

Uut ja vana Wolf–Rayet tähtedest

Tiit Nugis

Sissejuhatuseks

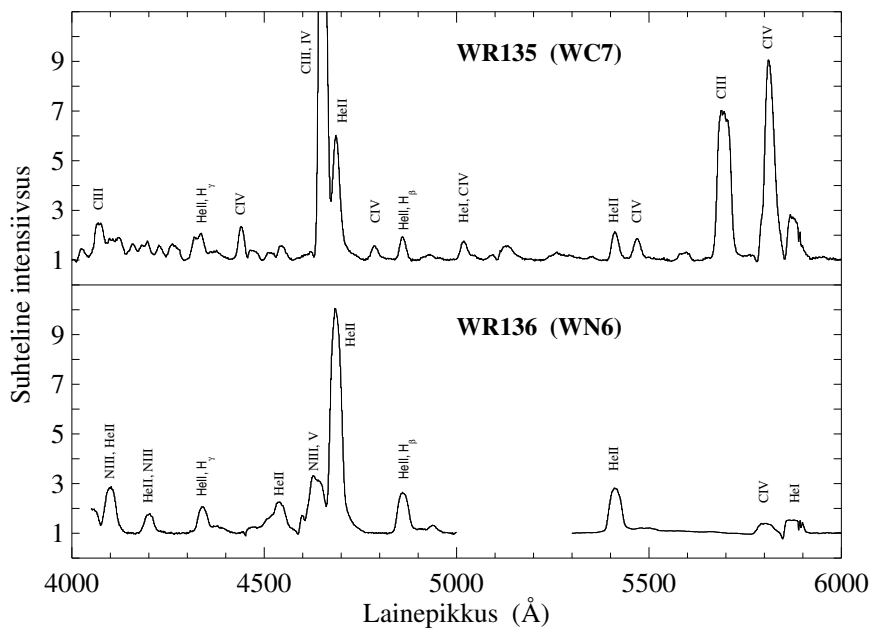
Wolf–Rayet tähed (WR tähed) avastasid Pariisi observatooriumi astronoomid Charles Wolf ja Georges Rayet 1867. aastal. Nad kasutasid 40 cm Foucault teleskoopi ja leidsid, et Luige tähtkuju tähtede HD 191765, HD 192103 ja HD 192641 spektrid erinevad oluliselt enamikest teistest tähtedest, kus spektris esinevad vaid neeldumisjooned või neeldumisribad. Wolf–Rayet tähtede spektrites domineerivad aga laiad emissioonijooned pideva spektri taustal. Varem on Tähetorni Kalendris ilmunud WR tähtede ülevaated 1946. a (Aksel Kipper), 1976. a (Tiit Nugis) ja 2004. a (Kalju Annuk). Käesolevas ülevaates kirjeldame põhjalikumalt Tõravere observatooriumi astronoomide olulisemaid WR tähtede alaseid uurimusi.

WR tähtede levik tähtede maailmas

Esimese WR tähtede kataloogi koostas W.W. Campbell 1894. aastal. See sisaldas 55 tähte. Järjekorras teise kataloogi publitseeris W.P. Fleming 1912. aastal ja see sisaldas juba 108 tähte, neist 86 meie (Linnutee) galaktikas, 21 LMC galaktikas ja 1 SMC galaktikas. Kolmanda WR tähtede kataloogi publitseeris C.H. Payne 1930. aastal ja selles oli 92 tähte, neist 91 Linnutee galaktikas ja 1 SMC galaktikas. Neljanda kataloogi koostas M.S. Roberts 1962. aastal. Selles oli 123 tähte. Viienda WR tähtede kataloogi koostas L.F. Smith 1968. aastal ja see sisaldas 127 WR tähte. Kuuenda WR tähtede kataloogi publitseerisid K.A. van der Hucht et al. 1981. aastal ja selles oli 159 galaktilist WR tähte. Seitsmenda kataloogi publitseeris K.A. van der Hucht 2001. aastal ja see sisaldas 227 galaktilist WR tähte. Edasi ei ole uue numbriga katalooge publitseeritud, vaid on täiendatud seitsmendat kataloogi. 2006. a täienduses on galaktiliste WR tähtede koguarvuks saadud 299. Hiljem on lisandunud veel paarsada tähte. Alates kuuendast kataloogist on säilitatud WR tähtede numeratsioon WR1 kuni WR158-ni (kuuendast kataloogist on üks täht välja arvatud). Need kataloogi alustähed on järjestatud tähtede otsetõusu järgi. Hiljem juurde avastatud tähed lisati kataloogi lähima otsetõusuga tähe järele. Algselt oli kasutusel alfabeetiline täiend WR põhinumbrile (näit WR1a, WR1b, jne), kuid IAU on hiljem soovitanud kasutada lisatähtede paigutamiseks kataloogi numbrilisi indekseid.

Alates kuuendast galaktiliste WR kataloogist on esitatud andmed vaid nn klassikaliste WR tähtede kohta. Klassikalisteks WR tähtedeks loetakse massiivsete tähtede evolutsiooni teatud faasis tekkinud WR tüüpi spektritega tähti ja nad kuuluvad galaktika I tähepopulatsiooni (ketta populatsiooni). Välja arvatud tähed on küll WR tüüpi spektritega, kuid nende absoluutheledused on sadu ja tuhandeid kordi väiksemad klassikaliste WR tähtede omadest ja nad kuuluvad galaktika II tähepopulatsiooni (nad on planetaarude tuumadeks). Vahe tegemiseks tähistatakse neid kandiliste sulgudega ([WR]).

WR tähtede klassid WN ja WC võeti kasutusele IAU soovitusel 1938. aastal lähtudes C.S. Bealsi ja H.H. Plasketti 1935. aastal publitseeritud eristamiskriteeriumist. WR tähtede spektrid on uuemates ülevaattetöodes ja kataloogides jaotatud neljaks põhiklassiks WN (lämmastikjada WR täht), WC (süsinikjada WR täht), WO (hapnikjada WR täht) ja WNh (vesiniku emissioonijoontega lämmastikjada WR täht).



Joonis 1. Lämmastikjada (WR136) ja süsinikjada (WR135) tähtede spektrite võrdlus.

Pärast 2001. aastat on avastatud uusi WR tähti lähis-IP ja IP vaatlustega galaktika tuuma lähedastes piirkondades ja massiivsetes täheparvedes. Neid tähti polnud optilises spektrialas võimalik näha suure interstellaarse ja parvesisese neeldumise tõttu.

Praeguseks on Linnutee galaktikas avastatud ligi 500 WR tähte ja hinnanguliselt võiks nende koguarv olla umbes 1000.

WR tähti on avastatud ja katalogiseeritud ka väljaspool Linnutee galaktikat. LMC galaktikas on leitud 154 WR tähte ja SMC galaktikas 12 tähte. Lokaalses galaktikagrupis, kuhu kuulub ka Linnutee galaktika ja mis sisaldab 80–90 galaktikat, on avastatud kokku (koos Linnuteega) umbes 2000 WR tähte. Veelgi kaugemates galaktikates pole enamikul juhtudel individuaalselt võimalik WR tähti vaadelda, kuid mõnes galaktikas on avastatud mitmeid tuhandeid WR kandidaattähti (näiteks M101). Paljudes kauges galaktikates on järeldatud WR tähtede olemasolu galaktika summaarse spektri iseloomulike detailide põhjal. Eriti hästi on need summaarse spektri WR tunnusooned nähtavad intensiivse tähetekkega galaktikates ja eriti just nn WR galaktikates.

Kuigi meie galaktikas moodustab WR tähtede arv (umbes 1000) vaid tühise osa tähtede koguarvust (100–400 miljardit), on nende mõju galaktika arengule palju-

des aspektides väga oluline. Klassikaliste WR tähtedega evolutsiooniliselt seotud O spektriklassi tähtede koguarv on meie galaktikas ligikaudu 20 000. Planetaarudusid on avastatud meie galaktikas ligikaudu 3000 ja neist umbes 10 protsenti on [WR] tuumadega. Klassikalistest WR tähtedest on palja silmaga nähtavad 2 tähte – WR11 ja WR48 (mõlemad on vaadeldavad vaid lõunapoolkeral). Praegu teadaolev suurima massiga täht Universumis R136a1 LMC-s on ka WR täht (WN5h, $M \approx 200 M_{\odot}$).

WR tähtede olemuse väljaselgitamine ja Tõravere observatooriumi astronoomide panus

WR tähtede spektrid on sarnased noovade ja ka supernoovade spektritega teatud ajavahemikus. See asjaolu lubas teha oletuse, et WR tähtede spektrid tekivad pidevalt uuenevas tähest eemalduvas keskkonnas (ümbrises). Esimesena modelleeris joonte teket liikuvast tähest eemalduvas keskkonnas Kanada astrofüüsik C.S. Beals eelmise sajandi kahekümnendate lõpus ja ta sai vaatlustele sarnaseid lai emissioonijooni. Mis ja miks põhjustab pidevat aine väljavoolu jäi veel paljudeks kümnenditeks selgusetuks. Eelmise sajandi kolmekümnendail tehti ka lihtsustatud eeldustel hinnanguid ümbriste keemilise koostise kohta.

Tolleaegsetes hinnangutes eeldati kas lokaalse termodünaamilise tasakaalu olemasolu ümbrises või siis eeldati, et WR tähtede ümbrised on joonkiirguses läbi paistvad nagu planetaarudud. Need eeldused tundusid paljudele astrofüüsikutele ebarealistlikud ja seega saadud hinnanguid WR keemilise koostise võimalikust anomaalsusest ei peetud tõestatuks. Küsimus keemilisest koostisest jäi paljudeks kümnenditeks kummitama. Kolmekümnendate lõpus, kui selgitati välja tähtede energiallikad (vesiniku põlemine heeliumiks), pakkus G. Gamow, et WR tähtede ümbriste aine võib olla läbinud osaliselt või täielikult termotuuma põlemise faasi. Lõpliku selguseni läks veel mitukümmend aastat.

Oluliseks panuseks liikuvate ümbriste teooriasse oli pärast II maailmasõda Peterburi (tolleaegse Leningradi) ülikooli astrofüüsiku V.V. Sobolevi vastavateemaline monograafia. Monograafia ilmus 1947. aastal ja pärast selle tõlkimist inglise keelde ning publitseerimist USA-s kuuekümnendatel hakkas tekkima tõsisem huvi leida lahendus paljuskümnendite WR tähtede olemuse kindlakstegemiseks.



Foto 1. Leonard Vello Kuhi

1968. aastal organiseeriti Boulderis (USA) esimene spetsiaalne WR tähtede alane konverents. Sellele järgnes 1971. aastal WR tähtede alane IAU sümposium Buenos Aireses. Kolmas oluline nõupidamine toimus Moskvas (IAU sümposium nr. 67: „Muutlikud tähed ja täheevolutsioon“), kus olid kohal paljud WR tähtede uurijad. Sellel nõupidamisel esinesin ka mina suulise ettekandega WR tähtede keemilisest koostisest, mis põhines minu paar kuud varem kaitstud kandidaadidissertatsiooni andmetel. Need tulemused pakkusid huvi Moskvasse kogunenud täheevolutsiooni modelleerijatele ja sellest ajast alates kutsuti mind edaspidi osa võtma ka järgnevatest WR tähtede alastest nõupidamistest.

1960-ndatel ja 1970-ndatel aastatel oli oluline tegija WR tähtede uurijate seas väliseestlane Leonard Vello Kuhi, kes sündis 1936. a Kanadas, kuid teadlasena töötas ta põhiliselt USA-s. Ta tuntuimad (enim viidatud) tööd WR tähtede alal on WR tähtede ümbriste ionisatsioonilise kihistumise avastamine (suurema ionisatsioon-

nienergiaga ionide spektrijooned tekivad tähele lähemal võrreldes väiksema ionisatsioonienergiaga ionidega), WR tähtede fotograafiliste spektrite atlase publitseerimine koostöös L.F. Smithiga ja erinevate WR kaksiksüsteemide vaatluslike iseärasuste avastamine. Näiteks leidis ta koostöös F. Schweizeriga, et varjutusmuutlikul süsteemil CV Serpentis on varjutuste sügavus muutlik ja mõnel ajavahemikul pole varjutust üldse näha. 1970-ndate lõpuaastatel hakkas ta uurima väiksema massi ja absoluutheledusega emissioonitähti, T Tau, Herbigi, Ae ja Be tüüpi tähti ning WR tähtede alastel üritustel ta edaspidi ei osalenud (ka Moskvast polnud ta kohal). L.V. Kuhi on publitseerinud paarkümmend teadusartiklit WR tähtede kohta.

Mina lõpetasin Tartu ülikooli (tollal TRÜ) 1969. aastal ja asusin kohe uurima Wolf–Rayet tähti. Dissertatsioon „Wolf-Rayet tähtede ümbriste uurimine“ valmis mul 1974. aastal (teaduslik juhendaja oli prof Lauri Luud (25.08.1933–12.05.1989)). Dissertatsioonis kasutasin ma Krimmi astrofüüsika observatooriumi 50-tollise trofeoteleskoobiga vaadeldud viie Luige tähtkuju WR tähe spektrogramme. Kaitsmine toimus TRÜ-s 1974. aasta kevadel.

Aastal 1975 läks käiku 1,5-meetrine teleskoop ja nüüd tekkisid võimalused WR tähtede piisava spektraalse lahutusega ja mõistliku ekspositsioonijaga vaatlusteks ka Tõraveres.

Kalju Annuk kaitses kandidaadiväitekirja „Kolme pikaperioodilise WR kaksiksüsteemi spektroskoopiline uurimine“ 1990. aastal AAI kaitsmisnõukogus (teaduslik juhendaja T. Nugis). Tõraveres saadud WR spektrite alusel kaitses 1992. aastal PhD kraadi Toruüni ülikoolis Andrzej Niedzielski „Wolf-Rayet tähtede spektrofotomeetria“ (teaduslik juhendaja oli T. Nugis).

2003. aastal kaitses TÜ-s magistrikraadi Anti Hirv „Lühiperioodiliste Wolf–Rayet kaksiksüsteemide spektroskoopiline ja fotomeetriline uurimine“ (teaduslik juhendaja oli K. Annuk).

Oma uurimistöodes püüdsime anda panuse mitmete võtmeprobleemide lahendamisse. Tõraveres on vaadeldud paljude WR tähtede spektreid optilises lainelas. Üheks oluliseks uurimissuunaks oli aastatel 1970–1995 WR tähtede keemilise koostise kindlakstegemine. WR tähtede ümbriste mudelid täiustati nii meil kui mujal maailmas pidevalt, kuid ikkagi sisaldasid nad palju lihtsustusi ja empiirikat. Seetõttu oli oluline kasutada keemiliste koostiste määramiseks mudelidest võimalikult vähe sõltuvaid meetodeid. 1990. aastal esinesin Varnas IAU sümposiumil nr. 145 tellitud ülevaateettekandega WR tähtede keemilisest koostisest, kus kirjeldasin mudelidest vähe sõltuvaid meetodeid ja tulemusi (Nugis, 1991).

WR tähtede spektrijoonete intensiivsus ja kuju (profiil) ning pideva kiirguse lainepikkusest sõltuvus on oluliselt mõjutatud aine väljavoolu tempost ja ainevoolu kiiruse radiaalsest muutumisest. Kaheksakümnendate keskelt alates hakkas aga kogunema vaatluslikke andmeid, et WR tähtede ümbrised (tähetuuled) on mittehomogeensed. Kanada astrofüüsik Moffat ja ta kolleegid avastasid spektroskoopiliste detailvaatlustega, et WR tähtede laiade emissioonijoonete peal on näha liikuvaid kitsaid joonekesi, mida tõlgendati ainetihenduste liikumisena tuules (Moffat et al, 1988). Hillier (1991) järeltas tugevaimate emissioonijoonete tiibade suhtelisest nõrkusest, et tuuleaine peab olema mittehomoogeense struktuuriga. Mina järeltasin (Nugis, 1990), et WR tähtede pikalainelise kiirguse lainepikkusest sõltuvuse seletamiseks tuleb eeldada kas mittestandardset tuule kiiruse muutumise seadust või siis klombilist struktuuri. Keemiliste koostiste määramiseks WR tähtede klombilistes ümbristes töötasime välja uudse meetodika ja rakendasime seda Tõraveres

vaadeldud WN tähtede H/He sisalduste määramiseks (Nugis, Niedzielski, 1995).

Olulisi uusi tulemusi saadi seitsmekümnendatel satelliitteleskoopidega Maa peal kättesaamatus UV spektrialas. Akadeemik A. Saparil õnnestus konkursi kaudu saada võimalus vaadelda kuumade tähtede ultraviolettspektreid IUE satelliidiga (ta osales ise 1978. a vaatlustel USA-s). Programmis oli tal ka kaks WR tähte. Olulise uue tulemusena leidsime, et lainepikkuste vahemikus 1245–1720 Å on WN tähtede spektris nähtavad blendeerituina (liitunuina) tuhandete raua ioonide spektrijooned, enamasti laiade emissioonijoonetena, kuid mõnel juhul olid nähtavad ka neeldumiskomponendid. Lühikokkuvõtte neist tulemustest on publitseeritud N Liidu juhtivas astronoomiaajakirjas Pisma Astron Zh 11, 455–457, 1985. Detailsem kirjeldus sellest avastusest on publitseeritud väljaandes Tartu Astrofüüs. Obs. Teated (Nugis, Sapar, 1985). UV spektrite kaudu saab täpsustada WR tuulte lõppkiiruseid (paljude UV spektrialas vaadeldavate ioonide resonantsjoonte tekkeala ulatub kaugtuulde). Koostöös Poola astrofüüsikute A. Niedzielski ja W. Skórzyńskiga uurisime, milliste ioonide resonantsjoonte kaudu saab määrata kõige täpsemalt tuulte lõppkiirusi ja pakkusime ka seletuse resonantsjoonte laiade neeldumiskomponentide tekkeks (Niedzielski, Nugis, Skórzyński, 2004).

Seitsmekümnendail ja kaheksakümnendail aastail vaadeldi paljusid WR tähti IP spektripiirkonnas ja ka erinevatel raadiolainepikkustel. See lõi uued võimalused WR tähtede aine väljavoolu tempode (tähetuule intensiivsuse) määramiseks. Koostöös Inglise astrofüüsikute P.A. Crowtheri ja A.J. Willisega töötasime välja IP/raadio pideva kiirguse teoreetiliste voogude arvutamise programmi klombilise struktuuriga tähetuulte jaoks. Võrdluses vaatlusandmetega oli nii võimalik määrata varasemast täpsemalt tähetuulte intensiivsusi (Nugis, Crowther, Willis, 1998).

Minu olulisemad tööd on publitseeritud koos Hollandi astrofüüsiku H. Lamersiga. Need tööd käsitlesid WR tähtede aine väljavoolu tempode sõltuvust tähe parameetrist ja tuulte tekkepõhjuste uurimist. Me leidsime, et WR tähtede aine väljavool tekib väga sügaval tähe sisemuses (termotuuma põlemistsooni pealsetes kihtides ja tuul on põhiosas optiliselt paks kontinuumis) (Nugis, Lamers, 2000, 2002; Nugis, 2006, 2008).

IP vaatlustega tehti kindlaks, et paljude hilist tüüpi WC tähtede tuultes on nähtav tolmu kiirgus. See tundus algul olevat täielik müstika, sest hiliste WC tähtede tuuleaine temperatuur on piisavalt kõrge ja ei lange ka kaugtuules nii madalaks, et ioniseeritud gaas saaks neutraliseeruda ja algaksid protsessid, mis tekitaksid tolmuteri (ühes tolmuteras on umbes 10^{12} aatomit: tolmu on kas grafiidi või amorfses süsiniku kujul). Peagi jõuti arusaamisele, et tolmu saab tekkida vaid ekstreemaalsetes tingimustes. Mudelarvutused näitasid, et WC+O lähiskaksüsteemides saavad pörkuvates tuultes tekkida tolmu tekkeks vajalikud tingimused lööklaine frondis (pärast kokkusurutud kuuma gaasi kiirgusfaasi saab temperatuur mittetasakaaluliselt alaneda piisavalt madalaks, et tekiks tolmu). Tolmu kiirgust on leitud ka mõnede WC üksiktähtede tuultes. Siin on võimalikuks tekkepõhjuseks keskmisest suuremate aineklompide pörkumised. Osa WC kaksiksüsteemide korral on vaadeldud episoodiliselt tekkivat tolmu. Kalju Annuk vaatles pikaajaliselt kaksiksüsteemi HD 193793 (WC7+O5.5) ja leidis, et selle kaksiksüsteemi orbiit on väga ekstsentriline



Foto 2. Henny Lamers

ja kaksiksüsteemi komponenttähtede teineteisele lähenedes saab siin realiseeruda teatud ajaks pörkuvate tuulte kaudu tolmu tekke mehhanism. Need K. Annuki tööd on leidnud tunnustust ja laialdast tsiteerimist WR tähtede uurijate poolt (Annuk, 1991; Marchenko et al, 2003).

Tõravere observatooriumis on vaadeldud alates 1975. aastast suuremal või vähemal määral peaaegu kõiki põhjapoolkeral nähtavaid heledamaid WR tähti (~20). Saadud spektrite koguarv ületab 2500 piiri. Publitseeritud on üle 100 WR tähtede alase töö. T. Nugis on publitseerinud kokku nii eesti, inglise kui ka vene keeles 120 kirjutist, neist 75 WR tähtede kohta.

1990-ndate lõpul otsustasime tollase Tõravere observatooriumi direktori Laurits Leedjärve innustusel hakata Tõraveres või Tartus korraldama astrofüüsika alaseid nõupidamisi, et anda uut hoogu tähefüüsika arenguks Tõraveres. Selleks kaasasime oma meeskonda maailmas tunnustatud Hollandi professori Henny Lamersi. Tema oli Tartu nõupidamiste teadusliku organiseerimiskomitee esimeheks. 1998.–1999. aastal leppisime kokku, et Tartu nõupidamise põhitemaatika oleks seotud OB, LBV ja WR tähtedega. Sellise temaatikaga korraldasime Tartus kaks rahvusvahelist nõupidamist (1999. ja 2005. aastal). Neil nõupidamistel osales palju maailma juhtivaid astrofüüsikuid ja ka noori tulevikutegijaid. Nõupidamised said toimuda tänu Tõravere observatooriumi igakülgsel abile ja Eesti Teadusfondi finantstoetusele (grandid nr 3702 (grandihoidja T. Nugis) ja nr 6102 (grandihoidja T. Nugis)). Korralduskomiteesse kuulusid 1999. aastal: T. Nugis (esimees), E. Ergma (kaasesimees), K. Annuk, I. Kolka ja M. Ruusalepp ning 2005. aastal: T. Nugis (esimees), K. Annuk, I. Kolka, L. Leedjärv ja M. Ruusalepp. Lühiülevaade neist nõupidamistest on avaldatud Tähetorni Kalendrites 2000. ja 2006. aastaiks. Tartus korraldatud rahvusvaheliste astrofüüsika-alaste nõupidamiste teaduslikud materjalid on publitseeritud ASP (Astronomical Society of the Pacific) konverentsikogumike sarjas (ASP Conf. Ser 204 ja 353).

Mis teada, mis mitte

WR tähed on ühed kuumemad ja absoluutskaalas heledaimad tähed Universumis. Oluliseks teetähiseks WR tähtede olemuse väljaselgitamisel oli nende keemiliste koostise piisavalt usaldusväärne kindlakstegemine (see sai teoks eri hinnanguil alles aastail 1990–1995). Praeguseks on teada, et WN tähtede ümbristes (väliskihtides) vaadeldav aine on kas täielikult või osaliselt läbinud vesiniku heeliumiks põlemise reaktsioone CNO tsükli kaudu. WC ja WO tähtede ümbriste aine on aga läbinud heeliumi raskemateks elementideks põlemise termotuumareaktsioone. Vähesed tähed on vahepealse koostisega (väliskihtides on nii vesiniku kui heeliumi põlemisreaktsioonide ainet), neid tähistakse WN/WC tähtedena.

Kaasaegsed WR tähtede ümbriste mudelid on üsna detailsed ja võtavad arvesse paljusid olulisi eripärasid, nagu kõrvalekalle termodünaamilisest tasakaalust (non-LTE), sfääriline sümmeetria, tuule põhjustatud kasvuhoooneefekt jm, kuid kaks hüdrodünaamika seisukohast olulist mõjurit, ainevoolu kiiruse ja tiheduse klombilise struktuuri radiaalne sõltuvus ümbrises on arvesse võetud ülelihtsustatult ja see võib paljude parameetrite määramised muuta ebatäpseks.

Aastail 1990–2000 jõuti WR tähtede intensiivse aine väljavoolu tempode suhtes järeldusele, et varasemad hinnangud tuleb ümber hinnata (aine väljavoolu tempod hinnati keskmiselt kolm korda madalamaks klombilisuse mõju tõttu). Uute evolutsiooniaruutuste järgi on leitud, et kõik teatud massist ($M \approx 25 M_{\odot}$) suurema

algmassiga tähed evolutsioneeruvad peajada O tüüpi tähtedest WR tähtedeks, algul WNH täheks, siis WN täheks ja edasi WC ja WO täheks. Mõningane ebaselgus jäi vaid O tähest WN täheks ülemineku vaheetapi suhtes. Peajada O täht võib muunduda enne WN täheks saamist kas siniseks (O) ülihiiuks, punaseks ülihiiuks või LBV täheks (LBV – luminous blue variable). Üleminekufaasi vaheetapi tähe tüüp sõltub nii algtähe metallilisusest, aine väljavoolu tempest kui ka tähe pöörlemisest ehk siis lõppkokkuvõttes täheaine segunemisest.

Need samad tegurid mõjutavad ka WR tähtede arengu lõppfaasi ehk seda, kas WR tähed lõpetavad oma tähelise arengufaasi supernoovana või voolab tähest välja niipalju ainet (tähetuulena ja võib-olla ka väliskihtide äraheitmistena), et tähe lõppfaasiks on valge kääbus. Üldiselt arvatakse, et kõik WR tähed lõpetavad oma evolutsiooni supernoovana plahvatades. Täht saab plahvatada supernoovana, kui pärast tuumakütuse varude ärapõletamist toimub aine kiire kokkukukkumine, millele järgneb plahvatus.

2022. a teatasid Gran Telescopio Canariase astronoomid, et nad on avastanud esimese Wolf–Rayet tähe supernoova plahvatuse. Kataloogides on see plahvatus kirjas kui SN 2019hgp ja ta tüübiks on märgitud Icn. Plahvatus ise registreeriti aastal 2019, kuid plahvatava tähe tüüp tehti spetsiaalvaatlustega kindlaks alles nüüd. Plahvatanud tähe spektritüübiks on WC/WO. Üldiselt arvatakse, et paljude seni plahvatanud Ib ja Ic tüüpi supernoovade tekitajatähtedeks on WR tähed.

WR tähtede ja ka WR tüüpi spektritega planetaarude tuumade evolutsioonistseenaariumitega on veel palju ebaselget. Empiirilised (vaatluslikud) WR populatsioonide andmed ja evolutsiooniteoreetilised ennustused pole kooskõlas eriti just madala metallisusega galaktikates.

Palju ebaselget on ka tolmu tekke seletamisega WR tähtede tuultes. Hiljuti avastati et ka mõnede WN tähtede tuultes esineb tolmu. Pole kindel, kas see tolmu tekib tuules või on tegu relikttolmuga või hoopis lähedase udukogu tolmuikiirgusega.

Lõpetuseks

Tartu Observatooriumis on läbi aegade paljud astronoomid tegelenud suure massiga tähtede uurimisega. Mul on olnud meeldiv võimalus teha koostööd paljude kolleegidega WR tähtede uurimisel nii vaatluslikus kui teoreetilises plaanis. Tahaksin erilisel tänada kolleege, kellega oleme publitseerinud ühiselt WR tähtede alaseid uurimusi: Lauri Luud, Arved Sapar, Kalju Annuk, Anti Hirv, Milvi Ilmas ja Tanja Feklistova.

Minu publikatsioonidest on rahvusvahelistes teadusajakirjades ja kogumikes enim tähelepanu ja viitamisi leidnud mitmed Wolf–Rayet tähtede ja nende tuulte uurimused. 16. novembri 2022. a seisuga on enim viiteid kogunud minu koostöös H. Lamersiga 2000. a publitseeritud artikkel (A&A Vol. 360, p. 227–244) (kokku on viiteid 540 SAO/NASA ADS andmebaasi järgi).

Kasutatud kirjandus

- Annuk, K. (1991). Long Period WR Binaries. In: Wolf–Rayet Stars and Interrelations with Other Massive Stars in Galaxies. Proc. IAU Symp. No. 143, eds. K. van der Hucht, B. Hidayat. Kluwer. 245–250.
- Hillier, D.J. (1991). The Effects of Electron Scattering and Wind Clumping for Early Emission Line Stars. A&A, 247, 455–468.

- Lamers, H.J.G.L.M., Sagar, A. (eds.) (2000). *Thermal and Ionization Aspects of Flows from Hot Stars: Observations and Theory*. ASP Conf. Ser. 204. San Francisco, 453 pp.
- Lamers, H.J.G.L.M., Nugis, T. (2002). An Explanation for the Curious Mass Loss History of Massive Stars: from OB Stars, through Luminous Blue Variables to Wolf-Rayet Stars, *A&A*, 395, L1–L4.
- Lamers, H.J.G.L.M., Langer, N., Nugis, T., Annuk, K. (eds.) (2006). *Stellar Evolution at Low Metallicity: Mass Loss, Explosions, Cosmology*. ASP Conf. Ser. 353. San Francisco, 430 pp.
- Marchenko, S.V., ..., Annuk, K.,... (2003). The unusual 2001 Periastron Passage in Clockwork Colliding-Wind Binary. *ApJ*, 596, 1295–1304.
- Moffat, A.E.J., Drissen, L., Lamontagne, R., Robert, C. (1988). Spectroscopic Evidence for Rapid Blob Ejection in Wolf-Rayet Stars. *ApJ*, 334, 1038–1043.
- Niedzielski, A., Nugis, T., Skorzynski, W. (2004). Kinematical Structure of Wolf-Rayet winds. II. Internal velocity scatter in WN stars. *Acta Astronomica*, 54, 405–427.
- Nugis, T., Sagar A. (1985). Numerous blended Fe V, Fe VI emission lines identified in the ultraviolet spectrum of the WN 6 star HD 192163. *Sov. Astron. Lett.*, 11, 188–189.
- Nugis, T., Sagar A. (1985). High-resolution IUE spectrum of the WN 6 star HD 192163: the Fe V and Fe VI dominated emission line spectrum. *Tartu Astrofüüs. Obs. Teated*, 80, 3–23.
- Nugis, T. (1990). Deceleration Regions in the Wind of WR and P Cygni Stars. *Astrophysics*, 32, 51–60.
- Nugis, T. (1991). The Chemical Composition of Wolf-Rayet Envelopes. In: *Evolution of Stars. The Photospheric Abundance Connection*. Proc. IAU Symp. No. 145 (eds. G. Michaud and A. Tutukov), Kluwer, 209–220.
- Nugis, T., Niedzielski, A. (1995). Chemical Composition of Wolf-Rayet Stars. II. Hydrogen-to-Helium Ratio. *A&A*, 300, 237–258.
- Nugis, T., Crowther P.A., Willis A.J. (1998). Clumping-corrected mass-loss rates of Wolf-Rayet Stars. *A&A*, 333, 956–969.
- Nugis, T., Lamers H.J.G.L.M. (2000). Mass-Loss Rates of Wolf-Rayet Stars as a Function of Stellar Parameters. *A&A*, 360, 227–244.
- Nugis, T., Lamers H.J.G.L.M. (2002). The Mass-Loss Rates of Wolf-Rayet Stars Explained by Optically Thick Radiation Driven Wind Models. *A&A*, 389, 162–179.
- Nugis, T. (2006). Optically Thick Wind Models of WNE Stars: the Dependence on Metallicity. In: *Stellar Evolution at Low Metallicity: Mass Loss, Explosions, Cosmology*. ASP Conf. Ser. 353, eds. H.J.G.L.M. Lamers, N. Langer, T. Nugis, K. Annuk. San Francisco, 191–196.
- Nugis, T. (2008). Optically Thick Winds of Hot Stars: What Determines the Mass Flux? In: *Mass Loss from Stars and the Evolution of Stellar Clusters*. ASP Conf. Ser. 388, eds. A. de Koter, L.J. Smith, L.B.F.M. Waters, San Francisco, 207–208.
- Van der Hucht, K.A. (2001). The VIIth Catalogue of Galactic Wolf-Rayet Stars. *New Astronomy Reviews* 45, 135–232.
- Van der Hucht, K.A. (2006). New Galactic Wolf-Rayet Stars, and Candidates. *A&A*, 458, 453–459.