

T Pyxidis - eine rekurrente Nova im Ausbruch - Teil 3

Der Blick in Vergangenheit und Zukunft des Veränderlichen führt zu einem konsistenten Bild

Hans-Günter Diederich

Einleitung

Die Arbeit [1] ist mit einer Länge von 30 Seiten äußerst umfangreich. Mehrere ihrer Kapitel müssen daher übersprungen werden. Am drängendsten ist zu verstehen, warum das letzte Intervall zwischen 1967 und 2011 so lange dauerte und warum die Vorhersagen so extrem daneben lagen. Diese Frage wird hier (zu Beginn von Teil 3) erneut aufgegriffen.

Aber es ist viel mehr zu verstehen: Wie ergibt sich aus all den Information ein konsistentes Bild? Woher kommt T Pyx? Und wohin wird sich dieser Veränderliche entwickeln?

Das 44 Jahre lange Intervall (The 44 Year Inter-Eruption Interval)

Wie konnte es nur zu diesen misslungenen Vorhersagen des Ausbruchs von T Pyx kommen? Schaefer et al. (2011) [1] erklären, was falsch gemacht wurde. Die einzige Möglichkeit für einen Fehler liegt bei der Ableitung der Akkretionsrate aus der B-Helligkeit.

Helligkeit und Dauer der Intervalle zwischen den Ausbrüchen
(nach Table 3 aus [1])

Intervall	Länge (Jahre)	(B) (mag)
Pre-1890		13,80
1890-1902	11,86	14,38
1902-1920	17,92	14,74
1920-1944	24,62	14,88
1944-1967	22,14	14,70
1967-2011	44,33	15,59

Nach [7] ist die Akkretionsrate proportional zum Fluss im B-Filter zum Quadrat. Der Exponent 2 ergibt sich aus dem Modell einer einfachen Akkretionsscheibe mit den Parametern von T Pyx. Wäre für diesen Exponenten E stattdessen der Wert $\sim 1,0$ eingesetzt worden, hätte die Vorhersage ziemlich genau gepasst. Und das ist der Fall bei einer zum B-Band-Fluss proportionalen (nicht quadratischen) Akkretionsrate.

Zwischen 1944 und 1967 betrug die Helligkeit im Ruhezustand 14,72 mag, während sie von 1967 bis 2005 bei 15,49 mag lag. Dieser Unterschied von 0,77 mag entspricht einem Flussverhältnis im B-Band nahe 2,0. Bei einer dem B-Fluss proportionalen Akkretionsrate folgt für diese im Durchschnitt ebenfalls ein Verhältnis von nahe bei 2,0: die Akkretionsrate wäre die letzten Jahre also nur noch halb so hoch gewesen wie zuvor, und der Weiße Zwerg hätte doppelt so lange benötigt, das für einen Ausbruch erforderliche Material auf seiner Oberfläche anzusammeln.

Das Intervall nach 1967 wäre also 2×22 Jahre = 44 Jahre lang gewesen. Der nächste Ausbruch wäre somit in 2011 zu erwarten gewesen.

Der B-Band-Fluss von T Pyx scheint also irgendwie proportional seiner Akkretionsrate zu sein, der Exponent E einen Wert von ~ 1 aufzuweisen. Alle bisherigen fünf Zwischenintervalle sind konsistent mit $E = 1$. Um so wichtiger ist es, diesen niedrigen Wert zu erklären.

T Pyx ist ein intermediärer Polar, erkennbar durch typisch instabile fotometrische Periodizitäten nahe seiner Umlaufperiode (Patterson et al. 1998), das kennzeichnende Merkmal dieser Klasse von kataklysmischen Veränderlichen. Und als intermediärer Polar findet auf seiner Oberfläche ein helles, kontinuierliches "nukleares Brennen" ([9]) statt.

Die Akkretionsscheibe wird durch sein Magnetfeld gestutzt, und ihr Innenrad befindet sich weit oberhalb der Oberfläche des Weißen Zwergs. Die Scheibe mag vielleicht nur als schmale Ringscheibe vorliegen oder nicht einmal als Scheibe bzw. Ring erkennbar sein.

Der Ort des "nukleares Brennens" auf der Oberfläche zeigt sich als helle "überweiche Röntgenquelle" ("supersoft X-ray source"), welche die Akkretionsscheibe (soweit vorhanden), die Akkretionssäule und die Sekundärkomponente beleuchtet ("irradiating"). Auf diesen Strukturen wird die Röntgenstrahlung in sichtbares Licht im B-Band umgewandelt ("reprocessed"). Sie trägt dadurch mit einem bedeutenden Anteil zur Helligkeit von T Pyx bei.

Der Außenrand der Scheibe wird durch den Roche-Lobus bei 320.000 km gestutzt. Der Innenrand ist durch den Radius des Weißen Zwergs (6.300 km) und durch das Magnetfeld (10.000 km bis fast 320.000 km) begrenzt.

Die "überweiche Röntgenquelle" hat im letzten Jahrhundert parallel zur abnehmenden Akkretionsrate an Helligkeit verloren. Daraus entspringt das Erfordernis, eine zweifache Anpassung des einfachen Modells (wegen der gestutzten Akkretionsscheibe und der Umwandlung von Röntgenlicht in "B-Licht") vorzunehmen. Dies könnte eine Änderung des theoretischen Wertes von E erforderlich machen.

Die spektrale Energieverteilung (SED) von T Pyx hat kein Beispiel unter den anderen kataklysmischen Veränderlichen (CV). Das Licht entstammt keiner thermischen Scheibe. Die Frage stellt sich, wo im System von T Pyx dessen optisches und infrarotes Licht entsteht.

Die Entstehung des optischen Kontinuums muss also in einem nicht-thermischen Mechanismus gesucht werden, während das infrarote Licht von einer Scheibe stammt, die beide Komponenten umgibt ("circumbinary disk"). Wenn aber das optische Licht nicht von Schwarzkörperstrahlung dominiert ist, dann scheiden alle früheren Modelle mit einem Exponenten von ~ 2 zur Erklärung des Verhaltens von T Pyx aus.

Ein konsistentes Bild (A Consistent Picture)

Inzwischen wissen wir, wie es zum Intervall mit einer Dauer von 44 Jahren kam. Aber das Verstehen von T Pyx darf sich nicht auf diesen Zeitraum beschränken. Es muss auf den gesamten Lebenslauf des Veränderlichen ausgedehnt werden, der nicht nur dessen Vergangenheit sondern auch dessen Zukunft umfasst. Dies wird mit diesem Kapitel versucht.

T Pyx besitzt eine recht komplizierte Geschichte, die aus vielen Einzelstücken und einer breitgefächerten Menge von Daten zusammen gesetzt wurde. Es dürfte von Vorteil sein, dies in einem konsistenten Bild, an einer einzigen Stelle konzentriert, vorzufinden. [1] präsentieren eine größtenteils chronologisch organisierte Zusammenfassung, die sich besonders auf folgende drei Arbeiten stützt: [8], [9] und [10].

Bei den grundlegenden Parametern von T Pyx handelt es sich um die Masse des Weißen Zwergs von $1,30 M_{\text{sun}}$ ($\pm 0,05 M_{\text{sun}}$), die Masse des Begleiters mit $0,26 M_{\text{sun}}$ ($\pm 0,04 M_{\text{sun}}$), der Umlaufperiode ("orbital period") von 1,83 Stunden und einer Inklination von nahe 0° ("nearly pole-on"). Die Entfernung zu T Pyx beträgt $3,5 \text{ kpc}$ ($\pm 1,0 \text{ kpc}$), und die Extinktion weist einen Wert von $E\{B-V\} = 0,25 \text{ mag}$ ($\pm 0,02 \text{ mag}$) auf. Das Magnetfeld des Weißen Zwergs ist ausreichend stark, das akkretierende Material kanalisiert auf die Polkappe zu führen, wie dies bei intermediären Polaren (IP) der Fall ist. Während eines Zeitraums von ~ 750.000 Jahren vor 1866 besaß T Pyx die Eigenschaften eines unscheinbaren kurzperiodischen IP mit einer Akkretionsrate von $\sim 4 \times 10^{11} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ und mit $B = 18,5 \text{ mag}$.

Klassischer Novausbruch setzt eine Rückkopplung in Gang

Nach dieser langen Zeit mit langsamer Anhäufung von Masse auf dem Weißen Zwerg, ereignete sich im Jahr 1866 ± 5 ein normaler klassischer Novausbruch, bei dem T Pyx eine Helligkeit von möglicherweise $B = 5 \text{ mag}$ erreichte. Bei diesem Ausbruch erfolgte der Ausstoß einer glatten, gleichmäßigen Schale ("shell") einer Masse von $\sim 10^{4,5} M_{\text{sun}}$ mit einer Geschwindigkeit von $500 - 715 \text{ km/s}$. Diese Schale war massereicher als die Menge der bis dahin auf dem Weißen Zwerg abgelagerten Masse. Dieser Ausbruch beleuchtete ("irradiated") den aufgrund der kurzen Umlaufperiode nahen Begleiter. Daraus ergab sich ein kräftiger Akkretionsstrom, der vom Magnetfeld des Weißen Zwergs erfasst auf dessen kleine Polkappe gelenkt wird.

Bei einer bestimmten Kombination aus hoher Akkretionsenergie und stetem Wasserstoffbrennen blieb der Weiße Zwerg als heiße, hoch-leuchtkräftige Quelle bestehen und sorgte so weiterhin für die Beleuchtung des Begleiters. Die hohe Akkretionsrate verweilte damit auf ihrem hohen, sich selbst erhaltenden Niveau.

Auch lange nach dem Ausbruch von 1866 blieb T Pyx weiterhin als helles System mit hoher Akkretionsrate bestehen, im starken Unterschied zu seinem Zustand noch einige Jahre zuvor. Mit seiner neu angenommenen Akkretionsrate, sammelte der Weiße Zwerg sehr schnell Material an. Und da sich seine Masse nahe der Chandrasekhar-Grenze befand, begann T Pyx, sich wiederholende ("rekurrente") Novausbrüche zu zeigen. Jeder dieser Ausbrüche sandte eine mit 2.000 km/s schnelle Schale mit einer recht niedrigen Masse ($\sim 2 \times 10^6 M_{\text{sun}}$) aus. Jede dieser Schalen stieß auf die langsamere Schale von 1866 und führte dabei zur Entstehung von tausenden von Knoten (Rayleigh-Taylor-Instabilität).

Die Rückkopplungsschleife ("feedback loop") von Beleuchtung und Akkretion ("irradiation and accretion") ist aber nicht stabil. Die Akkretionsrate muss daher auf einer für solche Situationen typischen Zeitskala von ca. einem Jahrhundert abnehmen. Daher muss sich aber auch die Systemhelligkeit verringern, wie es als "Fading" von $B = 13,8 \text{ mag}$ in 1890 auf $B = 15,7 \text{ mag}$ in 2011 zu beobachten war. Des weiteren muss die übergeordnete Phase als rekurrente Nova (begonnen in 1866) von kurzer Dauer

sein. Eine andere Konsequenz dieser Entwicklung ist die Zunahme der Dauer der Abstände zwischen den Ausbrüchen ("inter-eruption intervals").

Damit dies alles bei T Pyx der Fall ist, müssen drei Bedingungen vorliegen:

- ein Weißer Zwerg mit einer Masse nahe der Chandrasekhar-Grenze,
- eine kurze Umlaufperiode und
- ein deutliches Magnetfeld an der Oberfläche des Weißen Zwergs.

Die Kombination aller drei Bedingungen ist selten. Somit befinden sich nur wenige dieser Sterne in einer solchen Phase. Und die Dauer dieser Phase wird sehr kurz sein, vielleicht ein bis einige hundert Jahre von insgesamt Millionen von Jahren. Die häufigen und hellen Ausbrüche solcher Systeme werden aber dennoch unsere Aufmerksamkeit auf sich ziehen.

Kein Vorgänger einer Supernova!

Obwohl im System T Pyx Materie mit sehr hoher Akkretionsrate auf den Weißen Zwerg fällt, der sich nahe der Chandrasekhar-Grenze befindet, ist der Veränderliche kein Vorgänger von Supernovae des Typs Ia. Falls der Weiße Zwerg in der Phase als Rekurrente Nova an Masse zunimmt, kann er dennoch nicht zu einer der beobachteten SN vom Typ Ia werden. Denn Systeme derselben Art wie T Pyx sind in unserer Galaxis, in M31 und in der LMC viel zu selten, als dass sie Vorgänger dieser Supernovae sein könnten. Auch die Dauer der rekurrenten Novaphase ist nur ein so kleiner Teil der Lebensdauer, dass auch hiermit nicht die Zahl der beobachteten SN vom Typ Ia erklärbar wäre.

Ob die Masse des Weißen Zwergs während der Phase als Rekurrente Nova anwächst oder nicht, spielt keine Rolle, da die dynamische Entwicklung von klassischen Novaausbrüchen dominiert wird. Und in diesen wird immer mehr Material ausgestoßen, als zwischen den Ausbrüchen angesammelt werden kann. Die Masse des Weißen Zwergs wird also unterm Strich abnehmen.

Allgemein formuliert: Rekurrente Novae mit kurzer Umlaufperiode (nur T Pyx und IM Nor sind zur Zeit bekannt), sind keine Vorgänger von Supernovae, weil sie keinen Mechanismus besitzen, um die zeitweise hohe Akkretionsrate aufrecht zu erhalten. Dagegen können Rekurrente Novae mit langer Umlaufperiode (z. B. U Sco und RS Oph) durchaus deren Vorgänger sein, weil sie einen solchen Mechanismus aufweisen (die Entwicklung des Begleiters von der Hauptreihe weg), der eine stetige hohe Akkretionsrate von Materie auf den Weißen Zwerg sicherstellt.

Noch verhindern äußerst komplexe Verhältnisse das Lüften aller Geheimnisse

In T Pyx führt die Beleuchtung des Begleiters geringer Masse zu einer hohen Akkretionsrate, die aus der schnellen und stetigen Zunahme der Umlaufperiode seit Mitte der 1980er zu 10^6 ($\pm 0,5$) M_{sun}/yr bestimmt werden konnte. Durch das Magnetfeld auf eine kleine Polkappe gelenkt, ergibt sich lokal eine so hohe Akkretionsrate, dass eine ausgedehnte Hülle ("envelope") um die Akkretionssäule herum entsteht. Die Physik der dortigen Verhältnisse ist äußerst komplex und nicht

vollständig erforscht. Aber die Beobachtungen bestätigen eine heiße Hülle, welche den Roche-Lobus des Weißen Zwergs ausfüllt.

Diese heiße Hülle wurde vom International Ultraviolet Explorer (IUE) im UV-Bereich als das Spektrum eines Objekts mit einer Schwarzkörpertemperatur von 34.000 K und einer Leuchtkraft von $10^{35,9}$ erg/s gesehen.

Das "nu^{0,9}-Potenzgesetz" im optischen und infraroten Teil des Spektrums rührt von den optischen dünnen äußeren Bereichen der zentralen Region plus dem diffusen Material außerhalb des Roche-Lobus her, das durch den nahen Begleiter heraus geschleudert wird.

Sehr viel wurde also in der letzten Zeit beobachtet und erklärt. Dennoch war es bis heute immer noch nicht möglich, das Geheimnis von T Pyx vollständig zu lüften.

Und zum Schluss

Mein Dank gebührt dem CDS (Strasbourg, Frankreich) für die Bereitstellung von Aladin und SIMBAD. Ohne die im Literaturverzeichnis aufgeführten Arbeiten wäre der Aufsatz nicht zustande gekommen. Daher sei auch deren Autoren (ganz besonders denen von [1] für ihre Zusammenfassung zum konsistenten Bild) herzlich gedankt.

Anhang

Tabelle: Kennwerte von T Pyx:

Entfernung	3.5 kpc (± 1.0 kpc)
Masse Weißer Zwerg	1.30 Msun (± 0.05 Msun)
Masse Begleiter	0.26 Msun (± 0.04 Msun)
Umlaufperiode	1.83 hr
Inklination	fast "pole-on"
Extinktion $E\{B-V\}$	0.25 mag (± 0.02 mag)

Elemente der Orbitalbewegung:

HJD =	2451651.65255	+0.076227249 N
-------	---------------	----------------

Literaturverzeichnis

- [1] Schaefer, B., et al., 2011. The 2011 Eruption of the Recurrent Nova T Pyxidis; the Discovery, the Pre-eruption Rise, the Pre-eruption Orbital Period, and the Reason for the Long Delay, arXiv:1109.0065v1
- [2] Lange, T., 2011. Kataklysmische Sterne: Aktivitäten zwischen Februar und April 2011, RB 2011-2, S. 145
- [3] Uthas, H., et al., 2010. The orbital period and system parameters of the recurrent nova T Pyx, arXiv:1005.5166v1
- [4] Schaefer, B., et al., 2009. The Nova Shell and Evolution of the Recurrent Nova T Pyxidis, arXiv:0906.0933v2
- [5] Shore, S. N., et al., 2011. The spectroscopic evolution of the recurrent nova T Pyxidis during its 2011 outburst I. The optically thick phase and the origin of moving lines in novae, arXiv:1108.3505v1

- [6] Diederich, H.-G., 2012. T Pyxidis - eine rekurrente Nova im Ausbruch - Teil 1, Literatur bis zum Ausbruch, RB 2012-2, S. 113 - 119
- [7] Schaefer, B., 2005. A Test of Nova Trigger, *Astrophys.JLett*, 621, L53
- [8] Schaefer, B., et al., 2010. The Nova Shell and Evolution of the Recurrent Nova T Pyxidis, arXiv:0906.0933v2
- [9] Schaefer, B., Collazzi, A., 2010. Novae With Long-Lasting Supersoft Emission That Drive a High Accretion Rate, arXiv:1002.1401v1
- [10] Schaefer, B., 2010. Comprehensive Photometric Histories of All Known Galactic Recurrent Novae, arXiv:0912.4426v1

Lichtkurve

Created by VARSTARS: Thorsten Lange (tl@thola.de), version 28.01.2012

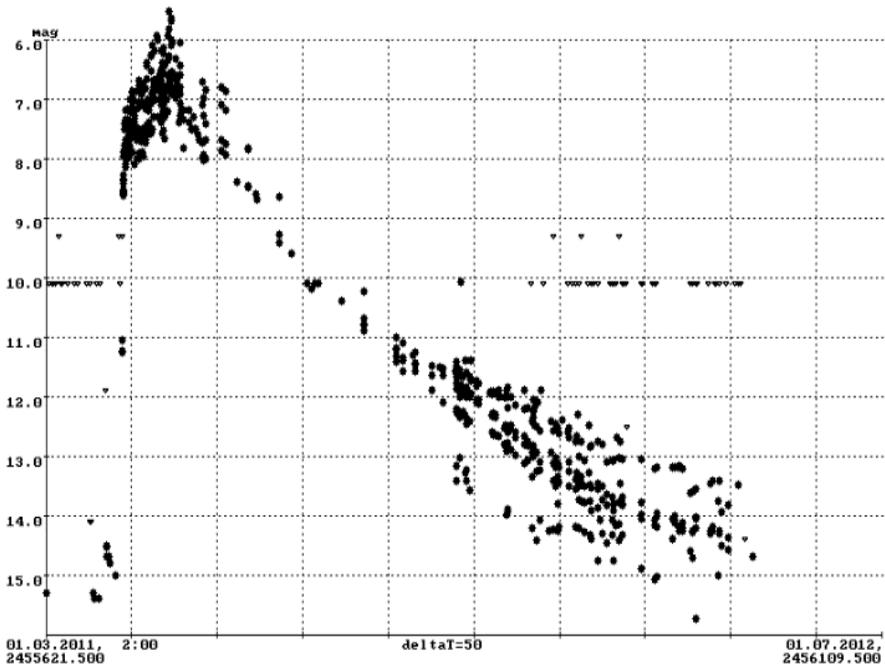


Abb. 1: Lichtkurve T Pyxidis (Zeitachse bis 01.07.2012), BAV-Lichtkurvengenerator (Thorsten Lange)

Hans-Günter Diederich
 Insel Str. 16
 64287 Darmstadt