

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Vít Sigmund

Eruptivní proměnné hvězdy

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 37 (1992), No. 5, 273--288

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138898>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1992

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Eruptivní proměnné hvězdy

Vít Sigmund, Praha

Skupina eruptivních proměnných hvězd je charakterizována velkými změnami jasnosti během krátkého období. Tyto změny jsou způsobeny eruptivními procesy na povrchu nebo v obálkách těchto hvězd. Velkou skupinou eruptivních proměnných jsou těsné dvojhvězdy. V těchto dvojhvězdách je hmota z primární složky předávána na složku sekundární, kterou je kompaktní hvězda s akrečním diskem. Do této skupiny, tj. do skupiny eruptivních dvojhvězd, zařazujeme novy, hvězdy typu U Geminorum, typu AM Canum Venaticorum, typu AM Herculis, symbiotické dvojhvězdy a rentgenové dvojhvězdy. Skupina eruptivních dvojhvězd je velice rozsáhlá a příčinou zjasnění jsou děje probíhající v akrečním disku okolo kompaktní složky.

Dalším typem eruptivních proměnných hvězd jsou hvězdy typu α^2 CVn. Tyto hvězdy jsou někdy nazývány magnetické hvězdy, neboť mají velmi silné magnetické pole. Méně známou skupinou eruptivních proměnných hvězd jsou hvězdy typu RS CVn. Jsou to dvojhvězdy se složkami různého stáří, které se navzájem ovlivňují přenosem hmoty. Mezi eruptivní proměnné hvězdy dále zařazujeme supernovy, tj. nejsvítlivější hvězdy vůbec. Se supernovami souvisí také pulsary a zábleskové zdroje záření γ .

Nejnámější skupinou eruptivních proměnných hvězd jsou nejspíše hvězdy v raném stadiu vývoje, tj. hvězdy typu T Tauri a typu UV Ceti. Obě tyto skupiny mají vysokou chromosférickou aktivitu a velmi nízký věk. Za hvězdami typu T Tauri a UV Ceti následují nadobří proměnné hvězdy. Patří k nim tři skupiny hvězd: hvězdy typu S Dor, γ Cas a R CrB.

Posledními skupinami eruptivních proměnných hvězd jsou hvězdy v centru planetárních mlhovin a hvězdy typu BY Dra.

Nebudeme se zde blíže zabývat novami, supernovami a pulsary, které již byly v naší literatuře mnohokrát popsány, stejně jako malými skupinami eruptivních proměnných hvězd jako RS CVn, BY Dra, rentgenovými dvojhvězdami a zdroji záření γ .

Eruptivní dvojhvězdy

Skupina eruptivních dvojhvězd se vyznačuje velmi bouřlivými změnami jasnosti. Tyto změny se pohybují od zlomků magnitudy až ke změnám o 7–16 mag. Všechny změny jasnosti jsou přibližně periodické s periodou od dnů do desetitisíců roků. První skupinou jsou novy. Vyznačují se největšími změnami jasnosti a nejdelší periodou. Druhou třídou eruptivních dvojhvězd jsou hvězdy typu U Gem. Jsou charakterizovány změnami jasnosti o 2–6 mag během 1–2 dnů. Tyto změny mají periodu od 10 do 1 000 dnů. Jako další třídu lze uvažovat hvězdy typu AM CVn, které jsou podobné U Gem,

VÍT SIGMUND (1974) je posluchač I. ročníku MFF UK v Praze.

Eruptivní proměnné hvězdy

	perioda (dní)	změny jasnosti	spektrální typy (složky)	poznámka
Eruptivní dvojhvězdy				
novy	50–10 ⁴ let	7–16 mag	<u>obr nebo hvězda hl. posloupnosti</u> bílý trpaslík	rozdíly podle stadií
typu U Gem	10–1000	2–6 mag	<u>hvězda hl. posloupnosti G nebo K</u> bílý trpaslík	podobné novám
typu AM CVn	1,1	0,3 mag	<u>obr typu G</u> bílý trpaslík	nižší obsah H
typu AM Her	10–100	3–4 mag	<u>obr typu G–F</u> bílý trpaslík	rozštěpení čar
symbiotické dvojhvězdy	500–800	5–6 mag	<u>obr typu M</u> bílý trpaslík	nebulární čáry
rentgenové dvojhvězdy	sekundy až 100	až 2 mag	<u>obr nebo hvězda hl. posloupnosti</u> bílý trpaslík nebo neutr. hvězda	vysoká excitace
typu α^2 CVn	5–15	0,1 mag	B0p–B7p	rozštěpení čar
Hvězdy v raném stadiu vývoje				
typu T Tauri	neper.	1–4 mag	F0–M4	rané stadium vývoje
typu UV Ceti	neper.	4–6 mag	K3–M6	rané sp. čáry
Nadobří proměnné				
typu S Dor	1 rok– 10 roků	1–7 mag	B0–A0 P Cygni spektrum	jasné čáry H
typu γ Cas	50–500	1,5 mag	B0–A5 P Cygni spektrum	silné abs. čáry
typu R CrB	neper.	1–9 mag	F0–K0 uhlíkové spektrum	čáry CIII, C ₂
hvězdy typu RS CVn	50–200	0,2 mag	<u>obr typu G–K</u> hvězda hl. posloupnosti	silné emise Ca
supernovy	neper.	více než 20 mag	<u>SN typ I slabé čáry H</u> SN typ II silné čáry H	vysoká ionizace
pulsary	0,01–45 s	v radio- vém obo- ru	neutronová hvězda	vysoká ionizace
zábleskové zdroje záření γ	neper.	v rtg obo- ru	neutronová hvězda	
hvězdy typu BY Dra	60–100	0,3–0,5 mag	G7eV–M0eV	molekul. pásy
hvězdy v centru plane- tárních mlhovin	neper.	6–8 mag	bílý trpaslík	vysoká ionizace

Názvy a zkratky některých souhvězdí použitých v článku

Latinský název	genetiv	zkratka	český název
Aries	Ārietis	Ari	Beran, Skopec
Auriga	Aurigae	Aur	Vozka
Camelopardalis	Camelopardalis	Cam	Žirafa
Cancer	Cancri	Cnc	Rak
Canes Venatici	Canum Venaticorum	CVn	Honící psi
Cassiopeia	Cassiopeiae	Cas	Kasiopeja
Centaurus	Centauri	Cen	Kentaur
Cepheus	Cephei	Cep	Kefeus
Cetus	Ceti	Cet	Velryba
Chamaeleon	Chamaeleontis	Cha	Chameleón
Columba	Columbae	Col	Holubice
Corona Borealis	Coronae Borealis	CrB	Severní koruna
Cygnus	Cygni	Cyg	Labuť
Dorado	Doradus	Dor	Mečoun
Draco	Draconis	Dra	Drak
Gemini	Geminorum	Gem	Blíženci
Hercules	Herculis	Her	Herkules
Pegasus	Pegasi	Peg	Pegas
Perseus	Persei	Per	Perseus
Sagitta	Sagittae	Sge	Šíp
Taurus	Tauri	Tau	Býk
Telescopium	Telescopii	Tel	Dalekohled
Ursa Maior	Ursae Maioris	UMa	Velká medvědice
Vela	Velorum	Vel	Plachty

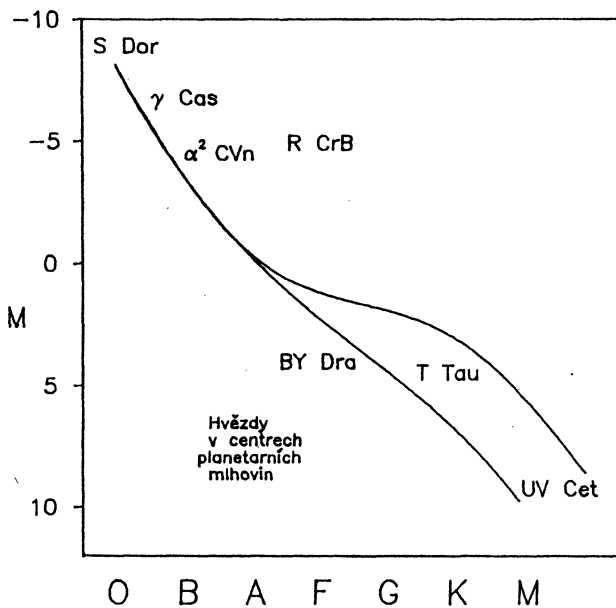
ale odlišují se od nich spektrem a charakterem vzplanutí. Čtvrtou třídou jsou eruptivní dvojhvězdy typu AM Her. Jsou to hvězdy velmi podobné novám, ale se silným magnetickým polem, které způsobuje polarizaci záření. Někdy se díky této vlastnosti nazývají polary. Pátou třídou jsou symbiotické dvojhvězdy, jejichž charakteristickým znakem jsou absorpční i emisní čáry vysokého stupně excitace. Vyznačují se nepravidelnými změnami jasnosti o 5–6 mag. Poslední, šestou třídou eruptivních dvojhvězd, jsou eruptivní dvojhvězdy proměnné v rentgenovém oboru spektra. Byly objeveny až pomocí astronomických družic vybavených rentgenovými dalekohledy. Vyznačují se změnami v rentgenovém oboru spektra, jejich příčinou jsou poruchy v akrečním disku okolo kompaktní složky.

Obecně jsou změny jasnosti těchto hvězd způsobeny poruchami v přenosu hmoty z jedné složky dvojhvězdy na druhou.

Dvojhvězdy typu U Geminorum

a) Chování a rozdělení

Eruptivní hvězdy typu U Gem jsou trpasličí hvězdy, které zvýší svou jasnost během 1–2 dnů o 2–6 mag a ta za několik dní nebo týdnů opět klesne na původní hodnotu.



Obr. 1. Hertzsprungův-Russelův diagram některých typů eruptivních proměnných hvězd. Na vodorovné ose je vyznačena spektrální třída, na svislé ose absolutní hvězdná velikost v magnitudách.

Perioda těchto vzplanutí je polopravidelná s periodou 10–1000 dnů. Tento typ se podřizuje pravidlu, že střední čas mezi maximy je obvykle tím delší, čím je změna vizuální jasnosti větší. Tyto hvězdy se díky svým menším změnám jasnosti někdy nazývají trpasličí novy.

Skupina eruptivních dvojhvězd typu U Gem se rozděluje na tři podtřídy. Jsou to:

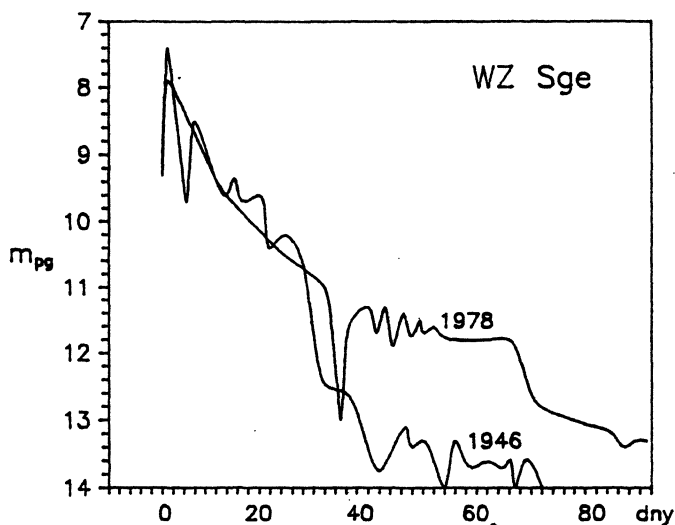
1. Hvězdy typu SU UMa, které každých 3–10 cyklů mají tzv. supermaximum, které až o 1,5 mag převyšuje maxima ostatní. Dále se hvězdy typu SU UMa vyznačují velmi rychlými změnami jasnosti s periodou kratší než 2 hodiny. Do této podtřídy patří např. V 436 Cen, Z Cha, YZ Cnc, WX Hyi, WZ Sge a CV Vel.

2. Dvojhvězdy podobné Z Cam. Zvláštností této podskupiny jsou její světelné křivky. Jasnost po vzplanutí klesne na hodnotu asi uprostřed mezi maximem a minimem a zde setrvá i po velmi dlouhou dobu. Cyklus vzplanutí u této podskupiny trvá 10–40 dní a změna jasnosti má amplitudu 2–5 mag. Do této podskupiny patří např. AM Cas.

3. Dvojhvězdy typu UX UMa. Změny jasnosti v této podskupině jsou pomalejší (asi 50 dní) než u ostatních podskupin U Gem.

Charaktery světelných křivek můžeme rozřadit podle jednotlivých podskupin. Začneme např. s podskupinou SU UMa. Změny jasnosti jsou dosti nepravidelné, ale přesto mají společné znaky. Vzestup jasnosti do maxima je velice rychlý. Téměř ihned po dosažení maxima začíná pokles. Tento pokles je přerušen místními zjasněními, vytvářejícími lokální maxima mezi tzv. supermaximy, která tato lokální maxima značně převyšují. Nejdelsí cyklus má z této skupiny WZ Sge, kde perioda mezi supermaximy je 11900 dnů a změny jasnosti dosahují až 9 mag.

Světelné křivky další podskupiny, tj. Z Cam, mají také rychlý vzestup do maxima, ve kterém se někdy projevují malé oscilace, a následuje rychlý pokles buď do minima



Obr. 2. Světelná křivka hvězdy WZ Sge z roku 1946 a 1978. Na svislé ose je vynesena fotografická hvězdná velikost.

nebo do mezimaxima, kde jasnost může setrvat až několik měsíců. V mezimaximu se rovněž projevují malé oscilace jasnosti.

Poslední skupina eruptivních dvojhvězd typu U Gem, typ UX UMa, se vyznačuje světelnými křivkami s delšími změnami jasnosti než u předchozích dvou podskupin.

b) Spektra

Většina hvězd typu U Gem vykazuje silné čáry Balmerovy série vodíku na pozadí modrého spojitého spektra. Toto spektrum neobsahuje zakázané čáry, jako např. O III, což ukazuje, že hustota plynu okolo kompaktní složky je dosti vysoká. Spektrální čáry jsou rozšířené vlivem Dopplerova jevu, neboť rychlost materiálu v akrečním disku, který emituje toto záření, je až $500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Spektrum v minimu jasnosti obsahuje ještě čáry He I, He II a Ca II. Protože bílý trpaslík s akrečním diskem je složkou dvojhvězdy, zasahují do těchto spekter ještě čáry primární složky. Tato složka se nalézá na hlavní posloupnosti a má spektrum typu G nebo K. Spektra v maximu jasnosti obsahují většinou emisní čáry silně ionizovaných prvků. Absorpční čáry jsou velmi nezřetelné a jsou posunuty Dopplerovým jevem. Při poklesu jasnosti se také objevují čáry kovů.

c) Příčiny proměnnosti

Příčiny proměnnosti jsou podobné jako u nov, neboť eruptivní dvojhvězda typu U Gem se skládá také z bílého trpaslíka a hvězdy hlavní posloupnosti. Bílý trpaslík je obklopen akrečním diskem, který je v případě typu U Gem nestabilní a způsobuje změny jasnosti hvězdy.

Nejčastější příčinou změn jasnosti je zjasnění horkého bodu v důsledku poruch v akrečním disku. Hmotu akrečního disku se podle výpočtů pohybuje od $10^{-7} M_{\odot}$ (hmot Slunce) do $10^{-5} M_{\odot}$ při rychlosti přenosu hmoty $3 \cdot 10^{-7} M_{\odot} \cdot \text{rok}^{-1}$. Tato hmota určitě stačí k uvolňování $1,6 \cdot 10^{15} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, což je příčinou vzrůstu jasnosti, jak je

tomu obvykle u typu U Gem. Při zjasnění horkého bodu nebo i jiného bodu akrečního disku disk nezůstává v klidu. Rozrušuje se jeho dosavadní struktura a někdy dochází i k odvrhování vrstev jako u nov. To vyvolá hned nebo později další bouřlivé změny jasnosti, neboť disk už nemá pevnou strukturu a jeho části se opět snaží vytvořit strukturu energeticky odpovídající. Jedním z důležitých faktorů pro změny o amplitudě 0,2–1 mag je oběžná rychlost a oběžná dráha bílého trpaslika s akrečním diskem okolo primární složky. Tyto změny jasnosti jsou způsobeny stejným jevem jako u zákrytových dvojhvězd. U dvojhvězd typu U Gem se vyskytují také zjasnění s velmi krátkou periodou v rozmezí 20–500 s. Tyto změny jsou způsobeny místním zjasněním v akrečním disku nebo pulsací objemu horkého bodu.

AM Canum Venaticorum

a) Světelné křivky a chování

Do této třídy eruptivních dvojhvězd patří zatím pouze tři zástupci. Jsou to AM CVn, GP Com, PG 1346 + 082. Jejich struktura a vlastnosti jsou podobné U Gem. Díky svému spektru se však zařazují do samostatné třídy. Světelné křivky mají amplitudu asi 0,3 mag a hlavní periodu vzplanutí okolo 1,1 dne. Při vzestupu se někdy objevují krátkoperiodické změny jasnosti. Celkové změny jasnosti na světelné křivce můžeme rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny patří světelné periodické změny s téměř stále stejnou amplitudou, které jsou způsobeny dvojhvězdným charakterem hvězdy. Do druhé skupiny náleží rychlé změny jasnosti s periodou od 2 do 10 minut, jež se vyskytují při vzestupu nebo v minimu jasnosti.

b) Spektra

Spektra třídy AM CVn se liší od spekter eruptivních dvojhvězd typu U Gem podstatně nižším obsahem vodíku. Tento obsah je více než 1 500krát nižší než má Slunce. Spektrum je proto téměř výhradně heliové.

c) Příčiny proměnnosti

Příčiny proměnnosti jsou stejné jako u typu U Gem, ale jsou více spojeny s oběžnou dobou. Hvězdy typu AM CVn jsou dvojhvězdy s nejkratší známou dobou oběhu. U AM CVn to je 18 min, u GP Com 46 min a u PG 1346+082 25 min. Vlivem blízkosti složek je akreční disk velmi silně ovlivňován pochody na povrchu primární složky. Tyto pochody spolu s fluktuacemi hmoty v akrečním disku vyvolávají hlavní změny jasnosti.

Eruptivní dvojhvězdy typu AM Herculis

a) Světelné křivky a chování

Eruptivní dvojhvězdy typu AM Her se někdy také nazývají polary. Tento název je odvozen od jejich silného magnetického pole, které způsobuje polarizaci záření.

Změny jasnosti se pohybují od 3 do 4 mag s periodou 10–100 dnů. Zjasnění má dosti nepravidelný průběh a nastávají v něm místní poklesy jasnosti. AM Her může setrvat v maximu i několik dní a potom následuje nepravidelný pokles. V minimu někdy nastávají menší změny, obvykle s amplitudou 0,2–0,3 mag. Další změny jasnosti závisejí na oběžné době dvojhvězdy. Tyto změny jsou nejpravidelnější a mají periodu několik hodin. Změny jasnosti se netýkají pouze viditelného spektra. Při zjasnění se mění také intenzita rentgenového záření a mění se také magnetické pole okolo hvězdy a s ním i polarizace záření. Všechny tyto změny mají u AM Her periodu 3,1 hod.

b) Spektra

Spektra obsahují čáry velmi ionizovaných prvků. Mezi mnoha emisními čarami samozřejmě převyšují čáry vodíku společně s čarami hélia. Ve spektru jsou i čáry kovů, mezi nimi hlavně Fe II a Ti II. U všech čar ve spektru lze pozorovat jejich rozštěpení na několik složek v důsledku Zeemanova jevu. Z tohoto rozštěpení můžeme určit velikost a směr magnetického pole v dvojhvězdě.

c) Příčiny proměnnosti

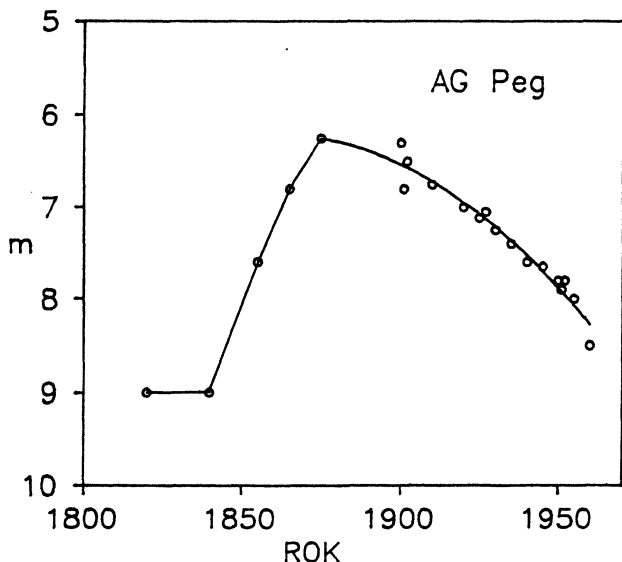
Uveďme některá základní fakta o AM Her. Je to dvojhvězda, jejíž jednou složkou je bílý trpaslík a druhou hvězda hlavní posloupnosti. Plyn z primární složky je opět předáván do akrečního disku. V něm se vyskytují poruchy podobné jako u hvězd typu U Gem. Protože záření AM Her je polarizováno, můžeme soudit, že akreční disk okolo bílého trpaslíka je díky jeho magnetickému poli zdrojem rentgenového záření. Změny v toku rentgenového záření způsobuje také zákryt akrečního disku primární složkou. Tím jsou vysvětleny dlouhodobé změny jasnosti. Změny lineární a kruhové polarizace jsou také spjaty s oběžnou dobou. Ještě jsme nevysvětlili velmi krátké změny jasnosti v rentgenovém oboru spektra. Mohou být způsobeny mnoha pochody v akrečním disku. Ovšem patrně nejdůležitějším zdrojem těchto krátkých vzplanutí jsou místní změny teploty (a tím i jasnosti) v akrečním disku v důsledku fluktuací hustoty a poruch v proudění hmoty.

Symbiotické dvojhvězdy

a) Světelné křivky a chování

Třída symbiotických dvojhvězd se vyznačuje nepravidelnými změnami jasnosti o 5 až 6 mag s periodou 500–800 dní. Spektra obsahují současně molekulové absorpční čáry i emisní čáry vysokého stupně excitace. Abychom mohli některou dvojhvězdu zařadit do symbiotických dvojhvězd, musí splňovat tyto požadavky: 1. Musí obsahovat absorpční čáry staré hvězdy, tj. absorpční čáry TiO, Ca I, Ca II atd. 2. Musí obsahovat emisní čáry vysoce ionizovaných atomů, jako např. He II, O II. 3. Rychlost vzdalování obálky nesmí přesáhnout $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 4. Změny jasnosti musí být větší než 3 mag a cyklus musí být delší než 1,3 roku.

Charakter vzplanutí symbiotických dvojhvězd je velmi podobný vzplanutí rekurentních nov. Podle této vlastnosti se symbiotické dvojhvězdy nazývají „novám podobné“. Podle světelných křivek můžeme symbiotické dvojhvězdy rozdělit na dva typy. Typ I se vyznačuje nepravidelnými změnami jasnosti. Vzplanutí je strmější než pokles, ale pouze u menších změn. Při změnách o 5–6 mag se strmost vzestupu a poklesu téměř vyrovnává. Do tohoto typu symbiotických dvojhvězd můžeme zařadit tyto dvojhvězdy: Z And, BF Cyg, AG Dra, AG Peg, AX Per. Symbiotické proměnné hvězdy typu II mají průměrnou amplitudu jasnosti okolo 4 mag. Tato střední amplituda postupně roste až dojde k prudkému nárůstu jasnosti až o 8 mag. Typ II má také velmi dlouhou dobu poklesu jasnosti z celkového maxima, která může trvat až několik desetiletí. Do tohoto typu patří RX Pup, RR Tel, V 1016 Cyg a HM Sge.



Obr. 3. Vzplanutí hvězdy AG Peg.

Ze všech symbiotických dvojhvězd je nejzajímavější asi V 1016 Cyg. Tato dvojhvězda má kolem sebe prachovou obálku a vysílá emise infračerveného i rentgenového záření. Její stavba vzhledem k šíři vysílaného spektra bude nejspíše velmi složitá. Do problematiky symbiotických dvojhvězd jsme ještě zcela nepronikli.

b) Spektra

Jak jsme již řekli, spektra obsahují absorpční čáry a zároveň i emisní čáry vysokého stupně excitace. Spektrum samozřejmě obsahuje čáry vodíku, a to čáry Balmerovy série. Dále spektrum obsahuje čáry hélia He I a He II. Ve spektru můžeme také nalézt čáry ionizovaných atomů jako C III, N III, Si III a Si IV, které prozrazují přítomnost velmi horkého plynu. Kromě toho lze ve spektru identifikovat zakázané čáry O III a Ne III, jež ukazují, že dvojhvězda je obklopena mlhovinou. Spektrum samozřejmě obsahuje ještě čáry kovů, hlavně Fe II. Při zjasnění se spektra velmi složitě mění.

Ve spektru převažuje modrý posun, což znamená rychlou expanzi plynů směrem od hvězdy. Obvykle to bývá příčinou zvětšení excitace čar a zjasnění zakázaných čar O III a Ne III. Při poklesu jasnosti se intenzity těchto čar snižují na původní hodnotu.

c) Příčiny proměnnosti

Stavba všech symbiotických dvojhvězd je velmi složitá. V dnešní době se astronomové sjednocují na následujícím modelu symbiotické dvojhvězdy. Dvojhvězda má za primární složku obra spektrálního typu N nebo řidčeji G či K o poloměru asi $100 R_{\odot}$. Sekundární složka je podtrpaslík nebo bílý trpaslík s poloměrem menším než $0,5 R_{\odot}$ a s efektivní teplotou okolo $80\,000\text{ K}$. Vzdálenost složek se pohybuje od 4 do 10 AU. Oběžná doba dvojhvězdy je od jednoho do několika roků. Obě složky jsou obklopeny obálkou s poloměrem $50\,000 R_{\odot}$, s elektronovou hustotou $10^4\text{--}10^5$ elektronů v jednom krychlovém metru a o elektronové teplotě okolo $15\,000\text{--}20\,000\text{ K}$. Zdrojem této obálky je červený obr, jenž zásobí obálku materiálem přenášeným hvězdným větrem. Tento materiál se uvolňuje při pulsaci obra.

Mezi nejdůležitější příčiny zjasnění nebo ztmavnutí můžeme zařadit tyto: 1. Změna v mlhovinné obálce dvojhvězdy. Ta může být způsobena přesuny hmoty v důsledku fluktuací nebo poruch na primární složce. 2. Změna stavu nebo struktury hmoty v okolí horké složky, a to v důsledku změn na jejím povrchu nebo v magnetosféře. Tyto změny mohou vést k prudkému zahřátí plynu, a tím k jeho zjasnění. 3. Dlouhoperiodické změny v chladné primární složce, tj. buď změny poloměru nebo vzplanutí na povrchu chladné složky. 4. Zákrytové změny jasnosti, které se vyskytují pouze u několika symbiotických hvězd. 5. Změny způsobené rotací hvězdy. Mohly by být způsobeny různou teplotou povrchových vrstev chladnější složky. Tyto změny mohou být pozorovány pouze u těch dvojhvězd, které nejsou zákrytové. Na změnách jasnosti se samozřejmě podílí i jiné druhy příčin. Během vzplanutí nastávají v obálce rychlé přesuny hmoty a částečná zjasnění jednotlivých částí obálky. U primární složky se hustota snižuje, u sekundární zvyšuje. V maximu jasnosti se na okrajích obálky odtrhují její části a jsou odvrhovány.

Hvězdy typu α^2 Canum Venaticorum

a) Chování a vlastnosti

Tato skupina eruptivních proměnných hvězd je někdy nazývána magnetické hvězdy. Vyznačují se velmi silným magnetickým polem s velikostí od 10^{-2} do 10^{-1} T . Když je srovnáme s magnetickým polem Země ($5 \cdot 10^{-5}\text{ T}$) nebo Slunce ($\sim 10^{-4}\text{ T}$), vidíme, že α^2 CVn má magnetické pole opravdu velice silné. Změny jasnosti mají amplitudu velmi malou, nejvýše 0,1 mag a periodu 5–15 dní. Hvězdy typu α^2 CVn můžeme rozdělit do dvou podskupin. První podskupina, tzv. SX Ari, je charakteristická vysokou teplotou a jasným heliovým spektrem. Druhá podskupina je skupina Ap hvězd. Tato podskupina má abnormálně silné čáry některých kovů. Obě skupiny mají společné

světelné křivky a křivky změn magnetického pole, které jsou pravidelné a zjevně spolu souvisí.

Jasný přehled vlastností hvězd dostaneme, jestliže zjistíme jejich místo na HR-diagramu. Hvězdy typu α^2 CVn leží na hlavní posloupnosti nebo těsně nad ní a mají spektrum typu B0p–B7p. Jejich absolutní hvězdná velikost leží v rozmezí $-0,5$ až $-2,5$ mag.

b) Spektra

Spektrum této skupiny eruptivních hvězd je velmi zajímavé. V důsledku silného magnetického pole se projevuje Zeemanův jev, který způsobuje rozštěpení spektrálních čar na několik složek. Spektra jsou též výjimečná obsahem ionizovaných kovů. Ve spektru se vyskytují také čáry He I a He II a samozřejmě i čáry vodíku.

c) Příčiny proměnnosti

Příčinou proměn jasnosti ve viditelném oboru spektra jsou nejspíše chladné skvrny na povrchu hvězdy. Tyto skvrny jsou o více než 2000 K chladnější než okolí. Změny jasnosti tedy závisejí na rotaci hvězdy. Příčinou vzniku skvrn jsou nejspíše konvektivní proudy nebo částečná pulsace povrchu hvězdy. Příčinou změn magnetického pole může být nestabilita vrstev těsně obklopujících jádro, v němž probíhají termonukleární reakce. V této oblasti je ještě mnoho nevyjasněných jevů, které je zapotřebí detailně prozkoumat.

Hvězdy v raném stadiu vývoje

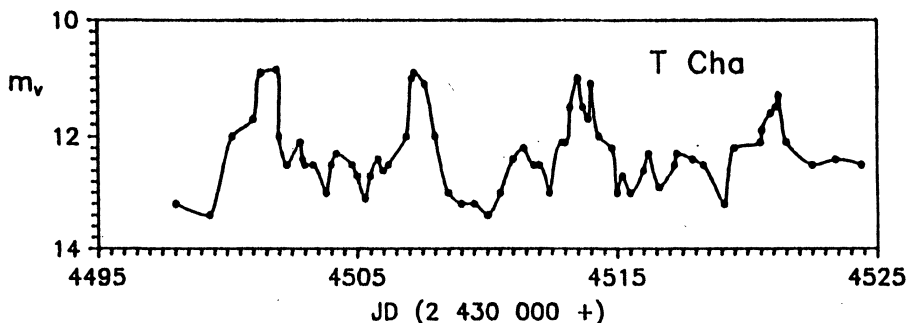
Do této skupiny eruptivních proměnných počítáme proměnné hvězdy typu T Tauri a typu UV Ceti. Tyto skupiny hvězd patří do spektrální třídy B až M; jsou to hvězdy, které většinou ve svém vývoji ještě nedosáhly hlavní posloupnosti. Skupina T Tauri tvoří asociace v mlhovinách, např. ve známé mlhovině v Orionu. Naopak UV Ceti jsou většinou osamocené hvězdy, ležící na dolním konci hlavní posloupnosti. Kromě věku mají obě skupiny společnou vysokou chromosférickou aktivitu, která je znakem hvězd v raném stadiu vývoje.

Hvězdy typu T Tauri

a) Světelné křivky a chování

Hvězdy typu T Tauri jsou po novách a supernovách nejznámější eruptivní proměnné hvězdy. Prototypem je hvězda T Tau, která nepravidelně mění svoji jasnost o 1 mag. Hvězdy typu T Tauri mohou měnit jasnost až o 4 mag, což je doprovázeno procesy vyvrhování hmoty. Hmotnost hvězd skupiny T Tau se pohybuje od 0,3 do 3 M_{\odot} a jejich spektrum od typu B až k typu F. Změny jasnosti se opakují po několika hodinách, výjimečně dnech.

U hvězd typu T Tau můžeme rozeznávat následující charakteristické změny: 1. Pomalé kolísání. Jeho perioda se pohybuje okolo 100 dnů. 2. Minima jasnosti. Projevují se náhlým poklesem světelné křivky, který je buď pomalejší nebo rychlejší než vzestup. Tento druh proměnnosti můžeme pozorovat např. u T Cha nebo BO Cep. 3. Erupce. Jsou typické pro skupinu proměnných hvězd v raném stadiu vývoje. Zjasnění trvá 0,01–0,1 dne a je buď pomalé jako u T Tau, nebo rychlejší a s místními zjasněními. 4. Proměnnost v emisních čarách. Ta souvisí s obálkami, které tyto čáry emitují. Mění se v průběhu 0,1 až jednoho dne. Při zjasnění nebo poklesu se vyskytují i změny jasnosti s malou amplitudou. Tyto změny souvisí s akrecí okolní hmoty na hvězdu nebo s posuny v rozsáhlé atmosféře.



Obr. 4. Světelná křivka hvězdy T Cha. Na vodorovné ose je uvedeno juliánské datum, na svislé ose vizuální hvězdná velikost.

Dobré dělení hvězd typu T Tauri zavedl Hoffmeister podle světelné křivky hvězdy RW Aur. Toto dělení je následující: 1. RW Aur, která vykazuje rychlé změny jasnosti v trvání několika hodin s amplitudou od 1,5 do 4 mag. Příkladem této podskupiny jsou např. RW Aur, RR Tau, a T Cha. 2. Hvězdy podobné RW Aur, vyznačující se nižší amplitudou změn (asi 1,5 mag) a větší rozmanitostí těchto změn. Členem této skupiny je také T Tau. 3. Proměnné hvězdy podobné Algolu. Tyto hvězdy mají převážně nepravidelné poklesy jasnosti a jsou spektrální třídy F. Sem patří T Ori, BO Cep, W Vul. Oblast hvězd typu T Tau na HR-diagramu je velká. Leží těsně nad hlavní posloupností a rozšiřuje se od spektrální třídy F dolů až k třídě M 4, kde jsou také někteří zástupci UV Ceti. Absolutní hvězdná velikost se pohybuje od +2 do +7 mag.

b) Spektra

Spektrální třída se pohybuje od G k M a ukazuje, že hvězda ještě nedosáhla hlavní posloupnosti. V méně případech mají T Tauri spektrum B, A nebo F. Ve spektru jsou přítomny jak absorpční, tak i emisní čáry a často se překrývají. Absorpční čáry jsou rozšířeny v důsledku pohybů v atmosféře hvězdy. Emisní se vytvářejí v chromosféře, kde konvekce a magnetická pole způsobují chromosférickou aktivitu. Ve spektru lze pozorovat modrý posun čar, což svědčí o vyvrhování hmoty. Spektrum obsahuje čáry vodíku, draslíku a vápníku Ca II. Ve spektru se také nacházejí méně jasné čáry kovů, převážně železa. Zdrojem některých emisních čar mohou být i obálky hvězd, které jsou intenzivním zdrojem infračerveného záření, jež může být přeměněno na záření rádiové.

c) Příčiny proměnnosti

Již tím, že známe věk hvězdy, je částečně určena příčina změn jasnosti. Mladá hvězda je obklopena oblakem prachu, který je velice podobný akrečnímu disku. Tento prach se může dostávat do nestabilních stavů díky záření hvězdy, což způsobuje některé rádiové emise. Mladá hvězda intenzivně a rychle přeměňuje vodík ve svém jádru na hélium. Tyto procesy jsou u mladé hvězdy doprovázeny mnoha jevy, které se podílejí na změnách jasnosti. Prvním z těchto procesů je velmi intenzivní hvězdný vítr o vysoké rychlosti, doprovázený erupcemi na povrchu hvězdy. Tyto erupce jsou způsobeny nestálostí magnetického pole, a tím i změnami struktury chromosféry hvězdy. Jednou z nejčastějších příčin proměnnosti je vznik horkých skvrn na povrchu hvězdy. Tyto skvrny jsou nejspíše vytvořeny dopadem hmoty z plynného disku. Změny jasnosti způsobené těmito skvrnami závisejí na rotaci hvězdy a na teplotě těchto skvrn, která je regulována magnetickým polem a přísunem hmoty. Rychlé nepravidelné poklesy jasnosti způsobují nejspíše dva jevy. Prvním je náhlé prudké zvětšení efektivního povrchu hvězdy, které může být důsledkem přeskupování hmoty uvnitř hvězdy. Druhá příčina poklesu jasnosti je zakrytí hvězdy částí její rozsáhlé obálky.

Hvězdy typu UV Ceti

a) Světelné křivky a chování

Hlavní charakteristikou hvězdy je její poloha na HR-diagramu. Hvězdy typu UV Ceti leží na hlavní posloupnosti mezi typem K 3 a M 6. Jejich absolutní hvězdná velikost odpovídá +15 až +9 mag. Světelné křivky jsou velmi zajímavé. Během několika sekund nastane zjasnění o 4–6 mag, po němž jasnost opět poklesne na původní hodnotu. Světelné křivky hvězd UV Ceti můžeme rozdělit do dvou typů. Typ I má pokles v délce 10 min až 2 hod. Typ II má pokles asi 10krát pomalejší než typ I. Rychlost poklesu u typu I je okolo $0,05\text{--}0,01\text{ mag}\cdot\text{s}^{-1}$, u UV Ceti jsou pozorovány poklesy o $0,6\text{ mag}\cdot\text{s}^{-1}$ a v některých případech až o $2,8\text{ mag}\cdot\text{s}^{-1}$. Během poklesu se vyskytují ještě místní zjasnění a vlny okolo 0,5 mag. Při zjasnění byly také pozorovány rádiové a ultrafialové emise předcházející maximu jasnosti.

b) Spektra

Spektra hvězd typu UV Ceti se vyznačují jasnými čarami vodíku, a to hlavně čarami Balmerovy série. Ve spektru můžeme nalézt ještě čáry vápníku nebo draslíku. U některých hvězd typu UV Ceti jsou ve spektru i čáry těžších prvků nebo molekul, hlavně skupiny TiO.

c) Příčiny proměnnosti

Jak jsme již viděli u hvězd typu T Tau, na povrchu mladých hvězd probíhají velmi bouřlivé procesy. Hlavní z těchto procesů jsou erupce, které u hvězd UV Ceti mají velký rozsah. Na povrchu hvězdy před erupcí nastane jakési vlnobití, které se projeví

i na světelné křivce rychlými změnami jasnosti. Při procesu se mění také magnetické pole uvnitř i vně hvězdy a toto pole určuje vlastní průběh erupce.

Přestože některé hvězdy typu UV Ceti leží v malých vzdálenostech od Slunce, procesy, které způsobují erupce, nejsou dosud objasněny.

Nadobří proměnné hvězdy

Hvězdy patřící do této skupiny eruptivních hvězd se vyznačují vysokou svítivostí a vysokou povrchovou teplotou. Patří sem tři třídy eruptivních proměnných hvězd: 1. Hvězdy typu S Dor — velmi horké a svítivé hvězdy. 2. Hvězdy typu γ Cas — o něco méně horké a svítivé hvězdy. 3. Hvězdy typu R CrB — nadobří spektrálního typu F 5–G 5 se stejnou svítivostí jako hvězdy S Dor. Hvězdy typu γ Cas a S Dor leží těsně nad hlavní posloupností a jsou to hvězdy přecházející do stadia nadobří. Všechny tyto skupiny jsou obklopeny obálkami z plynu a prachu, které hvězda produkuje.

Hvězdy typu S Doradus

a) Světelné křivky a chování

Změny jasnosti u hvězd typu S Dor mají amplitudu 1–7 mag. Změny jsou značně nepravidelné a jejich trvání se pohybuje od 1 roku až do dekády. Ve světelné křivce lze nalézt jak vzestupy jasnosti, tak i dosti velké poklesy. Ve světelné křivce hvězd typu S Dor byly v současnosti odhaleny také rychlejší, asi týdenní změny jasnosti s amplitudou okolo 0,05 mag. Členy třídy S Dor jsou např. tyto hvězdy: AE And, AF And, Z Cam, AG Car, HR Car, η Car, P Cyg a S Dor.

Poloha všech těchto hvězd na HR-diagramu je vlevo nahoře. Ze spektrálních čar, které svědčí o velmi vysoké teplotě, bylo odvozeno, že patří do spektrálního typu O9p až Fp. Povrchová teplota se pohybuje od 10 000 K až do 30 000 K. Všechny zástupce obklopuje ještě teplejší plynná obálka. Hvězdy S Dor patří k hvězdám s nejvyšší absolutní jasností, a proto i s největší svítivostí. Samotná hvězda S Dor má absolutní hvězdnou velikost $-9,2$ mag. Hmota hvězd typu S Dor je také úctyhodná, např. η Car má hmotnost $150 M_{\odot}$.

b) Spektrum

Spektrum všech členů tohoto typu se shoduje s tzv. P Cygni spektrem. Obsahuje silné emisní čáry vodíku posunuté k modré části spektra. Současně s emisními čarami se vyskytují i čáry absorpční, také posunuté do krátkovlnné oblasti. Díky modrému posunu se stávají viditelnými i čáry Paschenovy série $P\delta$, $P\gamma$ a $P\beta$. Ve spektru jsou dále obsaženy čáry He I a He II, které produkuje hlavně obálka hvězdy.

c) Příčiny proměnnosti

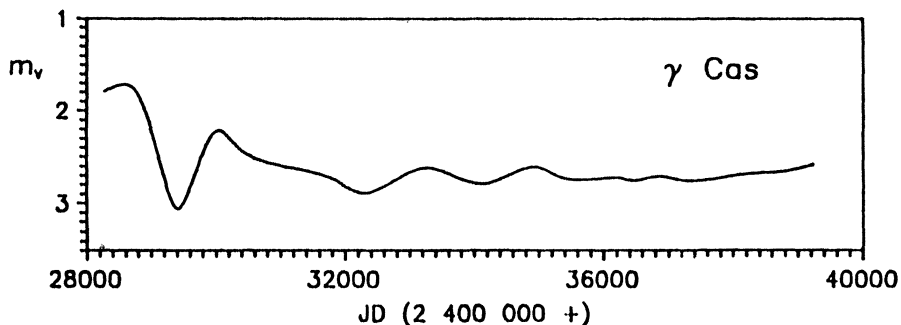
Z posunu spektrálních čar u hvězdy S Dor bylo zjištěno vyvrhování hmoty v množství asi $5 \cdot 10^{-8} M_{\odot} \cdot \text{rok}^{-1}$. Pro hvězdu P Cyg bylo dokonce vypočteno, že se zbaví

hmoty $10^{-4} M_{\odot}$ za rok. Tato hmota vytváří okolo hvězdy velmi horkou obálku. Vyvřování neprobíhá tolik při erupcích, ale spíše při jakési pulsaci povrchu nadobra, která způsobuje změny asi o 0,07 mag. To je způsobeno nejspíše příliš vysokou energií vrstev těsně pod povrchem, které jí předávají povrchovým vrstvám ve formě energie kinetické. Z povrchu hvězdy stále vychází hvězdný vítr, který s sebou odnáší části povrchové vrstvy. Tyto změny mohou být způsobeny pomalými přesuny hmoty uvnitř hvězdy v souvislosti se změnou termonukleární reakce.

Hvězdy typu γ Cassiopeiae

a) Světelné křivky a chování

Hvězdy typu γ Cas jsou také někdy klasifikovány jako Be-hvězdy s obálkou. Na HR-diagramu leží na hlavní posloupnosti nebo i nad ní, mezi spektrálními typy B0–A5. Mají absolutní hvězdnou velikost od -1 do -4 mag. Změny jasnosti jsou nepravidelné a pomalé. Tvoří vlny o trvání 50 až několika set dní s amplitudou okolo 1,5 mag. Při vzestupu nebo poklesu se někdy vytvářejí sekundární maxima. Ve změnách převládají ty s nižší amplitudou, obvykle okolo 0,1–0,3 mag, změny o 1,5 mag následují až po několika stech dnech. Do skupiny hvězd typu γ Cas patří např. BU Tau (Pleione v Plejádách), X Per, X Oph, φ Per, σ And, EW Lac a μ Cen. Jejich spektrální třída se většinou pohybuje okolo B IV pe.



Obr. 5. Světelná křivka hvězdy γ Cas. Na vodorovné ose je vyneseno juliánské datum, na svislé ose vizuální hvězdná velikost.

b) Spektra

Spektrum je typické pro spektrální typ B. Obsahuje jasné čáry vodíku a Balmerovy série i čáry hélia He I. Obsahuje také jasné čáry kovů, např. Fe a Ni a je tedy velmi podobné spektru P Cyg. Ve spektru je také obsaženo mnoho absorpčních čar, které jsou značně široké, což svědčí o rychlé rotaci povrchových částí hvězdy. Spektrální linie jsou podobné jako u třídy S Dor posunuty k modrému konci spektra.

c) Příčiny proměnnosti

Příčiny změn jasnosti jsou opět ve vyvřování hmoty do obálky. Změny jasnosti může způsobit obálka i změna vyvřování hmoty. Proces vyvřování hmoty ovšem

díky rychlé rotaci probíhá hlavně v rovníkové oblasti hvězdy. Obálka pak tvoří jakýsi disk podobný akrečnímu disku. Změna jasnosti může být způsobena rozepnutím disku, který je také zdrojem záření. Rozepnutí může být způsobeno vnitřní nestabilitou disku nebo podnětem z hvězdy, např. v podobě erupce. Na změnách jasnosti se mohou podílet také horké skvrny objevující se v rovníkové části hvězdy a rychle mizející v důsledku rychlých přesunů hmoty pod povrchem hvězdy.

Hvězdy typu R Coronae Borealis

a) Světelné křivky a chování

Skupina hvězd typu R CrB je velice malá. Jejich pozice na HR-diagramu je téměř přesně vymezena asi ve středu větve nadobrů. Hvězdy typu R CrB patří většinou do pozdního spektrálního typu F. Leží v rozmezí typů F0 až K0, tzn., že mají povrchovou teplotu od 5 000 K do 7 500 K. Jejich svítivost je dosti vysoká a absolutní hvězdná velikost je v rozmezí od -4 do -5 mag. Světelná křivka hvězd typu R CrB je velmi zajímavá. Jasnost nepravidelně neperiodicky klesne o 1–9 mag a rychle nebo pomalu se vrátí opět na původní hodnotu. Pokles může být buď rychlý, nebo pomalejší, popř. i několikrát přerušovaný. V minimu jasnost někdy setrvává až 100 dní.

b) Spektra

Všechny hvězdy typu R CrB mají ve spektru velmi jasné čáry uhlíku. Čáry vodíku jsou méně silné. Spektrum dále obsahuje čáry hélia He I a někdy i He II. Z čar uhlíku dominuje čára C III. Některé hvězdy mají ve spektru i pásy molekul, a to hlavně uhlikových molekul C_2 , CN a CH.

c) Příčiny proměnnosti

Ze spekter bylo odvozeno, že jasnost klesá v důsledku zákrytu hvězdy obálkou, která předtím byla hvězdou vyvržena. Hvězdy R CrB jsou velmi bohaté na uhlík, a to stejně jako hmota, kterou vyvrhují. Uhlík ve vakuu krystalizuje na grafitová zrnka, která vytvoří oblak, jenž hvězdu zakrývá, dokud se sám nerozpadne. Tato obálka se prozradila infračerveným zářením, které bylo zachyceno. Proces vyvrhování hmoty je podle mnoha autorů spojen s pulsací povrchu hvězdy, kterou způsobují pohyby v oblasti těsně pod povrchem. Vyvrhování může být způsobeno poruchami v konvektivním proudění, které je ovlivněno poruchami při přenosu energie z oblasti jádra.

Závěr

V předešlém textu jsme se seznámili s charakteristikami některých skupin erupčních proměnných hvězd. Jak jsme viděli, změny jasnosti ve skupině erupčních proměnných hvězd jsou velmi různorodé. Také příčin změn jasnosti je velmi mnoho,

více než u jiných proměnných, např. u pulsujících proměnných hvězd. Pro zajímavost, u hvězd typu T Tauri bylo publikováno dvacet možných příčin změn jasnosti v souvislosti s obálkou. Odtud vyplývají obtíže při objasňování příčin změn jasnosti eruptivních proměnných hvězd. Další potíží při výzkumu eruptivních proměnných je, že téměř každá hvězda má vlastní modifikace změn jasnosti. Proto je zapotřebí pozorovat jich co možná nejvíce; v tom mohou pomoci i amatérští astronomové. Skupina eruptivních proměnných hvězd je zatím nejméně prozkoumanou skupinou proměnných a nabízí ještě značně velký prostor pro další výzkum a nové objevy.

L i t e r a t u r a

- [1] ANTON HAJDUK, a kol.: *Encyklopédia astronómie*. Obzor, Bratislava 1987.
- [2] VLADIMÍR VANÝSEK: *Základy astronomie a astrofyziky*. Academia, Praha 1980.
- [3] C. HOFFMEISTER, G. RICHTER, W. WENZEL: *Variable stars*. Springer Verlag 1984.
- [4] *Interacting binary stars*, ed. by J. E. PRINGLE & R. A. WADE. Cambridge University Press 1985.

Fullereny a fullerity

Miloš Matyáš, Praha

1. Úvod

V posledních několika letech se stále více pozornosti fyziků a chemiků věnuje nové krystalické formě uhlíku, která se nazývá fulleren a skládá se z kulovitých molekul C_{60} uspořádaných do kubické plošně centrované nebo do prosté kubické mřížky. Zájem o klastry C_{60} začal v r. 1985, kdy byly pozorovány v parách uvolněných z grafitu ohřivaného pulsním laserem klastry o 60 atomech uhlíku [1]. Záhy se ukázalo, že tvar klastru je typu ikosaedru, který má kulovitý tvar, jehož povrch je tvořen 20 šestiúhelníky a 12 pětiúhelníky, které mají v rozích atomy uhlíku. Zásadní pokrok nastal v r. 1990, kdy se podařilo Krätschmerovi a spol. [2] rozpustit páry uhlíku obsahující klastry C_{60} v benzenu, který původně bezbarvý se zbarvil do červena. Tímto krokem se otevřela možnost připravit krystalický C_{60} .

Doc. RNDr. MILOŠ MATYÁŠ, DrSc., člen korespondent ČSAV (1923), je vedoucím vědeckým pracovníkem FzÚ ČSAV, Na Slovance 2, 180 40 Praha 8.