

La Naturaleza de la Estrella Eta Carinae

© Augusto Damineli 2000
e-mail:damineli@iagusp.usp.br

RESUMEN

Eta Carinae ha sido objeto de artículos en todas las revistas de astronomía de este último año. ¿Qué se descubrió de nuevo, después de 105 años de observaciones espectroscópicas? ¿Cuál es la importancia de esta estrella para haber merecido un taller internacional exclusivamente dedicado a estudiarla?. Este artículo muestra la secuencia de eventos que llevaron a la creación de un modelo que explica la naturaleza de esta estrella masiva, que hasta ahora era considerada como misteriosa.

ABSTRACT

Last year the subject of Eta Carinae appeared in all astronomical journal. What is new about this star, after 105 years of spectroscopic observations? What important feature does it show to be awarded with an international workshop exclusively dedicated to its study? This paper presents the sequence of events, which results in a new model, that explains the nature of this massive star.

Una erupción gigantesca

Entre los años 1820-1845 Eta Carinae sufrió una serie de erupciones que la convirtieron en la segunda estrella más brillante de todo el cielo, siendo

visible en pleno día. Estando a una distancia de 2.3 kiloparsec (aproximadamente 7500 años luz), es fácil concluir que el evento fue mucho más energético que una Nova. ¿Sería entonces una explosión de Supernova? Entre las numerosas explicaciones, en el pasado, esta fue una de las más populares entre los astrónomos. A partir del color de la estrella en el máximo de luminosidad se puede estimar que ella alcanzó una magnitud de $M_{bol} = -14$ (luminosidad total en unidades logarítmicas en base 10) lo que equivale a una emisión de 10^{50} ergs durante el evento. Mientras la estrella sobrevivió a la catástrofe, su brillo aparente (es decir su brillo visto desde tierra) cayó significativamente, debido a la formación de una cobertura densa formada de polvo. Sin embargo, su luminosidad total cayó apenas en un factor 4, manteniéndose en torno de $M_{bol} = -12$ hasta hoy. El evento en Eta Carinae actualmente es clasificado como una *erupción gigantesca* y no una detonación nuclear, como sería esperado de una Supernova. Se sabe que este tipo de evento ocurre repetidamente en estrellas supermasivas, al alcanzar la fase de Variable Luminosas Azul (LBV). En esta fase corta (~20-50 mil años) las estrellas que nacen con más de ~50 masas solares pierden la mayor parte de sus masas, antes de entrar en la fase de Wolf-Rayet (estrella con emisión de partículas a altas velocidades que produce vientos fuertes). Los modelos existentes sugieren que la erupción en las LBVs se debe a inestabilidades en las capas externas de la estrella, sin embargo ninguno de estos modelos tiene plena aceptación entre los investigadores del área.

Estrella de alta masa

Un evento como el de Eta Carinae, por la baja probabilidad de ser observado, es extremadamente valioso para entender la estructura y evolución estelar de las estrellas con masas y temperaturas elevadas. La nebulosa del Homúnculus, una nebulosa bipolar eyectada durante la *erupción gigantesca*, ha entregado datos sobre la dinámica, la composición química y la formación de polvo alrededor de la estrella central. Mientras que la naturaleza de esta misma ha permanecido oscura a pesar del enorme esfuerzo observacional empleado a lo largo de este siglo. El nombre de nebulosa bipolar se debe a la presencia de los dos grandes lóbulos que se muestran en la Figura 1. El objeto central está oculto por el polvo. Sin embargo, su luminosidad puede ser estimada en $L=10^{6.7}$ luminosidades solares, con un error de 20%. La masa inicial sería entonces de $M=160$ masas solares, lo que implicaría una masa superior al límite teórico para una estrella. Por otro lado, la edad del cúmulo abierto al cual Eta Carinae pertenece es de aproximadamente 3 millones de años (Massey et al. 1995). Extrapolando los modelos de Schaller et al. (1992)

para esa masa inicial, la estrella debería ser una Wolf-Rayet y no una LBV. Para evitar el problema de masa muy alta, algunos autores sugirieron, en el pasado, que Eta Carinae es un sistema binario o múltiple. Esta es una posibilidad que siempre puede ser aplicada a cualquier otra estrella, debido al límite de resolución angular de los telescopios actuales. Ninguna prueba en ese sentido, sin embargo, había sido presentada hasta recientemente. Así, el modelo universalmente aceptado para Eta Carinae era el de una estrella aislada en fase de post-secuencia principal (es decir, que salió de su etapa inicial de evolución donde la estrella se mantiene quemando hidrógeno en su núcleo). Esa idea sufrió un fuerte golpe con el descubrimiento de una periodicidad de 5.52 años en el nivel de excitación de las líneas espectrales, esto es, ciertas líneas espectrales decrecían o desaparecían (para más detalles ver Daminieli 1995 y Daminieli 1996). Eventos de este tipo habían sido registrados en 1948, 1965 y 1981, y se pensó que eran debidos a las pulsaciones tipo S Doradus, bien conocidas en otras LBVs. A través de una campaña observacional iniciada en 1989 en el Laboratorio Nacional de Astronomía del Brasil (LNA), registramos por primera vez con detalle, un evento de este tipo en 1992. En conjunto con otros cinco eventos que identificamos en artículos previamente publicados, en los que los autores no se percataron de que habían observado la estrella durante eventos de baja excitación, dedujimos un período de 2014 días, con un margen de error de 50 días (2% de error). Con esto hicimos la predicción de que un nuevo evento de baja excitación ocurriría a inicios de 1998 (denotado como *evento 1998.0*). Ese período fue rechazado por otros astrónomos, en base a la presuposición de que los mecanismos de inestabilidad no puede funcionar como relojes: las pulsaciones S Doradus en las demás LBVs ocurren en intervalos aleatorios de tiempo, dentro del rango de 5 a 30 años.

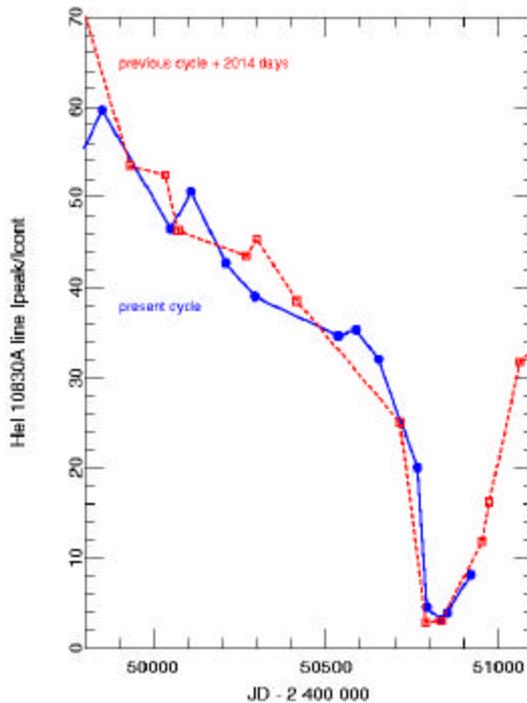


Figura 1. Nebulosa del Homúnculo alrededor de Eta Carinae y esquema del sistema binario en comparación con el sistema solar.

Confirmación del modelo binario

Propusimos el abandono de la suposición de que los eventos espectroscópicos de Eta Carinae fueran causados por las oscilaciones S Doradus (Damineli 1997), pues al contrario de las demás LBVs, la temperatura efectiva de Eta Carinae se mantiene constante mientras las líneas espectrales muestran fuerte variabilidad. Inmediatamente se hizo sentir la oposición de los investigadores que trabajaban en el área durante los últimos 20 años, apegados a la idea de las oscilaciones S Doradus. La más expresiva de las oposiciones fue la negativa ante el pedido de tiempo del telescopio espacial Hubble, para acompañar el *evento 1998.0* que habíamos predicho. Los pedidos de tiempo en los telescopio en tierra también estaban amenazados de recibir el mismo tratamiento, y el cuadro sólo podía ser modificado con una posición científica más agresiva. Hubiese sido absurdo esperar hasta el año 2003 para tener una nueva oportunidad de observar plenamente un evento de baja excitación, como había sido sugerido por el comité de asignación de

tiempo de telescopio del Instituto de Ciencias del Telescopio del Espacio (STScI). El camino escogido fue el de desarrollar un modelo físico completo, aunque los datos existentes parecían insuficientes. Basados en que la periodicidad restringida sugería un mecanismo orbital, comenzamos a buscar variabilidad en las velocidades radiales. La dificultad era que sólo en el espectro óptico la estrella muestra más de 700 líneas de emisión y cada una de estas líneas, usando los principios del efecto Doppler, permite medir la velocidad con que se aleja de nosotros la región estelar que la genera. A pesar de esto, obtuvimos las masas y temperaturas de las componentes, edad y ángulo de inclinación del sistema (ver esquema de la órbita en comparación con el sistema solar en la Figura 1; Daminieli, Conti & Lopes, 1997). El par de estrellas, a pesar de ser el sistema más masivo propuesto hasta ahora (113 ± 88 masas solares), encajaba en los modelos estelares estándares (Schaller et al. 1992). Eta Carinae dejaba así su estigma de peculiaridad y pasaba a la normalidad en el cuadro de la familia estelar. La gran luminosidad de las componentes indicaba que ellas deberían tener fuertes vientos estelares, y por estar en un sistema binario, los vientos deberían entrar chocando entre sí. Las características que se espera observar en un proceso de choque entre partículas a altas velocidades, correspondientes al choque de estos vientos estelares, podían ser estudiadas para corroborar el modelo binario. Esto permitió aumentar el acceso, que ya teníamos desde 1996 al satélite XTE, permitiendo una observación temporal de la fuente en forma semanal y en algunas épocas diariamente. La coherencia del modelo binario atrajo la colaboración de astrónomos del Observatorio Europeo Austral (ESO) y con ellos planeamos una campaña de observación con frecuencia de visitas semanales. Las observaciones en rayos-X resultaron estar en buen acuerdo con el modelo binario. Una observación en el rango de ondas de radio, realizada en Itapetinga (São Paulo) en Octubre/97 (Abraham & Daminieli, 1997), mostró de forma decisiva que el evento previsto para 1998.0 estaba realmente aproximándose. Esto motivó un cambio en la postura del STScI y fue posible obtener espectros en la fase central del evento, en varias frecuencias desde el rango ultravioleta hasta el visible. El evento se desarrolló tal cual como se había previsto, con un error de apenas algunos días (Lopes & Daminieli, 1997; Jablonski, Lopes & Daminieli, 1998).

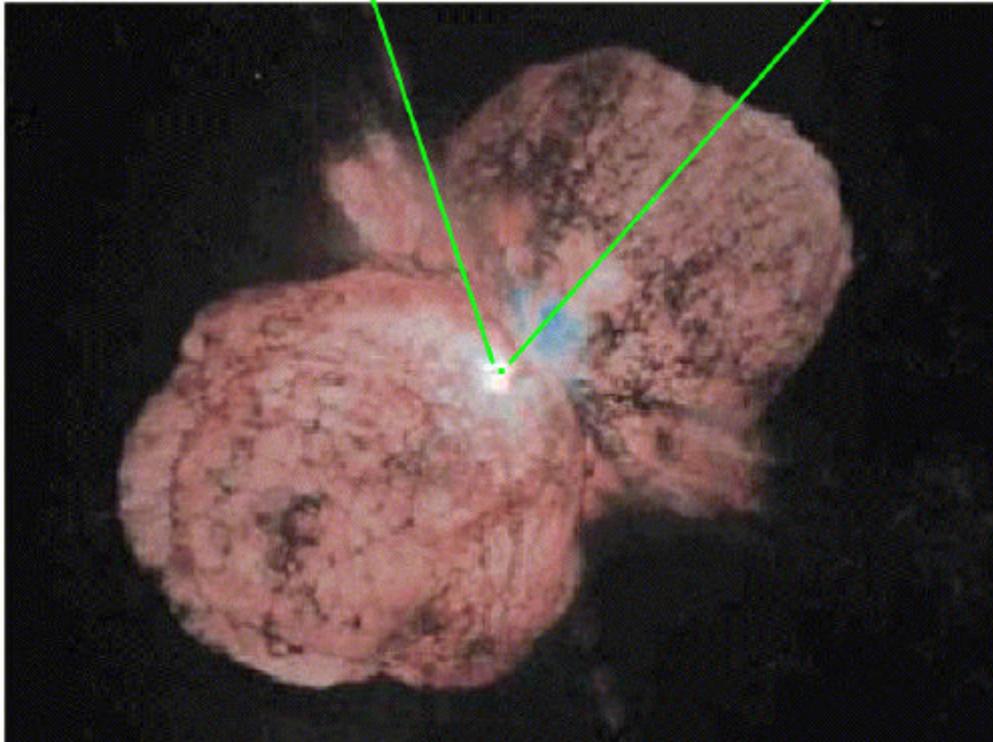
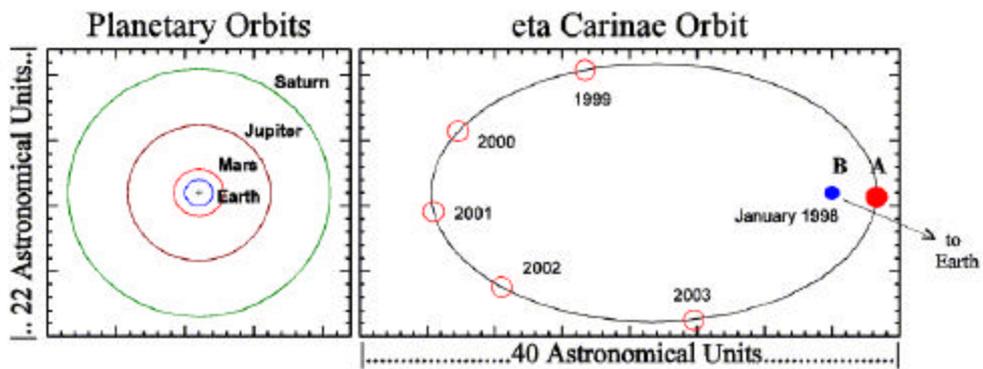


Figura 2. Predicciones según la variabilidad de las líneas espectrales. Resultado de los espectros obtenidos en LNA (Brasil), en días Julianos. Estos muestran la disminución de las líneas de excitación de Helio (línea continua), en casi exacta coincidencia con las predicciones (línea discontinua), el error entre los mínimos correspondió a un error en la predicción de 0.5%. La curva actual (línea continua) está en proceso de medición, y aquí sólo se muestran los primeros 100 días después del mínimo. Para comparar totalmente ambos ciclos deberá observarse otros 200 días adicionales. La línea de HeI es emitida en el infrarrojo cercano, exactamente en la longitud de onda 10830 Angströms.

Nebulosa del Homúnculus: más evidencias

Varios detalles interesantes fueron descubiertos durante la campaña observacional del *evento 1998.0*. La curva de luz del objeto central en Eta Carinae tiene una forma sinusoidal, esto corresponde a variaciones continuas en el proceso asociado al grado de ionización, no observándose así la variación esperada por sucesivas eclipses entre las estrellas. Lo mismo ocurre con la intensidad de las líneas espectrales generadas por el Helio neutro. Eso indica que los eventos espectroscópicos están modulados por la entrada y salida de la estrella secundaria en el viento de la estrella primaria, el cual es más denso a medida que ésta más se aproxime a la fotosfera de la primaria. Así, como ya había sido argumentado por Daminieli, Conti e Lopes (1997) el mecanismo de variabilidad no es controlado por eclipses.

También, fue observada con los satélites ASCA y BeppoSAX la componente de emisión térmica a 83 millones de grados Kelvin. Esta corresponde a la emisión en rayos-X del gas caliente, la cual desapareció durante el *evento 1998.0*, posiblemente debido a la interferencia de un disco ecuatorial en torno de una de las estrellas. Esa estructura convierte a la estrella primaria del sistema Eta Carinae muy parecida a una estrella B[e]: estrella caliente, luminosa, con disco ecuatorial extenso y con emisión de líneas de nebulosas. La conexión entre estrellas B[e] y las LBVs ya había sido propuesta con frecuencia, en los últimos años por otros autores, basados en argumentos de otra naturaleza.

La observación del *evento 1998.0* fue suficientemente amplia como para respaldar totalmente el modelo binario y permitió una mejor determinación de los parámetros del sistema. Otro hecho favorable al escenario de estrellas binarias es que la nebulosa del Homúnculus, que rodea Eta Carinae, está químicamente más evolucionada que la estrella. Lamers et al. (1998) muestran que eso sólo es posible en el caso de que una segunda estrella, más evolucionada y hoy menos luminosa, hubiese eyectado en 1843 la materia que forma la nebulosa. Junto a esto, un modelo de estrellas binarias se torna todavía más atractivo cuando se considera la forma de la nebulosa del Homúnculus y las propiedades geométricas de una órbita. En efecto, el plano orbital del par de estrellas (primaria y secundaria) coincide con el ecuador de la nebulosa, lo cual debería producir eyección de material. Esto explicaría como una erupción esférica, típica en una erupción de estrella aislada, puede generar una nebulosa bipolar. Por otro lado, el ecuador de Homúnculus muestra una estructura de jets cometarios muy elongados, alineados en una

estructura de disco extremadamente fino. Esto podría ser explicado por el hecho de que, durante la *erupción gigantesca* la estrella primaria aumentó su radio en por lo menos un factor 10 (~10 U.A.), lo que implicaría que la otra componente del par a cada pasada por la posición de máxima aproximación (periastro) habría nadado en su atmósfera. Así, el viento de la estrella secundaria, que quedaría aprisionado por la presencia de la estrella primaria, tendería a escapar en la dirección radial. Aún más interesante resulta el hecho que cuando se observa el ecuador de Homúnculus en el infrarrojo existe una estructura en forma de rayos, formando también un sector circular (para mayores detalles ver figuras en Smith & Gehrz, 1998 y Smith, Gehrz & Krautter, 1998).

Sin embargo, no todo cuadra con el modelo binario. Después de la pasada por el periastro, los niveles de emisión vuelven muy lentamente a los niveles normales, indicando que una masa grande de gas del sistema es perturbada durante un período largo. Actualmente, la campaña observacional se restringe a algunas visitas anuales del telescopio espacial Hubble, de los satélites de detección de rayos-X ASCA y BeppoSAX, además de las observaciones en los observatorios ópticos y de radio ubicados en tierra. El satélite RXTE es el único que mantiene una alta frecuencia de observaciones. Además, tendremos observaciones con el satélite AXAF, que nos permitirá por primera vez una capacidad espectroscópica completa en emisión de rayos-X. Esperamos que esas observaciones sean hechas antes del año 2003 (Julio), cuando ocurrirá el próximo evento. En esa época, los telescopios de SOAR y Gemini, localizados en Chile, serán usados para descubrir los detalles del sistema binario.

Es importante resaltar que la naturaleza binaria de Eta Carinae no explica la *erupción gigantesca*, pero si permite determinar los parámetros físicos de la estrella. Este modelo binario establece bases más firmes para explorar las condiciones en que ocurre este intrigante fenómeno. Informaciones y más detalles sobre este asunto pueden ser encontradas en las homepage:

<http://www.iagusp.usp.br/~damineli/>

<http://opposite.stsci.edu/pubinfo/pr/96/23.html>

<http://casa.colorado.edu/~morse/eta/index.html>

http://lheawww.gsfc.nasa.gov/users/corcoran/eta_car.html

<http://ast1.spa.umn.edu/bish/ETACAR/whatsnew.html>

<http://www.astro.umd.edu/~white/text/eta-images.html>

<http://www.achilles.net/~jtalbot/news/EtaCarinae.html>

Agradecimientos a FAPESP por el continuo apoyo financiero y al LNA por el apoyo observacional.

Bibliografía

- Abraham, Z. & Daminieli, A. (1997). IAUC 6768.
- Daminieli, A. (1995). En *O topo do Diagrama H-R no Infravermelho Próximo*, tesis de libre-docencia - Instituto Astronômico e Geofísico Universidade de São Paulo.
- Daminieli, A. (1996). *Astrophysics Journal*, 460: L49-L52
- Daminieli, A. (1997). En *Workshop on Luminous Blue Variables Massive Stars in Transition*, Kona/Hawaii, ASP Conf. Ser. Vol.120: 270-276
- Daminieli, A, Conti, P.C. & Lopes, D.F. (1997). *New Astronomy* 2: 107-117
- Davidson, K. & Humphreys, R. (1997). *Ann. Rev. Astron&Astroph* 35: 1
- Jablonski, F., Lopes, D.F. & Daminieli, A.(1998). IAUC 6849.
- Lamers, H.J.L.M. et al. (1998). *Astrophysics Journal Letters*. 505: L131-L133
- Lopes, D.F. & Daminieli, A. (1997). IAUC 6790.
- Massey, P., Johnson, K.E., & Eastwood, K. de G. (1995). *Astrophysics Journal* 454: 151-171
- Schaller, G., Schaerer, D., Meynet, G., & Maeder, A. (1992). *Astron&Astroph Suppl.* 96: 269-331
- Smith, N. & Gehrz, J. (1998). *Astronomical Journal*. 116: 823-828
- Smith, N., Gehrz, J. & Krautter J., (1998). *Astronomical Journal*. 116: 1332-1345

Glosario

Campaña observacional: Observación de objetos astronómicos y objetos de comparación en varias noches, utilizando uno o más instrumentos. Estos instrumentos pueden ser tanto telescopios, en el caso de observación óptica o infrarrojo próximo, como antenas, en el caso de observación de la emisión en ondas de radio. También son utilizados satélites artificiales para detectar la emisión en rayos-X o ultravioleta.

Cúmulo abierto: estrellas agrupadas en condensaciones ricas en gas y polvo. La distribución espacial es asimétrica y generalmente corresponden a grupos de estrellas muy jóvenes. Debido a esto, se observan en mayor número en regiones con abundante gas, como el disco galáctico en nuestra galaxia.

Curva de luz: variación observada de la luminosidad de un objeto a lo largo de un período de tiempo dado. Su forma puede ser periódica, semi-periódica o sin ningún patrón de comportamiento.

Espectroscopía: En astronomía esta técnica observacional permite medir en detalle la cantidad de energía del objeto que llega en luz visible, así como también en otras frecuencias del espectro electromagnético (ondas de radio, emisión en rayos-X o ultravioleta). Para esto, el haz de luz que proviene del objeto pasa por una red de difracción que debido a sus múltiples ranuras milimétricas descompone el haz formando un arcoiris (espectro) que resulta ser diferente de objeto a objeto. Esta puede ser medida y catalogada para clasificar objetos, algo así como las huellas digitales lo hacen con la especie humana. Sin embargo, a diferencia de una huella digital un espectro permite obtener propiedades físicas como temperatura y elementos químicos en la atmósfera de estrellas. También se pueden obtener la velocidad del objeto con respecto a la Tierra y los tipos de interferencias que sufrió el haz antes de llegar al espectrógrafo.

Líneas espectrales: La espectroscopía permite obtener un espectro del objeto observado. Este corresponde a la distribución de energía de la luz del objeto en las diferentes frecuencias. Si algún proceso físico en la atmósfera estelar o en el camino hasta el detector (o espectrógrafo) produce absorción de energía, ésta quedará registrada en el espectro como una hendidura, esto es, una línea en la posición correspondiente a la energía absorbida (línea de absorción). En cambio, aparecerá una línea por sobre el espectro (línea de emisión) si aparece otra fuente de emisión de luz, como por ejemplo la respuesta del polvo ubicado alrededor de la estrella al sentir el calor de ésta que se calienta y re-emite.

Nova: Evento explosivo de menor energía que una Supernova (ver Supernova). Sin embargo, su causa no corresponde a una etapa avanzada en la evolución de la estrella sino a una respuesta a la caída de material que ha sido acumulado a su alrededor. Generalmente, éstas son estrellas viejas, de baja luminosidad y en sistemas binarios. El nombre de Nova fue originalmente designado porque, debido a la explosión, el aumento de la luminosidad producía que varias de ellas, antes no visibles, aparecieran en el cielo como una nueva estrella.

Supernova: Etapa evolutiva final en estrellas de alta masa, que comienza cuando se rompe el equilibrio entre la fuerza de gravedad, debida a la propia masa de la estrella, y la fuerza de radiación producida por la ignición de elementos químicos en su interior. Este rompimiento de equilibrio resulta en una explosión altamente luminosa de las capas externas de la estrella y una

implosión de las regiones internas. La explosión de Supernova más próxima y reciente fue observada en nuestra vecina galaxia irregular llamada La Gran Nube de Magallanes. Denominada como SN1987A fue un evento muy valioso para entender la evolución estelar.

Variabilidad de líneas espectrales: La variabilidad de líneas espectrales puede corresponder a la variación temporal de algún proceso físico asociado al propio objeto o sus alrededores. Si estas líneas variables corresponden a líneas de alta o baja excitación, entonces se está detectando procesos variables a altas o bajas energías. Uno de los tipos más interesantes de variaciones en las líneas espectrales son aquellas que se repiten periódicamente a través del tiempo. Estas últimas son generalmente asociadas a las pasadas periódicas de otro objeto orbitando alrededor del objeto observado, de manera que la luz que llega al observador depende de la posición y de las características orbitales del sistema (órbitas circulares o elipsoidales, período de rotación rápido, etc.). El movimiento orbital puede producir variación en la posición de las líneas a lo largo del espectro; estas variaciones corresponden a variaciones en la velocidad del objeto.

Augusto Damineli Neto nació en Brasil. Hizo su Magister y Doctorado en Astronomía en la Universidad de São Paulo. Ha efectuado post-doctorados en el Instituto di Astrofísica Spaziale, CNR – Frascati – Italia, y en la Universidad de Colorado- USA. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Astronomía del Instituto Astronómico y Geofísico de la Universidad de São Paulo.