

PERIODIKUS VÁLTOZÁSOK A CSILLAGOK SUGÁRZÁSÁBAN

SZEIDL BÉLA
A FIZIKAI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

Általános megjegyzések

A csillagok belső szerkezetét és fejlődését meghatározó fizikai törvényeket — úgy hisszük — jól ismerjük. Általában ismertek egy csillag belsejében lezajló lehetséges energiatermelő folyamatok és a felszabaduló energiának a csillag magjából kifelé történő áramlásának módjai, akár sugárzás, akár pedig konvekció útján valósul is meg. (A vezetésnek általában jelentéktelen szerepe van.)

A csillagot saját gravitációja tartja össze. A gravitációval a belső nyomás tart egyensúlyt, így egy normális csillag hidrosztatikus egyensúlyban levő gázgömbnek tekinthető.

A csillag élete során belsejében különböző energiatermelő folyamatok lépnek föl, melyek energiaprodukciója más és más. Így a csillag élete jól meghatározott szakaszokra bontható. A csillag belsejében először ${}_1\text{H}^1$ -ből ${}_2\text{He}^4$, majd ${}_6\text{C}^{12}$, ${}_{10}\text{Ne}^{20}$, ${}_{12}\text{Mg}^{24}$ és még nehezebb elemek épülnek föl. A viszonylag hosszú ideig tartó (10^5 — 10^{10} év) „fúziós” szakaszokat rövid idő alatt (10^3 — 10^6 év) lezajló gravitációs kontrakciós fázisok választják el egymástól. A magasabb szintű fúziós folyamatok beindulásához szükséges hőmérsékletre a gravitációs kontrakció során felszabaduló energia fűti föl a csillag magját. A leírt irreverzibilis folyamatok során a csillag mérhető jellemzői: fényessége, mérete és felszínének hőmérséklete változik.

A csillag állapotát, szerkezetét, méretét és fényességét tömege és kémiai összetétele (hidrogén, hélium és egyéb elemek aránya) egyértelműen meghatározza. Ha a gázgömb tömege kb. $0,05$ naptömegnél ($M_\odot$) kisebb, a centrális hőmérséklet nem érheti el azt a fokot, hogy a hidrogén-égés ($4{}_1\text{H}^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4$) meginduljon. Viszont kb. $50 M_\odot$ fölött a gázgömb instabil. Mindez azt jelenti, hogy a csillagok tömege és mérete korlátozott. A csillagok sugara általában 10^9 — 10^{14} cm közötti értékű.

A csillagot két független paramétere egyértelműen jellemzi. Minthogy a tömeg és kémiai összetétel közvetlenül nem mérhető, célszerű két, a csillag állapotát jellemző, mérhető mennyiséget választani. Ezek a csillag fényessége (luminozitása $= L =$ másodpercenként kibocsátott energia mennyiség) és felszínének effektív hőmérséklete (T_e). A $\log L - \log T_e$ sík az elméleti HERTZ-

SPRUNG—RUSSEL diagram, a csillagászatban általánosan használt legalapvetőbb állapot-diagram. Az

$$L = 4R^2 \pi \sigma T_e^4$$

összefüggés alapján (R a csillag sugara, σ a STEFAN—BOLTZMANN állandó) ez lényegében azonos a $\log R - \log T_e$ diagrammal.

A HERTZSPRUNG—RUSSELL diagramon (HRD) a csillagok jól meghatározott helyen, ágakon vagy sorozatokon helyezkednek el. Minden ág lényegében egy meghatározott energiatermelő folyamatnak felel meg. (Pl. a fősorozat a $4_1\text{H}^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4$ folyamatnak, ezért is nevezhetjük a fősorozatot hidrogén-ágnak.) A fejlődés során a csillagok egyik ágról a másikra jutnak, s meghatározott pályát írnak le a HRD-n.

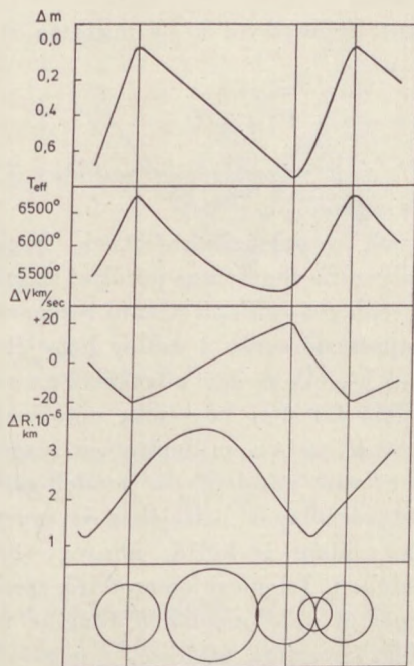
Periodikus fizikai változócsillagok

Alig több mint 300 éve, 1660-ban ismerték föl a csillagászok, hogy léteznek olyan csillagok is, amelyek periodikusan változtatják fényességüket. A FABRICIUS által 1596-ban felfedezett Omikron Ceti-ről (Mira) derült ki, hogy fényességét 11 hónapos periódussal változtatja. A megfigyelési technika fejlődésével a felfedezett periodikus fizikai változók száma rohamosan nőtt. Napjainkban már több mint 10 000 ilyen csillagot ismerünk. Periódusuk, fényváltozásuk menete alapján különböző típusokba lehet őket sorolni. A típusokat, karakterisztikus méretükkel, effektív hőmérsékletükkel és periódusukkal együtt az I. táblázatban adjuk meg.

A csillagok periodikus fényváltozása (eltekintve az ún. geometriai változóktól) együtt jár felszínük effektív hőmérsékletének változásával és atmoszfé-

I. táblázat

Típus	Prototípus	Számuk (1968-ban)	Karakterisztikus		
			hőmérséklet (K°)	méret (10^{16} cm)	periódus (nap)
β Cephei csillagok	β Cephei	23	24 000	?	0,2
Klasszikus cepheidák	δ Cephei	706	5 700	500	5–10
II. populációs cepheidák	W Virginis		6 100	500	12–28
RR Lyrae csillagok	RR Lyrae	4433	7 600	20	0,5
Törpe cepheidák	AI Velorum		8 000	10	0,1
δ Scuti csillagok	δ Scuti	17	8 000	10	0,1
Hosszú periódusú változók	α Ceti	4566	2 800	1300	270
Félig szabályos változók	α Herculis	2221	2 500	1500	100



1. ábra.

rájuk oszcilláló mozgásával. Az 1. ábra egy cepheida típusú csillag jellemzőinek változását (fényesség magnitúdóban, effektív hőmérséklet K° -ban, oszcilláló mozgás sebessége km/sec -ben, csillagsugár megváltozása 10^6 km -ben) mutatja egy ciklus alatt.

A periodikus változók többsége (cepheidák, RR Lyrae csillagok, törpe cepheidák) periódusukat szigorúan tartják, ezen csillagok esetében a periódus ΔP random változásai a periódus tízmilliomod részénél is kisebb. Ebből gyanítható, hogy a fényváltozást valami mechanikus jelenség szabályozza. A „kettőscsillag hipotézis” a megfigyelésekkel ellentmondásban van, míg a „pulzációs hipotézis”, mely szerint a csillag saját-periódusával pulzáló mozgást végez, a jelenséget jól leírja. AUGUST RITTER 1879-ben vázolta föl először a pulzáció elméletét. A legegyszerűbb esetben, homogén csillagok adiabatikus radiális pulzációját tételezve föl, meghatározta az alaprezgés f frekvenciáját:

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2} (3\gamma - 4) \frac{g}{R} = (3\gamma - 4) \frac{G\rho}{\pi},$$

ahol γ a fajhő hányados, g a felszíni gravitáció, R a csillag sugara, ρ a sűrűsége, míg G a gravitációs állandó. Azonosítva ρ -t az átlagos sűrűséggel, ez az egyszerű formula is már igen jó egyezést mutat a megfigyelésekkel. A pulzáció

elméletet A. S. EDDINGTON fejlesztette ki, s mutatta meg, hogy általános feltevések mellett is igaz a

$$P\sqrt{\bar{\rho}} = Q$$

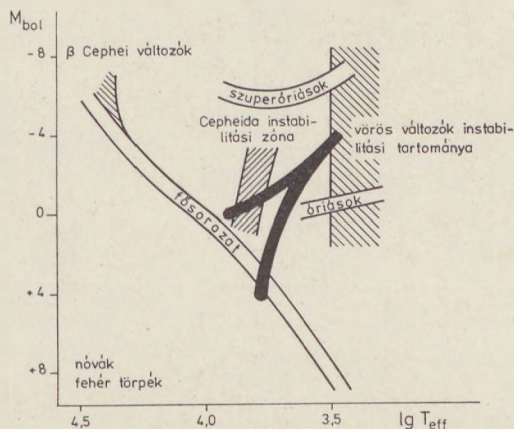
„periódus-sűrűség reláció”, ahol P a pulzációs periódus, $\bar{\rho}$ a csillag átlagsűrűsége, Q pedig a pulzációs állandó.¹

Alapvető kérdése volt a pulzációelméletnek, hogy a pulzáció során disszipálódott energiát milyen mechanizmus pótolja. Megfigyelési tény ugyanis, hogy a pulzáló változócsillagok csillapítatlanul rezegnek. EDDINGTON egyik elképzelése szerint a kompresszió során a csillag belsejében a nyomás és hőmérséklet emelkedik, ennek következtében növekszik a termonukleáris energia-termelés. Ha ez megfelelő fázisban történik, pótolhatja a pulzáció során disszipált energiát és fenntarthatja a csillapítatlan rezgést. Ez az elképzelés azonban ellentmondásban van mindenfajta modell-számolással. A termonukleáris reakciók a változócsillagok belsejében is egyenletesen termelik az energiát, és a csillagnak csupán legkülső, mintegy 0,02 sugárnyi vastag burka vesz részt a pulzációban. Jelenlegi ismereteink szerint az atmoszférában az opacitásnak² a nyomástól való megfelelő függése idézi elő a pulzációs instabilitást. Ha a csillagatmoszféra átlátszó, a sugárzási energia szabadon kifolyik, és a csillag fényesnek látszik. Ha az opacitás megnő, a sugárzási energia jelentős részét az atmoszféra elnyeli, s a csillag halvány lesz. Ha a csillag éppen össze van nyomva, amikor az opacitás a legnagyobb, a sugárzás jelentős része befogódik, s ez ahhoz vezet, hogy a csillag külsőbb rétegeire a nyomás megnő. Ez a folyamat szolgáltatja az energiát a pulzáció fenntartásához. A hidrogén és az első hélium ionizációs zóna (mely cepheidáknál a felszíntől csupán néhány 10 000 km-es mélységben van) rendelkezik azzal a tulajdonsággal, hogy a nyomás növekedésekor opacitása megnő. Ha a H és He ionizációs zóna megfelelő mélységben van, akkor a vázolt mechanizmus fenntartja a pulzációt. Sőt, az atmoszférában elegendő egy kis zavar ahhoz, hogy a pulzáció beinduljon.

A pulzációs változók a HERTZSPRUNG—RUSSELL diagram igen jól meghatározott, szűk tartományokban helyezkednek el (2. ábra). Ezeket a tartományokat instabilitási zónáknak nevezzük. Ha egy csillag fejlődése során egy ilyen zónán áthalad, változócsillaggá válik. Minthogy a cepheida instabilitási zóna centrális helyet foglal el a HRD-on, jelentősége különösen nagy. Egy csillag élete során többször is áthaladhat rajta. A β Cephei és vörös változók instabilitási övezeteinek meglétét még nem értjük kielégítően. Viszont

¹ A mechanikus sajátrezgés periódusát meghatározó $PM^{1/2}R^{-3/2} = \text{állandó}$ periódus-sűrűség reláció lényegét jobban megérthetjük, ha emlékezünk arra, hogy a III. KEPLER-törvény is hasonló alakú: $PM^{1/2}a^{-3/2} = \text{állandó}$, ahol P a keringési periódus, M a centrális tömeg, a pedig a pálya fél nagytengelye.

² Opacitás az egységnyi tömegű anyag által elnyelt sugárzási energia mennyisége.



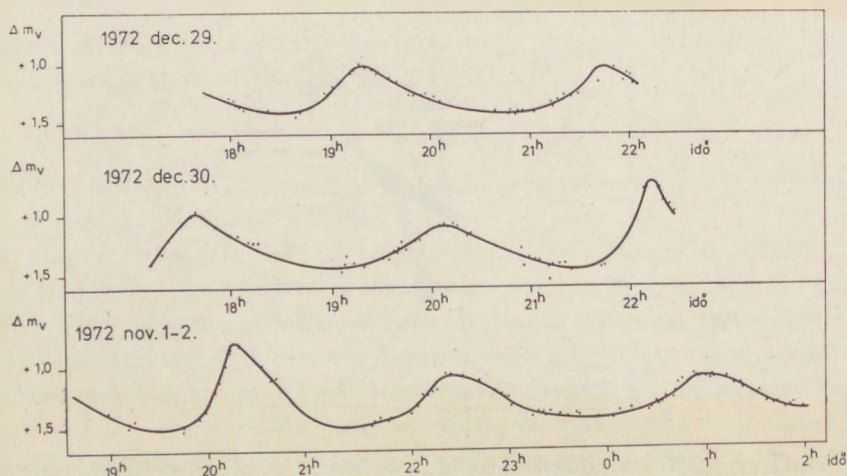
2. ábra. HERZSPRUNG-RUSSEL diagram. $\lg T_{\text{eff}}$: a felszíni hőmérséklet logaritmus; M_{bol} : a fényerősség magnitúdója. Az erős fekete kétágú görbe az ún. kettős populációs objektumokat jelöli

a cepheida instabilitási zónát az előbb vázoltak alapján tudjuk magyarázni, a határokat kvantitatíve is meg tudjuk adni. A hélium-ionizációs zóna mélysége a csillag állapotától függ, amely végső soron meghatározza a HRD-ben elfoglalt helyét is. Ha az ionizációs zóna túlságosan mélyen van, vagy pedig túlságosan közel van a csillag felszínéhez és vékony, instabilizáló hatását nem tudja kifejezni.

Gyakori jelenség a pulzációs változócsillagok között a többszörös periodicitás, melynek többféle oka is lehet. A cepheidáknál és törpe cepheidáknál előfordul, hogy a csillag nemcsak alapperiódusával pulzál, hanem első és második felharmonikus rezgéseket is végez. Példaként az RV Arietis nevű törpe cepheidát említjük, melynek $P_0 = 0,09313$ napos alaprezgését a $P_1 = 0,07195$ napos első felharmonikus rezgés modulálja. A 3. ábra az RV Arietisről 1972-ben három különböző éjszaka végzett megfigyeléseinket mutatja. Jól látható, hogy a fénygörbe két rezgés szuperpozíciójaként áll elő.

Az egyidejűleg alap és felharmonikus periódussal pulzáló változók azért tettek különös jelentőségre szert, mert a többszörös periódusok ismeretében ezen csillagok mérete és tömege meghatározható, ugyanakkor a csillagok belső szerkezetéről alkotott elképzeléseink ellenőrizhetők.

Különleges többszörös periodicitással rendelkezik némely RR Lyrae típusú változócsillag. A másodlagos periódusok (általában 20–100 naposak) a csillagok rotációs periódusával azonosíthatók. A másodlagos fényváltozás valószínűleg azáltal jön létre, hogy a rotációs tengelyre nem szimmetrikus mágneses tér deformálja a pulzáló csillagot. Mint ahogy a mágneses tér napciklus jellegű változásoknak is alá van vetve feltehetőleg, hosszú, többéves ciklusok létezése is várható. Valóban megfigyelhető több RR Lyrae csillag



3. ábra.

esetében hosszú, 4—20 éves periodicitás. (Pl. az RR Lyrae maga is rendelkezik egy 4 éves ciklussal.) A többszörös periódusú RR Lyrae típusú változók vizsgálatában DETRE LÁSZLÓ akadémikus végzett úttörő munkát.

Mindezek után felvetődik a kérdés, hogy mi tekinthető a pulzáló változócsillag jellemző periódusának. Ésszerű az alapperiódust elfogadni, s a változócsillagot ezzel az értékkel behelyezni a SZÁDECZKY-KARDOSS ELEMÉR akadémikus által felvázolt periódus—karakterisztikus méret diagramba. A pulzáló változócsillagok a mechanikai anyag frekvenciasorozatára illeszkednek.