

Akkretionsscheiben

in

Kataklysmischen Variablen

Lauterbad, 10.10.2003

Dr. Thorsten Nagel

nagel@astro.uni-tuebingen.de

Überblick

- Kataklysmische Variable (CV)
- Entwicklung eines CV
- Novae
- Zwergnovae
- Modellierung einer Akkretionsscheibe
- Schlusswort

Kataklysmische Variable

- *κατακλυσμός* (griech.): Überschwemmung
- (halbgetrennte) [Doppelsternsysteme](#), meistens bestehend aus Hauptreihenstern (Sekundärkomponente) und Weißem Zwerg (Primärkomponente)
- [Massenüberfluss](#) von der Sekundärkomponente auf die Primärkomponente, häufig unter Bildung einer Akkretionsscheibe
- plötzliche [Helligkeitsausbrüche](#) um 2-20 Magnituden in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen

Kataklysmische Variable

- **Primärkomponente:** Weißer Zwerg (WD)
 - ausgebrannter Kern eines Sterns
 - Durchmesser etwa 10 000 km (vgl. Erde)
 - Masse 0,3 - 1,3 $M_{\odot}$, meist etwa 0,5 $M_{\odot}$, maximal 1,4 $M_{\odot}$ (Stabilitätsgrenze)
 - Dichte viele Größenordnungen höher als auf der Erde
- **Sekundärkomponente:** (meist) Hauptreihenstern
 - roter Zwerg
 - füllt sein Roche-Volumen aus
 - aufgeheizt durch Einstrahlung vom WD
 - eiförmig verzerrt durch die Schwerkraft des WD

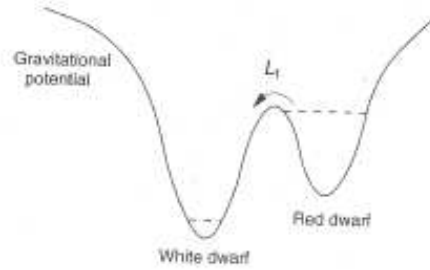


Fig. 2.4: The Roche lobes can be visualised as gravitational wells in which matter flows downhill. When the red dwarf overfills its Roche lobe, matter flows over the L_1 point into the Roche lobe of the white dwarf.

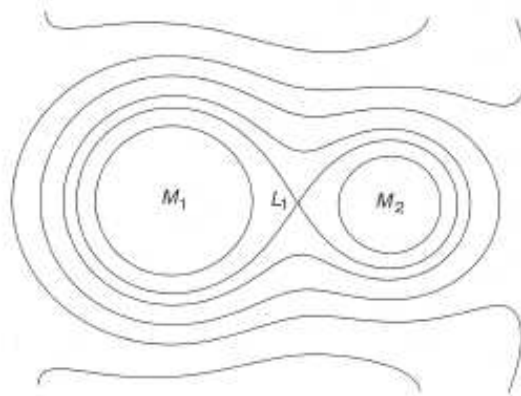


Fig. 2.3: Contours of equal gravitational potential drawn for a binary in which M_2 is half the mass of M_1 . The stars orbit in the plane of the paper. The potential surfaces just touching at the L_1 point are the Roche lobes of the two stars.

aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

Kataklysmische Variable

- Massentransfer
 - am [Lagrangepunkt \$L_1\$](#) entweicht ein dünner Strahl der Hülle des Sekundärsterns mit nahezu Schallgeschwindigkeit (10 km s^{-1})
 - L_1 bewegt sich senkrecht dazu mit 100 km s^{-1}
 - Gasstrom schwenkt in einen Orbit um den Weißen Zwerg
 - Bildung eines [Akkretionsringes](#) mit einem Radius, bei dem das Material denselben Drehimpuls hat wie bei L_1 ([Zirkularisationsradius](#))

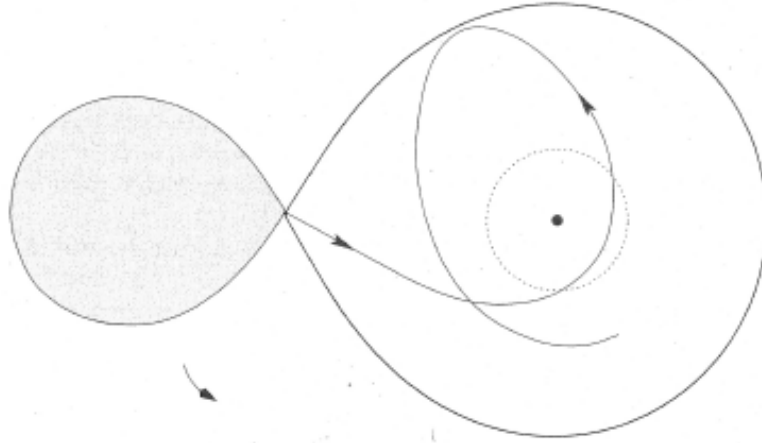


Fig. 2.7: A plan view of the trajectory of a gas stream emanating from the secondary (left). The primary nestles deep within its Roche lobe (outer line). The stream collides with itself and ultimately forms a ring at the circularisation radius (dotted line). Note that the trajectory is as seen by someone orbiting with the binary (the 'rotating frame'), thus one should envisage the whole diagram rotating while the stream traces the trajectory. The figure is drawn for a q of 0.3.

aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

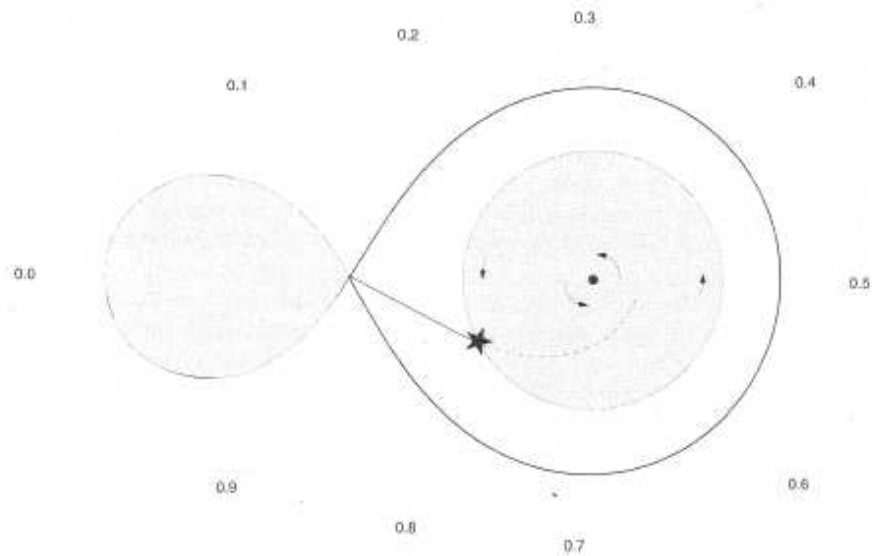


Fig. 2.8: A plan-view schematic of a cataclysmic variable showing the mass-transfer stream colliding with the disc at a 'bright spot'. Sometimes, part of the stream overflows the disc and continues to near the white dwarf (dotted line). The arrows on the disc illustrate the fact that material orbits faster near the disc centre. The tickmarks surrounding the figure indicate the direction from which the binary is viewed at the orbital phases labelled, assuming it to be seen edge-on. For lower inclinations, imagine the viewpoints lifted out of the plane of the paper.

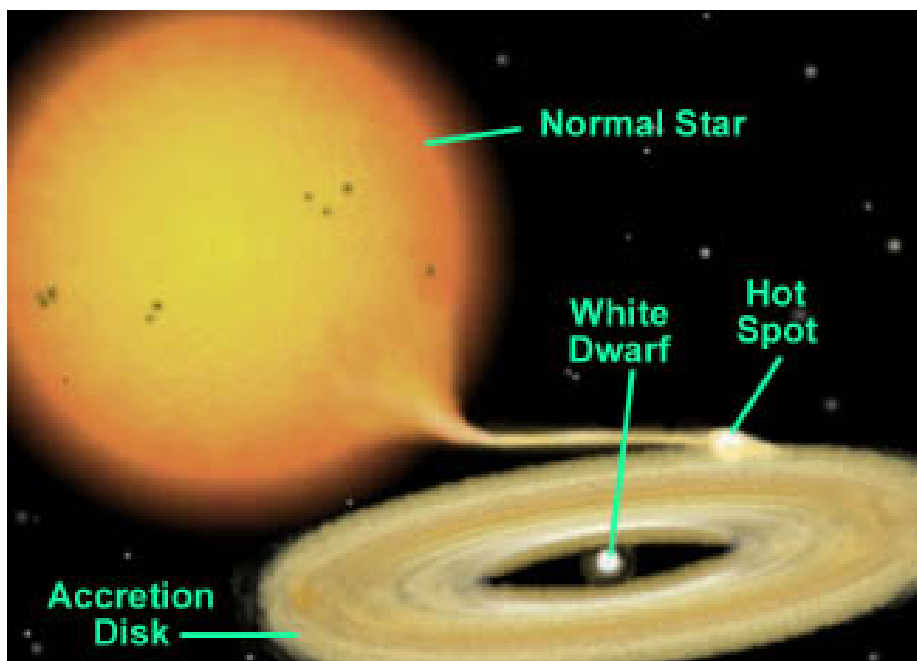
aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

Kataklysmische Variable

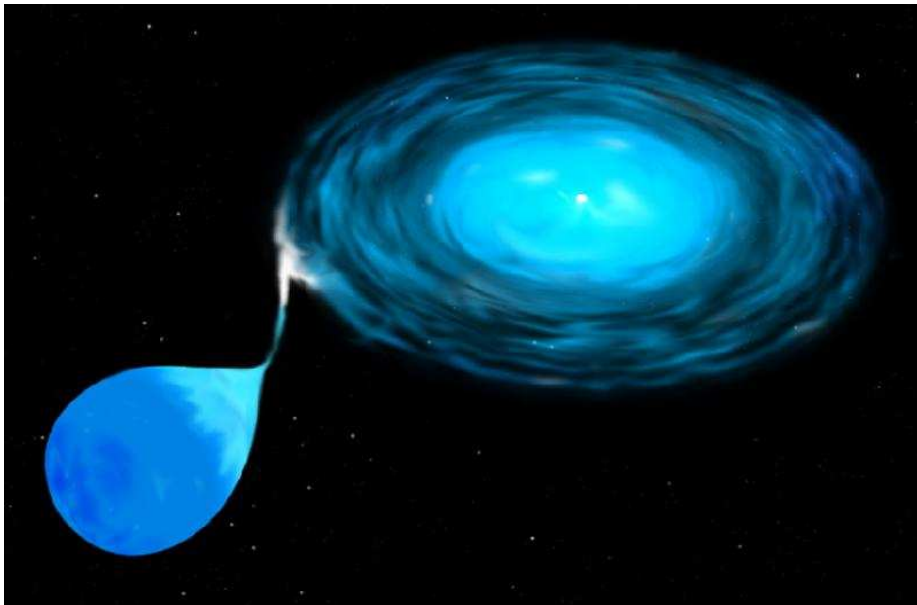
- Massentransfer
 - Akkretionsring zerfließt zu einer Akkretionsscheibe
 - im Falle eines nicht-magnetischen Weißen Zwerges reicht die Materie bis an den Primärstern und wird auf ihn akkretiert
 - im Falle eines magnetischen Weißen Zwerges reicht die Akkretionsscheibe nicht bis an den Primärstern, die Materie wird entlang der Magnetfeldlinien auf die Pole des Weißen Zwerges akkretiert
 - im Falle eines sehr starken Magnetfeldes bildet sich gar keine Akkretionsscheibe, die Akkretion erfolgt direkt entlang der Magnetfeldlinien auf die Pole

Kataklysmische Variable

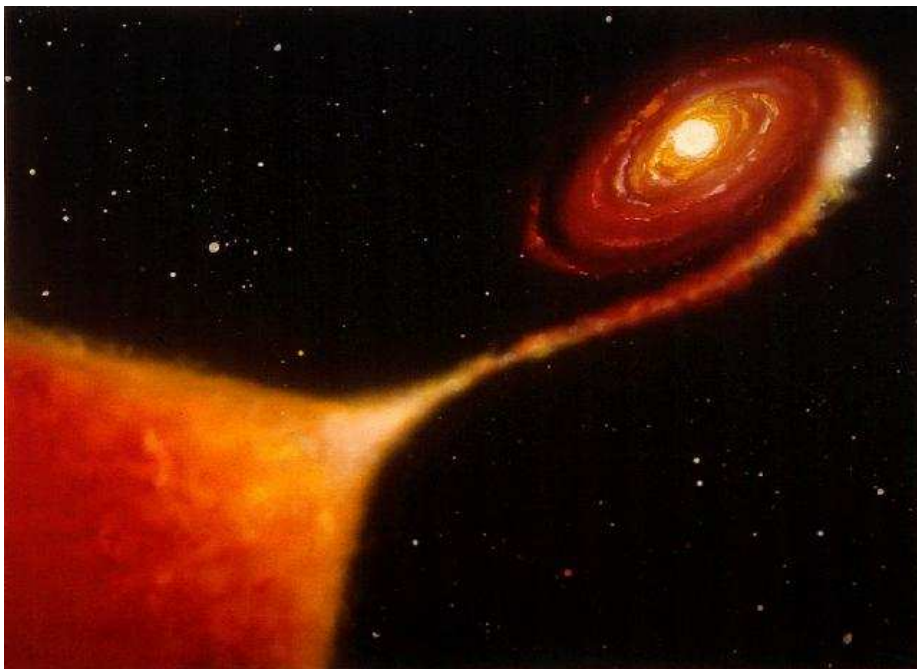
- Massentransfer
 - am Auftreffpunkt des Gasstroms auf die Akkretionsscheibe bildet sich der sog. **Heiße Fleck**
 - Lichtkurve eines bedeckenden Kataklysmischen Variablen zeigt den Weißen Zwerg, die Akkretionsscheibe und den Heißen Fleck



aus: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/cvs/cvs.html>



aus: <http://www.ast.cam.ac.uk/HST/press/diskillus.html>



aus: <http://www.psi.edu/howell/cvbdpressrelease.html>

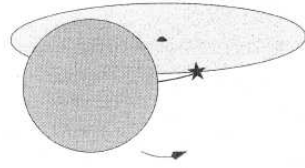


Fig. 2.10: The eclipse in a high-inclination cataclysmic binary. The secondary is partially eclipsing the disc, is about to eclipse the white dwarf, and will then eclipse the bright spot.

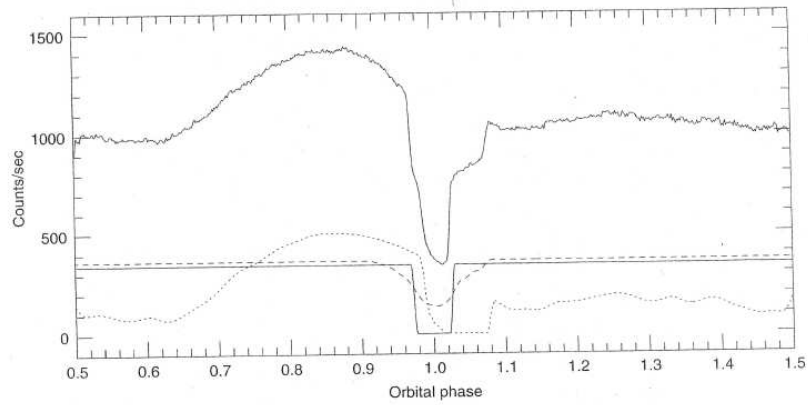


Fig. 2.12: The lightcurve of Z Cha (top) decomposed into the lightcurve of the white dwarf (solid line), reminiscent of that in NN Ser, and the lightcurve of the bright spot (dotted), including the orbital hump and its eclipse, and the lightcurve of the disc (dashed) showing its broader eclipse. This is shallower, since the red dwarf is not big enough to completely hide the disc. (Analysis by Janet Wood.⁸)

aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

Entwicklung eines CV

- Herkunft: getrenntes Doppelsternsystem, ein Stern mit etwas weniger als $1 M_{\odot}$, der andere mit mehr, etwa 10 Jahre Umlaufzeit
- der schwerere Stern entwickelt sich schneller, wird zum Roten Riesen
- er füllt sein Roche-Volumen aus und überträgt seine äußeren Schichten an den massenärmeren Stern
- Zustand ist instabil

Entwicklung eines CV

- schwerere Stern ist näher am Massenzentrum des DS-Systems, Materie, die auf den Begleiter transferiert wird, bewegt sich weg vom Massenzentrum
- Drehimpuls des übertragenen Materials wird erhöht, Abstand der beiden Sterne verringert sich (Drehimpulserhaltung des Gesamtsystems)
- Größe des Roche-Volumens verringert sich dadurch, der schwerere Stern füllt sein Roche-Volumen erst recht aus, mehr Materie wird übertragen
- es kommt zu einem sog. runaway-Effekt, die Hülle des Roten Riesen wird innerhalb weniger Jahre auf den Begleiter übertragen

Entwicklung eines CV

- der Begleiter kann in so kurzer Zeit nicht so viel Materie aufnehmen, die Materie füllt beide Roche-Volumen aus, es bildet sich eine Wolke um die beiden Sterne
- **Common Envelope Phase:**
der zukünftige Primärstern kreist innerhalb der Hülle eines Roten Riesen, ihr Abstand schrumpft von etwa $100 R_{\odot}$ auf $1 R_{\odot}$ innerhalb etwa 1000 Jahren, die gemeinsame Hülle wird in Form eines Planetarischen Nebels ans interstellare Medium (ISM) abgegeben
- ein Kataklysmischer Variabler ist entstanden (vorausgesetzt, der Abstand ist klein genug für Massentransfer)

Entwicklung eines CV

- Sekundärstern füllt sein Roche-Volumen aus, es kommt zu Massenübertrag vom masseärmeren Sekundärstern auf den Primärstern
- masseärmerer Stern ist weiter weg vom Massenzentrum, übertragenes Material kommt näher ans Massenzentrum heran und verliert Drehimpuls
- Abstand der beiden Sterne nimmt zu um Drehimpulsverlust zu kompensieren
- Sekundärstern wird kleiner als sein Roche-Volumen, Massenübertrag kommt zum Stillstand
- Wie ist ein stetiger Massentransfer möglich ?

Entwicklung eines CV

- Sekundärstern entwickelt sich zum Roten Riesen, durch seine Expansion bleibt er immer in Kontakt mit seinem Roche-Volumen
- aber: Sekundärsterne meist sehr massearm, zeitlich noch weit vom Riesenstadium entfernt
- Drehimpulsverlust des Doppelsternsystems führt zu kleinerem Orbit und so auch zu kleinerem Roche-Volumen des Sekundärsterns, ein kontinuierlicher Materieübertrag ist möglich
- zwei mögliche Mechanismen: Gravitationswellenabstrahlung und Magnetisches Bremsen

Entwicklung eines CV

- Gravitationswellenabstrahlung
 - Allgemeine Relativitätstheorie: Orbit zweier Sterne führt zu Abstrahlung von Gravitationswellen
 - Energie für die Wellen wird dem Orbit entzogen, Abstand der beiden Sterne schrumpft
 - vernachlässigbar für die meisten Doppelsternsysteme, aber bei sehr engen Orbits mit hohen Umlaufgeschwindigkeiten wichtig
 - ermöglicht für ein System mit 2 h Umlaufzeit einen kontinuierlichen Massenübertrag von etwa $10^{-10} M_{\odot}/\text{a}$

Entwicklung eines CV

- Magnetisches Bremsen

- Voraussetzung: Sternwind und stellares Magnetfeld des Sekundärsterns
- Teilchen des Sternwindes bewegen sich entlang der Magnetfeldlinien, rotieren gebunden durch das Magnetfeld mit dem Sekundärstern mit und werden letztendlich ins ISM geschossen
- ein Teil des Drehimpulses des Sekundärsterns wird dabei mitgenommen
- Rotation des Sekundärsterns ist durch Gezeitenkräfte an den Orbit des Systems gebunden
- Gesamtsystem verliert Drehimpuls, Abstand der beiden Sterne schrumpft
- ermöglicht einen kontinuierlichen Massenübertrag von etwa $10^{-9} M_{\odot}/a$ (stark systemabhängig)

Entwicklung eines CV

- Entwicklung von Kataklysmischen Variablen anhand der unterschiedlichen Orbitalperioden von über 300 CVs gut nachvollziehbar
- [langperiodischer cutoff](#):
Sekundärstern muss leichter sein als Primärstern ($1,4 M_{\odot}$), max. Orbit bei etwa 12 h, magnetisches Bremsen führt zu kleineren Orbitalperioden
- [Periodenlücke](#):
im Bereich 2-3 h Orbitalperiode (nahezu) keine Systeme vorhanden, Wechsel von magnetischem Bremsen zu Gravitationsstrahlung
- [Periodenminimum](#):
min. Orbitalperioden bei 78 Minuten, Masse des Sekundärsterns wird sehr klein ($0,06 M_{\odot}$), er entartet, weiterer Massenverlust führt folglich zu Expansion des Sekundärsterns (Kontakt mit Roche-Volumen bei größerem Abstand)

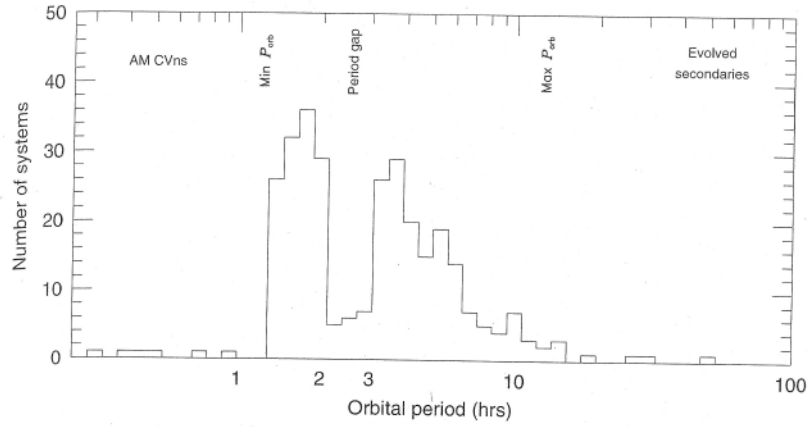


Fig. 4.1: The distribution of cataclysmic variable orbital periods, from a compilation by Hans Ritter and Uli Kolb.¹

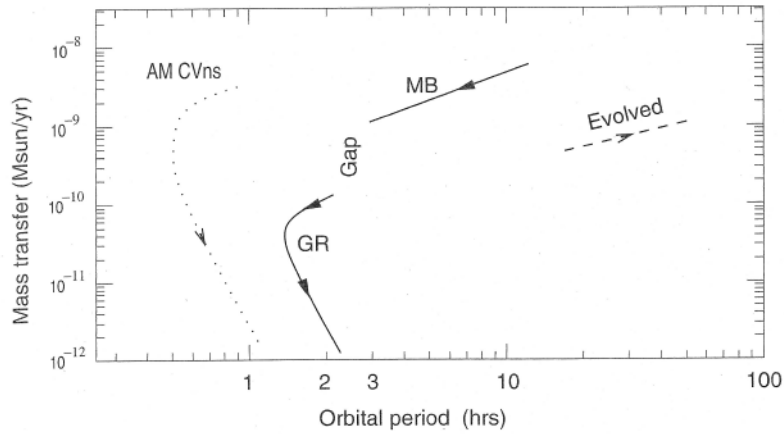


Fig. 4.2: The evolution of cataclysmic variables proceeds by magnetic braking (MB) above the gap, and then by gravitational radiation (GR) below the gap and through the period minimum. The helium systems (AM CVns) evolve on a similar track at shorter periods. Systems with evolved secondaries are at longer periods. Arrows show the direction of evolution.

aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

Entwicklung eines CV

- Masse des Sekundärsterns schrumpft weiter, Orbitalperiode nimmt zu, Abstrahlung von Gravitationswellen nimmt rapide ab, Massentransferrate sinkt
- Endprodukt: jupiterähnliches Objekt umkreist Weißen Zwerg (nicht beobachtbar)
- [AM CVn Sterne](#):
Orbitalperioden kleiner als Periodenminimum, Sekundärstern aus Helium, kompakter, engere Orbits möglich, aber analoge Entwicklung wie normale CVs

Novae

- Nova-Ausbruch ist das dramatischste Ereignis im Leben eines CV
- Helligkeitsanstieg um 8-15 Magnituden in Stunden
- anschließend Helligkeitsabfall über mehrere Tage
- Wiederholfrequenz abhängig von der Masse des Weißen Zwerges ($10^4 - 10^6$ Jahre)
- Ursache: nukleare Kettenreaktion an der Oberfläche des Weißen Zwerges
- hohe Temperatur und hoher Druck führen zu schlagartiger Fusion des akkretierten Wasserstoffs an der Oberfläche (Wasserstoffbombe mit 30-facher Erdmasse)

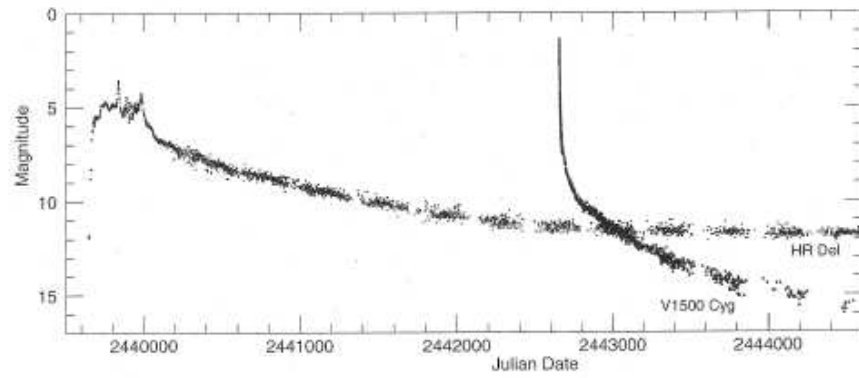


Fig. 11.1: The lightcurves of HR Del (Nova Del 1967) and V1500 Cyg (Nova Cyg 1975), representing the extremes of fast and slow novae. The data are 1-day averages compiled by the AAVSO.

aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

Zwergnovae

- Prototyp U Gem 1855 entdeckt
- 3 Unterklassen:
 - U Gem: mehr oder weniger reguläre quasiperiodische Ausbrüche
 - Z Cam: Ausbrüche gelegentlich unterbrochen von „standstills“ bei mittlerer Helligkeit
 - SU UMa: kurze normale Ausbrüche und lange Superausbrüche

Zwergnovae

- Helligkeitsanstieg 2-6 Magnituden in 2-8 Tagen, u.U. Plateau (10 Tage), Helligkeitsabfall 8 Tage, Wochen bis Monate Ruhephase
- Lichtkurve ändert sich beim Ausbruch: erst dominiert von WD und Heißen Fleck, dann dominiert von Scheibe
- Ausbruch bedeutet also dramatischer [Helligkeitsanstieg der Scheibe](#)

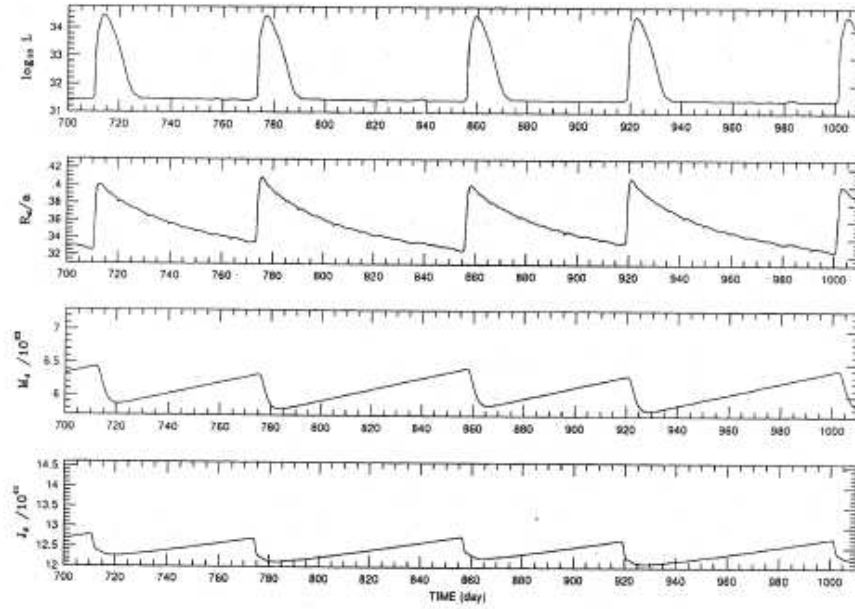


Fig. 5.15: Model simulations of outbursts, computed by Susumu Ichikawa and Yoji Osaki.¹³ The panels show (from the top) the luminosity, the disc radius, the mass of the disc, and its angular momentum. (Details of such models are beyond the level of this book, but for an introduction to the equations involved consult *Accretion Power in Astrophysics* by Frank, King and Raine.)

aus: Coel Hellier, Cataclysmic Variable Stars, 2001

Zwergnovae

- Erklärung: [Scheibeninstabilität](#) (Osaki 1974)
- Massentransferrate $\dot{M}(2)$ größer als Transportrate durch die Scheibe: Material häuft sich in Scheibe an, Temperatur steigt, Scheibe wird instabil
- Wasserstoff beginnt zu ionisieren, Erhöhung der Viskosität, Zunahme des Drehimpulstransports, Ausdehnung der Scheibe, Scheibe im Ausbruch
- verstärkte Akkretion auf WD, Scheibe wird geleert, fällt zurück in Ruhezustand
- geringe Viskosität, Material für den nächsten Ausbruch wird angesammelt

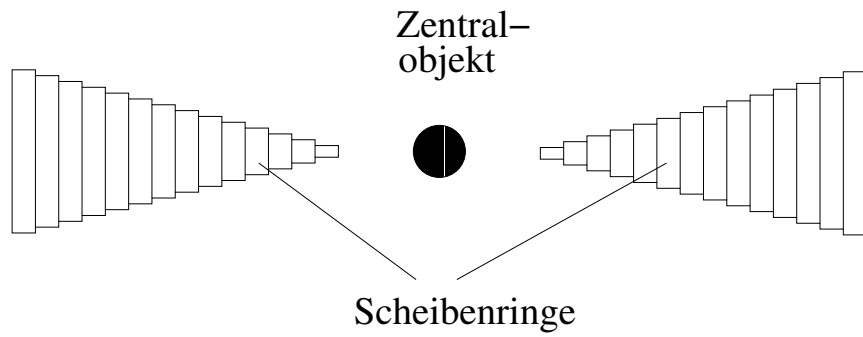
Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Akkretionsscheiben generieren bis zu 50 Prozent der Leuchtkraft eines Kataklysmischen Variablen, Zwergnovae im Ausbruch werden von der Akkretionsscheibe dominiert
- Verständnis des Gesamtsystems macht eine realistische Beschreibung der Akkretionsscheibe nötig
- eine detaillierte dreidimensionale strahlungshydrodynamische Behandlung sprengt allerdings die momentanen Computerleistungen
- deshalb Beschränkung auf **geometrisch dünne Scheiben** ($H \ll R$) und getrennte Betrachtung von Radial- und Vertikalstruktur

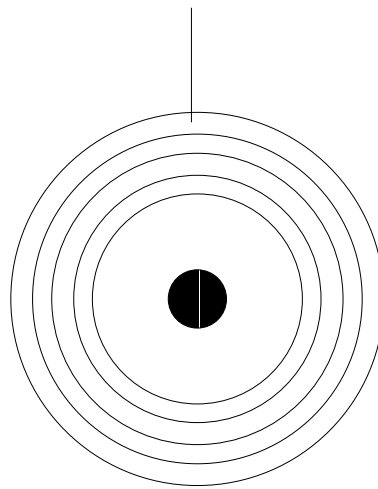
Modellierung einer Akkretionsscheibe

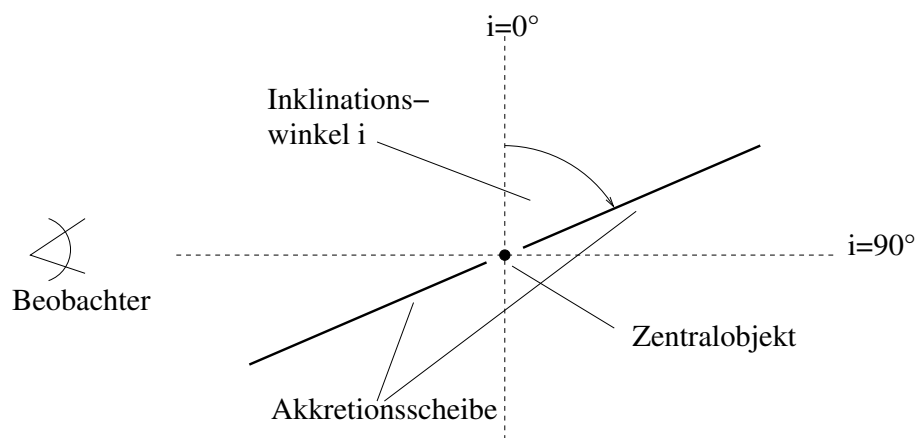
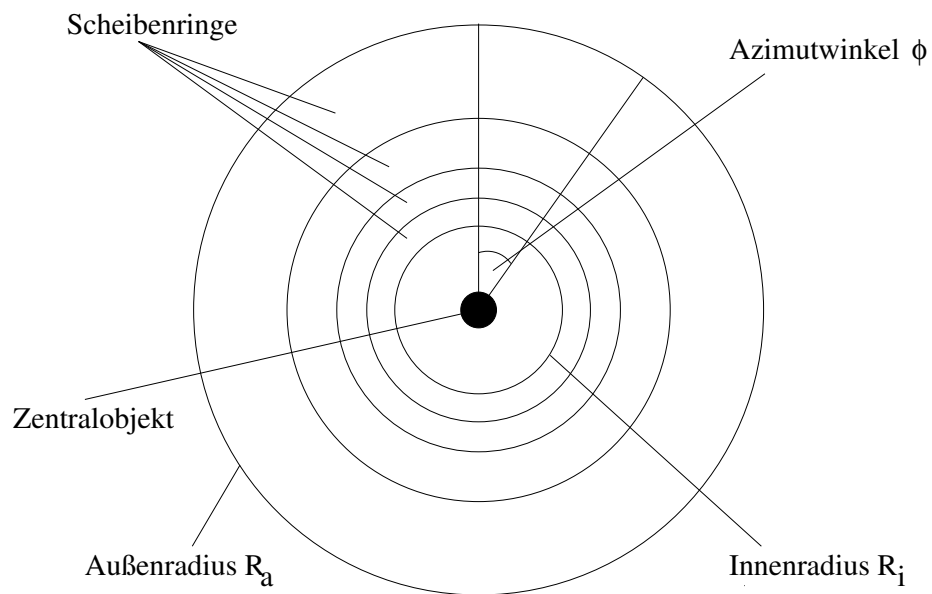
- **Ziel:** synthetisches Spektrum einer Akkretionsscheibe, um durch Vergleich mit einem beobachteten Spektrum Eigenschaften der Scheibe bestimmen zu können
- Reduktion des dreidimensionalen Problems auf ein System eindimensionaler Probleme
- Unterteilung der Akkretionsscheibe in einen Satz konzentrischer, voneinander unabhängiger Ringe
- Berechnung der Spektren der Einzelringe, anschließend Aufintegration der Einzelspektren zum Gesamtspektrum der Akkretionsscheibe

Seitenansicht



Aufsicht





Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Vertikalstruktur eines Scheibenringes ist bestimmt durch
 - Energiegleichgewicht
 - hydrostatisches Gleichgewicht
 - Ratengleichungen der atomaren Besetzungszahlen
 - Ladungs- und Teilchenzahlerhaltung
 - Strahlungstransportgleichung
- konsistente Lösung in einem iterativen Schema, vorgegeben werden chemische Zusammensetzung, Atomdaten, Massenakkretionsrate, Masse und Radius des Zentralobjektes, Viskositätsparameter, Radius des Scheibenringes

Modellierung einer Akkretionsscheibe

- **Energiegleichgewicht:**

$$E_{\text{mech}} = E_{\text{rad}} + E_{\text{konv}}$$

- **hydrostatisches Gleichgewicht:**

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{G M_{\star}}{R^3} z \rho$$

- **Ratengleichungen:**

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = n_i \sum_{i \neq j} P_{ij} - \sum_{j \neq i} n_j P_{ji}$$

- **Ladungserhaltung:**

$$n_e = \sum_{x=1}^{\text{Element}} \sum_{i=1}^{\text{Ion}} q(i) \left(\sum_{l=1}^{\text{NLTE}} n_{xil} + \sum_{l=1}^{\text{LTE}} n_{xil}^* \right)$$

- **Strahlungstransport:**

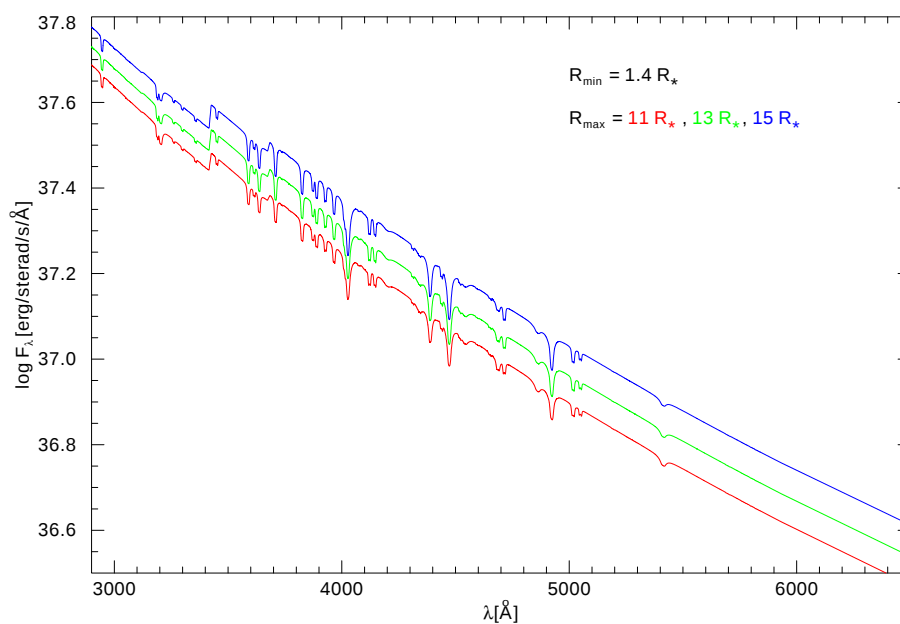
$$\mu \frac{\partial I_{\nu}(\nu, \mu, z)}{\partial z} = -\chi_{\nu}(\nu, z) I_{\nu}(\nu, \mu, z) + \eta_{\nu}(\nu, z)$$

Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Beispielmmodell: AM CVn
- Primärkomponente $1,1 M_{\odot}$, Sekundärkomponente $0,09 M_{\odot}$
- Radius $R_{\star}$ des Primärsterns 4600 km
- Massentransferrate etwa $3 \cdot 10^{-9} M_{\odot}/a$
- Teilchenzahlverhältnis von Wasserstoff zu Helium 10^{-5} , Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff solar
- sämtliche Abbildungen stammen aus T. Nagel, Vertikalschichtungen und synthetische Spektren von Akkretionsscheiben, Dissertation, 2003

Modellierung einer Akkretionsscheibe

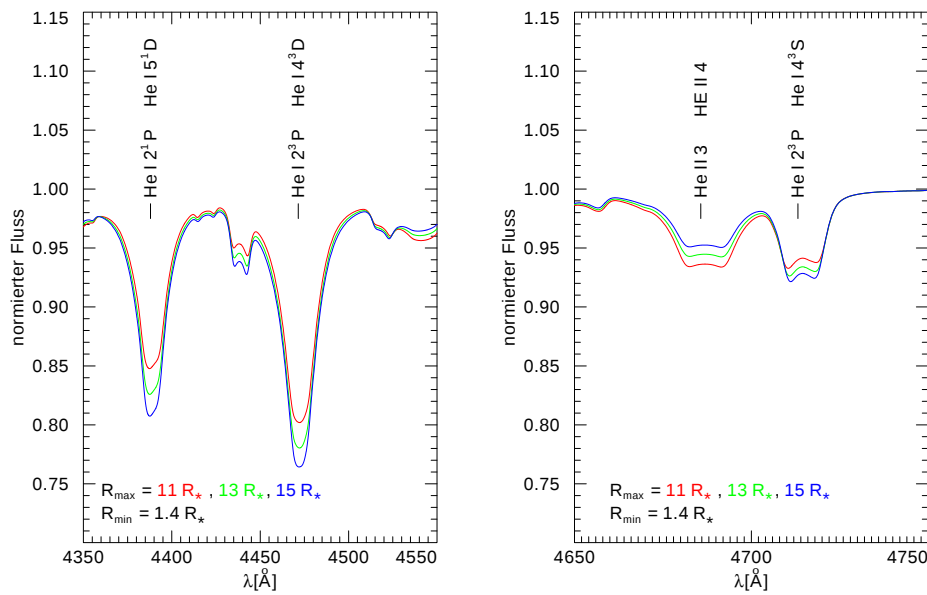
- Einfluss verschiedener Radien



Optischer Bereich eines Modellspektrums für AM CVn. Der Innenradius der Akkretionsscheibe beträgt $1,4 R_\star$, der Außenradius beträgt $11 R_\star$ ($T_{\text{eff}} = 23\,500\text{ K}$, rot), $13 R_\star$ ($T_{\text{eff}} = 21\,000\text{ K}$, grün) und $15 R_\star$ ($T_{\text{eff}} = 19\,000\text{ K}$, blau), die Inklination 10° , die Massenakkretionsrate $3 \cdot 10^{-9} M_\odot/\text{a}$.

Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Einfluss verschiedener Radien



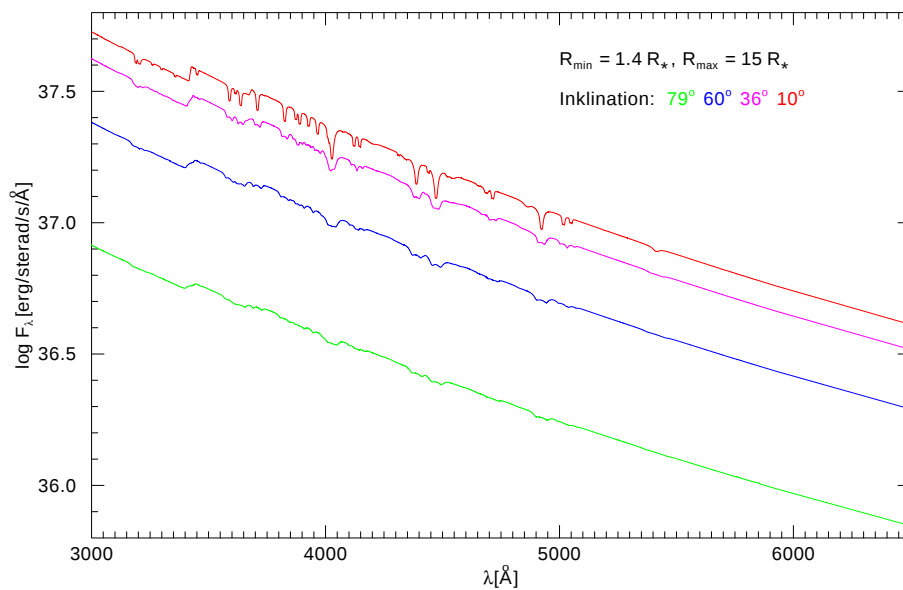
Ausschnitte aus dem optischen Modellspektrum für AM CVn. Der Innenradius der Akkretionsscheibe beträgt $1,4 R_*$, der Außenradius beträgt $11 R_*$ (rot), $13 R_*$ (grün) und $15 R_*$ (blau), die Inklination 10° , die Massenakkretionsrate $3 \cdot 10^{-9} M_\odot/\text{a}$.

Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Einfluss verschiedener Radien
 - Zunahme des absoluten Flusses mit größer werdendem Außenradius aufgrund der größeren strahlenden Fläche
 - Kerne der He I-Linien werden mit zunehmendem Radius der Scheibe tiefer, da die hinzukommenden Bereiche der Akkretionsscheibe kühl genug sind, um starke He I-Linien zeigen zu können. Zusätzlich nimmt die Fläche dieser Bereiche einen Großteil der Gesamtfläche ein.

Modellierung einer Akkretionsscheibe

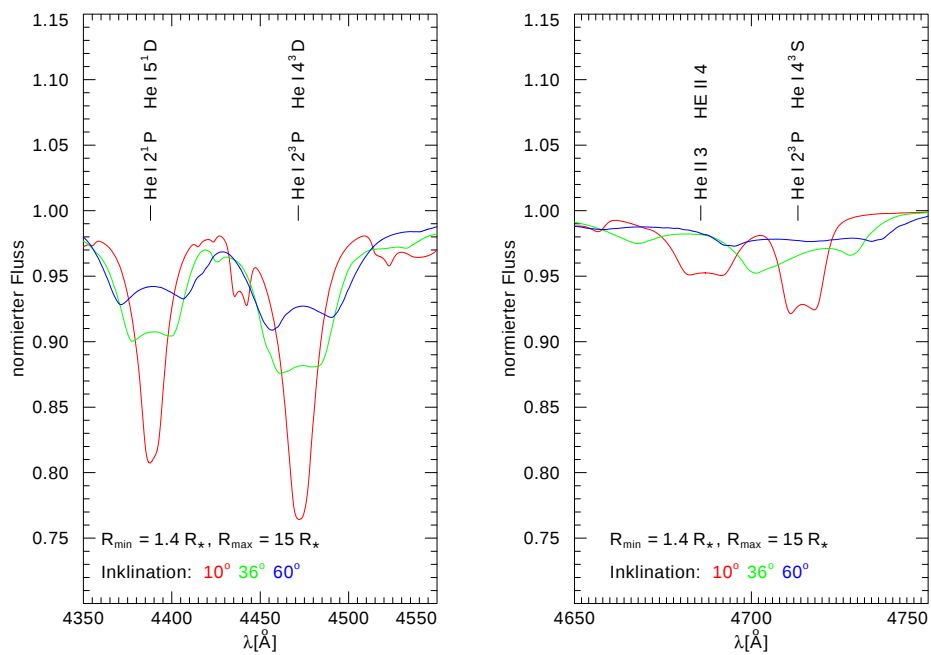
- Einfluss verschiedener Inklinationswinkel



Verschiedene Modellspektren von AM CVn für vier verschiedene Inklinationswinkel (10° , 36° , 60° und 79°). Der Innenradius liegt jeweils bei $1,4 R_{\star}$, der Außenradius bei $15 R_{\star}$ und die Akkretionsrate bei $3 \cdot 10^{-9} M_{\odot}/a$.

Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Einfluss verschiedener Inklinationswinkel



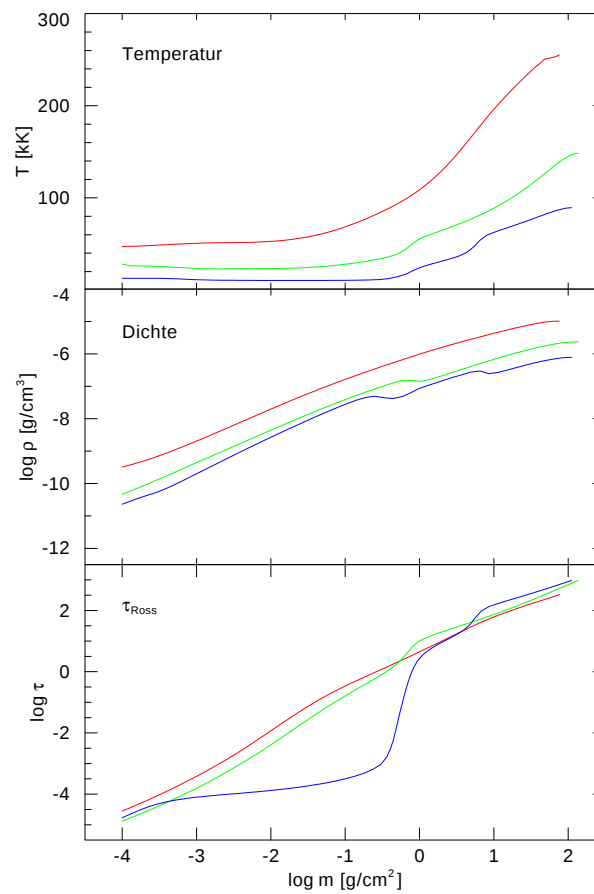
Ausschnitte aus dem optischen Modellspektrum für AM CVn. Die Inklinationswinkel betragen 10°, 36° und 60°, der Innenradius liegt jeweils bei $1,4 R_*$, der Außenradius bei $15 R_*$ und die Akkretionsrate bei $3 \cdot 10^{-9} M_{\odot}/a$.

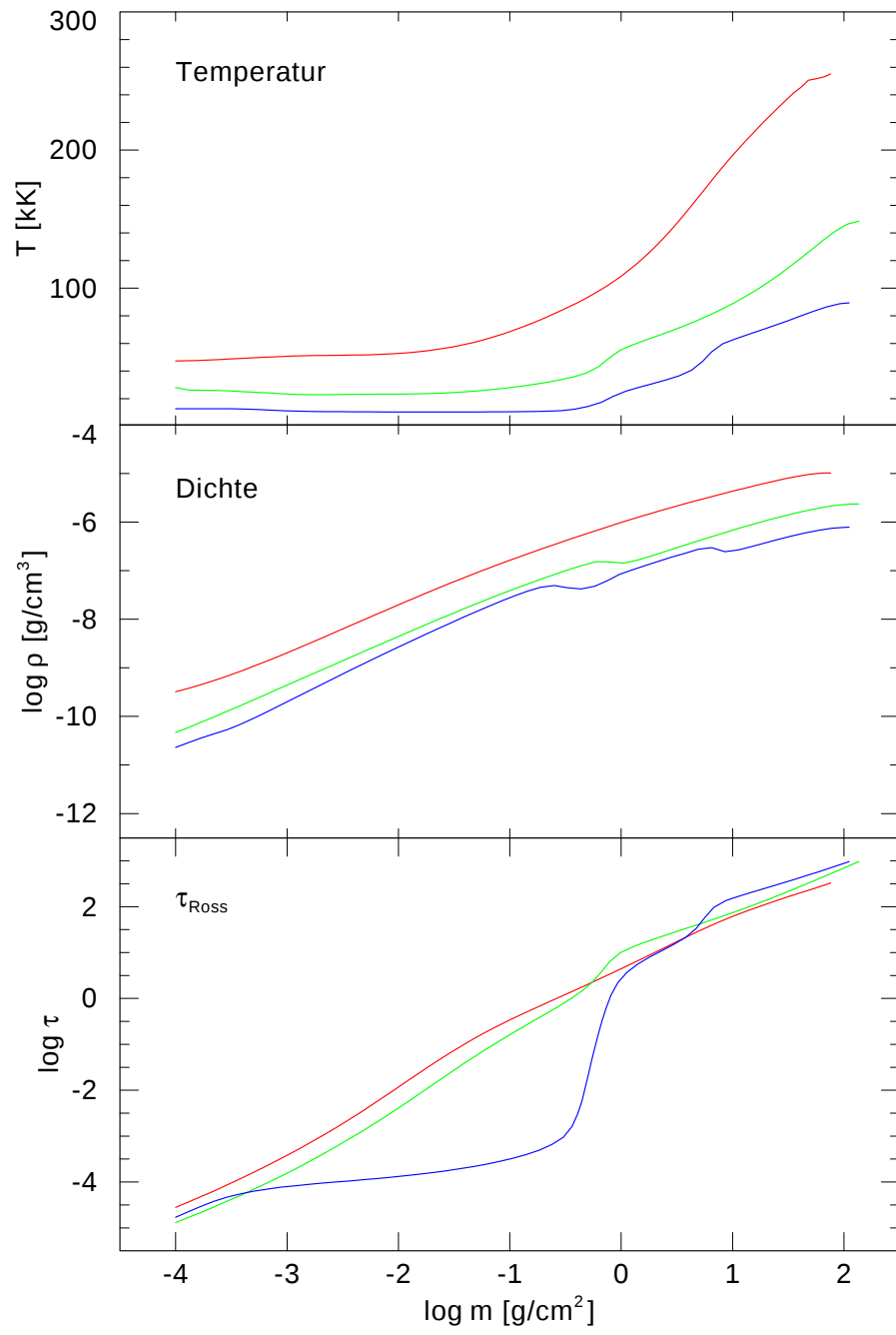
Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Einfluss verschiedener Inklinationwinkel
 - Der absolute Fluss wird mit zunehmender Inklination aufgrund der kleiner werdenden projizierten Fläche der Akkretionsscheibe geringer.
 - Bei geringer Inklination sind die Linien schmal, bei hoher Inklination werden sie breit und flach. Ursache ist die Zunahme der Rotationsverbreiterung bei größer werdender Inklination auf Grund des größer werdenden Radialanteils der Keplerbewegung.

Modellierung einer Akkretionsscheibe

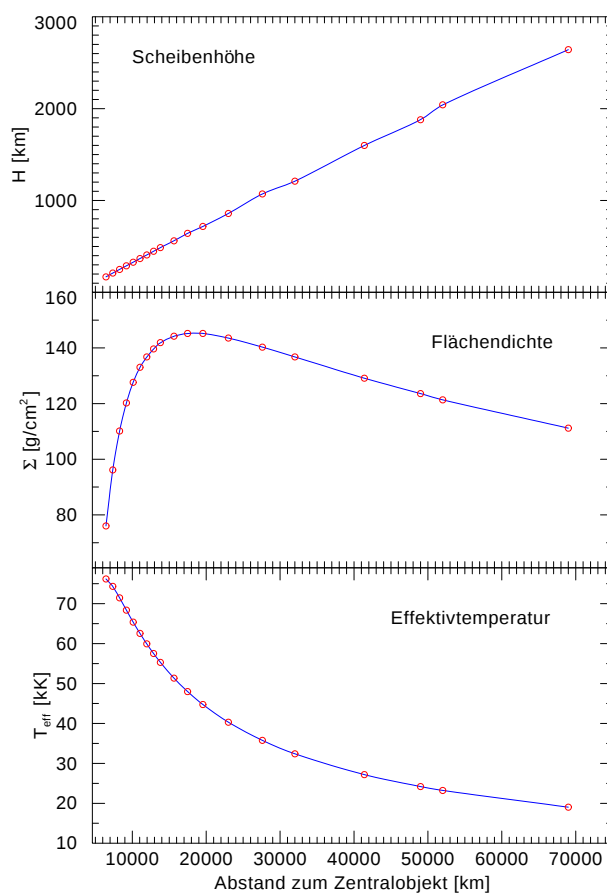
- Vertikalschichtung für drei Scheibenringe mit den Abständen $1,4 R_\star$ (rot), $7 R_\star$ (grün) und $15 R_\star$ (blau)

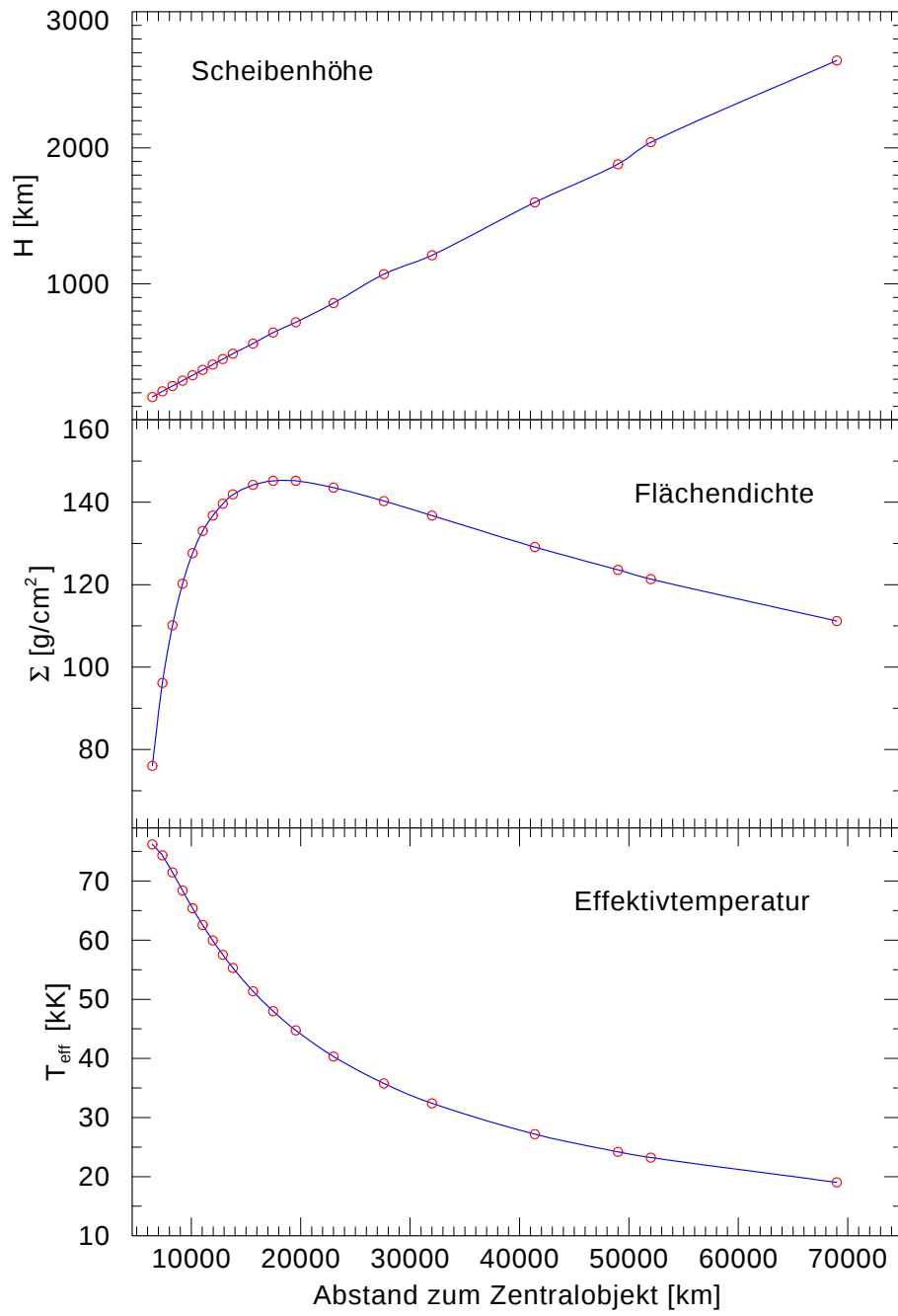




Modellierung einer Akkretionsscheibe

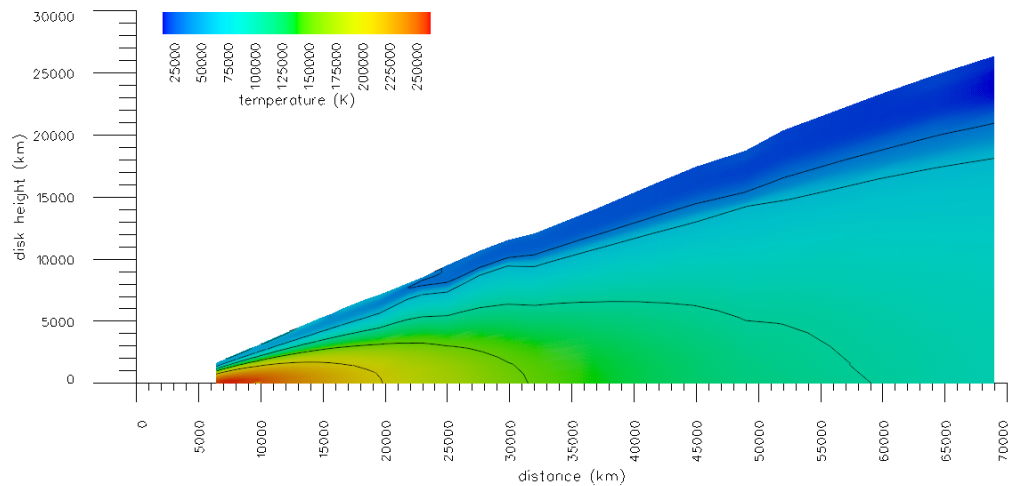
- Radialer Verlauf der Scheibenhöhe, der Flächendichte Σ und der Effektivtemperatur





Modellierung einer Akkretionsscheibe

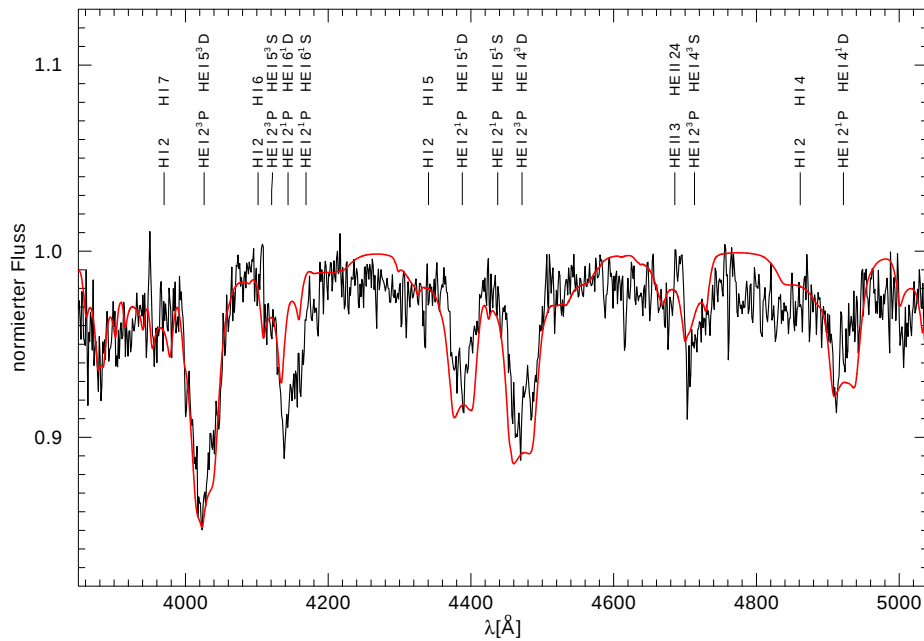
- Radialer Schnitt durch eine Akkretionsscheibe



Ausdehnung der Scheibe von $1,4 R_{\star}$ bis $15 R_{\star}$, Akkretionsrate beträgt $3 \cdot 10^{-9} M_{\odot}/a$. Die Scheibenhöhe ist um einen Faktor zehn gestreckt. Eingezeichnet sind außerdem Isolinien für die Temperaturen 30 000 K, 60 000 K, 100 000 K, 150 000 K und 200 000 K.

Modellierung einer Akkretionsscheibe

- Vergleich Modell - Beobachtung



Vergleich eines beobachteten Spektrums von AM CVn mit einem Modellspektrum. Der Innenradius des Modells beträgt $1,4 R_{\star}$, der Außenradius $13 R_{\star}$, die Inklination 36° und die Akkretionsrate $3 \cdot 10^{-9} M_{\odot}/a$.

Schlusswort

- Akkretionsscheiben sind ein wichtiger, oftmals dominierender Bestandteil von Kataklysmischen Variablen
- Berechnung des synthetischen Spektrums einer Akkretionsscheibe erlaubt durch Vergleich mit beobachtetem Spektrum die Bestimmung wichtiger, die Akkretionsscheibe beschreibender Parameter wie
 - Ausdehnung
 - Inklination
 - Massenakkretionsrate
 - Temperaturschichtung
 - Viskosität
 - chemische Zusammensetzung