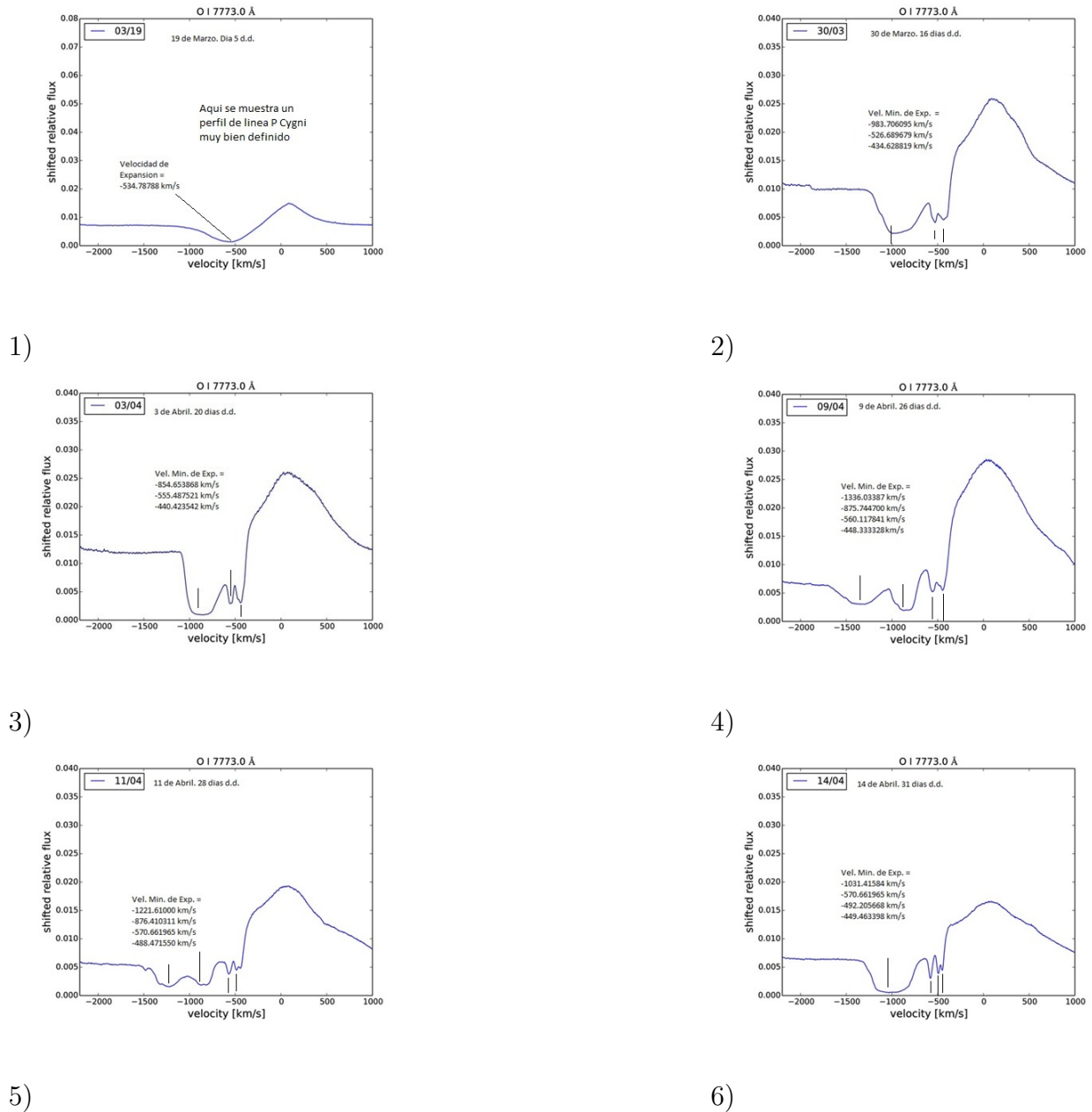


Figura 4.6: Perfiles de línea de OI 7773.0 Å en la parte más variante de la curva de luz hasta los 90 días después del descubrimiento. Como se puede ver algunos rasgos tienen uno, dos, tres o cuatro velocidades de expansión diferentes.

Para describir el comportamiento de los rasgos de absorción se graficaron todas las posiciones de todos los puntos de los mínimos de absorción de cada día obteniéndose la gráfica de la figura 4.7, donde en el eje X están los días después del descubrimiento (d.d.) y en el eje Y las velocidades de expansión en km/s . Se puede observar de la gráfica que hay un grupo de rasgos de absorción entre $-800 km/s$ y $-1800 km/s$ y otro grupo que oscila entre $-500 km/s$ y que cambia muy ligeramente a velocidades de expansión más negativas. No se puede determinar exactamente cuándo desapareció el primer grupo ya que hubo mantenimiento del TIGRE entre los días 60 y 80 d.d. El grupo que ilustra el comportamiento relacionado con la curva de luz de la Nova V5668 Sgr es el que está entre $-800 km/s$ y $-1800 km/s$.

Cuando la curva de luz está en un mínimo se puede observar que la velocidad del rasgo de absorción del segundo grupo también en la gráfica ha saltado a velocidades de expansión más negativas y que cuando se incrementa el brillo de la Nova V5668 Sgr el rasgo de absorción regresa a velocidades menos negativas. Cuando la curva se dirige hacia su profundo mínimo las velocidades de expansión se siguen haciendo más negativas. En general, este comportamiento es semejante para cada fase. Si se comparan a simple vista la curva de luz de la Nova V5668 Sgr y la gráfica de los mínimos de absorción de OI 7773.0 Å se ve que concuerdan con el comportamiento general que se ha discutido. En la figura 4.7 se pueden apreciar dos grupos bien distintos: uno de triángulos rojos que representan al grupo alrededor de $-500 km/s$ con muy poca variación y otro con círculos azules que muestran una variación relacionada con los cambios de la curva de luz.

El grupo de $-500 km/s$ parece ser una fuente de continua eyección de gas, todavía se especula sobre esta posible fuente, aún no se sabe mucho sobre este aspecto.

Cabe mencionar que la interpretación de la correlación está abierta a discusión ya que el fenómeno es demasiado complejo, pero lo más importante es el haber logrado con la mayor precisión hasta el día de hoy una correlación clara que solo se pudo haber logrado con la alta resolución del TIGRE y el monitoreo diario comparado contra análisis similares que se hacían con la observación durante un par de días. Se puede decir que es actualmente la única herramienta precisa que señala la correlación entre la curva de luz de la nova V5668 Sgr y por lo tanto de las novae clásicas tipo DQ Herculis y las velocidades de expansión. Nuestro artículo [13] avala la importancia de haber encontrado esta correlación para arrojar luz sobre la eyección de gas en las novae.

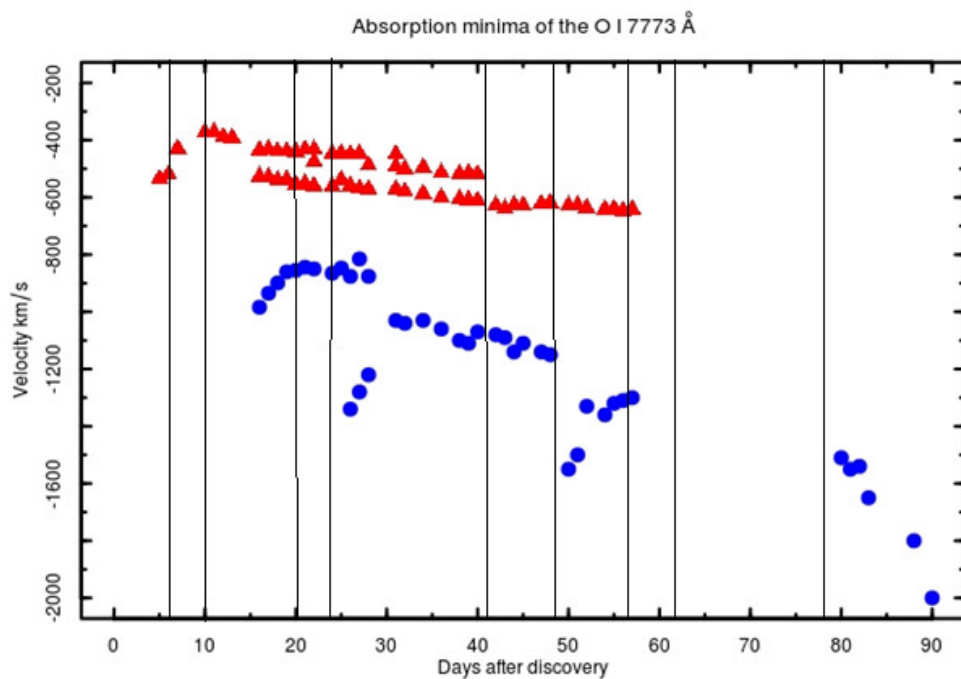


Figura 4.7: Posiciones de los mínimos de los rasgos de absorción de la línea espectral O I 7773.0 Å para todas las observaciones hechas con el TIGRE hasta el día 89 d.d.. En el eje X aparecen los días después del descubrimiento (d.d.) y en el eje Y la velocidad de expansión en km/s . Se distinguen dos grupos: el rojo que presentaba poca variación (alrededor de $-500 km/s$) y el azul que tiene el mismo comportamiento de todas las caídas.

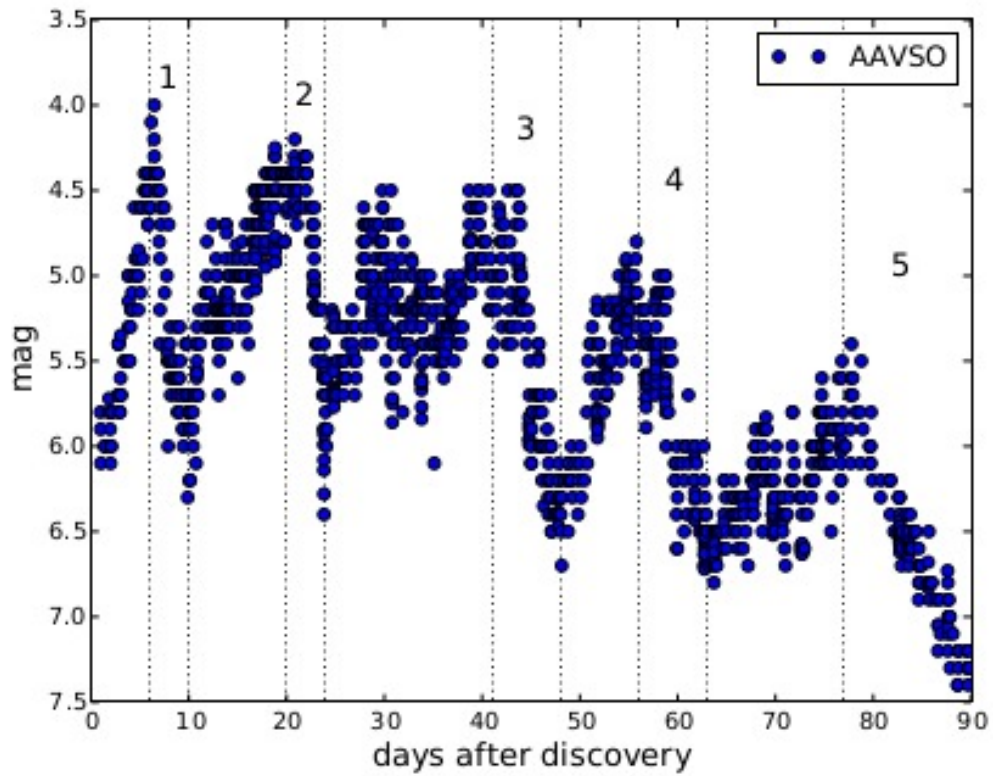


Figura 4.8: Gráfica de curva de luz en las etapas mas variantes. Tomada de [13]. Si se traslapa esta gráfica con la anterior (4.7) se ve que coinciden los puntos con el comportamiento discutido.

Capítulo 5

Conclusiones

Un total de 72 espectros fueron tomados en 72 días en los canales azul y rojo que tienen un rango desde 3800 Å a 8800 Å, 46 espectros se observaron antes del profundo mínimo de la curva de luz y 26 espectros después del profundo mínimo de la misma. Las fechas seleccionadas para identificar líneas espectrales se efectuaron en 4 fases características de la curva de luz: 20 de Marzo del 2015 que corresponde al primer máximo de la curva de luz, 10 de Mayo que corresponde al cuarto máximo, 12 de Junio que corresponde a la caída hacia el profundo mínimo de la curva de luz y 20 de septiembre que corresponde a la fase de emisión. En total 73 diferentes líneas espectrales fueron identificadas.

Las líneas identificadas en el primer máximo el 20 de Marzo conforman la mayoría de los espectros de la Nova V5668 Sgr, las líneas de H están presentes en todos los espectros, se encuentran líneas de Balmer y de Paschen y otros elementos como Cr, Mg II, Na I, Ti II, N II, Si I, N I y Ca II. Algunas líneas no fueron observadas en los primeros espectros pero aparecen en los espectros posteriores como las siguientes líneas: He II, O III y N III, Sr y He I entre otras. Algunas líneas prohibidas aparecen en los últimos espectros como las líneas prohibidas del [O I] y [O II], a excepción de la línea [O I] 5577.3 Å que aparece a los 9 días d.d. el 24 de Marzo.

Los rasgos de emisión después de caer al mínimo profundo de la curva de luz presentan todos un doble pico, donde el pico del lado azul es más alto que el pico del lado rojo como se pudo apreciar en la línea HI 6562.7 Å o H_{α} .

Respecto a las observaciones se distinguieron 5 fases de decaimiento durante la variación de la curva de luz de la Nova V 5668 Sgr. La gran cantidad de espectros tomados durante los primeros 90 días nos permitió relacionar la evolución espectral con los cambios en las curvas de luz durante todas las fases de decaimiento de la Nova V5668 Sgr. Se observó que cuando la curva de luz disminuye el flujo continuo disminuye también y análogamente durante las fases de incremento de la curva de luz el flujo continuo también se incrementa. A pesar de

no tener espectros calibrados en flujo se encontró que durante las fases de disminución de la curva de luz el flujo de la línea de emisión se incrementa en relación al continuo. Este hecho avala la consideración de que los cambios en la curva de luz se deben a los cambios en los perfiles de las líneas de emisión y además hay consistencia con el color constante en la curva de luz.

Antes del primer máximo en la curva de luz las líneas muestran un perfil claramente definido P Cygni causado por una envoltura en expansión ópticamente gruesa y después del primer máximo parece la envoltura de la nova cambiar a su fase de transición cuyos espectros son más complejos y cambian a perfiles de emisión solamente. Cuando el brillo de la nova disminuye a partir de su segundo máximo los rasgos de absorción cambian notablemente a velocidades de expansión más grandes.

Durante la tercer fase de decaimiento se pudo observar el mismo comportamiento; es decir, al disminuir el brillo de la nova los rasgos de absorción cambian notablemente a velocidades de expansión más grandes. La cuarta fase de decaimiento mostró el mismo patrón: cambio a velocidades de expansión más grandes conforme se decae el brillo en la curva de luz. Durante la quinta fase de decaimiento las velocidades de expansión también crecieron conforme el brillo de la curva decaía.

Algunas líneas de Fe II como 4232.0 Å, 5018.4 Å, 5169.0 Å, 5274 Å, desaparecen durante el tercer mínimo. En particular la línea Fe II 4232.0 Å que aparece en el tercer máximo desaparece durante el tercer mínimo. Una posible explicación es que el Fe II se ioniza a Fe III por unos cuantos días o que se están observando diferentes capas con diferentes abundancias de la capa envolvente en expansión.

Se presentó una evolución de la velocidad de expansión completa con la línea OI 7773.0 Å durante todas las fases de variación de la curva de luz de la Nova V5668 Sgr. Las variaciones en la curva de la luz están directamente relacionadas con los cambios en las velocidades de expansión. Todos los mínimos de absorción fueron graficados y se observó que hay un grupo de mínimos alrededor de -500 km/s que cambia muy poco su posición sobre un lapso de 50 días a velocidades de expansión más negativas y un segundo grupo cuyas velocidades de expansión varían con cada decaimiento están entre -900 km/s y -1800 km/s . La comparación entre la curva de luz y la posición de los mínimos se traslapa perfectamente y se puede observar claramente que cuando la curva de luz está en un mínimo la velocidad del rasgo de absorción correspondiente salta a velocidades de expansión más negativas y durante el incremento en el brillo de la curva de luz la velocidad de los rasgos de absorción regresa a valores ligeramente menos negativos. Ya que la nova tiene un perfil de viento radial típico que consiste en el incremento de la velocidad con el radio se podría deducir que lo que se ve durante las fases mínimas son capas de la envoltura que yacen mucho más lejos afuera y por

lo tanto muestran velocidades de expansión más elevadas ocultando las capas internas. Tal efecto óptico profundo explicaría la sincronización de estos cambios en iones diferentes.

Ya que se cuenta con una rica y única densidad de espectros con alta resolución, el trabajo en el futuro podría incluir simulaciones detalladas cuantitativas en modelos atmosféricos dinámicos. Por ejemplo se puede investigar la fase ópticamente gruesa con código atmosférico PHOENIX (Hauschildt & Baron 2006). Los espectros sintéticos pueden proveer información respecto a la temperatura, perfil de densidad y abundancias metálicas del material expulsado.

El modelo detallado de algunos espectros nos brindará el conocimiento para estudiar la evolución espectral de este tipo de novas DQ Her. Los próximos análisis se podrían hacer para interpretar las ricas evidencias espectroscópicas junto con la continuada observación de otras novas clásicas y su comparación.

Bibliografía

- [1] Banerjee D. P. K., Srivastava M. K., Ashok N. M., Venkataraman V., 2016a, MNRAS, 455, L109
- [2] Banerjee D. P. K., Ashok N. M., Srivastava M., 2015b, The Astronomer's Telegram, 7748, 1
- [3] Page K. L., Kuin N. P. M., Osborne J. P., Schwarz G. J., 2015a, The Astronomer's Telegram, 7953
- [4] Page K. L., Kuin N. P. M., Beardmore A. P., Osborne J. P., Schwarz G. J., 2015b, The Astronomer's Telegram, 8054
- [5] Page K. L., Beardmore A. P., Osborne J. P., 2015c, The Astronomer's Telegram, 8133
- [6] Cheung C. C., Jean P., Collaboration F. L. A. T., Shore S. N., 2015a, The Astronomer's Telegram, 7283, 1
- [7] Cheung C. C., Jean P., Shore S. N., 2015b, The Astronomer's Telegram, 7315, 1
- [8] Kuin P., Page K., Osborne J., Shore S., Schwarz G., Walter F., 2015, The Astronomer's Telegram, 8275
- [9] Harvey E., Berdyugin A., Redman M., 2015, The Astronomer's Telegram, 7986
- [10] Tajitsu A., Sadakane K., Naito H., Arai A., Kawakita H., Aoki W., 2016, ApJ, 818, 191
- [11] Wagner R. M., Woodward C. E., Starrfield S., Ilyin I., Strassmeier K. G., Page K., Osborne J. P., Beardmore A. P., 2016, in American Astronomical Society Meeting Abstracts. p. 239.10
- [12] De Gennaro Aquino I., et al., 2015, A&A, 581, A134
- [13] Jack D., et al., 2016, MNRAS, 451, 4104
- [14] Clerke A., 1902, Problems in Astrophysics, London.

- [15] Gaposchkin S., 1956, AJ, 61, 36
- [16] Steven N. Shore¹, *Spectroscopy of novae*, Bull. Astr. Soc. India (2012) **40**, 185-212
- [17] RF Webbink, M Livio, JW Truran, M Orio- Cataclismic Variables. Recent, The nature of recurrent novae ,1987-Springer
- [18] Jesús A. Guerrero Ordaz, “Barquisimeto”, Asociación Larense de Astronomía, ALDA, Febrero - Abril 2001.
- [19] Arai et al. (CBET 2679)
- [20] Richard Walker, Análisis e interpretación de espectros astronómicos, CH 8911-Rifferswill, versión 9.2, 12/2013 ©richiwalker@bluewin.ch.
- [21] M. F. Bode, 2010, AN, 331, 160
- [22] Starrfield S., Iliadis C., Hix R., 2008, in Bode M. F., Evans, A. eds., Classical Novae (2nd Ed.) Cambridge, Cambridge University Press
- [23] Casanova, J., José, J., Garcia-Berro, E. et al., 2011, Nature, 478, 490
- [24] Shore S. N., Augusteijn T., Ederoclite A., Uthas H., 2011b, A&A, 533, L8
- [25] Moro-Martin A., Garnavich P. M., Noriega-Crespo A., 2001, AJ, 121, 1636
- [26] Evans A., Geballe T. R., Rawlings J. M. C. et al., 1997, MNRAS, 292, 192
- [27] Williams S. C., Darnley M. J., Bode M. F., 2015, The Astronomer’s Telegram, 7230, 1
- [28] Schmitt J. H. M. M., et al., 2014, Astronomische Nachrichten, 335, 787
- [29] De Gennaro Aquino I., et al., 2015, A&A, 581, A134