

## Tähtede evolutsioonist.

E. Öpik.

Tartu Ülikooli Tähetorni publikatsioones, Tome 25 № 2, 1922, ilmunud töö järele: „Notes on Stellar Statistics and Stellar Evolution“.

Tähtede arenemiskäigu küsimus on tähtsat osa mänginud täheteaduses viimase 150 aasta jooksul. Juba Kant esitas üldise teooria, mis püüdis seletada tähtede — ka meie päikese — tekkimist udukogust, ja isegi terve meie tähtede süsteemi — Linnutee — sündimise saladusse püüdis süveneda selle uurija pilk. Selle küsimuse varajase tekkimise peale vaatamata jääb tähtede evolutsioon üheks põnevamaks uurimisaineks praeguselgi ajal; seäranis huvitavaks teeb selle küsimuse asjaolu, et meie päikese — ja, tähendab ka maakera — saatus oneneb tähtede ilmas valitsevaist arenemisseadusist.

Käesolevas töös tegime katsed seletada moodsaid tähestatistilisi andmeid teatavate evolutsiooni teooriate abil. Selleks tuleb mõningaid, meile tarvilikke mõisteid lähemalt defineerida.

1) Tavalisest mõõdetakse tähtede heledust tähesuurusega; nimetame tähe bolomeetriliseks suuruseks (ehk heleduseks) suuruse, mis tähe üldist (integraalset) energia-kiirgamist mõõdab; absoluutseks (ehk tõeliseks) suuruseks — suuruse kaugusel = 1; kauguse mõõduks võtame 1 parseki, mis võrdub 206 265 astron. mõõduga ehk  $3\frac{1}{3}$  valgusaastaga. Kui edaspidi tähe heledusest ehk suurusest räägime, mõistame selle sõna all absoluutset bolomeetrilist suurust — väljaarvatud juhtumised, kus nende sõnade tähendus pole teistviisi seletud (näit., visuaalne suurus, mis silmale nähtava valgus-energia määrab).

2) Kui teatavas väljavalitud ilmaruumi osas tähti nende absoluutse heleduse järele liigitada ja loetella, palju tähti igasse suuruseklassi kuulub, saame n. n. tähtede abs. heleduste aotuse. (J. C. Kapteyni terminoloogia järele — „Luminosity-Curve“, ehk „heleduste kõver“). Seda jaotust võib esitada tabelina, võib valida ka mõne analüütilise funktsiooni, mis vaatlusandmeid kõige paremini kujutab. Kui  $M$  tähendab absoluutset heledust,  $\varphi(M)$  — heleduste jaotuse funktsiooni, siis on  $\varphi(M)dM$  tähtede arv, mille heledus on  $M$  ja  $M+dM$  vahel.

Kuulsad Hollandi uurijad Kapteyn ja Van Rhijn on omaliikumiste statistika põhjal määranud visuaalsete heleduste

jaotuse funktsiooni meie Linnutee süsteemi kohta. Kuna meile on bolomeetriliste heleduste jaotust tarvis, tuli ülalnimetatud uurijate andmeid ümberarvutada, silmas pidades andmeid, mis praegusel ajal tähtede temperatuuride kohta on käepärast: temperatuuri teades võib nimelt visuaalse heleduse põhjal arvutada tähe üldise kiirgamis-energia. Tabel 1 kujutab resultaate.

Tabel 1.

Abs. bolom. heledus		Tähtede arv 1000 miljoni kuup-parseki kohta	Abs. bolom. heledus		Tähtede arv 1000 miljoni kuup-parseki kohta
Tähe- suurusis	Päikese suhtes		Tähe- suurusis	Päikese suhtes	
-13.64	240 000	0.3	- 2.64	9.5	784 000
-12.64	95 000	1.7	- 1.64	3.8	1 760 000
-11.64	38 000	8.8	- 0.64	1.5	4 140 000
-10.64	15 000	62.5	+ 0.36	0.6	8 420 000
- 9.64	6 000	221	+ 1.36	0.24	9 750 000
- 8.64	2 400	998	+ 2.36	0.095	7 010 000
- 7.64	950	3 540	+ 3.36	0.038	5 370 000
- 6.64	380	11 500	+ 4.36	0.015	3 390 000
- 5.64	150	38 100	+ 5.36	0.006	2 000 000
- 4.64	60	123 000	+ 6.36	0.002	1 230 000
- 3.64	24	277 000	+ 7.36	0.001	380 000

Sellest tabelist võib näha, et tähtede arv kasvab esialgu väga kiirelt heleduse kahanemisega; maksimumini jõuab see arv, kui heledus võrdub  $\frac{1}{4}$  päikese omast; veel nõrgemate tähtede arv kahaneb juba. Nii on siis kõige rohkem tähti, mille soojendamisvõime on 4 korda väiksem, kui meie päikesel.

Käesolevas töös oleme katset teinud tähtede heleduste jaotust seletada evolutsiooni seadusiga. Seni on seda jaotust kui juhuslikku vaadatud; sellele arvamisele aitas kaasa, et visuaalsete heleduste jaotus on Gaussi vigade kõverjoone sarnane. Kuid visuaalne heledus on meie silma juhuslikkude omaduste läbi määratud; kui meie selle juhuslise mõiste asemel tarvitame bolomeetrilist heledust, mis mitte enam vaatelejast, vaid ainult tähest oleneb, siis osutub, et 1. tabelis esitud bolomeetriliste heleduste jaotus enam Gaussi juhuslikkuse-seadusega ühtida ei saa; ja näib siis lubatud olevat otsida neid seadusi, mis mõjutavad vaadeldud jaotuse; meid ei või enam rahuldada „juhuslikkuse“ mõiste — mis ju ometi eneses varjab meile tundmatuid seadusi.

Et oma ülesannet teoreetiliselt käsitada, tuleb meil vastu võtta järgmised põhimõttelised eeldused.

Esiteks, oletame, et aja jooksul iga tähe bolomeetiline heledus kahaneb; see oletus vastaks tähtede „jahtumise“ teooriale, kuid selle vahega, et pinna temperatuur võib mõnikord ka mitte langeda; nii, näituseks, hiidtähe kokkutõmbumisega peab tema pinna temperatuur isegi kasvama; kuid vastukaaluna mõjub kiirgamispinna vähenemine, mis käib tihenemisega käsikäes; kõige viimaks ei kasva mitte heledus, vaid jääb kas konstantseks või väheneb temperatuuri tõusu peale vaatamata.

Teiseks, oletame, et kiirgamisenergia kahanemine ei kesta mitte lõpmata, vaid katkestub katastroofi läbi varem ehk hiljem; niisuguseid katastroofe näeme uute tähtede ilminguis. Oletame, et katastroofi järel täht asub jälle oma evolutsiooni algastmele ja pärast oma endist arenemiskäiku kordab uuesti. Nii moodustavad, meie oletuse järele, tähe arenemisastmed ringkäigu, katastroofist katastroofini, iga katastroofile järgneva pikaajalise „jahtumise“ perioodiga.

Et katastroofid, mida uute tähtede näol vaatleme, pole mitte erandnähtused, vaid et nad on tingitud seaduste läbi, mis terve tähtedeilma kohta on maksvad, võib järgmise mõttekäigu abil tõenäoliseks teha. Uute tähtede spektroskoobilised vaatlused on kindlaks teinud, et katastroofile järgnevate aastate jooksul uus täht muutub planetaarseks uduks, ja veel hiljem isegi n. n. Wolf-Rayet täheks; neid tähti peetakse tähtede evolutsiooni üheks kõige varemaks („nooremaks“) astmeks. Uute tähtede ilmumist hinnatakse minimaalselt kuni üheni iga aasta kohta; nüüd ei või kellelgi kahtlust olla, et Linnutee meie maakerast palju vanem on, nii et tema kümnete ehk sadandete miljonite aastate jooksul ei võinud tuntavalt muutuda omalt koosseisult. Nii võime suure tõenäosusega oletada, et nende ajavältuste jooksul vahetpidamata ilmus uusi tähti, mis siis muutusid planetaarseiks ududeks ja Wolf-Rayet tähiks. Kuna tähtede üldine hulk meid ümbritsevas Linnutee süsteemis umbes 1000 miljoni peale arvatakse, tuleks uute tähtede ilmumise sageduse põhjal järeldada, et planetaarsed udud ja Wolf-Rayet tähed moodustaksid 10 kuni 100% kõigist Linnutee tähist. Kuid vaatlused tõendavad vastupidist: ülalnimetud objektid kuuluvad just kõige haruldasemate hulka taevavõlvil; terves Linnutees ei või nende arv olla üle 10.000, mis on vaevalt  $\frac{1}{100.000}$  üldarvust. Tekib iseenesest küsi-

mus: kuhu jäid need sajad miljonid udud ja Wolf-Rayet tähed, mis Linnutee tähtede peres seni ilmusid? Ilmsesti muutusid nad tavalisiks tähiks — neiks samuks tähiks, mis nüüd helendavad uurija silma ees taevavõlvil; see on, nähtavasti, ainus tõenäoline seletus. Kui see nii on, peame järeldama, et iga täht on omal ajal olnud „uus“ täht, ja ümberpöörduvalt — et samasugune katastroof peab teda tabama tulevikus. See on vaadeldavate tõsiasjade otsekohene loogiline järjeldus.

Kolmas eeldus, mis meie teooriale läheb tarvis, on n. n. tasakaalu seisukorra oletamine; see tähendab, et Linnutee koosseis — meid huvitab siin peaaesjalikult ainult heleduste jaotus — ei pea muutuma ajavältuste jooksul, mil tähtede arenemiskäik kujuneb; teiste sõnadega, Linnutee iga peab üksikute tähtede omast palju pikem olema, nii et ajavältusel, mil mõni täht täielise ringkäigu läbielab, Linnutee omadusis veel tuntavaid muutusi ei ilmu.

Nende kolme eelduse põhjal võib teoreetiliselt arvutada tähtede heleduste jaotust. Selleks on tarvis teada: 1) heleduse kahanemise kiirust, mida tähendame  $V$  abil; seda suurust nimetame edaspidi lihtsalt „jahtumise kiiruseks“; meie seame valemi

$$V = \frac{dM}{d\tau},$$

kus  $M$  tähendab, nagu ennegi, bolomeetrilist suurust,  $\tau$  — aega. Peab meeles pidama, et heleduse kahanemisega  $M$  suureneb; 2) katastroofide sagedust, mida tähendame  $q$ -ga;  $q$  võrdub suhtega katastroofide arvu ajaüksuse vältel ja tähtede üldarvu vahel; seda suurust võib nimetada ka katastroofi sündimise tõenäosuseks ühelise aja vältel ühe tähe kohta.

Meie probleem sarnastub väga kõrbejõe voolu probleemiga: kui heledust (bolomeetrilist tähesuurust) kujutaksime voolu pikusega, jahtumise kiirust — voolu kiirusega, katastroofide mõju — vee auramisega, ja kui jõe laiuse lihtsuse pärast konstantseks arvame, siis kujutaks vee sügavus tähtede arvu ehk heleduste jaotuse funktsiooni. Meie ülesande lahendamiseks on tarvis analüütiliselt väljendada tasakaalu tingimus: et igal silmapilgul ja iga heleduseklassi jaoks tähtede arvu juurekasv, mis oleneb heledamate tähtede jahtumisest, võrduks väljaminekuga, mis sünnib kahte viisi: jahtumise läbi, kus osa tähti järgmisesse, nõrgema heleduseklassi üle läheb ja katastroofide läbi, mis tähti siiravad arenemiskäigu algastmele.

Meil puudub siin võimalus üksikasjaliselt peatuda analüütilisel valemil; tuleb leppida ainult resultaate kordamisega.

Ilma et meie avaldaksime mingisuguseid konkreetseid arvami jahtumise kiiruse kohta, võime oletada, et see funktsioon on 1) absoluutsest heledusest ja 2) tähe massist. Nii tuleb veel arvesse võtta tähtede masside jaotus. Kuid massi asemel tarvitasime ühte teist mõistet — nimelt, „algehedust“: nii nime-tame kõige suuremat heledust, mis teatav täht võib omandada; selle heledusega algab täht oma arenemiskäiku, ja seda heledust omandab ta iga katastroofi järel. Algehedusele vastavat bolo-meetrilist tähesuurust nimetame edaspidi  $M_0$ . Meie oletame lihtsuse pärast, et igale massile vastab teatav algehedus. Oletades, et algehedus vastab hiidtähe staadiumile, võime inglise uurija A. S. Eddingtoni kiirgamis-tasakaalu teooria põhjal määrata olenevuse massi ja algeheduse vahel. Selle teooria järele peab algehedus muutuma võrdeliselt massi ruuduga. Tähtede masside jaotuse määrasime hiljuti ilmunud uurimise põhjal, mis tähtede keskmist massi käsitab, ja mida ameeriklane Fr. H. Seares toimetanud; masside jaotust teades leidsime juba algeheduste jaotuse. See osutus Gaussi vigade kõverjoonena, mille dispersioon on  $\pm 1.55$  tähesuurust. Peab tähendama, et seda arvu ei saa pidada täpsaks, kuid see asjaolu ei või väga tuntavalt mõjuda resultaadisse.

Lõpulikult saavutasime järgmise valemi, mis teoreetilise heleduste jaotuse funktsiooni kujutab:

$$\varphi(M) = q \left\{ \int_{M_0 = -\infty}^{M_0 = M} \frac{X(M_0)}{[1 + q\theta(M_0)] \cdot V(M, M_0)} e^{-q \int_{M_0}^M \frac{dM}{V(M, M_0)}} dM_0 + \frac{\theta(M)X(M)}{1 + q\theta(M)} \right\}$$

Siin tähendavad:  $\varphi(M)$  — heleduste jaotuse funktsiooni, nii valitud, et  $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(M)dM = 1$ ;  $q$  — katastroofide sagedust;  $V(M, M_0)$  — jahtumise kiirust;

$X(M_0)$  — algeheduste jaotuse funktsiooni. Mis puutub suurusesse  $\theta(M_0)$ , siis vajab ta lähemat seletust. Teoreetiliselt, nii ka vaatluste seisukohalt näib tõenäone olevat, et täht oma arenemiskäigu algastmes, n. n. hiidtähe aja-järgus, oma heledust tuntavalt ei muuda, nii et sel ajal  $V(M, M_0) = 0$ ;  $\theta(M_0)$  tähendabki hiidtähe staadiumi vältust.

Konkreetsed arvutused on läbiviidud kahel juhtumisel: 1) oletusel, et tähtede energia allikana esinevad ilmingud, mis radio-

aktiivsete nähtuste sarnased ja 2) oletusel, et tähe soojusallikas peitub ainult tema kokkutõmbumises raskustungi mõjul. Esimese juhtumise nimetame radioaktiivseks, teise — gravitatsiooniliseks jahtumiseks. Arvutuste resultaadid ja vaatluste andmed (Kapteyni järele) — võrdluseks teooriaga — leiame 2. tabelis.

Tabel 2.

Absoluutne heledus ( $M$ )	— 6	— 4	— 2	0	+ 1	+ 2	+ 4	+ 6	+ 8
	Tähtede suhteline arv								
Vaatus . .	0.025	0.20	1.38	6.6	10.0	8.7	3.8	1.3	0.26
Radioaktiiv. jahtumine	0.002	0.11	1.86	7.4	8.9	8.1	3.6	1.1	0.35
Gravitat. jahtumine	0.050	0.78	4.1	9.6	10.0	6.8	0.36	0.001	0

Võrreldes mõlemaid hüpoteese vaatlusiga, jõuame selle tabeli põhjal otsusele, et gravitatsiooniline jahtumine sugugi vaatlusile ei vasta; teooriat tuleb sellelt vaatekohalt ebasoodsaks tunnistada tähtede evolutsiooni seletuseks. Ka nõuaks see teooria õige lühikest eluiga keskmise tähe kohta: katastroofilt katastroofini kuluks keskmiselt ainult umbes 2 miljoni aastat, ja sellele vastavalt peaks uute tähtede ilmumise sagedus olema umbes 500 aastas — mis ei käi tõsiasjuga sugugi kokku.

Selle vastu annab radioaktiivse jahtumise teooria õige rahuldava kokkukõla vaatlusiga; peab silmas pidama, et lahkumineku esimese arvu juures võiks kõrvaldada ja kokkukõla peaaegu täieliseks teha, kui võtta arvutuste aluseks veidi suurem algheduste dispersioon; kuid seda meie ei teinud, arvesse võttes, et vaatlusandmete täpsus praegusel ajal veel liig madal on, et väikeste lahkuminekute peale rõhku panna; tähtis on arvude üldine käik; ja see on radioaktiivse jahtumise teoorial ja vaatlusil ühesugune. Nii võime järeldada, et tähtede energia radioaktiivne iseloom, mida teisil põhjusil arvati mõjuandva olevat tähtede evolutsioonis, on ka tähtede heleduste jaotusega kokkukõlas.

Radioaktiivse energiaallika omadus on, et tema kiirgamisenergia kahanedes kasvab bolomeetiline suurus ühetaoliselt, nii et „jahtumise kiirus“  $V$  on konstantne suurus. Arvates katastroofide sagedust võrduvat 1-le ühe miljardi tähe kohta aas-

tas (see on ligikaudu uute tähtede sagedus), annavad vaatluste andmed järgmise arvu tähtede jahtumise kiiruse kohta:

0.17 tähesuurust (ehk umbes 17%) 100 miljoni aasta jooksul.

Arvates päikese kohta selle sama arvu maksvat, ja oletades, et elu maa peal võis algada alles, kui tema keskmine pinna temperatuur langes alla  $50^{\circ}$  C, — päike pidi siis umbes 60% võrra rohkem soojust andma kui nüüd — leiame, et sest ajast on möödunud umbes 300 miljoni aastat. See arv on heas kokkukõlas maa vanuse määramisiga mitmete meetodide abil (radioaktiivsete kivistuste, geoloogiliste ajajärkude vältuse järele jne.).

Tõuseb lõpuks küsimus ülevalnimetud radioaktiivse energiaallika omaduste ja katastroofide sündimisviisi kohta. Peame kõige pealt tähendama, et radioaktiivsuse all mõistame siin mitte teatava ühe aine (raadiumi) omadust, vaid üldse muutusi aine aatomite koosseisus, näit. aatomite lagunemist ja massi muutumist energiaks; kohasem nimi oleks siin — aine aktiivsus.

Väga oluline küsimus tähtede evolutsiooni teoorias on — kas muutub või ei muutu aine aktiivsus välimiste tingimustega, peajasjalikult temperatuuriga ja rõhumisega. Maiseis katseis ei ole tähele pandud niisugust välistingimuste mõju radioaktiivsesse ilminguisse; kuid neis katseis pole meil võimalik muuta tingimusi sel määral kui see sünnib tähtede sisemuses; kui paarituhande kraadilise temperatuuri muutusega radioaktiivsus jääb mõjutamata, ei või me veel järeldada, et mitme miljoni kraadi juures see teisiti ei ole; ja nii kõrge peab olema temperatuur tähtede siseosades.

Tähtede sisemise ehituse uurimine on viimasel ajal suuri edusamme teinud Eddingtoni kiirgamis-tasakaalu teooria läbi. Selle teooria käsitamisel on Eddington raskusi leidnud tõsiasi järele seletamiseks sel juhtumisel, kui tähtede energiaallikana oletatakse aine aktiivsust, mis muutumata ja olenemata on välimisist tingimustest. Kuid peale nende raskuste, mida Eddington leidis, on üks, veel tähtsam. Nimelt, kui aine aktiivsus oleks tingimustest olenemata, ei võiks meie üldse tähtede tekkimist kujutella. Üldine arvamine on, et tähed on sündinud kas udugogude ehk meteorparvede, ühe sõnaga — kosmiliste pilvede kondensatsioonist. Kui aktiivsus kondensatsiooniga ei muutunud, pidi tema pilves

samasugune olema kui täheski; kuid Eddingtoni teooria põhjal võib näidata, et teatava aktiivsuse astme juures peab tähel teatav minimaalne mass olema: vastasel korral ei jõua tähe raskustung valgusrõhumisele vastu pidada ja täht paisub ilmaruumis laiali; nii siis, meie oletuse õige olles võiksid kosmilisest pilvest korraga tekkida ainult suured — tähesuurused — massid, kuna järk-järguline massi kogumine ühte sentri võimata oleks; kuid et suure massi kogumine ilma väiksete vahelülideta võimata näib olevat, tuleksime otsusele, et suurte masside olemasolu on üldse võimata. Kui selle peale vaatamata tähed ikkagi on olemas, tuleme otsusele — et meie oletus aine aktiivsuse muutumatuse kohta ei ole õige; kosmilises, väga madala temperatuurige ürgpilves pidi aktiivsus väike ehk isegi 0 olema. Nii siis järeldame, et aine aktiivsus muutub välimiste tingimusega — peaasjalikult temperatuuriga, kasvades temperatuuri tõusuga.

See järeldus on suure tähtsusega tähtede arenemisteooriale; nimelt võimaldub selle läbi osalt katastroofide põhjusest arusaamine. Vanad teooriad, mis katsuvad seletada uute tähtede tekkimist, peab suuremal osal mitterahuldavaiks tunnistama. Need teooriad, mis katastroofis tahtsid näha kokkupõrget välispoolse kehaga — tähega või udukoguga, — nõuavad, et Linnutee süsteemi mass miljonid korrad suurem oleks tema tõelisest massist; nii ei või meie neil vaateil peatama jääda. Rohkem tõenäone on seletus kokkupõrkega sama päikese süsteemi kehaga — planeediga ehk suure komeediga (ameeriklase See arvamine); kuid siin on raskuseks asjaolu, et kokkupõrge väikse kehaga ei või seda määratud energia hulka sünnitada, mis lõpuks terve tähe laiaks udukoguks muudab.

Paremini tõsiasjule vastaks, meie arvates, järgmine seletus. Nagu ülal nägime, peab tähe aine aktiivsus olenema temperatuurist; kuna tähe keskpaigas valitseb kõige kõrgem temperatuur, peab tähe energia produktsioon peaasjalikult seal sündima. Oletame, et teatava ühe aine aktiivsus peaasjalikult energiat sünnitab; kuna seda ainet leidub igas tähe osas, produtseerivad energiat ainult need aktiivse aine hulgad, mis on keskpaiga lähedal. Eddingtoni teooria põhjal näivad konvektsiooni voolud tähe sees misis osis peaaegu võimatud, igatahes väga haruldased nähtused olevat; ka on inglase S. Chapman näidanud, et gaaside diffusion tuhandete miljardite aastate jooksul ei või tuntavalt mõjuda ainete segamistegurina tähe sisemuses; nii jääb tähe rahulise

eluea jooksul energiakandjaks ainult see, võib olla väike, osa aktiivset ollust, mis asetseb keskpaiga lähedal; aja jooksul kahaneb see hulk ja tähe heledus kahaneb ka („radioaktiivne jahtumine“). Kuid oletame, et mõnel põhjusel — võib olla, mõne väikse kehakese (planeedi) tähe peale langemise tõttu — rikkub kaua väldanud tasakaal: ilmuvad konveksiooni voolud, ja suured aktiivse aine hulgad, mis seni olid tegevusetu väliseis kihes, satuvad tähe keskpaiga lähedale; temperatuuri tõusuga (mis kõige pealt suure rõhumise järelalus) algab värskel aine aktiivsus, tõuseb valguse rõhumine, mis tähe raskustungist suurem, ja nii laieneb täht, muutudes udukoguks: see on uue ilma algus, mis vana hukkumisest tekkinud.

Äratrükk „Tartu Ülikooli Tähetorni Kalender'ist“ 1924 a.

K. Mattiesen, Tartus.

TARTU ÜLIKOOLI  
RAAMATUKOGU

A

55878

i 191842941