

EX Hydrae - ein etwas sonderbarer Intermediärer Polar (IP) Teil 1

Hans G. Diederich

Abstract: *EX Hydrae is one of the nearest cataclysmic variables (CV) and member of the sub-class of intermediate polars (IP). After introducing magnetic CV, IP and some properties of EX Hya, a lightcurve of 113 minutes duration is presented, followed by the trial, to get the multitude of observable structures unanimously explained by using professional literature.*

Einleitung

EX Hydrae (EX Hya) ist einer der nächst gelegenen kataklysmischen Veränderlichen (CV). Nachdem ich ihn erstmals am 07.05.00 als Belegbild aufgenommen und fotometriert hatte, folgte am 26.06.11 eine zeitlich nicht abgestimmte Belichtungsreihe mit dem Ziel der Erstellung einer Lichtkurve. In dieser ist eine Vielzahl interessante Details zu erkennen, die förmlich danach rufen, mit Hilfe der Literatur ausgewertet zu werden.

So einfach das Aufnehmen und Fotometrieren der Serie war, so schwierig stellte sich eine vollständige Auswertung aller gut sichtbaren Details dar. Bis heute ließ sich keine Arbeit finden, welche eine Lichtkurve ähnlich meiner vollständig und eindeutig, astrophysikalisch und geometrisch erklärt. Damit hatte ich nicht gerechnet. Deshalb sind meine Deutungen unsicher, teilweise nicht bestätigt und daher auch vorläufig. Zum Beispiel stellte sich in den Monaten der Literaturrecherche die Frage, ob EX Hya "disc-fed", "stream-fed" mit "disc-overflow" oder "ring-fed" mit "accretion curtains" ist.

Die Antwort lautet Ja! Denn einerseits ändert sich das Verhalten, sind mehrere Strukturen zur selben Zeit sichtbar und wirken sich auf den Verlauf der Helligkeit aus. Und auch die Fachastronomie ist sich bis heute nicht bei jedem Detail einig und im Klaren. Die Forschung ist eben (noch) voll im Fluss.

Daher gibt es auch keine, uns als Sternfreunde vollkommen zufrieden stellende Monographie zu EX Hya. Dies wird auch der Leser in diesem Aufsatz spüren, dem ich sehr gerne ein vielleicht einfaches, aber auf jeden Fall vollständiges und in sich widerspruchsfreies Bild gezeichnet hätte. Alleine, es geht nicht.

Das zeigt auch auf dem "Nebenschauplatz" der Begriffe und Abkürzungen. Die Literatur ist auf Englisch und mit ihr auch die Bezeichnung der vielfältigen Strukturen. Geläufige deutsche Begriffe sind mir fast nie bekannt. Ich tue mich also schwer damit, Eindeutschungen vorzunehmen. Auf die englischen Begriffe werde ich also nicht verzichten können. Es dürfte ratsam sein, sich das Verzeichnis der Begriffe weiter unten anzusehen. Als Nebeneffekt wird sich dabei die Erkenntnis einstellen, wie vielschichtig magnetische CV sein können (und es am Beispiel EX Hya auch sind).

Zusammengefasst: EX Hya ist beobachterisch (Lichtkurve) leicht, aber astrophysikalisch eine "harte Nuss".

Organisation des Aufsatzes

Der Aufsatz setzt sich mit einer kurzen Einführung in die magnetischen kataklysmischen Veränderlichen (mCV) und ihre Unterteilung in Untergruppen fort, gefolgt von einem Abschnitt zu den Intermediäre Polaren (IP).

Nach einigen Informationen zum Doppelsternsystem EX Hya wenden wir uns einer realen Lichtkurve zu, untersuchen zunächst ihr allgemeines Aussehen und beschreiben Details. Nun kann versucht werden, mit allen oben bereits angesprochenen Vorbehalten und Einschränkungen Erklärungen für das Gesehene zu finden.

Danach stelle ich in kurzen Auszügen einige Arbeiten vor, mit denen ich versuchte, die eigene Lichtkurve zu verstehen und auszuwerten.

Kataklysmische Veränderliche (CV)

Die CV bilden eine sehr artenreiche Familie mit vielen Unter- und auch einigen Unter-Untergruppen. Dies ist die Konsequenz daraus, dass CV Doppelsternsysteme sind, in denen Masse vom Sekundär- zum Primärstern fließt und auf ihrem Weg verschiedene Strukturen bildet. Das alles dreht sich tlw. mit verschiedenen Geschwindigkeiten. In manchen Systemen ereignen sich auch Bedeckungen. Und wo viel ist, kann auch viel bedeckt werden. Dies erklärte den "Zoo" an Erscheinungen und Strukturen, was wiederum Anlass gab, die CV verschiedenen Gruppen und deren Prototypen zuzuordnen.

Nach [7] sind zur Zeit etwa 900 CV bekannt. Davon gehören 450 zu den Zwergnovae, 130 zu den Novae und 100 zu den Novaähnlichen. Etwa 130 zählt man zu den magnetischen Systemen, 15 zu den AM-CVn-Sternen und 15 zu den superweichen Röntgenquellen.

In den Einleitungen vieler Arbeiten ist die Systematik der CV kurz wiedergegeben. Danach sind CV kompakte Doppelsternsysteme und bestehen aus einem Weißen Zwerg (die Primärkomponente), der Material aufnimmt (akkretiert), und einem wasserstoffreichen Begleiter (der Sekundärkomponente), welcher dieses Material abgibt.

Die Akkretion erfolgt durch eine Akkretionsscheibe in den Fällen, in denen das Magnetfeld des Weißen Zwergs schwach ($B < 0.01 \text{ MG}$) ist. Solche Systeme werden nicht-magnetische CV ("nonmagnetic CV") genannt.

Ungefähr 25% aller CV bilden die Gruppe der magnetischen CV ("magnetic CV", mCV). Und hier gibt es drei Untergruppen, die sich in der Stärke des Magnetfeldes unterscheiden.

Magnetische CV und ihre drei Untergruppen

Die mCV lassen sich weiter unterteilen in Polare, asynchrone Polare und intermediäre Polare.

Polare (AM-Her-Sterne)

Polare (AM-Her-Sterne) besitzen ein starkes Magnetfeld mit $B > 10$ MG. Dieses Feld bringt den Akkretionsfluss dazu, direkt auf die Magnetpole des Weißen Zwergs zu strömen und verhindert so die Bildung einer Akkretionsscheibe. Sie zeigen eine starke zirkuläre Polarisation und eine lineare Polarisation, welche mit der Umlaufperiode P_{orb} moduliert ist. Die Rotation des Weißen Zwergs ("spin period", P_{spin}) und die Umlaufbewegung sind aufeinander synchronisiert. Die Rotationsperiode des Weißen Zwergs ist größer als 1 Stunde. Nur $\sim 1\%$ der Polare weisen Asynchronität auf.

Asynchrone Polare (BY-Cam-Sterne)

Obwohl asynchrone Polare (BY-Cam-Sterne) in vielen Eigenschaften den Polaren gleichen, zeigen ihre Weißen Zwerge Rotationsperioden, die nicht synchron zur Umlaufbewegung sind, sondern zu dieser einen Unterschied von $\sim 1\%$ aufweisen. Als erster asynchroner Polar wurde V1500 Cyg entdeckt.

2005 waren erst vier asynchrone Polare bekannt [8]. Sie können als Hybride angesehen werden zwischen den synchronisierten Polaren (starkes Magnetfeld) und den schnell rotierenden intermediären Polaren.

Intermediäre Polare (DQ-Her-Sterne)

Mit einem Anteil von 10% der CV sind die intermediären Polare (IP) gar nicht so selten. Bei ihnen ist das Magnetfeld mit ~ 1 bis 10 MG schwächer als bei den Polaren. Die Akkretion verläuft daher zunächst über eine gestutzte Akkretionsscheibe ("truncated disk") und von dort weiter über Akkretionsvorhänge ("accretion curtains") zu den Magnetpolen.

Nahe der Oberfläche des Weißen Zwergs bildet sich in der zuströmenden Materie eine starke Stossfront ("shock") aus. Dahinter erhitzt sich das Material auf 10 bis 20 keV und kühlt unter Aussenden von thermischer Bremsstrahlung [Röntgenstrahlung] wieder ab.

Inzwischen hat sich heraus gestellt [3], dass es eine weitere Unterscheidung gibt, nämlich in "disc-fed" (durch die Akkretionsscheibe gespeiste) IP und in "stream-fed" (durch den Akkretionsstrom gespeiste) IP. Also stimmt es nicht, dass IP immer eine, wenn auch innen gestutzte Akkretionsscheibe aufweisen. Das Bild ist komplexer als zuvor gedacht.

Es gibt zudem IP, welche beides sind: "disc-fed" und "stream-fed"! EX Hya gehört hierzu: im Ruhezustand ist er ein "disc-fed" und im Ausbruch (mit disc overflow) ein "stream-fed" IP.

IP sind asynchrone Systeme, in denen die Umlaufperiode P_{orb} größer ist als die Rotationsperiode P_{spin} des Weißen Zwergs. Die Mehrheit der IP weist ein Verhältnis $P_{\text{spin}} / P_{\text{orb}} < 0,1$ auf, während die Theorie einen Bereich von 0,01 bis 0,6 zulässt. Der Weißen Zwerg rotiert mit einer Periode von < 1 Stunde und damit möglicherweise nahe seiner "break-up-Geschwindigkeit".

IP können durch hoch komplexe Absorption in ihren Röntgenspektren charakterisiert werden. Ihre Temperatur erstreckt sich in einigen Fällen bis zu 100 keV. Sie zeigen in

der Röntgen- oder/und in der optischen Lichtkurve eine Modulation bei P_{spin} . Zudem erscheint die Schwebungsperiode ("beat period") mit $1/P_{\text{beat}} = 1/P_{\text{spin}} - 1/P_{\text{orb}}$ oder ihre Seitenbänder.

EX Hydrae - ein besonderer IP

EX Hya ist ein seltsamer intermediärer Polar [Abb. 1]. Seine Umlaufbewegung ist asynchron wie in allen IP. Allerdings kommt sie dem Synchronismus näher, als es bei der Mehrheit der IP der Fall ist [4]. Seine Rotationsperiode beträgt ~ 67.03 Minuten, was ungefähr $2/3$ der Umlaufperiode (98.26 Minuten) entspricht. Damit gehört er zu der kleinen Gruppe von nur sechs IP (von 39 bestätigten IP), deren Umlaufperiode unterhalb der von 2 bis 3 Stunden reichenden Zone des "CV period gap" liegt. Seine Inklination beträgt $78^\circ (\pm 1^\circ)$. Es treten daher tiefe Bedeckungsminima auf.

EX Hya - ein "intermediate polar" im Ruhelicht

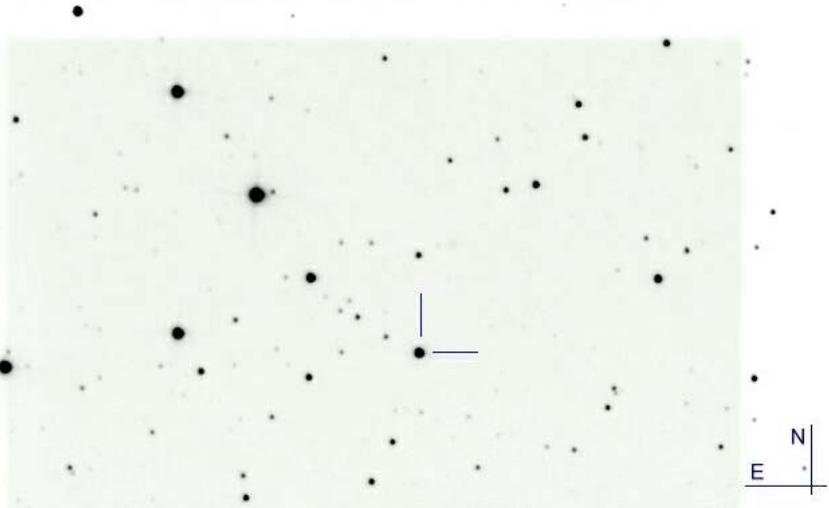


Abb. 1: 50-cm-Cassegrain (f/9), STL-1001E, 240 s,
IAS-Sternwarte Hakos (Namibia) 240 s

In [11] wird ihm der Typ UGSU+E zugewiesen und die seltenen Ausbrüche erwähnt, bei denen seine Helligkeit von 13 mag auf 10 mag ansteigt. Die Tiefe der Bedeckungsminima wird durch die Rotation des Weißen Zwerg nicht beeinflusst, die Amplitude beträgt ~ 0.3 mag [12]. Ebenfalls in [12] werden die Elemente dieser Bedeckungen mit $2437699.9414 + E \times 0.06823386$ angegeben.

Für das Flussmaximum der Rotation des Weißen Zwergs gelten andere Elemente, nämlich $2437699.8917(6) + 0.046546484(9) E$, die in der Arbeit noch um quadratische und kubische Anteile erweitert sind [13].

Wir bauen uns ein Modell!

Dem weiteren Text vorgreifend möchte ich schon einmal auf die Fig. 10 in [4] und die Fig. 13 in [5] hinweisen, welche die geometrisch-physikalischen Verhältnisse im Ruhezustand bzw. im Ausbruch visualisieren. Wer will, kann sich bereits jetzt die vier Darstellungen ausdrucken, ausschneiden und mit einem Gelenk drehbar wieder zusammenfügen: einen inneren Teil (mit Weißem Zwerg, seinem Magnetfeld und den Akkretionsvorhängen, in denen sich die Materie auf die beiden Magnetpole zu bewegt) und einen äußeren Teil (mit Akkretionsring bzw. im Ausbruch mit der Akkretionsscheibe und der Sekundärkomponente). Damit können wir uns vorzustellen, was sich in EX Hya wie in unsere Sichtlinie hinein dreht, bedeckt wird und danach wieder hinaus dreht. Gedanklich können wir nun die sich auf verschiedenen Zeitskalen vollziehenden Veränderungen in der resultierenden Lichtkurve summiert verstehen. Das erfordert etwas Mühe.

EX Hydrae animiert im Internet

Hilfreich ist eine künstlerische Darstellung des Systems, die sich Jeder im Internet ansehen kann [14]. Ich vermisse allerdings schmerzlich eine 3D-Animation, welche uns verstehen ließe, was wann wie von was bedeckt würde, und dies auch getrennt nach den verschiedenen in der Literatur vorgeschlagenen Szenarien.

Die Animation unter [15] zeigt das Ergebnis einer Simulation aus dem Jahr 2000, ist aber vor allem durch [4] und [5] überholt. Denn EX Hya wurde weder mit Akkretionsring noch mit Akkretionsscheibe modelliert, der Akkretionsstrom wird direkt auf einen Magnetpol geführt.

Aber das schadet nicht, denn die Animation zeigt uns wunderschön den Effekt des "pole flipping", wenn der Akkretionsstrom von einem Magnetpol auf den anderen wechselt, eine kurze Zeit noch beide Pole bedient, dann aber (wie die meiste Zeit) auf einem einzigen Magnetpol endet.

Ein Tipp für Beobachter

Schwierigkeiten beim Verstehen von EX Hya sollten keinen Sternfreund daran hindern, längere Serien für eine Lichtkurve zu fotometrieren. Wegen der unterschiedlich langen Perioden von Rotation des Weißen Zwergs und Umlaufbewegung beider Komponenten finden aufeinander folgende Bedeckungen in immer wechselnder "Umgebung" statt. Da aber beide Perioden zu einander im Verhältnis von ungefähr 2/3 stehen, lassen sich die Umlaufzyklen (wenn drei Rotationszyklen durchlaufen sind) falten, ohne dass ein "Verschmieren" der Lichtkurve erfolgt [9].

Mehrere Theorien beschreiben den Veränderlichen

In [4] werden Studien erwähnt, welchen zu entnehmen ist, dass EX Hya nicht dem traditionellen IP-Modell folgt. Das System weist ein großes Verhältnis $P_{\text{spin}} / P_{\text{orb}}$ von ~ 0.68 auf. Dies legt nahe, dass sich EX Hya nicht in einer gewöhnlichen Gleichgewichts-Rotation befindet. Für die meisten IP wurde nämlich gezeigt, dass sie ihr Rotations-Gleichgewicht nahe $P_{\text{spin}} / P_{\text{orb}} \sim 0.1$ erreichen. Daraus leiten die Autoren letztendlich ab, dass der Veränderliche keine Keplerische Akkretionsscheibe besitzen kann.

Theoretiker entwarfen daher ein anderes Modell, in dem sich die Akkretionsvorhänge bis zum Lagrange-Punkt L1 erstrecken. In dieser Beziehung ähnelt EX Hya den asynchronen Polaren, bei denen fast der gesamte Massentransfer über einen Akkretionsstrom oder über einen Akkretionsring nahe dem Radius des Roche-Lobus der Primärkomponente und dem Akkretionsstrom erfolgt. Welches der Fall ist, hängt von der Theorie und von der jeweiligen Umlauf- und der Rotationsperiode sowie der Stärke des Magnetfeldes ab. Das ist also theoretisch schon etwas komplex.

Sodann werden in [4] spektroskopische Daten von EX Hya präsentiert, in dem er sich im Ruhezustand befindet und andere, die ihn zwei Tage nach Beginn eines Ausbruchs zeigen.

Nach [1] (aus dem Jahr 1980) brechen die meisten Zwergnovae alle 20 bis 100 Tage mit einer Amplitude von bis zu 5 mag aus. EX Hya ist auch in dieser Hinsicht eine Ausnahme, als seine Ausbrüche sehr selten stattfinden (im Durchschnitt alle 574 Tage) und nie eine Amplitude von 2 mag übersteigen. Die kurze Dauer dieser Ereignisse von unter 4 Tagen erschwert zusätzlich deren Beobachtung. Die Folge ist, dass zumindest bis 1980 weder fotometrische noch spektroskopische Beobachtungen von EX Hya im Ausbruch vorliegen. Im Ruhezustand ist EX Hya dagegen ein recht gut studiertes Objekt, welches mit $B \sim 13,5$ mag eine der hellsten "Zwergnovae" ist.

Fragen für Teil 2

Was von diesen Eigenschaften lässt sich durch uns beobachten? Wie sieht die Lichtkurve von EX Hya aus? Wie können wir diese interpretieren? Das wird in den nächsten drei Kapiteln, im 2. Teil, gezeigt: die Lichtkurve von EX Hya im Ruhezustand.

Verzeichnis englischer Begriffe und Abkürzungen

VEM	vertically extended material
HVC	high velocity component
VHVC	very high velocity component
DFT	Inverse Diskrete Fouriertransformation
BMP	Back Projection Method
MEM	Maximum Entropy Method

binary	Doppelstern	physikalisches Doppelsternsystem
white dwarf	Weißer Zwerg	Primärstern
secondary	-	Sekundärstern
accretion curtain	Akkretionsvorhang	
accretion disc	Akkretionsscheibe	
accretion ring	Akkretionsring	
accretion stream	Akkretionsstrom	
accretion column	Akkretionssäule	... oberhalb eines Magnetpols
pole-flipping	"pole-flipping"	Wechsel der Akkretion zwischen den Magnetpolen

disc overflow	"disc overflow"	der Akkretionsstrom prallt von der Akkretionsscheibe ab und fließt weiter, bis er schließlich die Magnetosphäre des Weißen Zwergr erreicht und dort sein ultimatives Ende findet.
hot spot	Heißer Punkt	Einschlagstelle des Akkretionsstroms auf Akkretionsring bzw. -scheibe
bulge chunks	Verdickung Klumpen Magnetosphäre	Klumpen im Akkretionsring (vom Weißen Zwerg)
vertically extended material (VEM)	vertikal ausgedehntes Material	... auf dem Akkretionsring

Literaturverzeichnis

- [1] Vogt, N., et al., 1980. Periodic and secular variations in the lightcurve of dwarf nova EX Hydrae, *Astron.Astrophys.* 85,106-112
- [2] Hellier, C., 2001. *Cataclysmic Variable Stars, How and why they vary*, Springer PRAXIS
- [3] Hellier, C., 2002. Stream-fed Accretion in Intermediate Polars, arXiv:astro-ph/0201475v1
- [4] Mhlahlo, N., et al., 2007. Spectroscopic Observations of the Intermediate Polar EX_Hydrae in Quiescence, arXiv:0704.0017v1
- [5] Mhlahlo, N., et al., 2007. Outbursts of EX_Hya Revisited, arXiv:0706.0887v1
- [6] Pekön, Y., Balman, S., 2010. Orbital and Spin Phase-Resolved Spectroscopy of the Intermediate Polar EX_Hya Using XMM-Newton Data, arXiv:1009.4392v1
- [7] Reinsch, K., 2004. Was verraten Lichtkurven über die Natur kataklysmischer Veränderlicher? Fachvortrag BAV-Tagung, 2004 in Göttingen
- [8] Schwarz, R., et al., 2005. Doppler tomography of the asynchronous polar BY Camelopardalis, *Astron.Astrophys.* 444, 213-220
- [9] Hellier, C., et al., 1987. Time resolved optical spectroscopy of the eclipsing intermediate polar EX Hydra, *Mon. Not. R. astr. Soc.* 228, 463-481
- [10] Walter, F., 2009. Vorschlag für eine Neugestaltung der BAV-Programme, RB 2009-3,191
- [11] Lange, T., 2009. Kataklysmische Bedeckungsveränderliche für CCD Beobachter - Teil 2, RB 2009-2,111
- [12] Shylaja, B. S., 1985. Photometry of EX Hya, *Astrophysics and Space Science* 111, 407-411
- [13] Mauche, C. W., et al., 2009. Updated Spin Ephemeris for the Cataclysmic Variable EX_Hya, arXiv:0902.1977v1
- [14] <http://space-art.co.uk/en/artwork/binary-stars/intermediate-polar-binary.html> (Stand: 14.12.2011)
- [15] <http://www.ukaff.ac.uk/movies.shtml> (Stand: 14.12.2011)