

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR  
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

# Aktivitás csillagokon és iskolában

Szakdolgozat

Készítette: Csorvási Róbert, V. éves fizika hallgató  
Témavezető: Dr. Szatmáry Károly, egyetemi docens  
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged, 2008

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>3</b>
<b>2. A csillagok általános felépítése</b>	<b>4</b>
<b>3. Változócsillagok</b>	<b>6</b>
<b>4. A Nap, mint aktív csillag</b>	<b>8</b>
<b>5. Aktív csillagok</b>	<b>13</b>
5.1. Aktív csillagok kutatásának rövid története . . . . .	13
5.2. Aktív csillagok típusai . . . . .	14
5.3. Csillagfoltok megfigyelési technikái . . . . .	16
5.3.1. Fotometriai módszerek . . . . .	16
5.3.2. Doppler térképezés . . . . .	17
5.3.3. Összehasonlítás . . . . .	17
5.4. Aktivitási jelenségek más csillagokon . . . . .	19
5.4.1. A mágneses aktivitás a rotáció és a konvekció tükrében . . . . .	19
5.4.2. Poláris foltok . . . . .	21
5.4.3. Flip–flop jelenség . . . . .	22
5.4.4. Aktivitási ciklushosszak és asztrofizikai jelentőségük . . . . .	26
5.4.5. Aktív csillagok a "fiatal" Nap vizsgálatának szolgálatában . . . . .	28
5.4.6. Élet az M és K spektráltípusú törpe csillagok körül . . . . .	30
<b>6. Mire tanítanak a csillagok?</b>	<b>34</b>
6.1. Tanórába integrálható ismeretek . . . . .	34
6.1.1. A csillagok forgási sebessége . . . . .	34
6.1.2. Erők egy csillagon . . . . .	35
6.1.3. A rejtett merev test . . . . .	37
6.1.4. Hőterjedés formái . . . . .	38
6.1.5. Áram vezetés . . . . .	39
6.1.6. Mágneses indukció . . . . .	40
6.1.7. Csillagok hőmérsékleti sugárzása . . . . .	40
6.2. Alternatív lehetőségek . . . . .	41

6.2.1. Projektmódszer . . . . .	42
6.2.2. Brain storming . . . . .	44
6.2.3. Manuális készségek alkalmazása . . . . .	45
6.3. Összefoglalás . . . . .	47
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>48</b>
<b>Hivatkozások</b>	<b>49</b>

# 1. Bevezetés

Napjainkban a természettudományos tárgyak oktatása jelentősen háttérbe szorult a humán tárgyak előnyére, melynek tekintve az óraszám/ teljesítmény arányát nincsen tapasztalható eredménye. A 21. században, mikor technikai civilizációt építünk, fontos lenne, hogy a diákok alapvető fizikai ismeretek birtokában hagyják el az iskolát.

A közelmúltban és közeljövőben számos, fontos esemény és évforduló mutatott, mutat rá arra, hogy a természettudományok fontos szerepet töltenek be mindennapi életünkben, mondhatjuk, napjainkban nélkülözhetetlen részévé váltak társadalmunknak, kultúránknak. Ilyen volt 2005 a Fizika nemzetközi éve <sup>1</sup>, vagy 2007 a Heliofizika nemzetközi éve, <sup>2</sup>, 2008 a Föld éve <sup>3</sup>, és ilyen lesz 2009 a Csillagászat nemzetközi éve <sup>4</sup>. Mindezek mellett nemrég ünnepelethettük az űrkorszak 50 éves évfordulóját.

Sajnos az attitűd vizsgálatokból tudjuk (pl.: Papp & Józsa (2000)), hogy a fizikát szeretik legkevésbé diákjaink, melyet saját tapasztalataim is alátámasztanak. Magyarországon a reál diplomások aránya nagyon alacsony, mely a munkaerő piacnak sem kedvez. A dolgozatom egyik célja, hogy ismeretterjesztő szinten bemutassam a csillagászat egy szűk, ugyanakkor izgalmas és fontos területét, ez az aktív csillagok (vagy foltos változócsillagok) világa, innen ered dolgozatom címének első fele. Másik célja, hogy olyan szakmódszertani ötleteket vessek fel, melyek kapcsolódnak a dolgozat témájához és beépíthetők az iskolai tanórába, vagy egy csillagász szakkör foglalkozásaiba, ezáltal növelve a diákok aktivitását, belső motivációját. Innen ered dolgozatom címének második fele.

Két rövid fejezetben általános ismereteket közlök a csillagokról és a változócsillagok színes világáról. Ezt követően a hozzánk legközelebbi csillaggal, Napunkkal foglalkozok. Mindazokat a megfigyelhető jelenségeket áttekintem, melyek aktivitásával kapcsolatosak és vissza fognak köszönni az aktív csillagoknál. A Nap után részletesen bemutatom az aktív csillagokat és írok arról is, hogyan segíthetnek megérteni Csillagunk működésének megértését. A fent említett fejezeteket követően a középiskolában oktatott fizika egyes témaköreit áttekintve, ahol lehet, egy–egy a témához kapcsolódó feladatot, ötletet mutatok be.

---

<sup>1</sup>[www.wyp2005.org](http://www.wyp2005.org)

<sup>2</sup>[ihy2007.org](http://ihy2007.org)

<sup>3</sup>[www.foldev.hu](http://www.foldev.hu)

<sup>4</sup>[www.astronomy2009.org](http://www.astronomy2009.org), [www.csillagaszat2009.elte.hu](http://www.csillagaszat2009.elte.hu)

## 2. A csillagok általános felépítése

A 20. század egyik nagy eredménye a csillagok életútjának részletes elemzése és belső szerkezetük leírása. Több, mint 90%–ban ismerjük a csillagok életútját, ugyanakkor nagyon sok mindent még nem tudunk, melynek oka, hogy bizonyos fejlődési fázisok nagyon gyorsan végbe mennek, és ezekről kevés megfigyelés áll rendelkezésünkre. A csillagok leírásához szükség van ún. állapotathározókra, melyek ismeretében azt mondhatjuk, hogy egy csillagot ismerünk. Ezek: tömeg, luminozítás<sup>5</sup>, sugár, rotációs(forgási) periódus, hőmérséklet, mágneses térerősség, kémiai összetétel.

A csillagok – a bolygóktól eltérően – azért fénylenek, mert belső energiatermelésük van. Nagyon sokáig nem volt ismert, milyen folyamat termeli ezt az energiát. Hosszú és rögös út vezetett az égő széngolyó elmélettől egészen az először Hans Bethe által kidolgozott termonukleáris fúzió elméletéig. A termonukleáris fúzió során több millió Kelvin hőmérsékleten, és magas nyomáson könnyű atommagok ütköznek, mely során energia szabadul fel. Érdeemes átgondolni, hogy egy csillag energiatermelése egycsapásra megoldaná az emberiség hosszútávú energia problémáját, így nem is lenne más dolgunk, mint lemásolni, hogyan működik és készen vagyunk. Sajnos a probléma ennél jóval bonyolultabb, ahogy említettük, még a csillagok működését sem értjük teljes mértékben. (A témával részletesen foglalkozik a Magyar Euratom Fúziós Szövetség honlapja, mely a [www.rmki.kfki.hu/plasma/fusion](http://www.rmki.kfki.hu/plasma/fusion) webcímen található meg.)

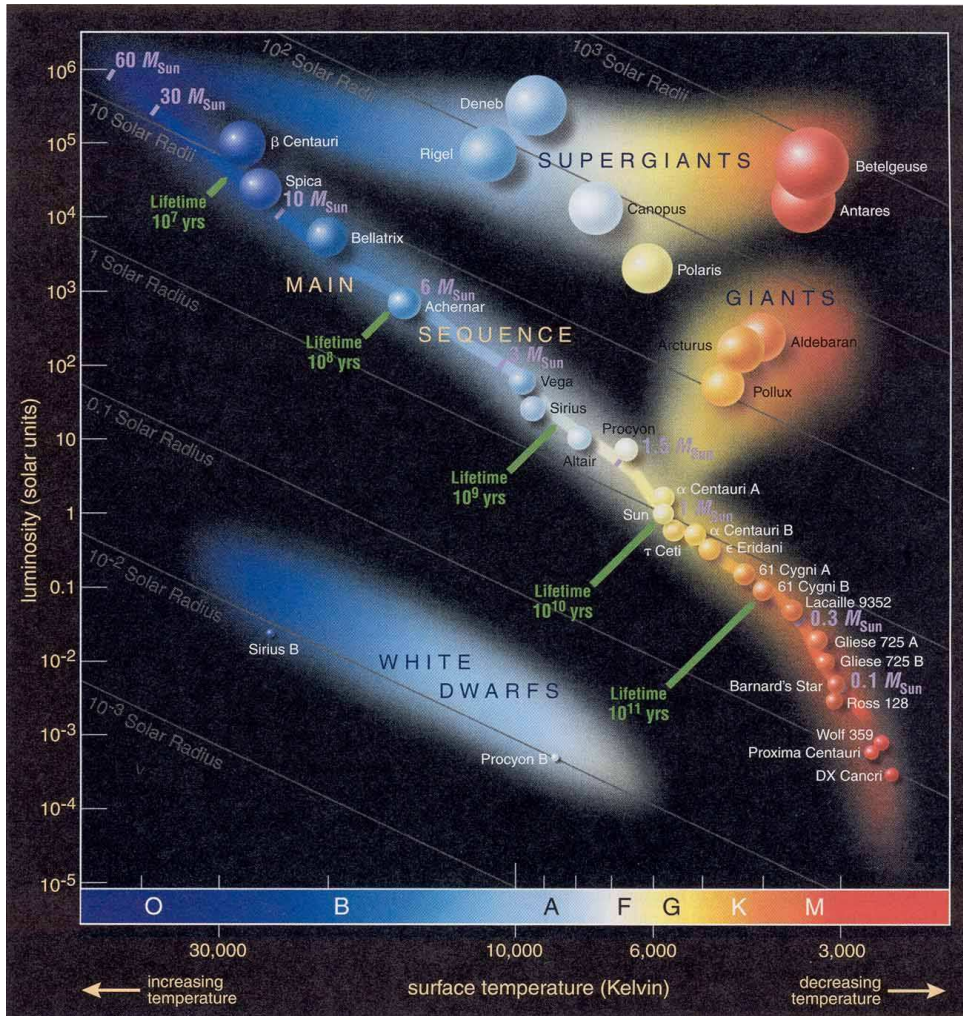
A csillagászat egyik legfontosabb ábrája a Hertzsprung–Russell diagram. Már 1905–ben Hertzsprung észrevette, hogy egy adott színképtípushoz (vagy felszíni hőmérséklet-hez) több különböző luminozítású csillag tartozik, majd Russell volt az, aki 1913–ban elkészítette a diagramot. A H–R diagram lehetővé teszi, hogy nyomon követhessük egy csillag életútját, módosított változatai további alkalmazásokat tesznek lehetővé (csillaghalmazok vizsgálata, távolságmeghatározás, stb.).

A H–R diagram több ágra bomlik. A legtöbb csillag a jól kirajzolódó fősorozaton helyezkedik el, melynek oka, hogy a csillagok életük nagy részét itt töltik. A fősorozatból ágazik az óriás ág, felette pedig a szuperóriás csillagok találhatóak. A fősorozat alatt helyezkednek el a fehértörpék.

A fősorozat elhelyezkedésére a Vogt–Russell tétel ad magyarázatot, miszerint ha a tömeg, luminozítás, sugár közül valamelyik ismert, akkor a többi meghatározható.

---

<sup>5</sup>Egy csillag időegység alatt kisugárzott összes elektromágneses energiája.



1. ábra. Hertzsprung–Russell diagram. Vízszintes tengelyen a spektráltípus és felszíni hőmérséklet, míg a függőleges tengelyen a luminozitás szerepel. Forrás: Internet

Az infravörös csillagászat fejlődésével a csillagok keletkezésének vizsgálata vezető terület lett napjaink csillagászatában. A születés, keletkezés az Univerzum óriási por-, gázfelhőiben történik. Ilyenkor a felhő külső hatások miatt (pl. egy közeli szupernóva robbanás lökéshulláma) elkezd összehúzódni. Az összehúzódás korai fázisában a felhő van annyira átlátszó, hogy a potenciális energia megváltozásából eredő, és sugárzás formájában távozó hőmennyiség szabadon távozzon. Ezt izotermális szakasznak nevezzük. Ezt követően a sűrűség elér egy olyan értéket, amikor a sugárzás már elnyelődik, ilyenkor a felhő összehúzódása megáll, és fragmentumok alakulnak ki, melyek aztán tovább folytatják összehúzódásukat. Később teljesen konvektívvé válik

a belseje, és a csillagkezdemény (protocsillag) összehúzódásának ütemét a konvekció által elszállított energiamennyiség határozza meg. A protocsillagok fejlődési útját a H–R diagramon az ún. Hayashi vonal írja le, melynek lefutását a tömeg határozza meg, ahogy azt is, hogy hol lép a fősorozatra a csillag.

A termonukleáris fúzió beindulásával a csillag rákerül a fősorozatra és megkezdí életét. Az alacsony tömegű csillagok hosszú időt töltenek el a fősorozaton, ellentétben a nagy tömegű csillagokkal, melyek pár millió év alatt elfejlődnek onnan. A csillagok életük legnagyobb részét a fősorozaton töltik, melyről a H–R diagram is árulkodik, mivel ez az ág rajzolódik ki a legjobban az összes többi közül. A kis tömegű csillagok, mint például Napunk is, milliárd évekig tartozkodik itt, majd felélve hidrogén és hélium készleteit felfúvódik és óriás csillaggá válik, ezt követően ledobja külső burkát és fehér törpeként fejezi be életét. A közepes és nagy tömegű csillagok hasonló életpályát futnak be, de életük végén felrobbannak és egy neutroncsillag vagy feketelyuk marad hátra, melyet körülvesz az ún. szupernóva maradvány.

Látható, hogy a legfontosabb állapothatározó a tömeg, mivel születéstől a csillag haláláig meghatározza, milyen életutat fut be, mennyi ideig él, mi lesz vele halála után és amiről még említést kell tenni, milyen a belső szerkezete.

A nagy tömegű csillagok esetében a konvektív zónát a sugárzási zóna követi, míg a nap–tömegű csillagoknál ez fordítva van. A kis tömegű csillagoknál pedig nincsen sugárzási zóna, azaz teljes egészében konvektívek (2. ábra). Az egyes zónák szerepéről részletesen szó lesz a 4. fejezetben.

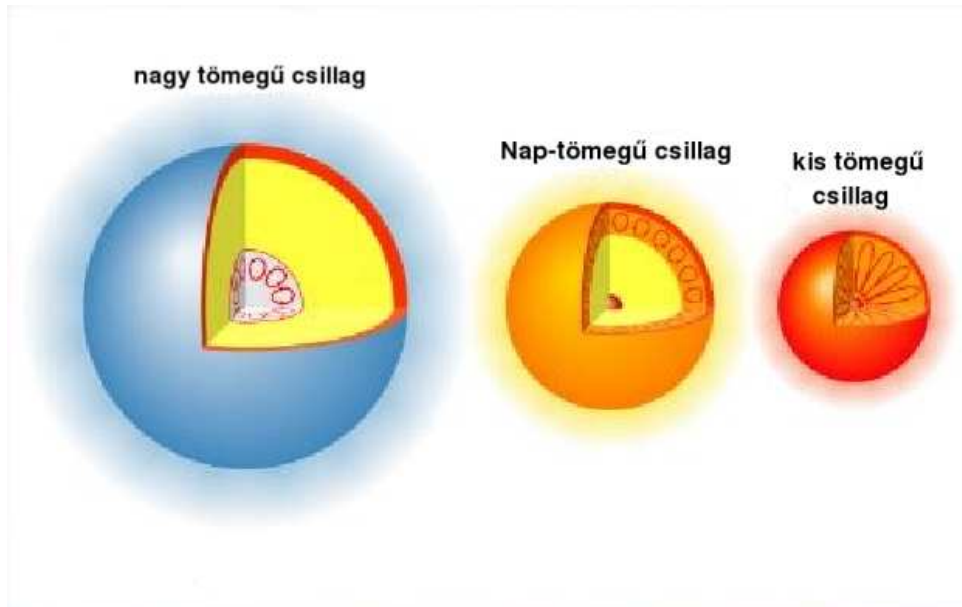
### 3. Változócsillagok

A csillagok világa rendkívül színes. Felvetődhet a kérdés, hogy miként tudhatunk meg bármilyen információt egy csillagról, ha távolságuk miatt távcsöveinkben ugyanolyan fénypontnak látszanak, mint az égen szabadszemmel.

A csillagok "beszélnek" hozzánk, változtatják fényességüket. A fényességváltozásnak sok oka lehet, melyet megfejtve a csillagok természetére lehet következtetni. Fizikájukat és fényváltozásukat tekintve öt nagy csoportba sorolhatók:

#### 1. Katakizmikus változók

Nagyon sokáig nem mutatnak jelentős fényváltozást, majd hirtelen kifényesednek. Ide tartoznak a nóvák és szupernóvák. A nóvák esetében a csillag felszínén



2. ábra. Különböző tömegű csillagok szerkezete. Forrás: Internet

vagy az akkréciós korongban történik robbanás, míg a szupernóvák esetén a csillag robban fel.

## 2. Pulzáló változók

A pulzáló csillagok egyik része nagyon szabályos, míg másik része félszabályos fényváltozást mutat. Ezeknél a csillag mérete időben változik. Összetettebb esetekben a csillag felszínén is hullámok vonulnak végig. Ezen csillagok vizsgálata fontos, mert többek között rajtuk keresztül térképezhetjük fel a csillagok belső szerkezetét (Ezzel foglalkozik az asztroszeizmológia).

## 3. Fedési változók

A fényváltozást az okozza, hogy két vagy több csillag kering a rendszer közös tömegközéppontja körül, néha elfedik egymást és lecsökken a rendszer fényessége. Ide sorolhatjuk azokat az exobolygó rendszereket, ahol a bolygó elfedi a csillaga egy részét.

## 4. Eruptív változók

A csillag fényváltozása szabálytalan, melyet a csillaglégkörben bekövetkező robbanások okoznak. Részben ezek természetéről lesz szó a dolgozatban.



## 5. Rotáló változók

A fényváltozás félszabályos, melyet a csillag átlagos felszíni hőmérsékleténél alacsonyabb hőmérsékletű területek, foltok okoznak.

A felvázolt kép ennél bonyolultabb, mivel egy csillag több csoportba is besorolható. Például a Nap pulzáló változó, mert felszínén hullámok futnak végig (naprezgések), de fedési változó is, mivel a körülötte keringő bolygók eltakarva csökkentik fényességét. A felszínén megfigyelhető foltok miatt rotáló változó, a légkörében bekövetkező robbanások (flerek) miatt pedig eruptív tulajdonságok jellemzik. Egyedül a kataklizikusok csoportjába nem sorolható be.

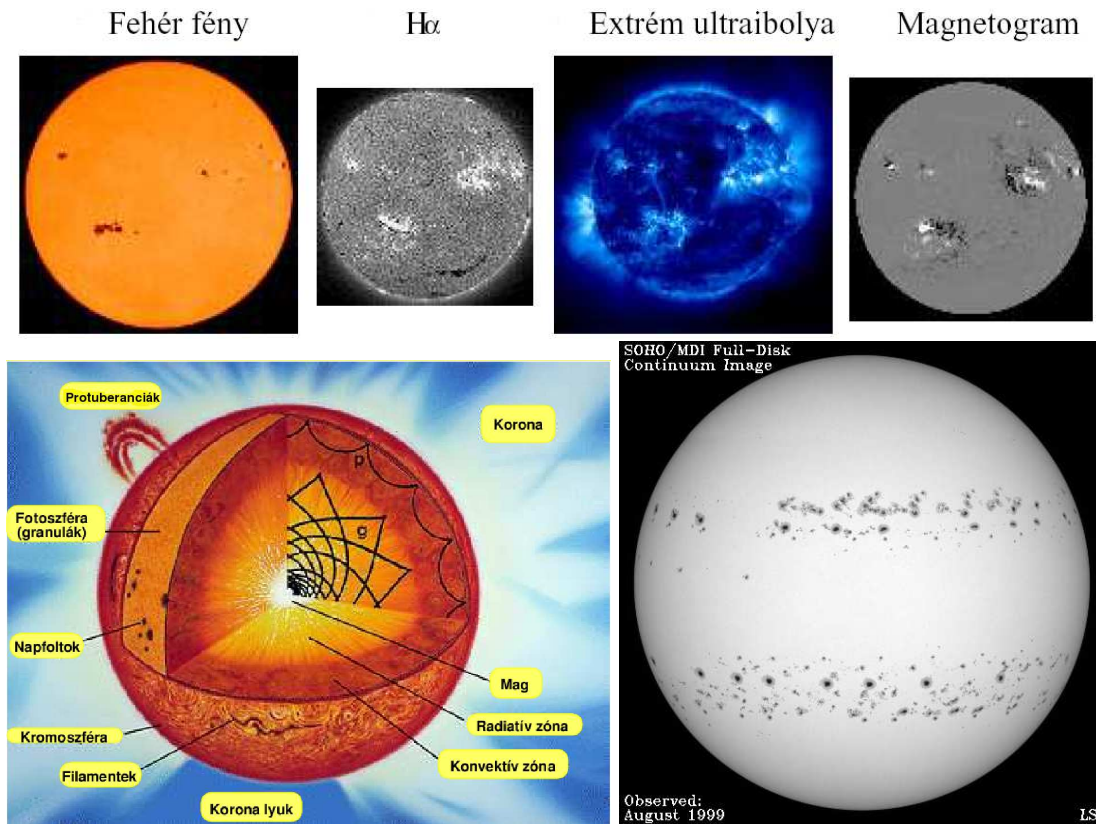
A dolgozat egyik fő témája az eruptív és rotáló (foltos) csillagok. Először a Napot, mint aktív csillagot jellemzem, majd ezután az aktív csillagokról írok.

## 4. A Nap, mint aktív csillag

Az aktivitás a mágneses energia hővé, nem termális részecskékké és kinetikus energiává való átalakulása, mikor a mágneses tér energiája túllép egy határértéket. A mágneses tér energiája különböző mechanizmusokon keresztül juthat magasabb energia állapotba, melyeket összefoglaló néven dinamómechanizmusoknak nevezünk. Minden, amit a Napon megfigyelhetünk, mágneses terének köszönhető. Az aktivitási jelenségek rövid tárgyalása előtt tekintsük át a Nap felépítését (3. ábra, lent balra).

Magjában magas nyomáson és kb. 15 millió fokon zajlik a termonukleáris fúzió. Mindez a folyamat a Nap sugarának 0.3 részében történik. Ezt követi a sugárzási zóna, melyben a létrejött elektromágneses energia sugárzással terjed tovább a konvektív zóna aljáig. A sugárzási zóna és a konvektív zóna között húzódik a tachoklína (melynek fontos szerepe van az aktivitás létrehozásában), ahol a fizikai viszonyok (hőmérséklet, nyomás) nagyon gyorsan megváltoznak. A hőmérséklet gyorsan lecsökken, az anyag átlátszósága lecsökken (azaz opacitása megnő). A sugárzást felváltja a turbulens energia szállítási forma. Ezt a réteget konvektív zónának nevezzük. A csillagoknak nincsen szilárd felszíne. A felszín az a rész, ahonnan a megfigyelhető sugárzás több mint 90%—a érkezik hozzánk. Ezt fotoszférának nevezzük, mely egy nagyon vékony réteg. A fotoszférát a kromoszféra követi a Nap légkörében. Ennek nincsen már éles határa, így elég nehéz elkülöníteni a legkülső tartománytól, a Nap koronájától. A korona egy

ritka, de helyenként kb. egymillió fokos gáz, anyaga folyamatosan megy át a bolygóközi tér anyagába, így nincsen határa.



3. ábra. A Nap különböző hullámhosszakon (felül). Ott fordulnak elő az aktivitási jelenségek, ahol a magnetogram erős mágneses teret mutat. A Nap szerkezete (lent balra). A SOHO űrszondával készült egy hónapos kompozit felvétel látható tartományban (lent jobbra). Jól látható, hogy +/- 40° között jelennek meg a foltok és az egyenlítő felé mozognak. Forrás: Internet

A Napon megfigyelhető aktivitási jelenségek a fotoszférában, kromoszférában és a koronában vannak jelen. A hőmérséklet a fotoszférától a koronáig növekszik, így más–más hullámhosszon más–más réteget vizsgálhatunk és más–más jelenségeket figyelhetünk meg. Ezt használjuk ki az aktív csillagok esetében is.

A fotoszférát a látható tartományban vizsgálhatjuk, itt fordulnak elő a napfoltok, melyek az átlagos 6000 fokos felszíni hőmérsékletnél kb. 1000–1500 fokkal hidegebb területek. Két részük van, a belső sötét umbra és a külső halványabb penumbra. Általában jelenlétük fáklyamezőkkel párosul, ezek melegebb és fényesebb területek a felszín-

nél. A  $H\alpha$  vonalán<sup>6</sup> vizsgálhatjuk a kromoszférot, itt fordulnak elő a kromoszferikus "plage" területek és filamentek, illetve protuberanciák, amik anyaghídként nyúlnak ki a koronába is. Az extrém ultraibolya és röntgen tartományban a koronában zajló folyamatokat örökíthetjük meg. Itt óriási koronakilövelléseket – ilyenkor nagy mennyiségű töltött részecske hagyja el a Napot – és koronalyukakat figyelhetünk meg. A felsorolt jelenségeket összefoglaló néven aktivitási jelenségeknek nevezzük.

Ezek egy jól meghatározott helyen kb.  $\pm 40$  fok szélesség értékek között fordulnak elő (lásd 3. ábra, lent jobbra). Gyakoriságuk (mely az aktivitás erősségével van kapcsolatban) kb. 11 éves periódussal változik (5. ábra), illetve létezik egy bizonytalanabb kb. 90 éves periódus is, melyet Gleisberg ciklusnak nevezünk. További érdekesség, hogy 1645 és 1715 között a Nap aktivitása jelentősen lecsökkent, melyet Maunder minimumnak neveztek el. Az elhalt élő szervezetek  $^{14}\text{C}$  izotópos vizsgálatával sikerült megállapítani, hogy kb. 200–300 évenként következik be nagyobb aktivitás csökkenés. A naptevékenység kis és hosszú időskálás változása egyértelműen kihat a földi életre. Nem cél, hogy részletesen tárgyaljuk ezeket, mivel Klein Tamás szakdolgozatában részletesen ír ezekről<sup>7</sup>, de néhányat megemlítek.

Az érzékeny műszerekkel ellátott űrszondák segítségével sikerült kimérni, hogy a napállandó értéke kb. 0.2%–ot változik az aktivitással korrelálva (5. ábra). A napállandó<sup>8</sup> az éghajlatot befolyásoló egyik tényező. A Napról érkező töltött részecske záporok és befagyott mágneses tér komoly gondokat okoz(hat)nak a földi távközlésben és áramellátásban. Erre példa Kanada esete. 1989–ben az áramszolgáltatás nyolc órán át szünetelt, mivel a mágneses viharok köszönhetően a vezetékekben túláram keletkezett, mely károkat okozott. Elképzelhető, hogy hatása van az élő szervezetre is. Egyelőre nem bizonyított. A felsorolt példák alapján látható, hogy mennyire fontos lenne, ha előre tudnánk jelzni eseményeket a Napon. Ehhez az kell, hogy megértsük a Nap működését.

A legelfogadottabb elmélet szerint a Nap kezdetben poloidális mágneses tere a differenciális rotációnak köszönhetően spagetti–szerűen feltekeredik és a konvektív zóna alján stabil toroidális fluxuscsöveket alkot. Instabilitások miatt, a fluxuscsövek kisza-

---

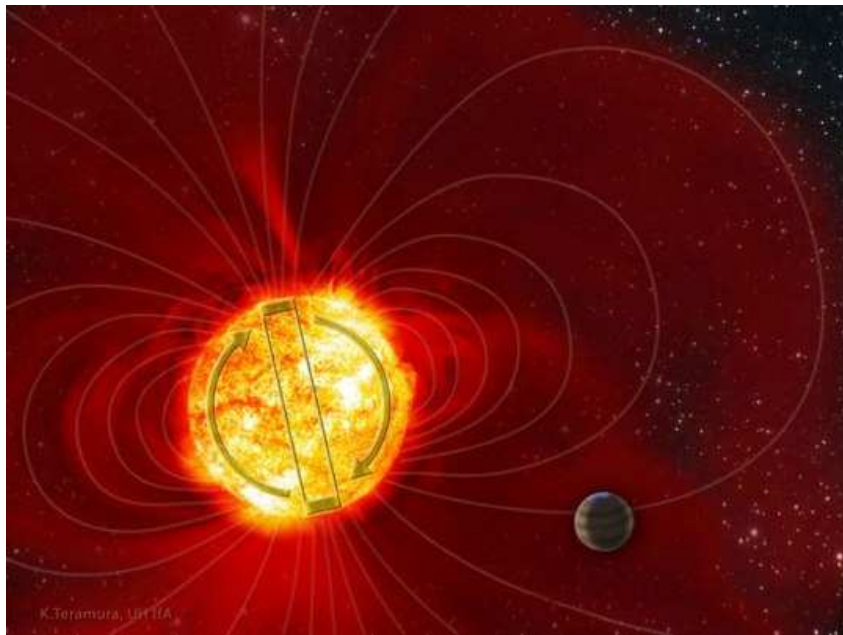
<sup>6</sup>A hidrogén Balmer sorozatának egyik vonala, hullámhossza 656 nm.

<sup>7</sup>[astro.u-szeged.hu/szakdolgoz/kleint/index.html](http://astro.u-szeged.hu/szakdolgoz/kleint/index.html)

<sup>8</sup>Megadja, hogy átlagos Föld–Nap távolságban, a légkör felső határán, a sugárzás haladási irányára merőleges egységnyi felületre időegység alatt mennyi energia esik. Elfogadott átlagos értéke  $1366 \text{ W/m}^2$ .

kadnak a toroidális rendszerből, és a felhajtó erő miatt megkezdik útjukat a konvektív zónán keresztül. A felszínre bukkanva létrehozzák az ismertetett aktivitási jelenségeket. Sajnos a jelenlegi elméletek nem tudják megmagyarázni pontosan, hogyan áll helyre a poloidális mágneses tere a Napnak.

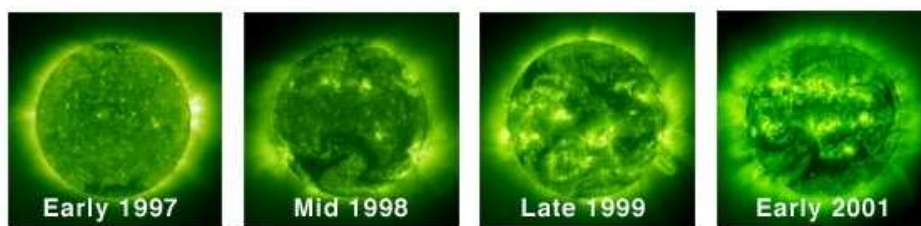
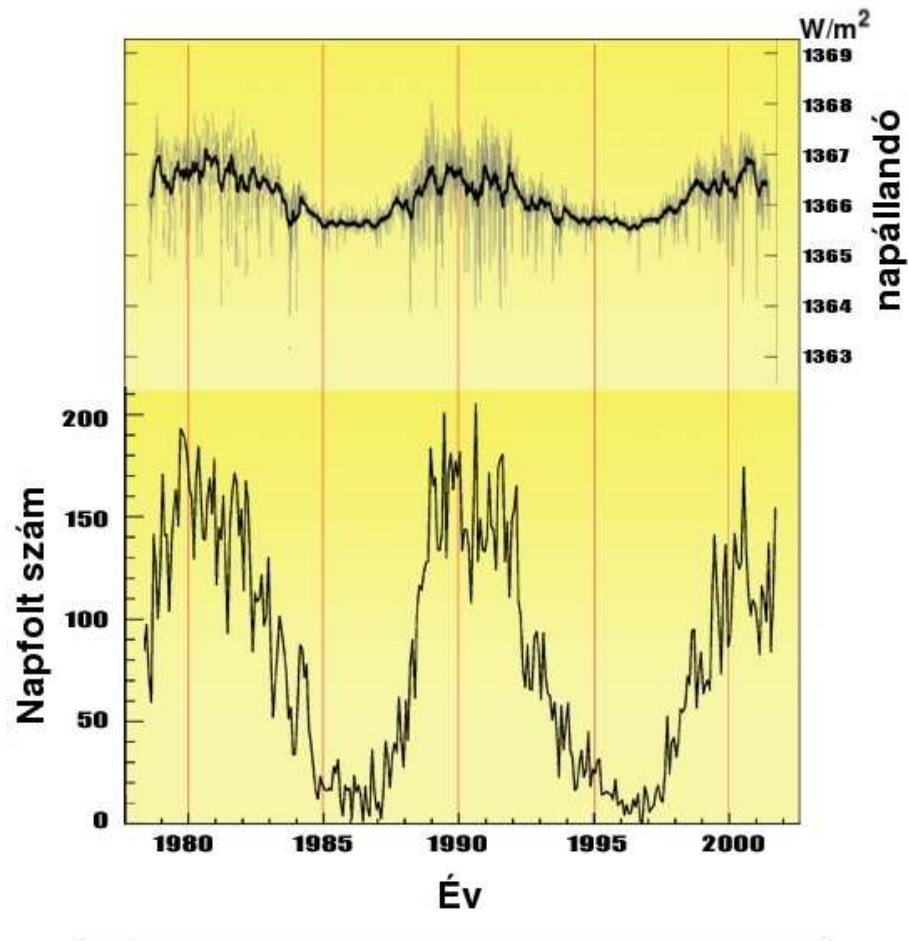
A kérdés az, hogy az ismertetett dinamó modell más csillagoknál is így működik-e, van, vannak-e olyan paraméterek, melyekkel a Nap aktivitási szintje tetszőlegesre skálázható? Az aktivitás forrása a mágneses tér. Ezért elsősorban a mágneses tér keletkezéséért felelős fizikai folyamatokat kell vizsgálni csillagról csillagra.



4. ábra. Illusztráció a  $\tau$  Bootisről és bolygójáról. A mágneses mező szerkezetét és irányát a csillagba rajzolt rúd-mágnes, illetve ennek erővonalai szemléltetik. Forrás: [hitek.csillagaszat.hu](http://hitek.csillagaszat.hu)

Példaként említeném a  $\tau$  Bootis nevű csillagot, mely nagyon hasonlít Napunkhoz (4. ábra). Francia kutatók és munkatársaik a csillag mágneses terének irányát vizsgálták. A megfigyelési időszak két éve alatt az átfordult. Első alkalommal sikerült a Napon kívül más csillagnál is kimutatni a mágneses pólusok átfordulását. Az eset kiemelt fontosságú, mivel a csillagnak van egy a Jupiterünknél mintegy 6.5-szer nagyobb kísérője is. Az a tény, hogy a mágneses tér átfordulását a megfigyelés rövid, két éves időszaka alatt sikerült észlelni, arra utalhat, hogy a  $\tau$  Bootis esetében a mágneses ciklus (Nap mágneses ciklusa 22 év) jóval rövidebb lehet, mint a Napnál. Mindazonáltal

a bolygó fontos szerepet játszhat a mágneses tér kialakulásáért felelős, a csillag belsejében zajló folyamatok irányításában. Ezekhez hasonló megfigyelések visznek közelebb a Nap működésének jobb megértéséhez.



**A Nap változása négy év alatt**

5. ábra. A napállandó és a foltok száma közötti összefüggés (fent). A Nap kromoszférájának változása az 1997-es napciklus kezdetétől 2001-ig. Forrás: Internet

## 5. Aktív csillagok

### 5.1. Aktív csillagok kutatásának rövid története

Elsőként a foltos változók fizikai modelljének alapgondolatát Ismael Boulliau fekteti le 1667–ben. Az *o* Ceti (Mira) fényváltozásait vizsgálva leírja, hogy a csillag egyik féltekéje fényesebb, mint a másik, s ez a tengely körüli forgás következtében fényességváltozást okoz (ma már tudjuk, hogy más okok vannak a háttérben ennél a csillagnál). A XVIII.-XIX. században rohamosan növekedett a megfigyelt változócsillagok száma. A fényességváltozás magyarázataként általánosan elfogadott volt a kettős csillag mellett a folt hipotézis. Pickering a változócsillagok klasszifikációjánál több esetben is a csillagfoltokat állítja be a fényváltozások okaként. Ezek után a csillagfolt hipotézis még kétszáz évig kering a köztudatban. A XX. század hajnalán részben a spektroszkópia fejlődése miatt egyre több esetben derült ki, hogy legtöbbször más fizikai okok vannak a fényváltozások hátterében. A folt hipotézis egyre inkább háttérbe szorult és sokszor a nyilvánvaló esetekben is más okokat jelöltek meg. Ezt láthatjuk a kettős csillagok vizsgálatánál. A fénygörbe torzulásokat vizsgálva Mergentaler (1950) és O’Connell (1951) olyan okokat jelölnek meg, mint periasztron effektus erősen excentrikus pályák esetén, az intersztelláris közeg általi súrlódásos fűtés a vezető féltekén, libráció, reflexió, stb., mindemellett megfigyelési effektusok is szóba kerültek.

Mérföldkőnek számítanak Kron XX. század közepén publikált munkái (Kron, 1947, 1952), mert ezekben először találkozott az elmélet és a realitás. Négy fedési kettőst vizsgált, melyek fénygörbéje erősen aszimmetrikus volt és időről–időre változott. Ennek ellenére nem történt forradalmi változás ezen a téren egészen az 1960–as évek derekáig. Hoffmeister (1965) és Chugainov (1966) egymástól függetlenül, újra felelevenítik a csillagfoltok elméletét. 1971-ben a változócsillagok katalógusa (GCVS) a BY Draconist, mint egy új változócsillag-fajta prototípusát mutatja be. Ezt követően is sokan vannak, akik elfordulnak az elmélettől, de a csillagfoltok gondolata mindinkább gyökeret ver a tudományos köztudatban. Ebben elvülhetetlen érdemek illetik Douglas S. Hallt, aki az 1974-ben, Budapesten megrendezett 29. IAU Kollokviumon tett kísérletet a foltos változók osztályozására, melyet a következőkben ismertettek.

## 5.2. Aktív csillagok típusai

A típusok ismertetésénél eltértek a Douglas S. Hall által felállított klasszifikációtól és Berdyugina 2005-ben megjelent, az aktív csillagokról készült összefoglaló cikke alapján tekintem át ezeket.

### 1. Vörös törpék és BY Draconis csillagok

A vörös törpék fősorozati csillagok, tömegük 0.08 és 0.5 nap tömeg között van. Az alsó tömeghatárt a magbéli hidrogén égeshez szükséges kritikus tömeg határozza meg, míg a felső az M0 spektráltípusú csillagok tömegével egyezik meg. A sugaruk 0.2 és 0.6 napsugár között van, míg felszíni hőmérsékletük 2500K–4000K között. Így a vörös törpék hidegebbek és kisebbek, mint a Nap. Összehasonlításképpen Naphoz viszonyított luminozitásuk 0.1%–tól 8%–ig változhat. A Tejútrendszer csillagpopulációjának 80%–át ezek teszik ki.

Aktivitásuk az extrém erős optikai flerekben nyilvánul meg. Az első rekord megfigyelések az ide tartozó UV Ceti csillagok közül kerültek ki. Általában a fénygörbe szinuszoidális kb. 0.1 magnitúdós amplitúdóval, melyet az átlagosan 10%–os foltfedettség okoz. Mindezek mellett a kromoszférában és a koronában is erősen kifejti hatását a mágneses tér, így az ultraibolya, röntgen és rádió tartományban is nagyon erősen sugároznak.

### 2. Nap típusú csillagok

Ezek a csillagok a fősorozat alján helyezkednek el (a Napunkhoz hasonlóan). Erős kromoszférikus aktivitás jellemzi őket, melyről a CaII H&K emissziós vonalak árulkodnak a színképükben. A megfigyelések azt mutatják, hogy az aktivitási jelenségek ugyanúgy mutatkoznak, mint a Napon, de sokkal nagyobbak, ezért távolságuk ellenére fényváltozásuk és színképük változása földi műszerekkel detektálható.

### 3. T Tauri csillagok

Intersztelláris felhőkben, nagy asszociációkat alkotva fordulnak elő. Néhány millió évesek, tehát fiatalok, melyet a légkörükben levő magas lítium elem gyakorisága is mutat. Körülöttük még ott van a gáz- és porokorong, mellyel mágneses terük kölcsönhat. Fényváltozásuk szabálytalan, melyet a felszínen megjelenő foltok és az anyagkorong együttesen okoz.

#### 4. RS CVn csillagok

Az RS CVn csillagok képviselik azon szoros kettős rendszereket, melyek főkomponense egy G–K színképtípusú óriás vagy szubóriás, míg másodkomponense egy szubóriás vagy G–M spektráltípusú törpe csillag. Fényváltozásukat a nagy amplitúdó jellemzi (0.6 magnitúdó), melyet a kiterjedt foltok okoznak. Számos RS CVn rendszerben a másodkomponens alacsony fényessége miatt a főkomponens nagyon jól vizsgálható. Vannak esetek, amikor mind a két komponens nagyon jól elkülöníthető egymástól, ezek a megfigyelések mutattak rá arra, hogy a főkomponens aktívabb, mint a mellékkomponens. A komponensek közelségéből fakadó erős árapály erő és gyors forgásuk magas aktivitási szintet eredményez. Nagy kromoszfrikus plage területek és flerek jellemzik ezeket a csillagokat. Röntgen és ultraibolya tartományban is nagyon erősen sugároznak. Mivel általában fényesek és fényváltozásuk nagy amplitúdójú, ezért a fénygörbe modellezések egyik kedvelt célobjektumai. A folt(ok) nagysága elérheti az 50%-os fedettséget is, ezért a rendelkezésre álló technikák segítségével jól tanulmányozható szerkezetük. Jelenleg a csillagfoltokról szerzett ismereteink nagy része ezek megfigyelésén alapszik.

#### 5. FK Comae csillagok

Az FK Comae csillagokat legkorábban az 1980-as években definiálták úgy, mint az aktív csillagok egy új csoportja. Ezek késői G–K színképtípusú csillagok, melyek forgási periódusa néhány nap. A mágneses aktivitásuk által okozott fényváltozás amplitúdója 0.1 és 0.3 magnitúdó között lehet.

Fontos, a megfigyelések azt mutatják, hogy ezek nem kettős rendszerek tagjai, hanem magányos csillagok. Ez a tény és koruk vetette fel a kérdést, miért rotálnak ennyire gyorsan. A megfigyelések és az elméleti számítások alapján elképzelhető, hogy korábban érintkező kettős csillagok összeolvadásából jöttek létre.

#### 6. W UMa kettős csillagok

Ezek érintkező kettősök. A keringési és egyben a komponensek forgási periódusa 5-től 20 óráig terjedhet. Mivel a komponensek összeérnek, a konvektív burrok közös, ezért a felszíni hőmérsékletek közel megegyeznek. A komponensek mindegyikén előfordulhatnak foltok. Az aktivitás részletes vizsgálata ezekben a rendszerekben még várat magára, részben megfigyelési nehézségek miatt, mely



a rendszer geometriájából és a komponensek közel azonos felszíni hőmérsékletéből fakad.

## 7. Algol kettős csillagok

Az Algol rendszerek főkomponense egy fősorozati B–F színképtípusú csillag, míg a másodkomponens egy kisebb tömegű, hidegebb csillag. Az árapály erőnek és a gyors forgásnak köszönhetően ezeknél is magas az aktivitás szintje.

## 5.3. Csillagfoltok megfigyelési technikái

Alapjában véve két csoportra oszthatjuk a meglévő technikáinkat. Az egyik csoport az aktivitási jelenségek által okozott fényváltozásból, míg a másik csoport a csillagok színképeinek vizsgálatából próbálja rekonstruálni a felszíni eloszlásukat.

### 5.3.1. Fotometriai módszerek

A fotometriai módszerek abban megegyeznek, hogy egy indirekt problémát kell megoldaniuk. Látunk valamilyen fényváltozást és ebből kell visszakövetkeztetnünk, milyen a folteloszlás a csillagon.

Az LCM (light curve modelling) technika során nem több, mint három kör alakú foltot tételezünk fel egy hipotetikus csillagon. Addig változtatjuk a foltok paramétereit (hosszúság, szélesség, méret, hőmérséklet), amíg az így kapott modell fénygörbéje a lehető legjobban nem illeszkedik az általunk megfigyelttel. Vannak esetek, amikor a kör alakú folt hipotézis helyett négyszög alakút vagy folt övet használnak. Mindig az adott helyzettől függ, melyik közelítést alkalmazzák. Ha több hullámhosszon mérjük a fényváltozást, akkor a módszer a foltok átlagos hőmérsékletének (benne van a melegebb fáklyamező és a hideg folt umbrája, penumbrája) meghatározását is lehetővé teszi. Sajnos sok a szabad paraméter, melyek számát valamilyen feltételezések alapján csökkenteni kell, emiatt a megszerezhető információ is korlátos.

Az LCI (light curve inversion) technika a csillagfelszín két komponensét tételezi fel, egy meleg fotoszférát és egy hideg foltot. Aztán az ezekhez tartozó intenzitások foltkitöltési faktorról (a folt területe a csillag látszó korongjához viszonyítva, 0 és 1 közötti érték) súlyozott összegeként áll elő az adott időpillanatban megfigyelt intenzitása a csillagnak. Végeredményben a foltkitöltési faktor felszíni eloszlását kapjuk. Ezzel

a technikával a foltok szélességéről semmi információt nem kapunk, viszont nagyon pontos képet ad a folt(ok) hosszúság szerinti eloszlásáról.

Létezik egy harmadik technika, az eclipse mapping, mely fedési kettősöknél alkalmazható. Ha a komponensek valamelyike foltos, akkor a fénygörbe fedési szakaszai torzulnak, melyből vissza lehet következtetni a folteloszlásra.

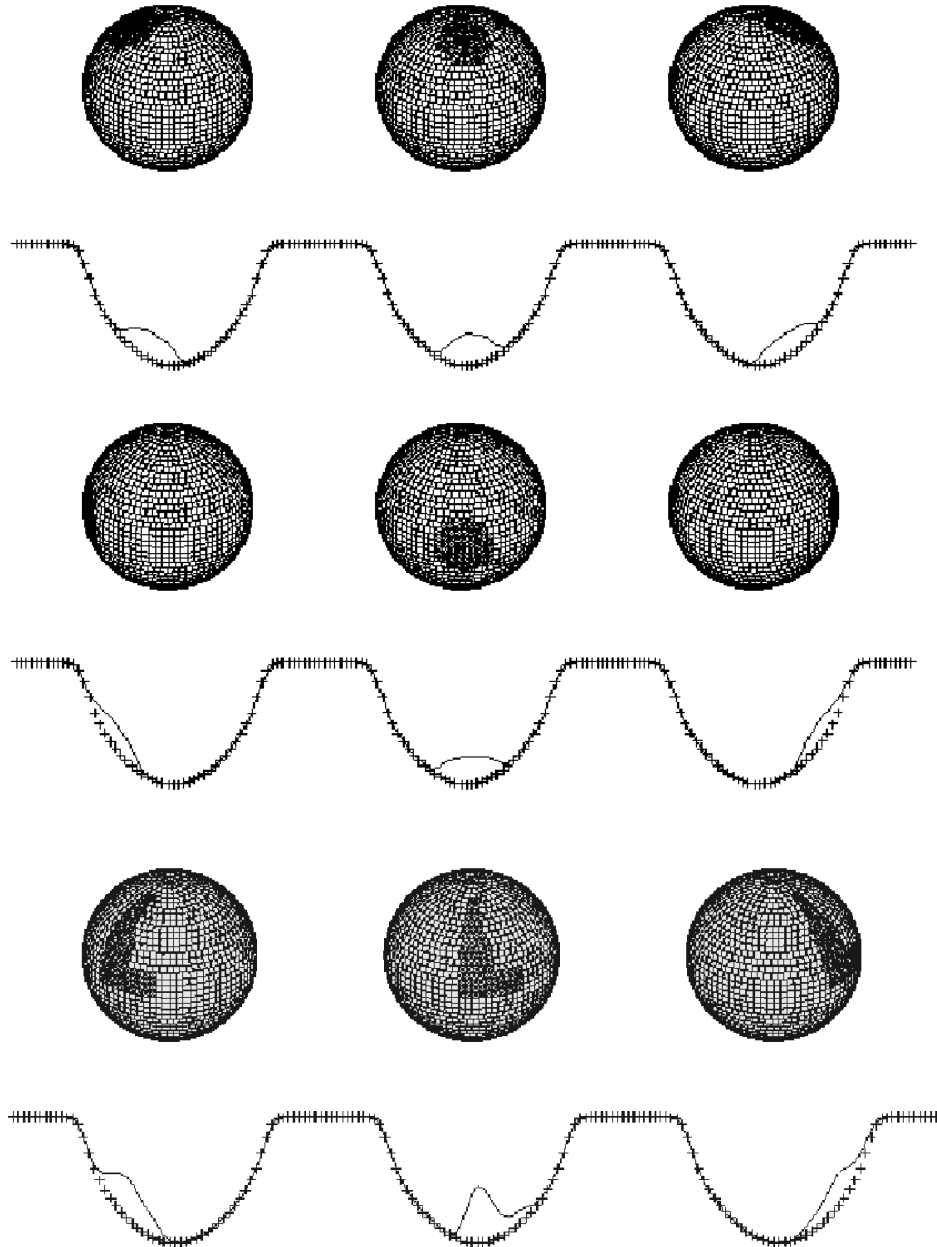
### 5.3.2. Doppler térképezés

A csillagok színképének vizsgálatával jóval több mindent ki lehet deríteni, mint pusztán a fényváltozásukból. A színképekből nagyon jó felbontású felszíntérképeket lehet készíteni. A színképekben levő sötét abszorpciós vonalak intenzitás szerinti eloszlása normál esetben egy széles haranggörbére hasonlít. Ha a csillagon van egy folt, akkor ezen a görbén egy "hupli" szalad végig, melynek alakja információt hordoz a folt méretéről, szélességéről, hosszúságáról és ami fontos, az alakjáról is (6. ábra). Ez a tény teszi ezt a technikát fontos eszközzé. Nincsen bizonytalanság a szabad paraméterek miatt, ugyanakkor nagyon precíz, jó minőségű színképekre van szükség. Ez megköveteli a nagy távcsövekre szerelt óriási felbontású spektroszkópokat, melyekből kevés van a világon, ezért a technika nehezen hozzáférhető.

### 5.3.3. Összehasonlítás

Érdemes szembeállítani a két módszert és megnézni előnyüket, hátrányukat.

A fotometriai módszerek alkalmasak a folt(ok) hosszúságának pontos meghatározására. Meg lehet becsülni a folt(ok) méretét, melyből lehet mondani egy foltfedettség értéket (megmondja, hogy a látszó csillagkorongnak hány százaléka fedett foltal). Ritkán, nagyon pontos és viszonylag hosszú idejű fotometriai mérések lehetővé teszik, hogy a foltok szélességét is meghatározzuk, de nagy bizonytalansággal. Információt kaphatunk az átlagos folthőmérsékletről, mely magában foglalja a melegebb és hidegebb területeket, de közvetlenül semmit nem mond a folt/fáklyamező területek arányáról. Általában elmondható, hogy erről korlátozott mennyiségű információt szerezhetünk. A fotometria haszna abban nyilvánul meg, hogy egyszerű és olcsó eszközökkel végezhető. Hosszú és folyamatos méréseket készíthetünk, így folyamatában figyelhetjük meg a zajló eseményeket (pl. egy aktív terület felbomlása, folt kitörések a csillagfelszínen), továbbá az aktív csillagok hosszú időskálás fényváltozásának vizs-



6. ábra. A Doppler technika elve. Az intenzitás eloszláson egy púp fut végig, melynek alakja árulkodik a csillagon levő folt szélességéről (fent és középen) és alakjáról (lent). Fontos megemlíteni, hogy nem emisszió, hanem kisebb mértékű abszorpció okozza a változást. Forrás: Strassmeier K. G. (2006)

gálatára is mód nyílik, és új aktív csillagokat fedezhetünk fel.

A Doppler technika pontos képet ad a folteloszlásról, ezzel együtt az egyes területek hőmérsékletéről. Hátránya, hogy drága és bonyolult eszközök kelljenek hozzá, így nehezen elérhető technika, emiatt folyamatos megfigyelésre nem használják. Azoknál a csillagoknál, melyek kerületi sebessége alacsony, a technika nem alkalmazható.

A két módszer együtt jól kiegészíti egymást, ezért mindkettő egyformán fontos.

## 5.4. Aktivitási jelenségek más csillagokon

Tekintsük át, miben különböznek az aktivitási jegyek más csillagokon. Milyen a rövid és hosszú időskálájú viselkedésük, mindez hogyan lehet kapcsolatban az aktív csillagok belső szerkezetével és más paramétereikkel.

Egy fontos tény, hogy a (generálódó) mágneses tér<sup>9</sup> jelenléte már önmagában jelzi, hogy a csillag belső szerkezete a mag, sugárzási zóna, konvektív burok, fotoszféra elrendezést követi és nem a nagy tömegű csillagoknál ismert felépítést. Ezért van az, hogy a H-R diagramon egy jól meghatározott tartományban (7. ábra) fordulnak elő az aktív csillagok.

### 5.4.1. A mágneses aktivitás a rotáció és a konvekció tükrében

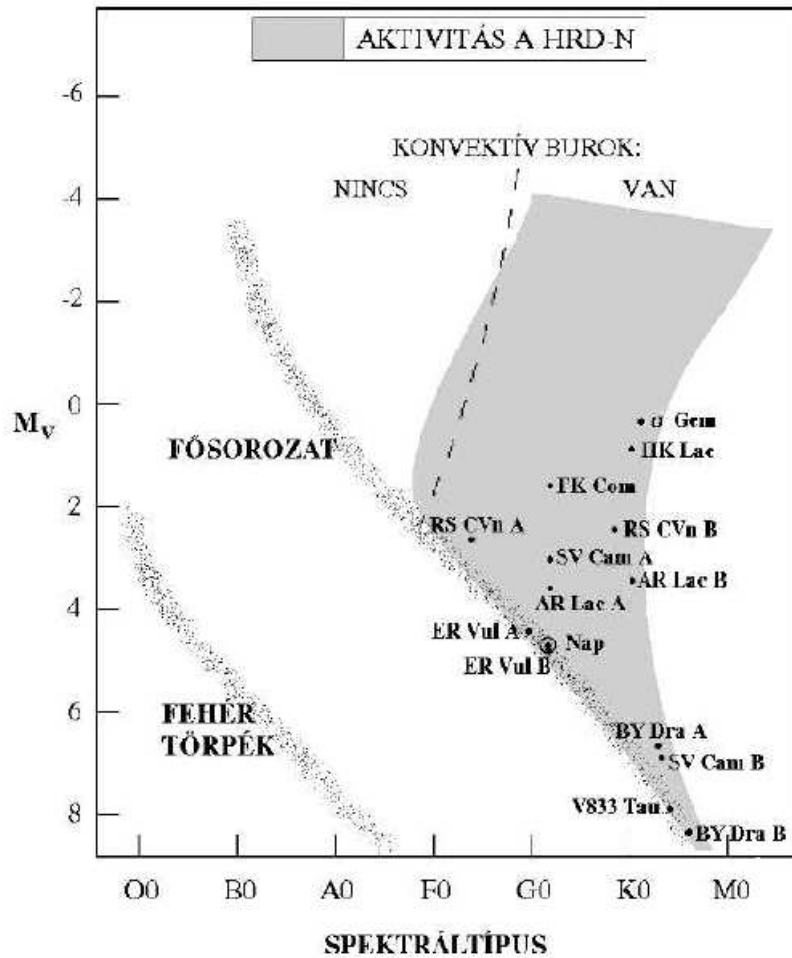
Észlelési és elméleti oldalról is alátámasztott tény, hogy a rotációnak és a konvekciónak kitüntetett szerepe van a csillag mágneses terének felszínre juttatásában, a tér felerősítésében és strukturálásában, mely végsősoron a csillag megfigyelhető aktivitásának alapja (pl. Mullan (1974), Pallavicini et al. (1981), Mangeney (1986), stb.). A dinamómechanizmus határfoka a rotáció sebességével értelemszerűen együtt nő, így az a gyorsan forgó fiatal K és M törpék és K óriások, valamint a T Tauri csillagok esetében fejt ki hatását legintenzívebben. Az aktivitási szint kvantitatív jellemzésére alkalmas mennyiség a Rossby szám:

$$R = \frac{\nu_c}{2H\Omega} \quad (1)$$

ahol,  $\nu_c$  a konvekció sebessége,  $H$  a konvekciós skálamagasság,  $\Omega = 2\pi/P$  pedig a rotáció szögsebessége. A Rossby szám lényegében a rotációs periódus idő és a kon-

---

<sup>9</sup>Az A, B színképtípusú fősorozati csillagok fotoszférájában a mágneses tér jelen van, és befolyásolja az ottani fizikai környezetet. Azonban jelenlegi tudásunk szerint ezeknél befagyott maradvány mágneses terekről van szó, melyek időben jelentősen nem változnak.



7. ábra. Az aktív csillagok elhelyezkedése a Hertzsprung–Russell diagramon. Forrás: Appourchaux et al. (1991)

vektív megfordulási idő hányadosa, ily módon a rotációnak a konvekcióra gyakorolt hatását méri. Hall (1991) vizsgálata szerint, melyet közel háromszáz kései típusú csillagon végzett,  $R < 2/3$  esetén jelentős volumenű foltosodás jegyei fedezhetők fel, míg  $2/3$ -nál nagyobb értékek (lassú rotáció) esetén, ha létezik is foltosodás, annak fotometriai moduláló hatása csupán néhány ezred magnitúdó, amely a jelenlegi mérési pontosság határa.

A megfigyelhető mágneses aktivitás alapja a mágneses fluxuskötegek felbukkanása a csillag felszínén.

A csillag belsejében a turbulens konvekció addig koncentrálna a mágneses fluxust, amíg annak nagysága el nem ér egy akkora értéket, mely éppen a nyomással tart

egyensúlyt:

$$B_{eq} = \nu_c \sqrt{4\pi\rho_e} \quad (2)$$

ahol  $\nu_c$  a már ismert konvektív sebesség,  $\rho_e$  pedig a környező gáz sűrűsége. A  $B_{eq}$  értéket szokás ekvipartíciós nyomás–kiegyensúlyozó mágneses határnak is nevezni, ugyanis ennek közelében a kinetikus és a mágneses energiasűrűség összemérhető. (A Nap konvekciós zónájának alján ez az érték megközelítőleg  $10^4 G$ .) Az az érték pedig, melynél a termikus és a mágneses energiasűrűség egyenlők:

$$B_p = \sqrt{8\pi p} \quad (3)$$

ahol  $p$  a külső gáznyomást jelenti. A konvektív zóna alján a  $B_{eq}/B_p$  arány elhanyagolható (a fotoszférához közel azonban már korántsem az!). Amint a fluxuscső belsejében a konvektív transzport csökken, a cső összeszűkül, így a tér erőssége megnövekszik, a fluxuserősség eléri  $B_p$ -t. Az ily módon koncentrált mágneses fluxuskötegekben a belső mágneses nyomás meghaladja a környező gáz nyomását, s lokális termikus egyensúly lévén a sűrűség a cső belsejében csökkenni kezd. Ennek eredményeképp a fluxuselemre hidrodinamikai felhajtóerő hat, mely hatására a fluxuscső megkezdi útját a felszín irányába. A felemelkedés során a külső nyomás csökkenésével a fluxuserősség is csökken. Ha az eredeti mágneses térerősség nem volt elegendően nagy, úgy a fluxuselemet a konvektív mozgások még a felszínre bukkanás előtt felemésztik. Ha azonban a kezdeti térerősség elegendően nagy, akkor a konvektív zónán keresztül jutva a fluxuscső képes a felszínre emelkedni.

#### 5.4.2. Poláris foltok

Az aktív csillagok kutatásával kapcsolatosan az utóbbi másfél évtizedben a legnagyobb visszhangot kiváltó elképzelés a nagy kiterjedésű, pólushoz közeli foltok ideája volt. A Doppler Imaging technika (Vogt & Penrod, 1983) elterjedésével számos olyan eredmény született, mely alapján a poláris foltok léte észlelési oldalról mostanra egészen bizonyosnak tűnik (pl. Vogt & Hatzes 1996; Stassmeier et al. 1998, stb.). Noha korábban nem volt világos, hogy milyen fizikai mechanizmus húzódik meg a Napon megfigyelt foltok pozíciójától annyira távoli poláris foltosodás mögött, mára a fizikai magyarázat is kezünkben van (Schüssler & Solanki, 1992; Schüssler, 1996), melyről az alábbiakban egy rövid áttekintést nyújtok.

A csillag konvektív zónájának aljáról a felhajtóerő hatására a felszín felé induló fluxuselem dinamikáját a felhajtóerő ( $F_B$ ) mellett a Coriolis-erő ( $F_C$ ) is befolyásolja (Choudhuri & Gilman, 1987). Ha az előbbi dominál, úgy a fluxuselem közel radiális irányban tör a felszín felé, míg ha a Coriolis-erő jut fő szerephez, a felemelkedés útja a rotáció tengelyével lesz megközelítőleg párhuzamos. A  $B_{eq}$  ekvipartciós térerősséget felhasználva a két erőkomponens hányadosára a következő összefüggés írható fel (Schüssler & Solanki, 1992):

$$\frac{|F_C|}{|F_B|} = \left(\frac{B_{eq}}{B}\right)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_c}\right) \left(\frac{2}{R}\right) \quad (4)$$

ahol  $R$  a korábban már definiált Rossby szám. Mivel a felemelkedés sebessége az Alfven sebesség ( $\nu_A$ ) nagyságrendjébe esik (Parker, 1975), így az előbbi egyenlet a következőképpen írható:

$$\frac{|F_C|}{|F_B|} = \frac{2}{R_m}, \quad (5)$$

ahol  $R_m = \nu_A/(2H\Omega)$  a "mágneses" Rossby szám. Ez utóbbi egyenlet alapján felírható annak feltétele, hogy a felemelkedő fluxuselem radiális irányban törjön a felszínre: ahhoz, hogy a felhajtóerő dominanciája érvényesüljön, a mágneses térerősség értékének meg kell haladnia egy

$$B_{min} = 4H\Omega\sqrt{4\pi\rho_e} \quad (6)$$

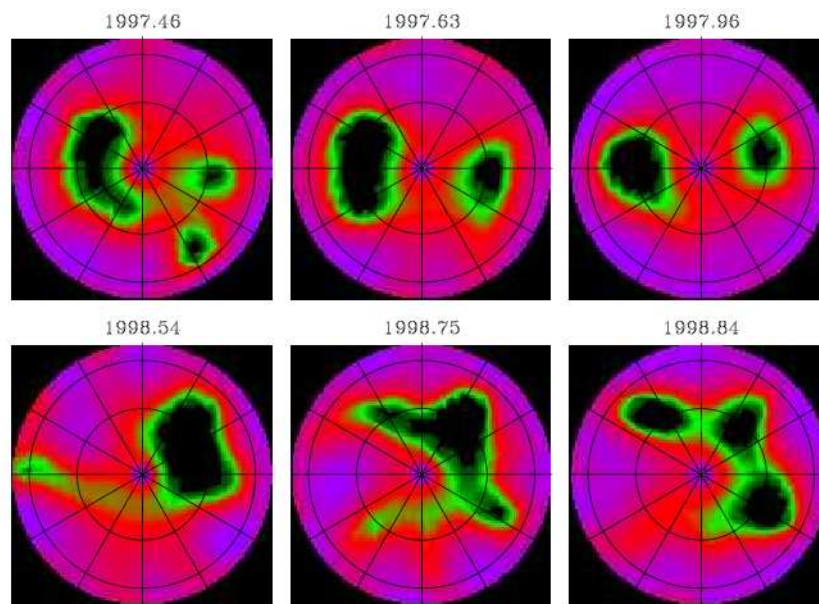
értéket. Ha  $B$  kisebb ennél, a fluxuselem közel párhuzamosan mozog a rotáció tengelyével, a mágneses hurkok poláris vidéken jelennek meg. A néhány nap periódusú aktív K törpékre  $B_{min}$  értéke közelítőleg  $10^6 G$ . Egyelőre azonban nem ismert, hogy a mágneses dinamó miként lenne képes ekkora térerősség generálására. Az elméleti modellek alapján tehát inkább az valószínűsíthető, hogy a gyorsan rotáló hideg csillagokon a felszíni mágneses fluxus inkább a pólusokhoz közeli vidékeken koncentrálódik. Napjainkra ezt számos megfigyelés igazolja, mint pl. a BO Mic ( $P_{rot}=0.38$  nap), AB Dor ( $P_{rot}=0.5$  nap) és az LO Peg ( $P_{rot}=0.42$  nap) csillagok esetében.

### 5.4.3. Flip–flop jelenség

A jelenséget először az FK Comae, késői spektráltípusú, óriáscsillag fényváltozása alapján írták le Jetsu et al. (1991) és Jetsu et al. (1993). Ezt követően Berdyugina & Tuominen (1998) négy RS CVn típusú kettős aktív hosszúságait vizsgálva mutatták ki a jelenséget. Eredményeiket Rodonò et al. (2000) megerősítette az II Peg esetében. A

jelenséget tovább kutatták a következő években fotometriai és spektroszkópiai megfigyelések alapján. Miután számos aktív csillagon felfedezték, Berdyugina & Usoskin (2003) sikeresen kimutatta Napunk esetében is.

A hosszú időt átfogó megfigyelések alapján kiderült, hogy a foltok (és velük együtt az egyéb aktivitási jegyek) jól meghatározott hosszúság értéknél jelennek meg. Ezeket aktív hosszúságoknak nevezzük. A flip-flop során az aktív hosszúság értéke  $180^\circ$ -ot ugrik, szélessége nem változik. A folyamat periódikusan ismétlődik (8. ábra). Az elméleti számítások nagyjából 10 év késéssel követték az első megfigyeléseket.



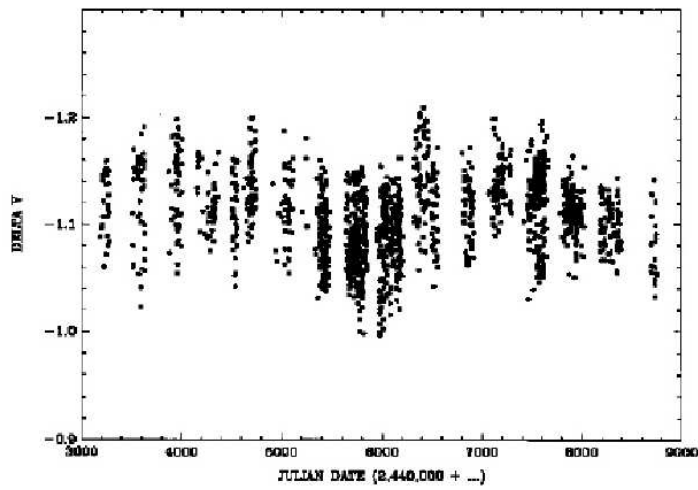
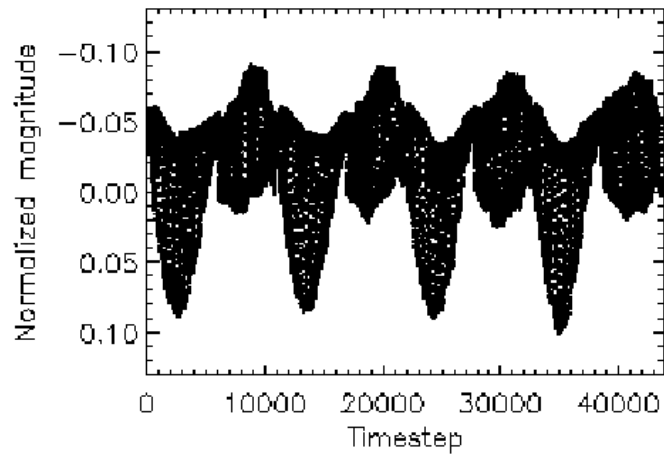
8. ábra. Az II Peg RS CVn típusú csillag doppler térképei 1997 és 1998 között. Forrás: Berdyugina et al. (1999)

Az utóbbi időkben az elméleti számítások azt is vizsgálták, hogy a flip–flop jelensége hogyan függ a csillagok globális paramétereitől. Erre vonatkozó számításokat (Moss, 2004, 2005) cikkeiben találhatunk, illetve Korhonen & Elstner (2005) munkájában. Például az utóbbi páros modelljeiben rámutatott, hogy belső folyamatok okán a flip–flop jelensége erősen jelentkezik és rövidebb periódussal rendelkezik. Emellett azt kapták még, hogy mély konvektív zónával rendelkező csillagok esetén elképzelhető, a flip–flop jelensége  $180^\circ$  helyett egy  $90^\circ$ -os fázis ugrásként jelentkezik. Ez idáig ezt az elméletet nem sok megfigyelés támasztja alá. Például, Oláh et al. (2006) az FK Comae nevű csillag fotometriai adatsorát újra modellezve megmutatták, miképp játszódik le



az említett két jelenség, és ezzel bizonyítékot szolgáltatott az elmélet által jósoltakra is. Mindezen felül Korhonen & Elstner (2005) egy  $90^\circ$  és  $180^\circ$ -os flip–flop kombinációjából egy szintetikus fénygörbét állítottak elő, mely hasonló viselkedést mutatott a  $\sigma$  Gem fényváltozásához.

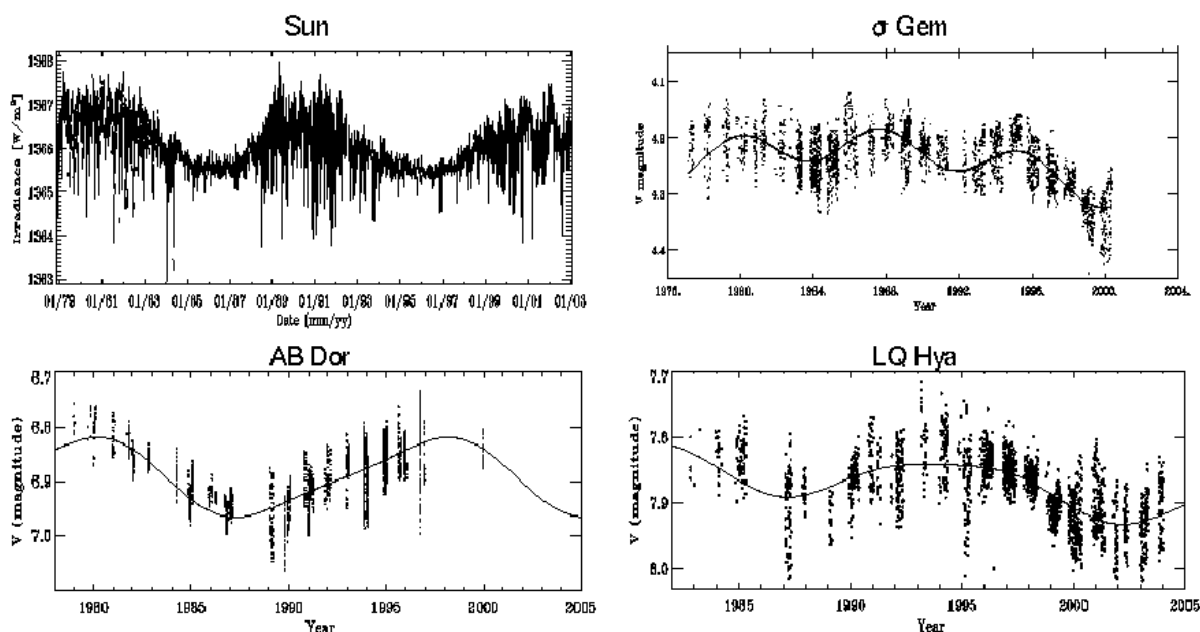
Több, mint 10 év telt el Jetsu et al. (1991) első flip–flop megfigyelése óta. Az elméleti számítások eredményei csak az utóbbi pár évben kezdtek el megjelenni. Várhatóan az elkövetkező években végrehajtott rendszeres méréseknek köszönhetően a flip–flop–ról szerzett ismereteink tovább bővülnek.



9. ábra. Egy  $90^\circ$  és  $180^\circ$ -os flip–flop kombinációjából előállított szintetikus fénygörbe (balra). A  $\sigma$  Gem valós fényváltozása (jobbra). Forrás: Korhonen & Elstner (2005)

#### 5.4.4. Aktivitási ciklushosszak és asztrofizikai jelentőségük

Napjainkra óriási adathalmaz gyűlt össze az aktív csillagokról, mellyel lehetővé vált aktivitási ciklushosszaik meghatározása. Mindez a frekvenciált észlelő programoknak köszönhető. Nagyon híres a Mount Wilson Obszervatóriumban végzett munka, ahol magányos, késői spektráltípusú, fősorozati csillagok Ca II H és K emissziós vonalainak időbeli változását mérték. 1990 óta koordináltan végzik a Nap–típusú csillagok több–szín fotometriai megfigyeléseit például a *Sun in Time* projekt keretében.



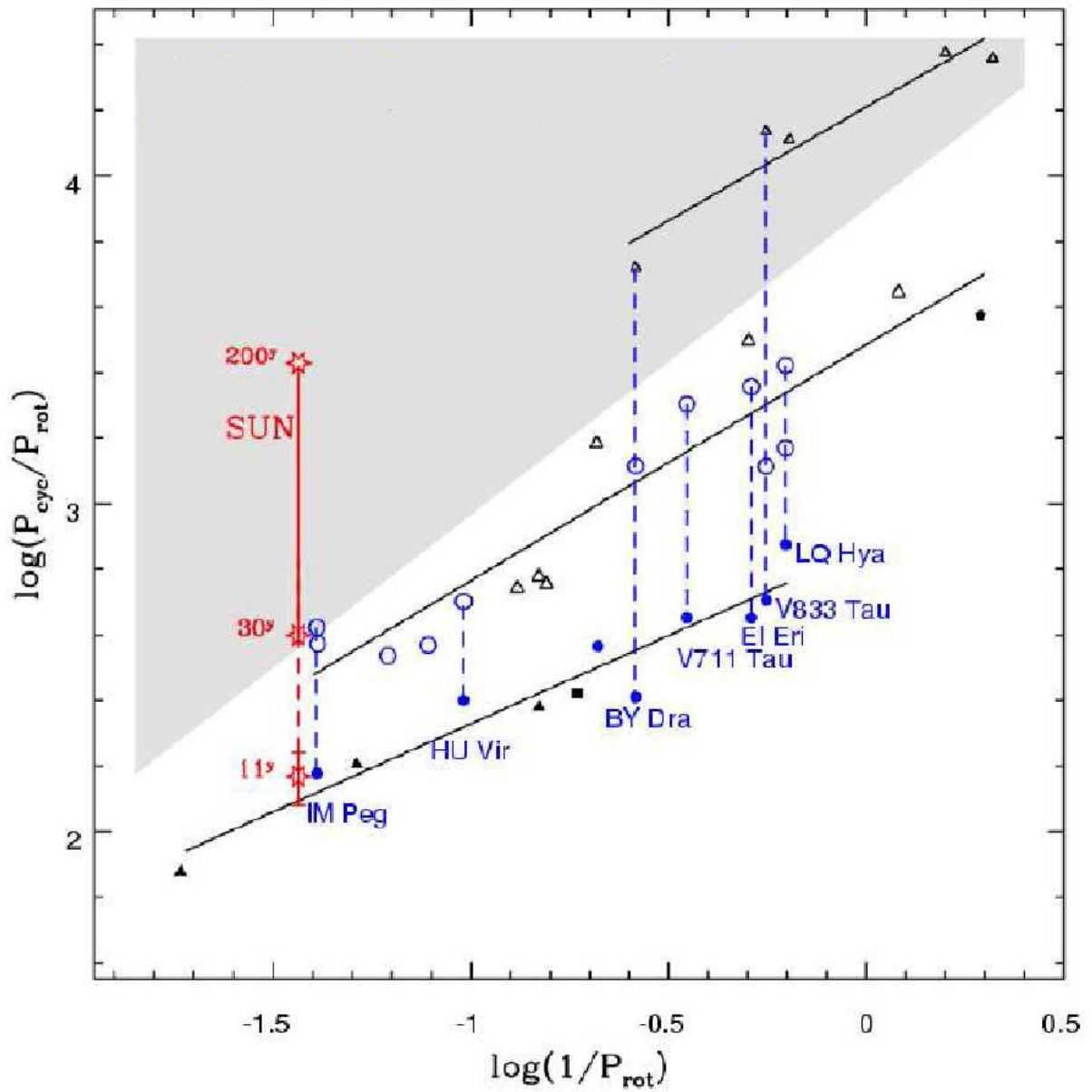
10. ábra. A napállandó változása (balra fent) és mellette másik három csillag hosszú időskálájú fényváltozása. Ezek a Nap és a csillagok mágneses aktivitásának változását jelzik. Forrás: Berdyugina (2005)

A cél, hogy vizsgálhatóvá váljon, hogyan függnek a csillagok globális fizikai paramétereitől az aktivitásuk és ami fontos, hogy az elméleti dinamó modellek ellenőrizhetőek legyenek a megfigyelések által. A különböző dinamó elméletek a következő általános formulát adják:

$$\frac{P_{cyc}}{P_{rot}} \sim D^\iota, \quad (7)$$

ahol  $\iota$  egy pozitív konstans és pontos értéke a dinamó mechanizmustól függ, míg  $D$  a dinamó szám. Az utóbbi egy nagyon fontos, a mágneses tér létrehozását kontrolláló paraméter az átlag–tér dinamó elméletekben. Az összefüggésben szereplő mennyisé-

gek, mint az aktivitási ciklus periódusa ( $P_{cyc}$ ) és a csillag rotációs periódusa ( $P_{rot}$ ) jól mérhető mennyiségek.

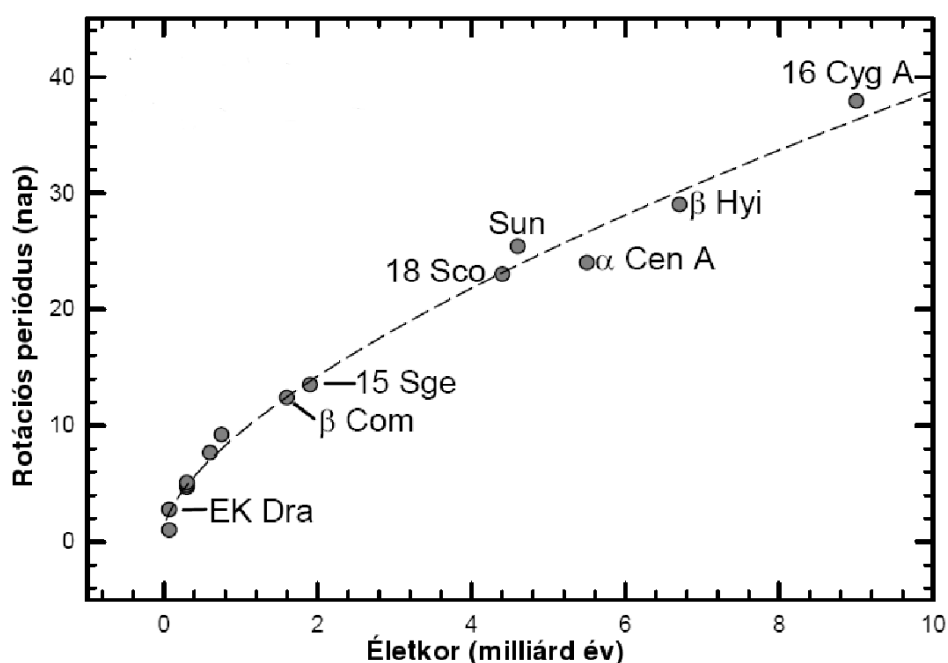


11. ábra. Az aktív csillagok rotációs periódusa és ciklushosszai közötti összefüggés. A szürkével sátozott részen az adatsorok hossza (rövidsége) miatt bizonytalan vagy nem meghatározható a ciklushossz. A kék vonalak (és a Napnál piros vonal) egyazon csillag összetartozó, többszörös ciklushosszait jelöli (Oláh et al., 2000; Oláh & Strassmeier, 2002).

#### 5.4.5. Aktív csillagok a "fiatal" Nap vizsgálatának szolgálatában

Napunk születése óta fejlődik (mely emberi időléptékkal nem mérhető), ami hatással van környezetére, így Földünkre is. Régóta vizsgált kérdés, hogy a fiatal Nap miben lehetett más, mint a jelenlegi, milyen szerepe lehetett a földi élet kialakulásában, illetve hogyan befolyásolta azt.

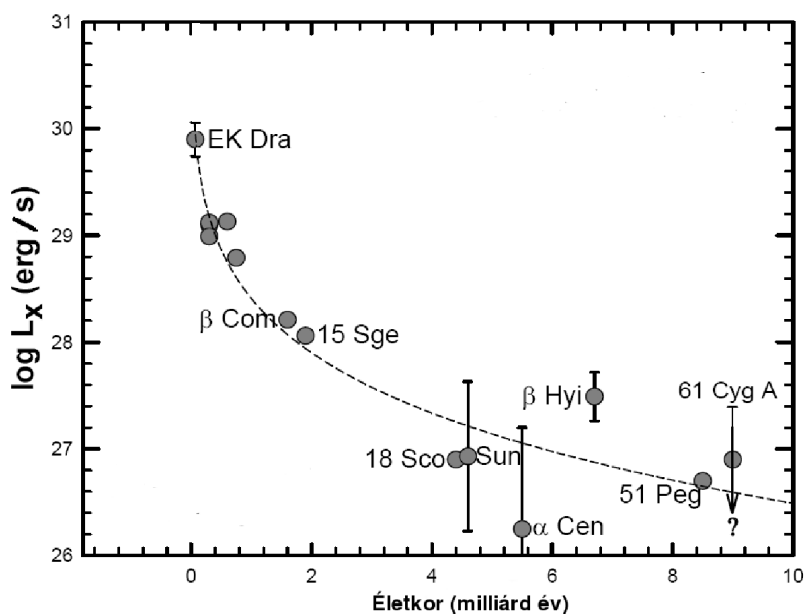
A fiatal Nap tulajdonságait a hozzá hasonló aktív csillagok megfigyelésével tudjuk vizsgálni. Fontos, hogy belső felépítésükben nagyon ne térjenek el a Naptól. Ezt megfelelő spektráltípusú és sugarú csillagok jól megválasztott mintáján keresztül érhetjük el.



12. ábra. Az aktív csillagok életkora és rotációs periódusa közötti összefüggés. Forrás: Guinan & Engle (2007)

Számos munka foglalkozik ezzel a témával (pl.: Ribas et al. 2004). Az 12. ábrán kb. 100 millió és 8.5 milliárd év közötti időintervallumban vizsgált csillagok egy mintáját látjuk. A rotációs periódusok kb. fél naptól egészen 38 napig terjednek. Az eltérő rotációs periódusok eltérő aktivitási szintet eredményeznek, mely például a röntgen tartományban mutatott luminozitással mérhető. Mivel a csillagok egyéb paraméterei közel megegyeznek, egy összefüggést lehetett adni a fluxus és életkor között. Ez alapján ki lehet számolni, hogy a fiatal Napnak mekkora volt életének egyes szakaszaiban

sugárzása. Ezt láthatjuk az 14. ábrán.

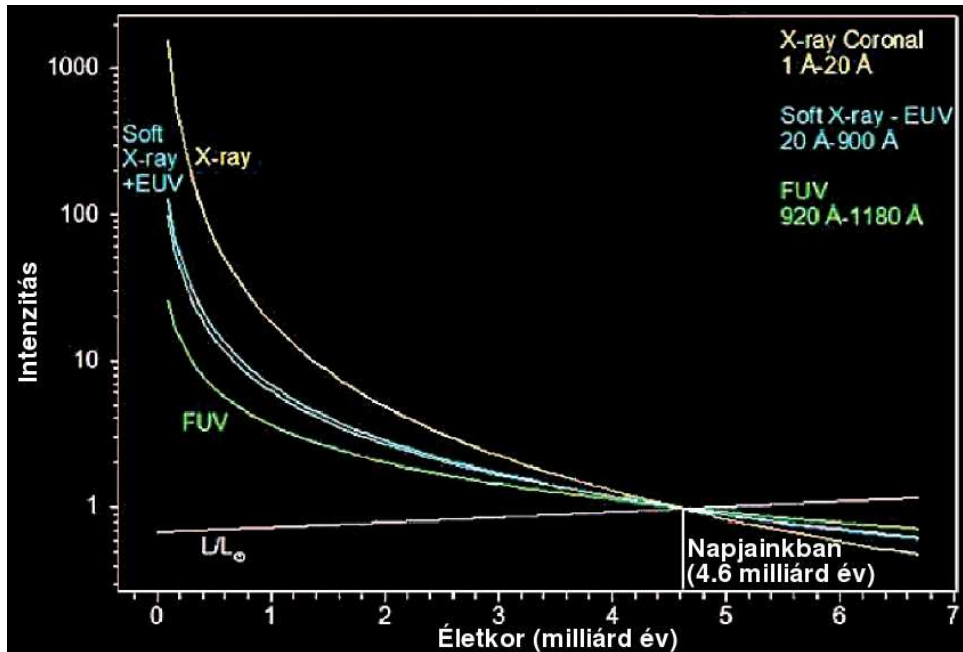


13. ábra. Az aktív csillagok életkora és a röntgen luminozitása közötti összefüggés. A bejelölt hibahatár nem mérési hibát jelöl, hanem a csillag aktivitási ciklusából eredő változást. Forrás: Guinan & Engle (2007)

Azt találták, hogy a napkorona által kibocsátott röntgen és extrém ultraibolya sugárzás kb. 100–1000-szer erősebb lehetett, mint jelenleg. Hasonlóképpen a kromoszféra sugárzása a távoli ultraibolya tartományban 20–60-szor, míg az ultraibolya tartományban 10–20-szor lehetett erősebb. Mindent egybevetve a nagy energiákon kisugárzott összes energia (1–1200 Å között) 2.5 milliárd évvel ezelőtt 2.5-szer, míg 3.5 milliárd évvel ezelőtt (ekkor kezdett kialakulni az élet a Földön) kb. 6-szor volt nagyobb a számítások alapján.

Az erős sugárzás a Föld atmoszférájának korai evolúciós szakaszára az elméleti megfontolások alapján hatással lehetett. Az erős nagy energiájú sugárzás fotokémiai és fotoionizációs folyamatokat indított el és alakította Földünk akkori légkörét.

A *Sun in Time* adatainak vizsgálata egy másik problémát is felvetett, melyet Fényes Nap Paradoxonnak nevezünk. A paradoxon abból ered, hogy a standard csillag evolúciós modellek azt mutatják, hogy a Nap bolometrikus luminozitása kb. 70%–a volt a ma megfigyelhetőnek. Ebből következne, hogy a korai Föld sokkal hidegebb volt, de a geológiai és fosszilis minták nem ezt bizonyítják. Egy megoldásként Sagan & Mullen



14. ábra. A Nap röntgen, lágy röntgen és extrém ultraibolya, továbbá távoli ultraibolya sugárzásának változása életkorának függvényében. Forrás: Guinan & Engle (2007)

(1972) az üvegházhatású gázok növekedésének hatásáról írnak. Habár az erős nagy energiás sugárzások nem adnak megoldást a paradoxonra, mégis a fotoionizációs és fotodisszociációs reakciók elősegíthették az üvegházhatású gázok növekedését.

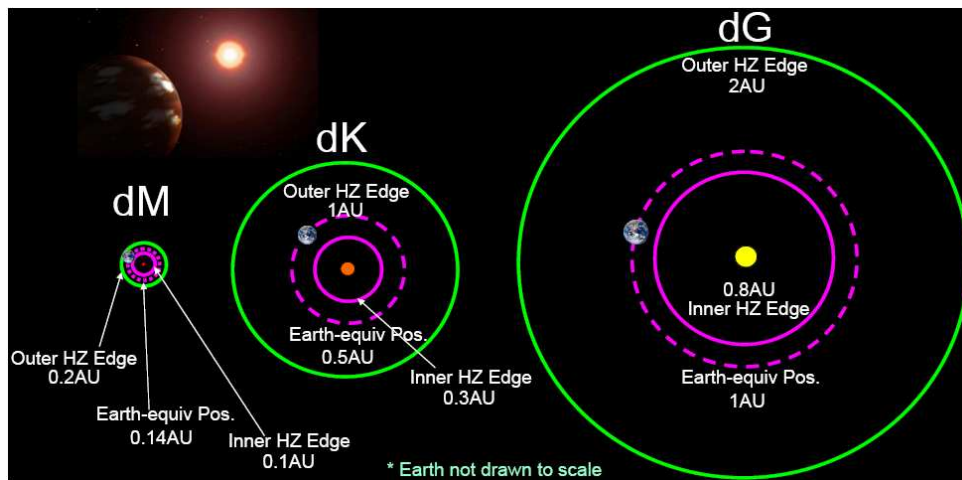
#### 5.4.6. Élet az M és K spektráltípusú törpe csillagok körül

A exobolygó kutatások során számos M és K színképtípusú törpe csillag (továbbiakban csak dM és dK csillagok) körül fedeztek fel bolygót. A *Sun in Time* programnak ez adta a motivációt, hogy kiterjessze a G színképtípusú törpe csillagok (Nap-típusú, továbbiakban dG csillagok) megfigyelését a kisebb és hidegebb, de annál nagyobb számban előforduló dK és dM csillagokra.

E csillagok vizsgálatának céljai hasonlóak a program kezdeti célkitűzéseivel. Modellt alkotni a mágneses aktivitásra és a dinamó mechanizmusára ezekben a kis tömegű, mély konvektív zónájú csillagokban, továbbá feltérképezni nagy energiájú sugárzásuk és az életkoruk közötti esetleges összefüggést a lehető legszélesebb életkor tartományra.

Tanulmányozásukkal számszerű feltételeket lehet majd adni az élet feltételeire a körü-

löttük keringő bolygókon. Nagy számuk miatt közös célpontjai lesznek az exobolygó kereső misszióknak. Kis tömegük és kis sugaruk teszi őket vonzó célponttá a bolygó vadászatra.



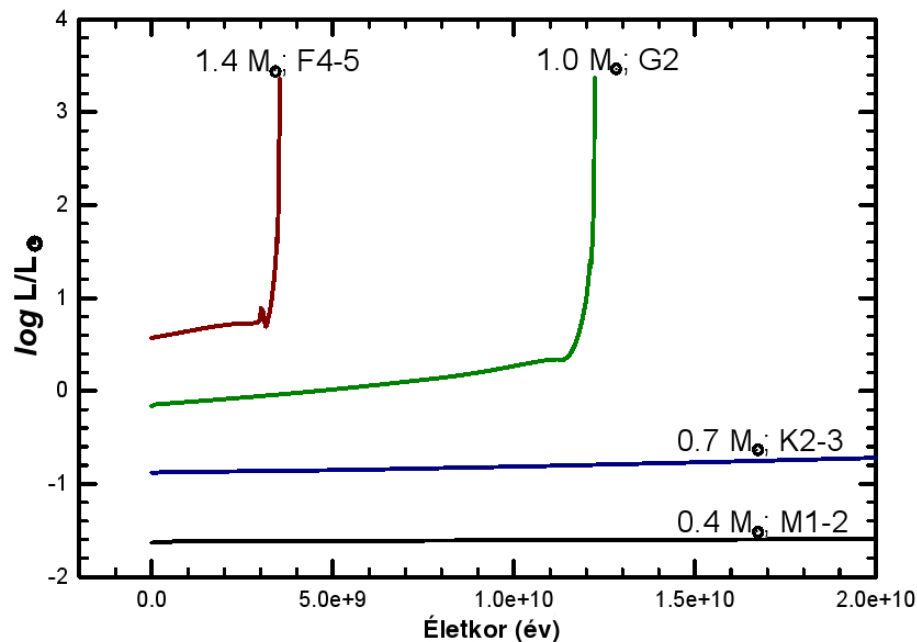
15. ábra. A dM, dK, dG csillagok lakhatósági zónája. Az AU a csillagászati egységet jelöli. A HZ a lakhatósági zónát. Forrás: Guinan & Engle (2007)

A dM csillagok exobiológiai szempontból is érdekesek. A középponti csillag körüli tartományt, ahol a fizikai viszonyok kedveznek a folyékony víz előfordulásának, lakhatósági zónának nevezzük. Ez erősen függ a központi csillag luminozitásától. A bolygó hőmérséklete szintén függ csillaga luminozitásától, továbbá csillagától való távolságától. Fontos még a bolygó albedója<sup>10</sup> és az üvegházhatású gázok fűtési hozzájárulása. A 15. ábrán látható, hogy a dM csillagok alacsony luminozitása miatt a lakhatósági zóna nagyon közel van a központi csillaghoz. Egy ebben a tartományban keringő hipotetikus bolygó a közelsége miatt ki van téve a csillag flereinek, erős csillagszélnek és korona kitöréseknek, melyek gyakran előforduló események egy dM csillagon. A dM csillagok hosszú életkora azonban lehetőséget biztosít arra, hogy kifejlődjön az élet egy ilyen bolygón. Guinan & Engle (2007) munkájában elindított egy programot, melyben a dM csillagok nagy energiájú sugárzásának és mágneses dinamójuk evolúcióját vizsgálják. A program neve "Living with a Red Dwarf", azaz "Élni egy vörös törpével". Munkájukban összegezték az eddig összegyűlt ismereteket és elképzeléseket. A dM csillagok kis tömegük miatt nagyon lassan élik fel hidrogén készleteiket. Emiatt az élettartamuk több, mint 10 milliárd év. Életük folyamán luminozitásuk közel

<sup>10</sup>Megadja, hány százalékát veri vissza a ráeső sugárzásnak.



állandó (16. ábra), így a lakható zóna is stabil marad, ellentétben pl. Napunkkal. Az állandó fizikai viszonyok kedveznek az élet kialakulásának és fejlődésének.



16. ábra. Különböző tömegű csillagok luminozitásának változása az életkorral. Jól látható, hogy a Nap luminozitása 11–12 milliárd éves korában hirtelen megnő majd, ellentétben az alacsony tömegű K és M törpe csillagokkal, melyek luminozitása egyenletes marad életük folyamán. Forrás: Guinan & Engle (2007)

A statisztikák szerint csak a Napunk környezetében levő csillagok kb. 70%–a vörös törpe csillag. A tömegük kisebb, mint 0.5 nap tömeg és felszíni hőmérsékletük 3900 K–nél kisebb. Alacsony hőmérsékletük miatt az infravörös tartományban sugároznak a legerősebben, és feketetest sugárzásuk a nagy energiákon elhanyagolható mértékű. Mély konvektív zónájuk hatékony dinamó mechanizmust eredményez, melynek következményeként gyakori és erős flerek, korona kitörések fordulnak elő. A kromoszféra és a korona nagyon erősen sugároz röntgen, távoli ultraibolya és ultraibolya tartományokban. A flerek gyakorisága a csillag életkorával nő. Például a Proxima Centauri 5.8 milliárd éves és naponta kb. egy nagy fler eseményt lehet megfigyelni rajta. Elméleti tanulmányok azt jelzik, hogy a dM csillagok körüli protoplanetáris diszkekben könnyen kialakulhatnak "Szuper-Földek" (1–10 földtömegű bolygók). A számítások szerint a lakhatósági zóna 0.1 és 0.4 csillagászati egység között van, mely

nagyon közel van a központi csillaghoz.

Annak ellenére, hogy a teljes elektromágneses spektrumban kisugárzott energiájuk meg sem közelíti Napunkét, a koronális–kromoszférikus röntgen és ultraibolya sugárzásuk a Napénál 3–10–szer erősebb. Ez állandó mutációt okozhat az élő szervezetekben. A gyakori flerek esetében hirtelen felszabaduló nagy energiák problémát jelenthetnek egy a lakhatósági zónában keringő bolygó számára.

Feltehetően a dM csillagok erős csillagszele és a korona kitörések szerepet játszhatnak a bolygó légkörének fűtésében. Továbbá a felszín fokozottabb erózióját és az atmoszféra elvesztését okozhatja, ha nincsen egybefüggő mágneses tere a bolygónak.

A galaxisunkban vannak öreg dM csillagok, melyek életkora meghaladja az 5 milliárd évet. Ez azt jelentheti, hogy az ezek körül a lakhatósági zónában keringő esetleges bolygók valamelyikén már korábban elkezdődhetett az élet kialakulása és magasabb szintre jutott, mint a mienk a 4.6 milliárd év alatt. Ugyanakkor az öreg dM csillagok nagyon fémszegények (a héliumnál nehezebb elemeket fémeknek tekintjük a csillagászatban), mely a bolygókeletkezésnek és egy esetleges életformának sem kedvez.

## 6. Mire tanítanak a csillagok?

Egy újszülött csecsemő kíváncsi természetű. Mindent megfog, megízlel, szétszed, így szerez ismereteket környezetéről. Tapasztalataim szerint ez a fajta kíváncsiság 7–8. osztályban (amikor a fizikával először találkoznak) csökken és egy középiskolás tanulóknál sokszor teljesen hiányzik.

Ez gond, mert elsősorban a diák motivációját az érdeklődése, kíváncsisága határozza meg a fizika iránt. Egy fizika óra lehet jól felépített és lehet nagy fegyelem, de nem ér semmit, ha csak ezekre emlékeznek a diák. Ezért kell a tanulót az óra menetébe a lehető legjobban bevonni.

E fejezet két részre oszlik. Az első felében olyan ötleteket mutatok be, melyekkel egy tanuló (talán) motiváltabbá tehető. Ezek mellett egy fizika óra szerves részét képezhetik, mint kiegészítő ismeret vagy számolási példa, mérési gyakorlat. A fejezet második felében alternatív megoldásokról írok, melyek főleg egy szakköri foglalkozáson vagy iskolán kívüli tevékenységen (outdoor activity) kerülhetnek jobban előtérbe.

### 6.1. Tanóraba integrálható ismeretek

#### 6.1.1. A csillagok forgási sebessége

Körmozgást végző test sebességét a jól ismert  $v = \omega \cdot r$  összefüggéssel számolhatjuk. Az  $\omega$  a test szögsebessége, mely  $\omega = 2\pi/P$  segítségével számolható. Azaz a körmozgást végző test sebessége egyenesen arányos a körpálya sugarával ( $r$ ) és fordítva arányos a periódus idővel ( $P$ ).

Az ismeret birtokában nézzünk szét az aktív csillagok között és vizsgáljuk meg forgási sebességüket. Számoljuk ki, hogy egy az egyenlítőjén kijelölt pont forgási (vagy kör) sebessége mekkora! Ezt a korábban bevezetett

$$v_k = \frac{2r\pi}{P}$$

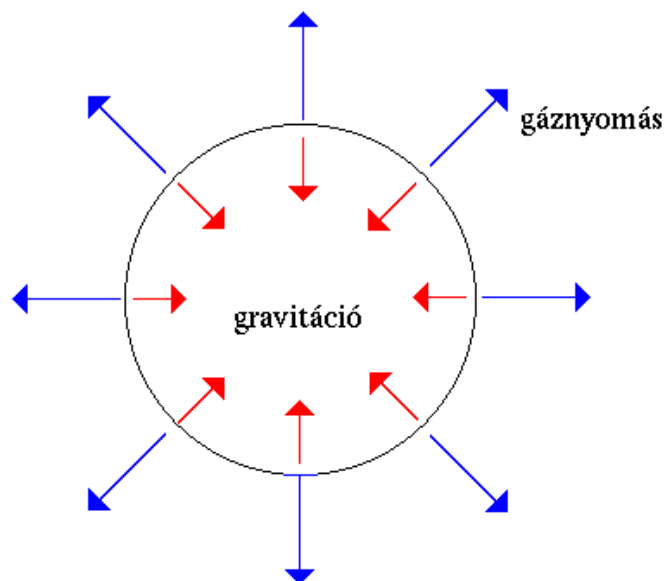
összefüggés segítségével tudjuk megtenni. Az eredményeket a 1. táblázat tartalmazza. Összehasonlításképpen a hang terjedési sebessége 0.34 km/s ( $15^0C$ -os száraz levegőben), míg a fény sebessége 300000 km/s.

Egy szakiskolai osztályban feladtam, hogy számoljuk ki egy csillag forgási periódusát.

Ezzel elértem, hogy többen számolni kezdtek (mert őket is érdekelte). A kapott eredményt megtudták ítélni a sebesség fogalma (néhány alkalommal ezelőtt vezettük be) alapján, mely elgondolkodtató volt számukra.

### 6.1.2. Erők egy csillagon

Az 1. táblázatból látszik, hogy az aktív csillagok rotációs periódusa a Naphoz képest 10–szer vagy akár 50–szer nagyobb lehet. Érdekes megvizsgálni, hogy milyen és mekkora erők hatnak egy kis tömegelemre a csillagon.



17. ábra. A gravitációs és a gáznyomásból származó erők szemléltetése. Forrás: Internet

A csillagokban alapvetően két erő "küzd" egymás ellen. Az egyik a csillagot összehúzni akaró gravitációs erő, míg a másik a gáznyomásból ered (17. ábra). Amikor a csillag élete végén feléli "üzemanyagát", akkor megszűnik a belső gáznyomásból származó erő, a csillag összeroskad és az összeomló rész tömegétől függően egy fehér törpe, neutroncsillag vagy fekete lyuk marad vissza.

A forgásból eredően fellépnek tehetetlenségi erők, mint a Coriolis- és centrifugális

erők. A Coriolis–erő az aktív csillagoknál, mint azt már láttuk, szerepet játszik a konvektív zónán keresztül haladó mágneses fluxuselemek mozgásában, de befolyásolja a fotoszférában az anyag áramlását is.

A centrifugális erő mindenki számára ismert, aki már ült körhintán vagy hirtelen kanyaródó járműben és még folytathatnánk. Egy az egyenlítőn lévő kis tömegelem ugyan ezt "érzi". A centrifugális erő torzíthatja a gyorsan forgó csillagok alakját, ahogy azt egyes megfigyelések mutatják. A továbbiakban vizsgáljuk meg ennek számszerű feltevéleit.

Csillagnév	$M_{nap}$	$R_{nap}$	$P(nap)$	$v_k(km/s)$	$F_g/F_{cf}$
Nap	1.0	1.0	25.38	1.9	$4.77 \cdot 10^4$
LQ Hya	0.7	0.8	1.601	25.2	$2.58 \cdot 10^2$
AB Dor	0.8	0.8	0.515	78.6	$3.05 \cdot 10^1$
EK Dra	1.0	1.0	2.606	19.4	$1.48 \cdot 10^3$
FK Com	1.5	10.0	2.400	210.8	$2.53 \cdot 10^1$
Achernar	7.0	9.85	1.89	262.5	$1.85 \cdot 10^0$

1. táblázat. Különböző aktív csillagokra, illetve az Achernarra kiszámolt  $v_k$  forgási sebesség és  $F_g/F_{cf}$  viszonyszám.

A kis tömegelemre ható gravitációs ( $F_g$ ) és centrifugális ( $F_{cf}$ ) erő aránya jól jellemzi a két erő viszonyát. Ez a viszonyszám valós csillagokra 1–nél nem lehet kisebb, mert az azt jelentené, hogy a csillag szétszakad. 1–hez közeli értékek esetén a csillag alakja torzult, 1-nél sokkal magasabb értékekre viszont a gravitációs erő sokkal nagyobb, így a csillag alakja nem torzul. Számoljuk ki Napunkra és még néhány aktív csillagra ezt a viszonyszámot.

A két erő hányadosa:

$$\frac{F_g}{F_{cf}} = \frac{\gamma \Delta m M}{\Delta m r \omega^2} = \frac{\gamma}{4\pi^2} \cdot \frac{P^2}{r^3} \cdot M$$

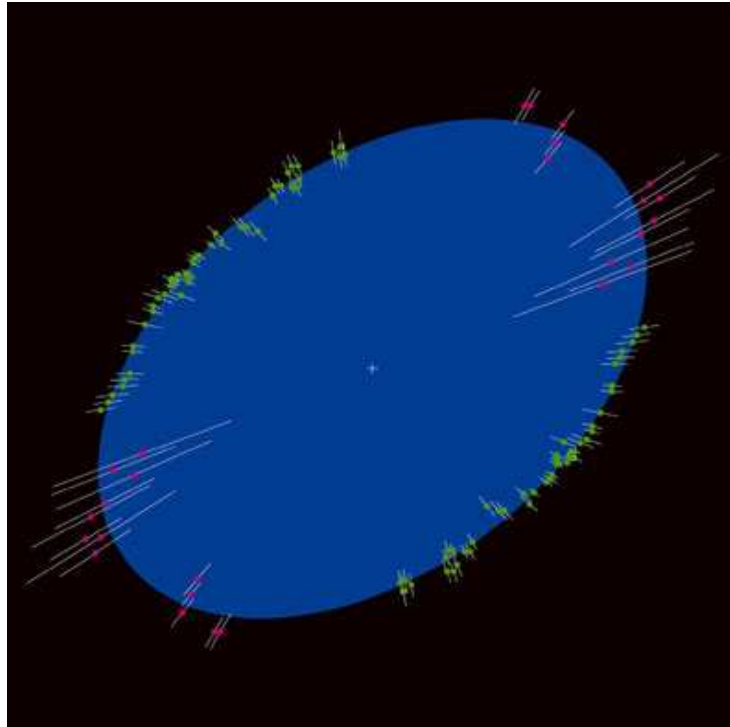
A tömegelem  $\Delta m$  tömege kiesett, így a két erő arányát nem befolyásolja. A két erő aránya a csillag forgási periódusától ( $P$ ), sugarától ( $r$ ) és tömegétől ( $M$ ) függ.

Egy táblázatban foglaltam össze az eredményeket. Az 1. táblázatban naptömegeben és napsugárban vannak megadva az értékek. (A Nap tömege ( $M_{nap}$ )  $1.983 \cdot 10^{30}$  kg,

sugara ( $R_{nap}$ )  $6.96 \cdot 10^5$  km és rotációs periódusa ( $P_{nap}$ ) 25.38 nap.)

Az 1. táblázatból látszik, hogy az aktív csillagok gyors forgási sebessége ellenére a két erő hányadosának értéke 1-nél jóval nagyobb, mely részben az aktív csillagok kis sugarának köszönhető.

A táblázat utolsó sorában egy főszorozati kék óriás csillag szerepel, mely szép példa a torzult csillagok létére. Az Achernar ilyen szempontból jól ismert a szakirodalomban (18. ábra).



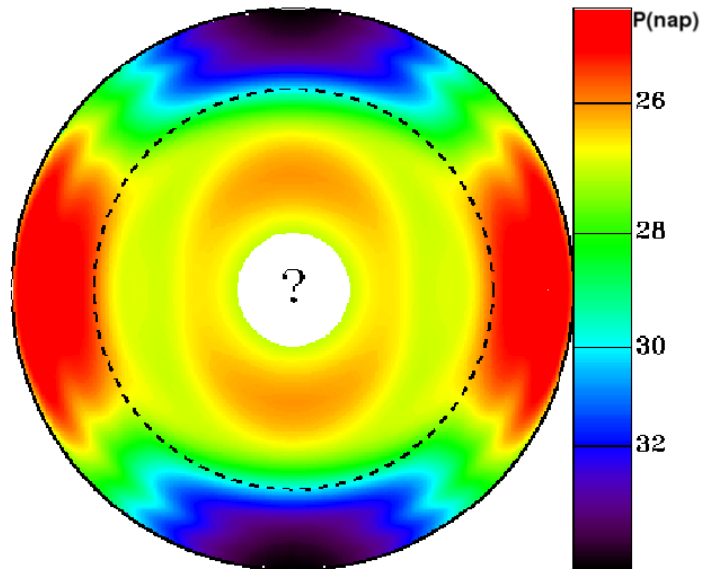
18. ábra. Az Achernar nevű csillag alakja mérések alapján. Forrás: ESO PR 2003/14

### 6.1.3. A rejtett merev test

A dolgozat első felében láttuk, hogy az aktivitás (a mágneses tér) létrehozásában jelentős szerepe van a differenciális rotációnak. A Nap anyaga az egyenlítő közelében gyorsabban rotál, mint a pólusok környékén. Ezzel ellentétben a merev test esetében a forgás feltétele, hogy a test minden tömegpontja azonos szögsebességgel haladjon.

A naprezgések vizsgálatával feltérképezhetővé vált a mélységi differenciális rotáció változása. A 19. ábráról jól leolvasható, hogy kb. 0.75 napsugárnál (szaggatott vo-

nal) a differenciális rotáció megszűnik és a belső tartomány, ami a sugárzási zónát és a magot foglalja magába, már közel merev testként viselkedik.



19. ábra. A Nap mélységi differenciális rotációja. Piros színnel a leggyorsabban, míg kék színnel a leglassabban rotáló részeket jelölték. Forrás: [sohowww.nascom.nasa.gov](http://sohowww.nascom.nasa.gov)

#### 6.1.4. Hőterjedés formái

A hőterjedés, mint téma, lehetőséget nyújt a csillagok jobb megismerésére egy fizika órán. Három fajtájának bevezetését kezdhetjük onnan, hogy elindul az "energia csomag" a csillag belsejéből. Korábban láttuk, hogy a csillag magját követi a sugárzási zóna, ahol az "energia csomag" sugárzással terjed, a következő zónában már áramlással folytatja útját. A felszínre érve újra sugárzással terjed és jut el pl. a Földre. A csillagok belsejében a hővezetés csekély mértékben veszi ki részét az energia szállításból, ellentétben a fehértörpékkel.

Fontosnak tartom, hogy egyszerű kísérletekkel és hétköznapi alkalmazásokkal vezessük be az ismertetett jelenségeket. Tapasztalataim szerint mindennél többet ér, ha az osztályt bevonva eljátszuk az energia szállítás módját a csillag magjától a Földre.

A játékhoz elég néhány krétadarab és az osztály. A krétadarabok jelképezik az "energia csomagot", míg a diákok lesznek az anyagot alkotó atomok. A tanulókat kérjük meg, hogy zsúfolódjanak össze, majd a krétát adogassák egymásnak. Ezzel a sugárzási zónában uralkodó állapotokat modellezhetjük, ahol a részecskék sokan és közel vannak, ezáltal az "energia csomag" folyton elnyelődik és kisugárzódik.

A továbbiakban a terem első felében halmozzuk fel a krétákat, majd állítsuk a tanulókat sorba. Minden diák fogjon meg egy krétadarabot, menjen el vele a terem hátsó végebe, rakja le, és jöjjön vissza egy másikért. A játék jól szemlélteti, mi is történik egy csillag konvektív zónájában, ahogy arra is rávilágít, hogy a leghatásosabb energia transzport. Rövid idő alatt sok krétát (energiát) juttattunk el egyik helyről a másikra. A játék utolsó részében állítsunk néhány tanulót a terem két végébe és kérjük meg őket, hogy dobják oda társuknak a krétát. A csillag felszínéről így terjed tovább az energia.

#### 6.1.5. Áram vezetés

Az anyagok vezetőképességére sok és szemléletes példát lehet bemutatni. Elég egy 4.5 V-os zsebtelep, egy LED és némi szigetelt vezetőhuzal. Bemutathatjuk, hogy egy grafitrúd vagy a csapvíz (elektrolitok) vezeti az áramot. A gázok vezetése, mint téma, lehetőséget kínál a csillagok anyagának tárgyalására.

A csillagok anyaga plazma, azaz forró gáz. A magas hőmérséklet miatt a gáz atomjai ionizált állapotban vannak, mely azt jelenti, hogy szabad elektronok, pozitív és negatív töltésű ionok (töltéshordozók) alkotják. A plazma fajlagos vezetőképessége  $10^3 - 10^6 A/Vm$  (tudni kell, hogy erősen hőmérsékletfüggő az értéke), mely mellett még az ezüst vezetőképessége ( $60 A/Vm$ ) is eltölpül.

A tehetséggondozás keretein belül mérési feladat lehet a gyertyaláng vezetőképességének vizsgálata. A méréshez szükség van két elektródára, multiméterre és egy változtatható feszültségforrásra. Kimérhetjük, hogyan változik a gyertyaláng vezetőképessége a feszültség függvényében.

Tudván, hogy a plazma jó vezető, a Nap mágneses terének jelenlétét is megmagyarázhatjuk.



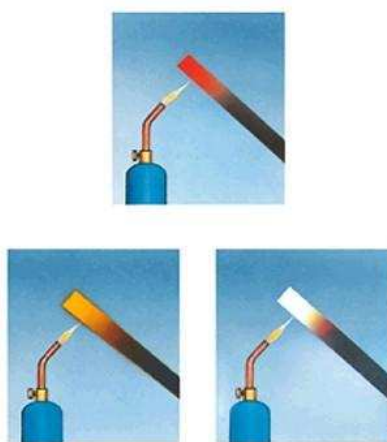
### 6.1.6. Mágneses indukció

Egy egyszerű kísérlettel igazolhatjuk, hogy áramjárta vezető körül mágneses tér jön létre (indukálódik). A kísérlethez a korábbiakban említett eszközök és egy rézdrót elegendő, illetve szükségünk van még egy cérnával felfüggesztett mágnesezett tűre. Ha a tű mellett vezetjük el áramjárta rézdrótunkat, akkor a tű megmozdul, bizonyítva a mágneses tér jelenlétét. Ennél a kísérletnél érdekesebb egy 9 V-os elemet használni. Ha a plazma anyaga (ami töltött részecskékből áll) rendezett és egyirányú mozgást végez, akkor mágneses tér indukálódik. A helyzetet csak bonyolítja, hogy ez a mágneses tér visszahat a plazma anyagára, mely nehezzé teszi a folyamatok leírását.

### 6.1.7. Csillagok hőmérsékleti sugárzása

A csillagok felszíni hőmérséklete egy fontos paraméter. Ennek meghatározására távolságuk miatt csak közvetett módszereket használhatunk, melyek elsősorban a hőmérsékleti sugárzásra épülnek.

Egy fémrudat hevítve (20. ábra), kezdetben csak vörösen, tovább hevítve sárgásan, majd fehéresen izzik.



20. ábra. Különböző hőmérsékleten izzó fémrúd képe. Forrás: Internet

A kísérleti és az elméleti kutatások alapján megállapították, hogy milyen összefüggés van a kisugárzó energia, a hőmérséklet és a hullámhossz között.

Stefan–Boltzmann törvénye szerint a test egységnyi felületéről időegység alatt kisu-

gárzó összes energia a sugárzó test abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával arányos

$$E = \sigma T^4.$$

A törvény csak abszolút fekete test (a ráeső sugárzást teljesen elnyeli) sugárzására igaz. Ennek ellenére nagyon sok testnek jó közelítéssel fekete test sugárzása van. Ilyen az izzó wolframszál, az izzó láva, a csillagok, stb.

Az aktív csillagok felszíni hőmérséklete általánosan 2000–6000 K között mozog. A törvényből következik, hogy az általuk kisugárzott energia pl. a kék szuperóriás csillagokhoz képest, melyek felszíni hőmérséklete eléri a 10000–20000 K-t, jóval alacsonyabb.

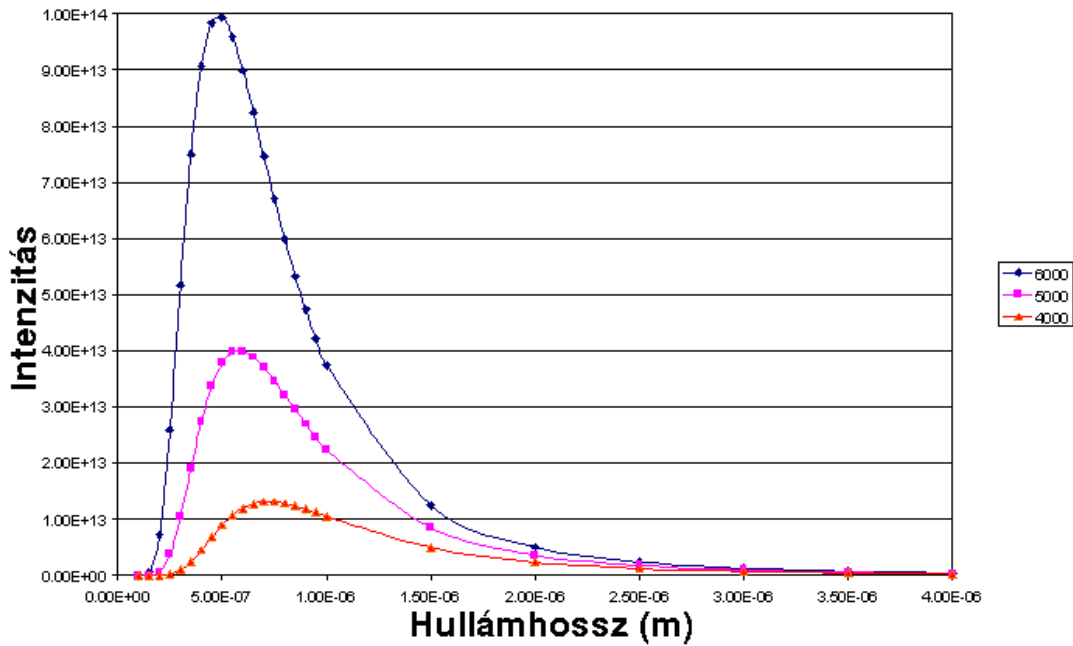
Említettük, hogy a fémrúd hőmérsékletének emelkedésével a színe is változik. A különböző hőmérsékletű fémhez más-más sugárzási görbe tartozik. A 21. ábrán ezt látjuk, melyet úgy kaphatunk meg, ha minden hullámhosszon megmérjük, mennyi energiát sugároz ki az adott hőmérsékletű fémrúd. Az ábrán látható, hogy a legnagyobb energiával kisugárzott fény hullámhossza ( $\lambda_{max}$ ) annál kisebb, minél magasabb a test hőmérséklete ( $T$ ). Az összefüggést Wien fedezte fel. Megállapította, hogy

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.896 \cdot 10^{-3} mK,$$

ez a Wien–féle eltolódási törvény. Ennek segítségével kiszámolható, hogy a Nap 5800 K-es hőmérsékletéhez mekkora hullámhossz tartozik. Ennek értéke 550 nm körül van. Általánosan elterjedt vélekedés, miszerint az emberi szem evolúciós okok miatt 550 nm-en a legérzékenyebb. Ezt a kijelentést fenntartással kell kezelni, a téma részletes tárgyalását és vizsgálatát Antal és mtsai. (2005) munkájában találjuk meg.

## 6.2. Alternatív lehetőségek

Az alternatív lehetőségek mindegyikében közös, hogy a tanuló nem passzív, hanem aktív befogadó a tanítási–tanulási folyamatban. Ezáltal egy adott témát, témakört hatékonyabban sajátíthat el. Mindazonáltal épít a diák egyéni és csoportban mutatott képességeire.



21. ábra. Három különböző hőmérsékletre tartozó sugárzási görbe. Forrás: Internet

### 6.2.1. Projekt módszer

Az aktív csillagok témakörének megismertetése történhet projekt munka keretében. A módszert 20. század eleji amerikai reformpedagógusok, Dewey és Kilpatrick nevéhez köthetjük.

A Dewey pedagógiai elvein alapuló projekt módszer elterjedésében nagy szerepe volt Kilpatrick A projekt módszer című könyvének (1918), mely a reformpedagógia egyik legforradalmibb írása. Hite szerint a gyereket úgy kell tanítani az iskolában, hogy figyelembe vesszük tapasztalatait, képességeit, érdeklődését. Szerinte projekt „minden célvezérelt tapasztalatszerzés, minden célirányos tevékenység, amelyben az uralkodó elképzelés határozza meg a tevékenység célját, rendezi el folyamatát és adja motivációs erejét.” Hortobágyi Katalin (1991) meghatározása konkrétabb: „A projekt egy sajátos tanulási egység, amelynek a középpontjában egy probléma áll. A feladat nem egyszerűen a probléma megoldása vagy megválasztása, hanem a lehető legtöbb vonatkozásnak és összefüggésnek a feltárása, amely a való világban az adott problémához organikusan kapcsolódik.”

A módszert sokféle módon, sok definícióval próbálták már meghatározni, de egy dologban majdnem mindenki egyetért: ez nemcsak tanulási technika, pedagógiai mód-

szer, hanem a gyerekek nevelésének, személyiségfejlesztésének nagyon hatékony eszköze.

A témaválasztás (első lépés) sokféle lehet, azt is mondhatjuk, hogy minden témában szervezhető projekt. Olyan, amely a szűken vett tananyaghoz, a tankönyvekben szereplő ismeretekhez kapcsolódik, olyan, amely részben köthető a tantervhez, és olyan is, amely annál általánosabb témával foglalkozik.

A második lépés a tervekészítés, ahol – csakúgy, mint a témaválasztásnál – a tanárnak csupán irányító szerepe van. Együtt, egyenrangúként tervez a részt vevő gyerekekkel, és mint moderátornak arra kell figyelnie, hogy minden gyerek megtalálja a feladatát a munkában. Itt dől el, hogy a projekt be tudja-e tölteni azt a szerepét, hogy minden gyereknek egyaránt biztosítja az értelmes tanulás és munka lehetőségét.

Az adatgyűjtés mint a projekt harmadik lépcsőfoka történhet az iskolában és az iskola falain kívül is. Az a szerencsés, ha a projektmunka kapcsán a gyerekek eddig ismeretlen helyeket keresnek fel és találnak meg. Ilyen lehet egy csillagvizsgáló meglátogatása, ahol meghallgatnak egy a projektmunka témájához kapcsolódó előadást.

A téma feldolgozása sokféle módon történhet, akár a hagyományos órakeretben, akár az iskola időkeretén túl. Nyilván ez utóbbi alkalmasabb a projektszervezésre, de nem lehetetlen az óra alatti feldolgozás sem, különösen, ha nincs lehetőség másra.

A legfontosabb azonban az, hogy a munka közös tevékenység legyen, a tanár inkább csak megfigyelőként, segítőként vegyen részt, ne pedig irányítóként. A projekt olyan munka, ahol a gyerekek hozzáadják saját tapasztalatukat, munkájukat a közöshöz, miközben egymástól is nagyon sokat tanulnak. Az osztályteremben egyébként vagy máskor nem aktív gyerekek kitűnhetnek ügyességükkel, gyorsaságukkal, szervezőképességükkel, döntésképeségükkel, életrevalóságukkal.

A végtermék nagyon fontos nevelési eszköz a projektmunkában, a gyerekek itt léphetnek ki az iskola belső nyilvánossága elé, megmutathatják munkájukat a szülőknek és az iskola szűkebb vagy tágabb környezetének. A produktum bemutatásával kezdődik a projektmunka értékelő fázisa (utolsó lépés), ahol fontos az önértékelés, egymás munkájának pozitív szemléletű mérése, szükség esetén a produktum korrigálása.

A csillagászat számos témát kínál, melyet projektmunka keretében feldolgozhatunk a gyerekekkel. A továbbiakban néhány lehetőséget sorolok fel:

1. Hazai csillagvizsgálókban folyó tudományos munkák

A cél, hogy a tanulók felkeressék a magyarországi csillagvizsgálókat. Továbbá

bepillantást nyerjenek az ott folyó munkákba. Az anyaggyűjtés során szerzett ismereteket, élményeket egy kiállítás és előadás keretén belül mutassák be környezetüknek.

## 2. Csillagászati megfigyelések

A diákok végezzenek hosszú távú vagy többszöri megfigyeléseket valamilyen égitestről. Természetesen az objektum megválasztását a rendelkezésre álló műszerek szabják meg elsősorban. Például a meteorok megfigyelése szabadszemmel történik, ugyanakkor változócsillagok fényességbecsléséhez elég egy binokulár is. Amennyiben a környezetben van lehetőség komolyabb műszerek használatára, a lehetőségek választéka is bővül. A munka produktuma beküldésre kerülhet pl. a Magyar Csillagászati Egyesülethez, részét képezhetik diák pályázatoknak, továbbá előadás és poszter formájában összefoglalható.

## 3. A csillagászat egyik területének bemutatása

A tanulók egy adott témát részletesen térképezzenek fel. Ehhez használják a könyvtárat és internetet. Megfogalmazható cél, hogy a csoport sajátítsa el saját tudásszintjéhez mérten a választott témát és abban otthonosan mozogjon, így tudását mások előtt biztonsággal elő tudja adni.

### 6.2.2. Brain storming

Brain storming, magyarul öteltörze: az alkotó szellemi munkát végző csoportok hatékonyságát növelő módszer. Célja az, hogy minél több jó ötlet szülessen, úgy, hogy a csoporton belül a résztvevők személyiségétől függetlenül jó együttműködés alakul ki. Segítségével az ötletek, megoldási javaslatok olyan bőséges választéka kapható, amelynek összeállítására egyetlen ember nem lenne képes.

A brain stormingot rendszerint célmeghatározáskor, helyzetfeltárásnál vagy koncepcióalkotáskor, valamilyen megoldás keresésekor alkalmazzák, teljes feladat megoldására viszont nem alkalmas.

A fentiek miatt, egy kötetlen(ebb) szakköri foglalkozáson jól használható annak ellenére, hogy nem ötletgyűjtés a cél, hanem egy téma bevezetése vagy feldolgozása. A menete egyszerű. A szakkörvezető (aki a moderátor szerepét tölti be) felveti a témát, mely esetünkben kapcsolódhat az aktív csillagokhoz. A résztvevők egymás után,

gyorsan egy–két szóban leírható gondolatokat fogalmaznak meg, melyet a moderátor vagy egy segítő rögzít a táblán (nem fontos, hogy ki az adott gondolat megfogalmazója). A vezető feladata, hogy a résztvevőket ne engedje egyszerre beszélni, továbbá saját gondolataival megfelelő irányba terelje a beszélgetést. Amikor a társaság kifogy a témához kapcsolódó fogalmakból, akkor nem szabad tovább erőltetni, le kell zárni ezt a szakaszt.

A következő lépcsőben a táblára felírt pár szavas fogalmakból felépíthető a foglalkozás további menete. Beszéljük meg azokat a kifejezéseket, melyek nem mindenki számára világosak vagy nem egyértelmű, hogy miként kapcsolódik az adott témakörhöz és ez alapján szelektáljuk. A megmaradt fogalmakat csoportosíthatjuk, logikai sorrendbe tehetjük, kibővíthetjük, stb.

Ez a fajta foglalkozási forma tartogat buktatókat is, mivel feltételezzük, hogy valamilyen részismerettel rendelkeznek a gyerekek. Éppen ezért, ha a téma nagyon speciális, akkor érdemes előtte valamilyen formában feldolgozni és néhány alkalom elteltével elővenni.

### **6.2.3. Manuális készségek alkalmazása**

Egy témakört (és egyéb témát is) feldolgozhatunk úgy, hogy kihasználjuk a gyerekek manuális készségét. A diákok nagy hányada szeret rajzolni, papírt hajtogatni, stb. Erre példának említeném, ami egyik matematika órán történt. Otthon megoldandó, szorgalmi feladatként adtam fel a következő példát. Hét egymást követő, négyzetekből álló térhálóból hajtogassanak kockát. "Sajnos" a feladat annyira megtetszett a diákoknak, hogy az órai anyag (mely ennél szárazabb volt), emiatt kicsit háttérbe szorult. Éppen ezért érdemes az ismeretszerzés folyamatát ezekkel kiegészíteni, színesíteni. Egy szakköri és tanórai foglalkozás keretén belül alkalmaztam ezeket, az így szerzett tapasztalataimat írom le.

A gyerekeket 2–3 fős csoportra osztottam fel. Minden csoport kapott egy nagy papírt és színes ceruzát. A feladat egy történet köré épült, mely úgy hangzott, hogy a Föld túlnépesedett, az emberiségnek a Naprendszer más égitestjei felé kell terjeszkednie és benépesítenie. Figyelembe véve a Naprendszerről eddig megszerzett valós ismereteinket rajzolják le, mely égitesteken, hogyan telepednének meg. Fontos, a rajzon jól látható legyen, hogy az égitest milyen jellemzőit és milyen módon használják ki a benépesítés során. Az asztalra kivettem néhány ismeretterjesztő könyvet, hogy segítsen

munkájukat. A rajz elkészítésére kb. 1 órát kaptak, ezután szóban ismertették munkáikat, melyet a többiekkel megvitattunk. Fontos, hogy világosan elkülönítsük a reális és helytelen, fizikailag lehetetlen ötleteket, felvetéseket egymástól.

Ennek mintájára az 5.4.5 és 5.4.6 fejezetekben leírt ismereteket hasonlóképpen feldolgozhatjuk. A feladatban kulcsfontosságú szerepet játszik a jó kerettörténet, mely buktatója is lehet a foglalkozás sikerének és hatékonyságának.

Egy másik lehetőség, hogy minden csoport feldolgoz egy rövid témát. Ehhez kapnak egy maximum egy–két oldalas szöveget néhány képpel. A kiosztott csomagoló papírra el kell készíteniük egy rajzo(ka)t és szöveget tartalmazó prezentációt, melyet a csoportból egy vagy két ember előad a többiek előtt. A rögzített témák miatt kevésbé időigényes és talán hatékonyabb is. Éppen ezért, egy dupla fizika órán is megvalósítható. Saját tapasztalatom, hogy többet tanultak így a diákjaim, mint ha kétszer 45 percig írok a táblára és magyarázok. Az unatkozó arckifejezések és más tevékenységgel való foglalkozás helyett aktívan részt vevő és érdeklődő diákokat láttam.

### 6.3. Összefoglalás

Dolgozatomban általános áttekintést adtam a csillagok fejlődéséről, felépítéséről és különböző osztályairól. Bemutattam, hogyan épül fel a Nap, milyen jelenségek figyelhetők meg rajta és röviden megemlítettem Földünkre gyakorolt hatásait is. Ezek után rövid történeti áttekintést adtam az aktív csillagok kutatásáról, majd típusaikat mutattam be. Ismertettem két fő módszert az aktív csillagok felszínének feltérképezésére és ezt követően bemutattam, milyen jelenségeket és folyamatokat figyelhetünk meg rajtuk.

A Mire tanítanak a csillagok? című fejezetben szakmódszertani ötleteket vettem fel, melyeket integrálva a fizika tanításba, talán növelik a diákok motivációját. A fejezet második részében olyan alternatív lehetőségeket említettem meg, melyek kevésbé használhatók a klasszikus iskolarendszerben, ezért inkább szakkörök vagy iskolán kívüli programok részét képezhetik.



## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak a rengeteg segítségért és türelemért, melyet a dolgozat elkészítése során kaptam.

Köszönöm Családomnak, hogy mindvégig támogattak és olykor hangot adtak a téma iránti érdeklődésüknek.

## Hivatkozások

- Antal A., Kály–Kullai K., Farkas H., 2005, *Fizikai Szemle*, 06. szám
- Appourchaux T., Catala C., Catalano S., 1991, *PRISMA Assessment Study*, ESA SCI 5
- Berdyugina S. V., 2005, *Living Rev. Solar Phys.*, 2, 8
- Berdyugina S. V., Berdyugin, A.V, Ilyin, I., Tuominen, I., 1999, *A&A*, 350, 626-634
- Berdyugina S. V., & Tuominen I., 1998, *A&A*, 336, L25
- Berdyugina S. V., & Usoskin I., 2003, *A&A*, 405, 1121
- Choudhuri A.R., Gilman P.A., 1987, *ApJ* 316, 788
- Chugainov P.F., 1966, *IBVS No.* 122
- Guinan E.F. & Engle S., 2007, *arXiv:0711.1530v1 (astro-ph)*
- Hall D.S., 1991, *IAU Colloq. No.* 130, 353
- Hoffmeister C., 1965, *Veröff. Univ. Sternw. Sonneberg*, 6, 97
- Hortobágyi K., 1991, *Új Pedagógiai Szemle*, 7-8. szám, 165-169
- Hortobágyi K., 1991, *Projekt kézikönyv*, Bp.
- Jennings R. L., & Weiss N. O., 1991, *MNRAS*, 252, 249
- Jetsu L., Pelt J., Tuominen I., & Nations H. L., 1991, in *The Sun and Cool Stars: activity, magnetism, dynamos*, ed. I. Tuominen, D. Moss, & G. Rüdiger (Heidelberg: Springer), *Proc. IAU Coll.*, 130, 381
- Jetsu L., Pelt J., & Tuominen I., 1993, *A&A*, 278, 449
- Kilpatrick W.H., 1918, *The project method*, *Teachers College Record* Vol. 19, No.4, p. 319-335
- Korhonen H. & Elstner D., 2005, *A&A*, 440, 1161-1165

- Kron G.E., 1947, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 305, 261-265
- Kron G.E., 1952, *Astrophys. J.*, 115, 301-319
- Mangenev A., 1986, in: *Highlights of Astronomy Vol. 7, Proc. XIX IAU Gen. Assembly*, Dordrecht, Reidel, p. 399
- Mergentaler J., 1950, *Wroclaw Contr.*, no.4.p.1
- Moss D., 2004, *MNRAS*, 352, L17
- Moss D., 2005, *A&A*, 432, 249
- Mullan D.J., 1974, *Sol. Phys.* 38, 9
- O'Connell D.J.K., 1951, *Pub. Riverview College Obs.*, 2, 85
- Oláh K., Kolláth Z., Strassmeier K.G., 2000, *A&A* 356, 643
- Oláh K., Strassmeier K.G., 2002, in: *Proc. 1st Potsdam Thinkshop on Sunspot and Starspots*, ed. Strassmeier K.G., *Astron. Nachr.* 323, 3/4, 361
- Oláh K., Korhonen H., Kővári Zs., Forgács-Dajka E., Strassmeier K.G., 2006, *A&A*, 452, 303-309
- Pallavicini R. et al., 1981, *ApJ* 248, 279
- Papp K., Józsa K., 2000/2 61., *Fizikai Szemle*
- Parker E. N., 1975, *ApJ* 198, 205
- Ribas I., Guinan E.F, Güdel M., Audard M., 2004, *astro-ph/0412253v1*
- Rodonò M., Messina S., Lanza A. F., Cutispoto G., & Teriaca L., 2000, *A&A*, 358, 624
- Sagan C., & Mullen G., 1972., *Science*, 177, 52
- Schüssler M., Solanki S.K., 1992, *A&A*, 264, L13
- Schüssler M., 1996, in: *Stellar Surface Structure*, IAU Symp. No. 176, eds. Strassmeier K.G. & Linsky J.L., p. 269
- Strassmeier K. G., *Stellar Coronae*, MPIfR, 2006

Strassmeier K.G., Bartus J., Kővári Zs., Weber M., Washüttl A., 1998, *A&A*, 336, 587

Vogt, S.S., Penrod, G.D., 1983, *PASP* 95, 565

Vogt, S.S., Hatzes, A.P., 1996, in: *Stellar Surface Structure*, IAU Symp. No. 176, eds. Strassmeier K.G. & Linsky J.L., p. 245

Alulírott ....., ..... szakos hallgató, kijelentem, hogy a szakdolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy szakdolgozatomat/diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

aláírás

dátum