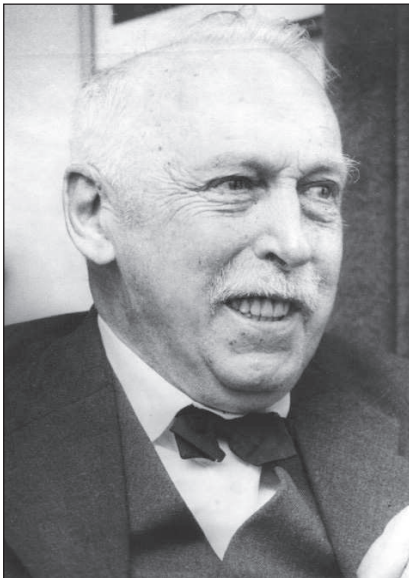


100 éves a Hertzsprung–Russell-diagram

A megfigyelő csillagászat legfontosabb munkaeszköze a távcső és a rászerezelt kisegítő berendezések. Az elméleti csillagászatban ugyanilyen fontos szerepet játszik a Hertzsprung–Russell-diagram, vagy közkeletű rövidítéssel HRD. Idén emlékezünk meg felfedezésének századik évfordulójáról.

A HRD szemléletesen megmutatja a csillagok fizikai tulajdonságai közötti összefüggést. Több változatban létezik, attól függően, hogy mely paramétereket ábrázoljuk a vízszintes, illetve a függőleges tengelyen. A lényeg azonban minden esetben az, hogy a diagramon a csillagok jól körülhatárolható csoportokba rendeződnek, következésképpen a jellemzőik nem függetlenek egymástól. Ezek az összefüggések alapvető bepillantást engednek a csillagászok számára a csillagok működésébe és fejlődésébe. A XX. századi asztrofizika legfontosabb felismerési nem születettek volna meg a HRD nélkül.



Ejnar Hertzsprung

A diagram egyik felfedezője Henry Norris Russell (1877–1957) amerikai csillagász volt, aki már egyetemi hallgatóként kitűnt tehetségével, ezért 1905-től a Princeton Egyetemen dolgozhatott. 1914-ben az Amerikai Csillagászati és Asztrofizikai Társaság, illetve az Amerikai Tudományfejlesztési Társaság éves gyűléseire összefoglaló tanulmányt készített a csillagok fizikájára vonatkozó ismeretek akkori helyzetéről. Dolgozatát 1914. április–májusban a *Nature* há-

rom részletben közölte, majd a *Popular Astronomy* című népszerűsítő folyóiratban is megjelent.

Munkáját az tette lehetővé, hogy a XX. század elejére a színképelemzésnek köszönhetően már meg lehetett állapítani a csillagok színképtípusát, ebből pedig a Wien-törvény, illetve a Planck-féle sugárzási törvények felhasználásával a felszíni hőmérsékletüket. Addigra már százezer számra sikerült a csillagokat az O, B, A, F, G, K vagy M színképosztályok valamelyikébe besorolni. Az egyre pontosabb parallaxismérések eredményeként a csillagok távolságát is meg lehetett határozni, így látszó fényességükből következtetni tudtak a valódi, vagy más néven abszolút fényességükre.

Russel a HRD általa felrajzolt első változatában a vízszintes tengelyen a fenti színképosztályokat ábrázolta, a függőleges tengelyen pedig a csillagok abszolút fényességét, emiatt az ábrát szín-fényesség diagramnak is szokás nevezni. A színképosztály egyértelműen megfeleltethető a csillag felszíni hőmérsékletének, a vízszintes tengelyen a két mennyiség bármelyike ábrázolható. Russell felismerte, hogy a diagramon a csillagok többsége egy átlós sávba rendeződik, amely az ábra bal felső részén elhelyezkedő a forró (kékesfehér) és fényes csillagoktól a jobb alsó részen lévő hűvösebb (vörös) és halványabb csillagokig húzódik. Ez az úgynevezett fősorozat vagy főág. (Az asztrofizika későbbi eredményei értelmében ezek azok a csillagok, amelyek belsejében a hidrogént héliummá alakító magreakciók termelik az energiát.) Ugyanakkor néhány csillag a főág fölött helyezkedett el, vagyis ezek jóval fényesebbek az ugyanolyan színű csillagok többségénél. (Ezek a csillagfejlődés későbbi szakaszát képviselő óriáscsillagok, amelyek sokkal nagyobb méretük miatt jóval fényesebbek az azonos hőmérsékletű fősorozati csillagoknál.) Russell diagramján egyetlen egy csillag a fősorozat alá, a bal alsó részre került. Később sok hasonló, forró, de halvány csillagot fedeztek fel, ezek az úgynevezett fehér törpék.

A ma ismert csillagok 90%-a a fősorozaton helyezkedik el. A nagy tömegű, fényes csillagok a főág felső végén, majd a főágon lefelé haladva egyre kisebb tömegű csillago-



Henry Norris Russell

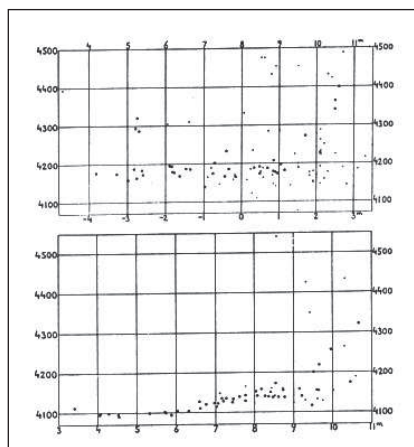
kat találunk. A Nap nagyjából a fősorozat közepe táján helyezkedik el. Az óriáságban jóval kevesebb csillag helyezkedik el. Bár fejlődése végén minden csillag óriássá fúvódik fel, ebben az állapotban azonban sokkal rövidebb időt töltenek, mint a hidrogénegető fősorozati állapotban, ezért az összes megfigyelhető csillagról „pillanatfelvételt” készítve azon sok fősorozati és kevés óriáscsillagot találunk. A vörös óriások energiatermelése nagyon intenzív, ezért nukleáris üzemanyaguk hamar elfogy. Egy részük – a kisebb tömegűen – fehér törpévé roskadnak össze, vagyis a HRD bal alsó részébe kerülnek.

Russell-lel párhuzamosan, de tőle függetlenül a XX. század elején egy dán vegyész-mérnök, Ejnar Hertzsprung (1893–1967) is a csillagok fizikáját tanulmányozta. Diplomáját a Koppenhágai Műszaki Egyetemen szerezte, így valójában amatőr csillagásznak számított. Valószínűleg ő volt az utolsó a csillagászat történetében, aki a csillagászat professzora és obszervatóriumigazgató lett, anélkül, hogy az egyetemi tanulmányai során valaha is csillagászatot hallgatott volna. A századfordulón néhány évig Szentpéterváron eredeti szakmájában dolgozott, majd Lipcsében folytatta kémiai tanulmányait. 1902-ben tért haza Koppenhágába, ekkor fordult érdeklődése a csillagászat felé.

Később holland és német csillagvizsgálókban dolgozott. Különböző módszereket dolgozott ki a csillagok távolságának megál-

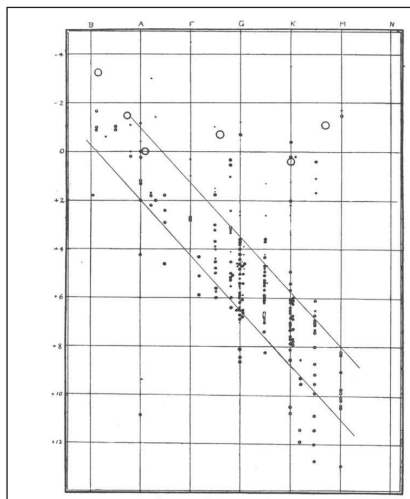
lapítására. A távolságból az abszolút fényességet levezetve észrevette, hogy egyes K és M színképtípusú csillagok sokkal fényesebbek ugyanazon osztályba tartozó társaiknál, vagyis sokkal nagyobbak azoknál, amint azt már egy 1905-ben megjelent dolgozatában leírta. 1911–12-ben kapcsolatot talált két nyílthalmaz, a Fiastyúk (Plejádok) és a Hyadok csillagainak hőmérséklete és abszolút fényessége között. Szerencsétlenségére az általa vizsgált mindkét csillaghalmaz viszonylag fiatal, azért csak nagyon kevés csillaguk érte el az óriáságot, a csillagok döntő többsége a fősorozatba tartozik. Eredeti diagramján egyébként – Russelltől eltérően – ő a vízszintes tengelyen ábrázolta a fényességet, a függőlegesen pedig a szint, illetve a hőmérsékletet. Egyszerűsítette viszont a helyzetét, hogy az egyazon halmazhoz tartozó csillagok távolságát azonosnak tekinthette. Sajnos eredményeit nem csillagászati, hanem a *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie* című fotografiai szaklapban tette közzé, így arra a csillagászok nem figyeltek fel.

1907-ben fényképészeti tapasztalatait felhasználva cikket írt a csillagok fotografikus fényességének megállapításáról. Cikkei különnyomatát elküldte a Göttingeni Observatórium igazgatójának, Karl Schwarzschildnek, aki felismerte a munka jelentőségét, a dán csillagászt rendkívüli professzori címre javasolta, majd a Potsdami Csillagvizsgálóban munkatársává fogadta. Schwarzschild 1910-ben az Egyesült Államokban járt, ahol találkozott Russellel. Így szerzett tudomást arról, hogy az amerikai csillagász hasonló eredményekre jutott, mint Hertzsprung.



A HRD őse, Hertzsprung első ábrái a Hyadok (fent) és a Fiastyúk (lent) csillagairól. A vízszintes tengelyen a csillagok fényességét, a függőlegesen felszíni hőmérsékletüket ábrázolta

Russell helyesen jött rá arra, hogy a rendkívül forró, B színképtípusú csillagok lényegesen nagyobb tömegűek a többi csillagnál.



Az 6s-HRD Russell féle változata az 1914-es cikkéből. A ma megszokott módon a függőleges tengelyen van a csillagok fényessége, a vízszintesen a színképosztály. A hőmérséklet balról jobbra csökken, a diagramon már világosan kirajzolódik a fősorozat és ettől határozottan elkülönül néhány óriáscsillag

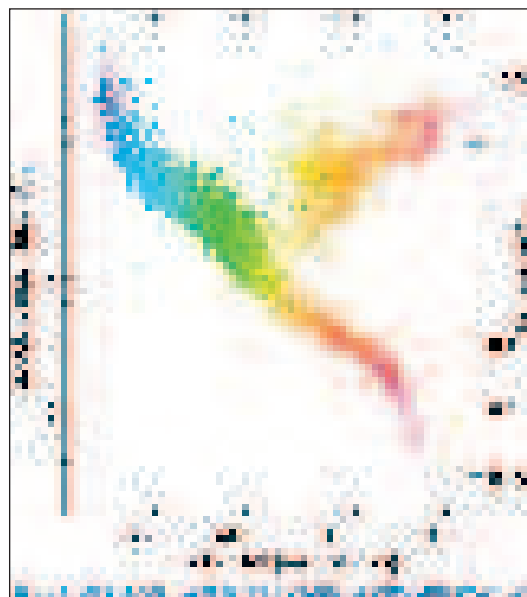
Emellett azonban ezt is feltételezte, hogy a csillagok fejlődésük során a főág mentén vándorolnak – ebben azonban tévedett. Ma már tudjuk, hogy a csillagok keletkezésükkor a fősorozat egy meghatározott pontjára fejlődnek rá. Hogy melyik pontjára, azt a tömegük határozza meg. Mindaddig ebben a pontban maradnak, amíg a belsejükben a hidrogén fúziója termeli az energiát. Miután a hidrogén elfogy a belsejükben, és megindul a hélium magasabb rendszámú elemekké történő egyesülése, akkor a csillag új egyensúlyi állapotba kerül, óriásá fúvódik fel. Csak ekkor mozdul el a HRD főágáról és vándorol át a főág fölötti óriáságra.

Különösen jól megfigyelhető ez a folyamat, ha különböző korú csillaghalmazok HRD-it hasonlítjuk össze. A fiatal halmazokban (mint például a Hertzsprung által vizsgált két halmaznál) a csillagok szinte kivétel nélkül a főágába tartoznak, a halmaz HRD-jéről hiányzik az óriáság. Az idősebb halmazoknál a csillagok egy része már elhagyta a főágot. A csillagok fősorozati élettartamának hossza a tömegüktől függ, vagyis a legnagyobb tömegű csillagok válnak legelőször óriássá. Am a nagyobb tömegű csillagok belsejében intenzívebb az energiatermelés, ezért ezek magasabb hőmérsékletűek, vagyis a főág felső ré-

szén helyezkedtek el. Az idősebb halmazokban a halmaz (és csillagai) keletkezése óta eltelt idő alatt ezek a nagy tömegű csillagok már mind óriásokká váltak, következésképp kezd kialakulni a HRD óriásága, a fősorozat felső vége viszont hiányzik. A nagyon idős halmazoknál már csak a kis tömegű vörös törpék maradtak a főágon, vagyis minél öregebb a csillaghalmaz, annál rövidebb rész marad meg a fősorozatból. Az úgynevezett töréspont, ahonnan kezdve a főág csillagai már hiányoznak (mert már mind átfelődtek az óriáságra), a halmaz korára jellemző. A HRD alakjából, vagyis a töréspont helyéből a halmaz korára következtethetünk.

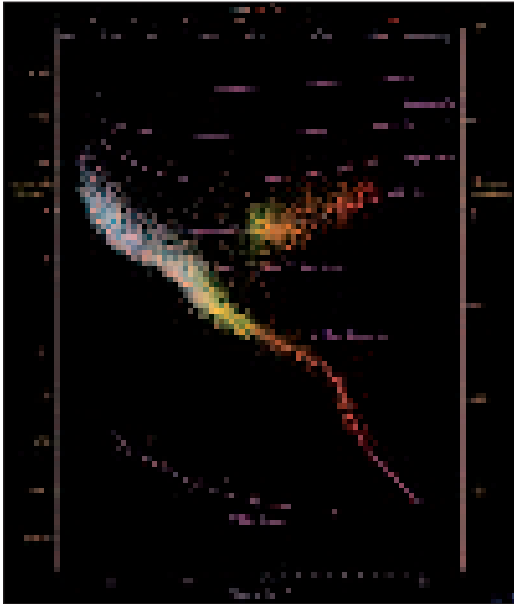
Érdekes felismerés, hogy a nyílthalmazoknál a töréspont különböző helyen fordulhat elő, a halmaz korától függően. A gömbhalmazok HRD-i viszont egyformák, a töréspont mindenütt a főág alsó vége közelében található, vagyis csak a kisebb tömegű csillagok maradtak meg a fősorozatban. Ez azt bizonyítja, hogy a gömbhalmazok mind öregek, legalább 10 milliárd évesek, vagyis az összes gömbhalmaz a Tejútrendszerrel egy időben jött létre.

Russell tehát 1914-ben több konferencián és több cikkben ismertette eredményeit. Hertzsprung ugyan néhány évvel korábban



A Hipparcos űrtávcső mérései alapján 17 500 csillagot tartalmazó, modern HRD. A csillagok színét a vízszintes tengelyen a kék és sárga színszűrővel mért fényességeik különbsége jelzi (F. van Leeuwen összeállítása)

publikálta dolgozatát, ám az említett fotografiai szaklapban. Következésképpen a diagramot évtizedeken keresztül – főként az angol nyelvű szakirodalomban – egyszerűen csak Russell-diagramként emlegették. Ám elsősorban a nemzeti büszkeségtől hajtva a dán születésű Bengt Strömberg és a holland származ-

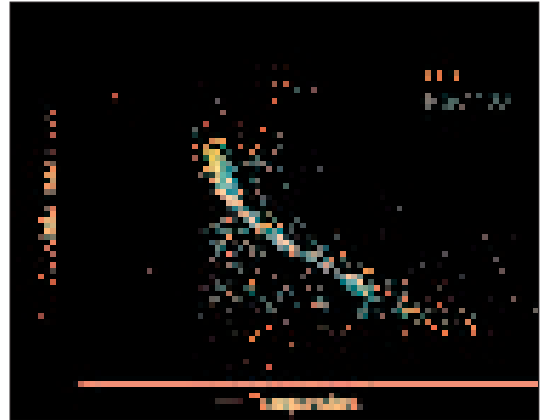


Korszerű HRD az átlósan futó fősorozattal, fölötté az óriásággal, alatta pedig a fehér törpékkel. A vízszintes tengelyen a B–V színindex (a kék és a sárga fényesség különbsége), fent a színképosztály és az annak megfelelő felszíni hőmérséklet látható. A függőleges tengelyről az abszolút fényesség magnitúdójában, illetve a csillag luminozitása (Nap = 1) olvasható le

zású Gerard Kuiper – Hertzsprung volt tanítványa a Leideni Observatóriumban – harcba szállt Hertzsprung elismeréséért. Akkoriban

A HRD felfedezését követően Hertzsprung cefeida típusú változócsillagok távolságának pontos meghatározásával foglalkozott. Ennek köszönhetően pontosítani tudta a cefeidák fényváltozási periódusa és abszolút fényessége között korábban Henrietta Leavitt által felismert összefüggést. 1919-től a Leideni Observatóriumban dolgozott, amelynek 1937-től az igazgatója volt. Két kisbolygó felfedezése is a nevéhez fűződik. Russell pályája további részében is a Princeton Egyetemen dolgozott, 1911-től professzorként, majd kutató professzorként. 1912-től 1947-es visszavonulásáig ő vezette a Princeton Egyetemi Csillagvizsgálót.

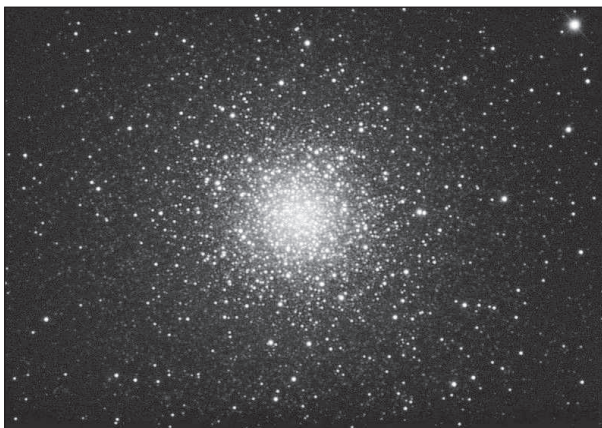
A HRD pontosságának kulcsa a csillagok abszolút fényességének ismerete, amihez viszont a távolságuk pontos mérésére lenne szükség. (A csillaghalmazok esetében ezért kedvezőbb a helyzet, mert a halmazok mérete a tőlünk mért távolságukhoz képest általában elhanyagolhatóan kicsi, ezért csillagok azonos távolságra lévőnek tekinthetők.



A különböző korú nyílt csillaghalmazok HRD-jén a főág másutt ér véget, minél öregebb a csillaghalmaz, annál lejjebb tolódik az ún. töréspont

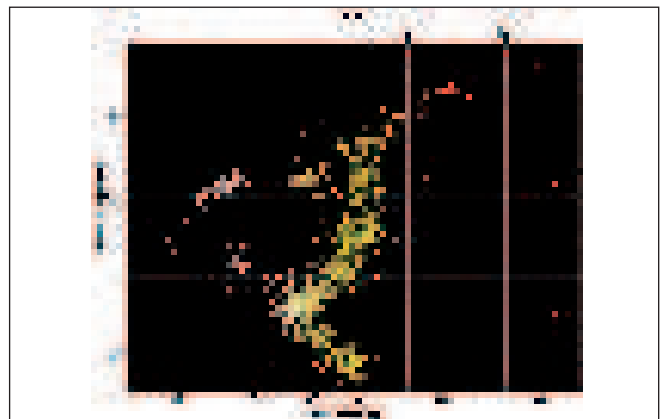
ben már 17 502 csillag adatait feltüntető HRD-t tehettek közzé, amely csillagok mindegyikének a Hipparcos mérései alapján 7%-nál kisebb hibával sikerült a távolságát meghatározni.

További előrelépés várható az ugyancsak az Európai Űrügynökség által 2013. decemberben felbocsátott Gaia pozíciós csillagászati űrtávcsőtől. A Gaia öt év alatt egymilliárd csillag pozícióját fogja megmérni. Kiterjeszti a távolságmérés pontosságát is, aminek köszönhetően pontosabb HRD készítése válik lehetővé. Nagy érzékenysége miatt köszönhetően kiterjeszti a HRD-t a halványabb csillagok, azaz a HRD fősorozatának jobb alsó vége irányában.



Az M3 jelű gömbhalmaz...

mindketten a Chicagói Egyetemen dolgoztak, ahol kollégájuk, Subrahmanyan Chandrasekhar akkoriban az *Astronomical Journal* főszerkesztője volt. Addig jártak Chandrasekhar nyakára, amíg végül az 1940-es évek végén beadta a derekát és nyilvánította, hogy attól kezdve a rangos folyóiratban a diagram megnevezése H–R-diagram lesz.



... és a HRD-nek megfelelő szín-fényesség diagramja, amely minden gömbhalmaz esetében ehhez hasonló

Ezért a pontatlanul ismert távolságból származtatott abszolút fényesség helyett a sokkal pontosabban mérhető látszó fényesség használható.) Nagy előrelépést jelentett az 1989-ben az Európai Űrügynökség által pályára állított Hipparcos asztrometriai műhold működése. Az űreszközzel több mint száz ezer csillag távolságát sikerült meghatározni. Az eredményeket a műhold mozgását pontosan elemezve sikerült tovább pontosítani, így 2007-

A HRD születésének 100. évfordulójára tehát a diagram már csillagok millióit tartalmazza, de néhány éven belül ez a szám megtöbszöröződik, miközben a csillagok HRD-n elfoglalt helye is pontosabbá válik.

BOTH ELŐD összeállítása
(*A Sky and Telescope* 2014. júniusi számának cikke alapján)