

Obsah

Historie a metody výzkumu

1 Úvod	11
1.1 Definice	11
1.2 Význam studia proměnných hvězd	11
2 Historie a současnost výzkumu proměnných hvězd	12
2.1 Prehistorie sledování proměnných hvězd	12
2.2 První vědecká pozorování	12
2.3 Začátky systematického studia	13
2.4 Výzkum proměnných hvězd v 19. a 20. století	15
2.4.1 Vizuální fotometrie	16
2.4.2 Nevizuální fotometrie	18
2.4.2.1 Fotografická fotometrie	18
2.4.2.2 Fotoelektrická fotometrie	18
2.4.2.3 „Křemíková“ fotometrie	19
2.4.3 Spektroskopie	20
2.4.4 Družicová pozorování	21
2.5 Typy proměnných hvězd	22
2.6 Brno a proměnné hvězdy	25
3 Pozorování proměnných hvězd	27
3.1 Astronomická fotometrie	27
3.1.1 Základní pojmy a vztahy	27
3.1.2 Rozložení energie ve spektru hvězdy	31
3.1.2.1 Záření AČT, Efektivní teplota, Spektrofotometrie	31
3.1.2.2 Barevné indexy	33
3.1.3 Fotometrické systémy	35
3.1.3.1 Historické fotometrické systémy	37
3.1.3.2 Johnsonův mezinárodní systém a jeho rozšíření	38
3.1.3.3 Strömgrenův systém $uvby(\beta)$	39
3.1.3.4 Další současné fotometrické systémy	42
3.1.3.5 Standardizace fotometrických systémů	43
3.1.4 Extinkce a její eliminace	44
3.1.4.1 Optická tloušťka a extinkce	44
3.1.4.2 Mezihvězdná extinkce	45
3.1.4.3 Atmosférická extinkce	47
3.2 Astronomická polarimetrie	49
3.2.1 Stokesův vektor	50
3.2.2 Polarizace záření kosmických objektů	52
3.2.3 Polarimetrická pozorování	52
3.3 Astronomická spektroskopie	53
3.3.1 Charakteristiky spekter	54

3.3.2	Základní pojiny	55
3.3.3	Vzhled spektra	59
3.3.4	Co lze vyčíst ze spektrogramů	62
3.4	Zdroje pozorovacích dat o proměnných hvězdách	63
3.4.1	Vlastní, převzatá a archivní pozorování	63
3.4.1.1	Vizuální odhady	63
3.4.1.2	Fotografická pozorování	64
3.4.1.3	Fotoelektrická pozorování	64
3.4.1.4	CCD pozorování	65
3.4.2	Soudobé přehlídkové projekty	66
3.4.2.1	Pozemské projekty	66
3.4.2.2	Kosmické přehlídky	69
3.4.3	Virtuální observatoř	71

Zpracování pozorování proměnných hvězd

4	Regresní analýza	74
4.1	Úvodem	74
4.1.1	Regresní model	74
4.1.2	Zdůvodnění metody nejmenších čtverců	76
4.2	Metoda nejmenších čtverců	77
4.2.1	Hledání řešení metodou nejmenších čtverců	77
4.2.2	Kritéria úspěšnosti modelování	80
4.2.2.1	Statistika modifikovaných odchylek e_i	80
4.2.2.2	Sumy χ^2 , χ^2_μ a rozptyl proložení s^2	81
4.2.2.3	Testování regresních modelů pomocí O-C diagramů	81
4.2.2.4	Informační kritéria AIC, AICc a BIC	82
4.2.3	Odhad nejistot jednotlivých měření	83
4.3	Lineární regrese	84
4.3.1	Lineární regrese užitím maticového počtu	85
4.3.2	Nejistoty parametrů modelu a předpovědí	87
4.3.3	Základní regresní modely - aplikace lineární regrese	88
4.3.3.1	Průměrná hodnota	89
4.3.3.2	Přímka jdoucí počátkem	89
4.3.3.3	Proložení obecnou přímkou	90
4.3.3.4	Proložení časových řad polynomem	91
4.3.3.5	Proložení časových řad harmonickým polynomem	91
4.3.4	Zobecnění lineární regrese I - vektorová závislá proměnná	92
4.3.5	Zobecnění lineární regrese II - více nezávisle proměnných	92
4.4	Nelineární regrese	95
4.4.1	Linearizace nelineárních regresních modelů	95
4.4.1.1	Odhad nejistoty okamžiků extrémů	96
4.5	Robustní regrese	96
4.5.1	Vlastní metoda robustní regrese	98

Fyzika proměnných hvězd

6	Proměnnost periodicky proměnných hvězd	142
6.1	Rotující proměnné hvězdy	142
6.1.1	Asférické hvězdy	142
6.1.2	Skvrny na hvězdách	143
6.1.2.1	Slunce a hvězdy slunečního typu	144
6.1.2.2	Typ FK Comae Berenices	145
6.1.2.3	Typ RS Canum Venaticorum – skvrnití psi	145
6.1.2.4	Typ BY Draconis	149
6.1.2.5	Chemicky pekuliární (CP) hvězdy	149
6.1.3	Magnetické pole	152
6.1.3.1	Pulsary	152
6.2	Dvojhvězdy	155
6.2.1	Zákrytové proměnné hvězdy	155
6.2.2	Světelné křivky zákrytových dvojhvězd	157
6.2.3	Křivky radiálních rychlostí	162
6.2.4	Těsné interagující dvojhvězdy	164
6.2.5	Význam výzkumu zákrytových dvojhvězd	166
6.2.6	Nezákrytové dvojhvězdy	167
6.3	Pulzující proměnné hvězdy	168
6.3.1	Radiální pulzace	168
6.3.2	Mechanismus pulzací	172
6.3.3	Pás nestability a jeho interpretace	173
6.3.4	Závislost perioda-zářivý výkon a její vysvětlení	176
6.3.5	Pulzace radiální i neradiální. Módy pulzací	178
6.3.6	Helioseismologie a astroseismologie	181
6.4	Typy pulzujících proměnných hvězd	183
6.4.1	Klasické cefeidy	183
6.4.2	Hvězdy typu W Virginis	185
6.4.3	RR Lyrae	186
6.4.4	Hvězdy typu δ Scuti	187
6.4.5	Hvězdy typu γ Doradus	188
6.4.6	Rychle oscilující pekuliární hvězdy	189
6.4.7	Hvězdy typu β Cephei	190
6.4.8	SPB	190
6.4.9	Pulzující bílí trpaslíci	191
6.4.10	Dlouhoperiodické pulzující proměnné hvězdy	192
6.4.10.1	Polopravidelné proměnné hvězdy	194
6.4.10.2	Hvězdy typu RV Tauri	195
6.4.10.3	Hvězdy typu R Coronae Borealis	195
7	Fyzika aperiodických proměnných hvězd	196
7.1	Proměnnost hvězdy v důsledku změn jejího okolí	196
7.1.1	Hvězdy typu T Tauri	196
7.1.2	Hvězdy typu FU Orionis	199

7.1.3	Herbigovy-Harovy objekty	200
7.1.4	Látka ve dvojhvězdách	200
7.2	Aktivita hvězd a její projevy	201
7.2.1	Příčiny hvězdné aktivity	203
7.2.2	Vzplanutí nov	204
7.3	Komplexní přestavby, zhroucení a výbuchy	205
7.3.1	Supernovy typu II, Ib a Ic	206
7.3.2	Supernovy typu Ia	207
Literatura		209

5	Analýza časových řad	100
5.1	Základní pojmy a úvahy	100
5.1.1	Světelná křivka	100
5.1.2	Čas pozorování	101
5.2	Periodicita proměnnosti	103
5.2.1	Příčiny změn periody periodicky proměnných hvězd	103
5.2.1.1	Pulzující hvězdy	103
5.2.1.2	Rotující hvězdy	104
5.2.1.3	Interagující dvojhvězdy	105
5.2.1.4	LiTE a apsidální pohyb	106
5.2.2	Epocha, fáze, fázová funkce a okamžitá perioda	107
5.2.3	Základní dvouparametrický model – lineární efemerida	108
5.2.4	Modely s pozvolnými změnami periody proměnnosti	108
5.2.4.1	Příklady	109
5.2.4.2	Diskuse. Prostý tříparametrický model periody	111
5.2.5	Modely s marginálními změnami periody	112
5.2.5.1	Kubický model změn periody	112
5.2.5.2	LiTE	113
5.3	Periodová analýza okamžiků extrémů	113
5.3.1	Řešení metodou nejmenších čtverců	116
5.3.1.1	Nejistoty jednotlivých okamžiků extrémů	117
5.3.1.2	Určování parametrů lineárních regresních modelů	118
5.3.2	Standardní určování okamžiků extrémů	118
5.3.3	Prosté modely světelných křivek	119
5.3.4	Precizní určování okamžiků extrémů světelných křivek	120
5.4	Přímá periodová analýza	122
5.4.1	Popis metody	123
5.4.2	Virtuální O-C diagram	124
5.5	Fenomenologické modely fázových křivek	125
5.5.1	Rotující hvězdy s fotometrickými skvrnami	125
5.5.2	Zákrytové dvojhvězdy	127
5.5.3	Spektroskopická proměnnost	130
5.6	Simultánní modelování nestejnorodých zdrojů fázové informace	130
5.7	Hledání period. Periodogramy	131
5.7.1	Metody minimalizace fázového rozptylu	133
5.7.2	Periodogramy jako aplikace metody nejmenších čtverců	133
5.7.2.1	Lineární regrese a její nástroje	133
5.7.2.2	Varianta I - suma čtverců odchylek	134
5.7.2.3	Varianta II - Lombova-Scargleova metoda	135
5.7.2.4	Varianta III - signál/šum	136
5.7.3	Složitější situace	136
5.7.3.1	Dlouhodobý trend	137
5.7.3.2	Multiperiodické změny	137
5.7.4	Zdláhlivé periody (aliasy)	137
5.7.4.1	Falešné periody	138