

CSILLAGOK, AZ UNIVERZUM FÉNYFORRÁSAI

Gyürky György

az MTA doktora, tudományos tanácsadó,
MTA Atomki
gyurky@atomki.mta.hu

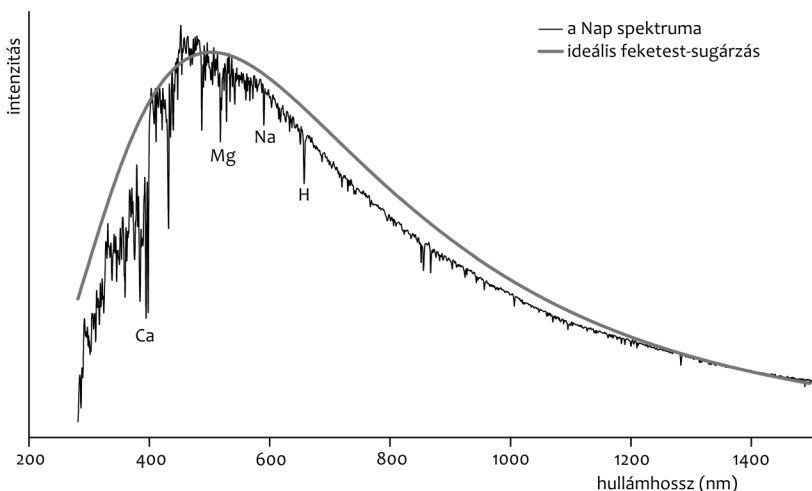
Ha megkérnénk az utca emberét, hogy nevezze meg világunk legjelentősebb fényforrását, szinte biztosra vehetjük, hogy a Napot említené elsőként. „De mi a helyzet éjszaka?” – próbálhatnánk keresztkérdésünkkel sarokba szorítani, de ekkor valószínűleg a Holdat (ami a Nap fényét veri vissza), illetve a csillagokat említené, és csak ezután következnenek a mesterséges fényforrások. Mivel Napunk is csillag, bizonyosan kijelenthetjük tehát, amit a cím is állít, hogy a csillagok az univerzum fényforrásai. 2015-ben, a Fény Nemzetközi Évében megjelenő jelen cikkgyűjtemény tehát nem lehet teljes egy csillagoknak szentelt írás nélkül. Ennek a cikknek a szerzője nem csillagász, hanem a csillagok belsejében zajló magreakciókat kutató tudománnyal, nukleáris asztrofizikával foglalkozik. Ezért a csillagok fényét inkább annak kiváltó okai, a háttérben zajló folyamatok szemszögéből vizsgáljuk. Magát a fényt is a hétköznapinál tágabban értelmezzük, amint sorba veszünk különböző típusú csillagokat, illetve az általuk kibocsátott sugárzást.

A Nap látható fénye

Kezdjük utazásunkat legfontosabb csillagunkkal, a Nappal! Mit is értünk pontosan napfény alatt? Az 1. ábrán a Nap fényének

spektruma látható, azaz a földet elérő fény mint elektromágneses sugárzás intenzitása a hullámhossz függvényében. Mint látható, az intenzitás eloszlása egy határozott maximumot mutat a 450–500 nm-es hullámhosszánál. Szintén látható az ábrán sima lefutású görbével ábrázolva egy 5800 K hőmérsékletű fekete test mint hőmérsékleti sugárzó színeképe. A két görbe igen hasonló jellege arra enged következtetni, hogy a Nap fénye első közelítésben hőmérsékleti sugárzás, mégpedig egy körülbelül 5800 K hőmérsékletű test sugárzása. Szembetűnő, hogy a sugárzás spektrumának maximuma igen közel esik szemünk érzékenységének maximumához. Ez nyilván nem véletlen: az evolúció az olyan szem kialakulásának kedvezett, amely a természetes fényforrás lehetőségeit minél jobban ki tudja használni.

De miből áll a Nap, és miért izzik ilyen forrón? Ezekre a kérdésekre szintén a sugárzás spektruma, illetve annak a feketetest-sugárzástól való eltérése adja az elsődleges információt. A spektrumban található éles mélyedések, a színeképvonalak a csillag anyagi összetételéről tanúskodnak (a legerősebbeket felfedezőjükről Fraunhofer-féle vonalaknak is nevezzük). A csillag fényéből a légkörében lévő gázok a rájuk jellemző hullámhosszakon



1. ábra • A napfény spektruma a Föld légkörén kívül, valamint egy 5800 K hőmérsékletű feketetest-sugárzó spektruma. Néhány elnyelési vonalnál az azt okozó kémiai elem vegyjele is fel van tüntetve a teljesség igénye nélkül.

nyelik el a fényt. Ezek az abszorpciós színeképvonalak tehát a csillag anyagának összetételéről árulkodnak. Az 1. ábrán látható néhány, a látható fény tartományában vagy annak közelében található színeképvonal, illetve az azokat előidéző kémiai elem. A spektrum részletesebb elemzéséből tudjuk, hogy a Nap főként hidrogénből és héliumból álló izzó gázgömb (pontosabban ionizált állapotú plazmagömb), nehezebb kémiai elemek csillagunk tömegének csak kevesebb mint 2%-át teszik ki.

A magas hőmérséklethez és a folyamatosan kisugárzott óriási mennyiségű energiához valamilyen energiaforrásra van szükség. Az energiaforrás kérdése egészen a 20. századig a tudomány egyik legjelentősebb megoldatlan problémája volt. A modern fizika kialakulása, a relativitáselmélet és a kvantummechanika forradalma volt szükséges a titok feltárásához. A titok pedig a hidrogénfúzió, amihez azonban a fizika forradalmán kívül a Nap

anyagi összetételének, tehát a bőségesen rendelkezésre álló hidrogénnek a megismerése is elengedhetetlenül szükséges volt. Ez utóbbi pedig a Nap fényének megfigyeléséből áll rendelkezésünkre.

A hidrogénfúzió tárgyalása nem témája jelen írásnak. A *Magyar Tudomány* hasábjain jelent már meg ezzel foglalkozó írás (Gyürky, 2008). Mivel azonban nemcsak a Nap, hanem az egész univerzum talán legfontosabb energiaforrásáról van szó, szenteljünk neki egy bekezdést!

Egy csillag úgy keletkezik, hogy egy megfelelően nagy tömegű gázfelhő a saját tömegvonzása hatására zsugorodni kezd. Eközben a gravitációs helyzeti energiája részben hővé alakul, a születő csillag magja felmelegszik. Ha a hőmérséklet elegendően magas (nagyágrendileg 10 millió K) értéket ér el, a csillagban lévő hidrogénatommagok, azaz a protonok hőmozgása legyőzi a köztük ható elektrosztatikus taszítást, és reakcióba lépnek

egymással. Ehhez segítségül hívják a kvantummechanikai alagúteffektust, valamint a gyenge kölcsönhatást, amelynek révén az egyik proton neutronná alakul, és a másik protonnal egyesülve deutériumot hoz létre. További fúziós folyamatokban a keletkező deutériumból hélium keletkezik, tehát összességében a hidrogénfúzió négy proton héliumatommaggá való egyesülését jelenti. Ebben a folyamatban hatalmas mennyiségű energia szabadul fel, amely mintegy milliószorosan meghaladja például a kémiai folyamatokban felszabaduló, számunkra megszokott energiát. Ez az energiaforrás felelős tehát a csillag működéséért: miután a csillag magja a gravitációs energia révén felmelegedett, a fúziós energia stabilizálja és tartja fenn a magas hőmérsékletet. A Nap magja tehát körülbelül 15 millió K hőmérsékletű, az ott termelt hő lassan jut ki a felszínére, ami így egyensúlyban mintegy 5800 K hőmérsékletű, és a magban termelt fúziós energiát hőmérsékleti sugárzás formájában sugározza ki. A fúzióban szerepet játszó alagúteffektus és gyenge kölcsönhatás miatt a folyamat igen lassan megy végbe, ezért a Nap mintegy tízmilliárd évig képes fenntartani működését többé-kevésbé változatlan formában.

A távoli csillagok látható fénye

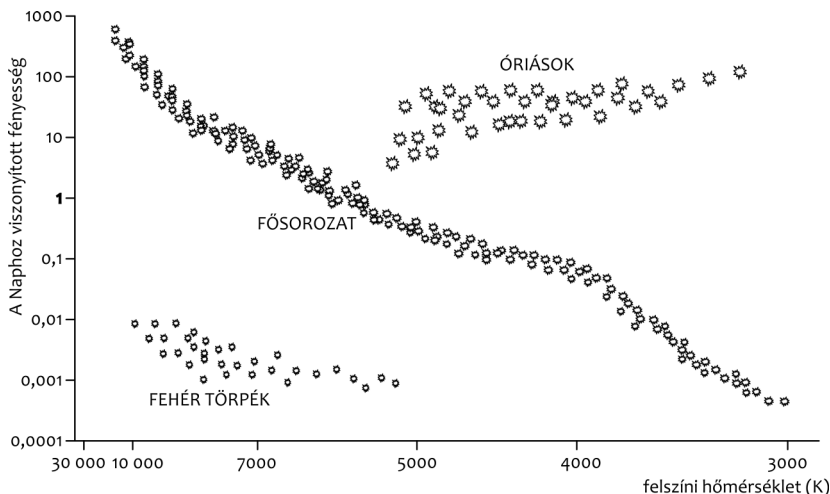
A távcsövek és a spektrometria fejlődésével a távoli csillagok fényét is hasonló vizsgálatnak vethetjük alá, mint a Nap fényét. Ezeknek a méréseknek az alapvető tapasztalata az, hogy a Naphoz hasonlóan gyakorlatilag minden csillag hőmérsékleti sugárzónak tekinthető. Ez az egyik bizonyítéka annak, hogy a Nap is csak egyike a Világegyetemben található, felfoghatatlanul nagyszámú csillagnak.

A csillagok spektrumában a színképvonalak vizsgálatával a tőlünk elérhetetlen távol-

ságban lévő objektumok anyagi összetételét is kutathatjuk. Ennek az eredménye az, hogy a Nap anyagi összetételét tekintve sem különleges: az egész univerzumra jellemző, hogy főként hidrogénből és héliumból áll. Az apró különbségek, a nehezebb elemek eltérő gyakorisága azonban olyan gazdag információforrás a csillagászok számára, amelynek alapján igen sok különböző tulajdonságú, eltérő fejlődési utat bejáró és más végső sorsú csillagtípust sikerült azonosítani.

A csillagok többsége mégis meglepően hasonló egymáshoz. A spektrum alakjának vizsgálatával meg tudjuk mondani egy csillag felszíni hőmérsékletét. A teljes sugárzás intenzitásának mérésével pedig – a csillag távolságának ismeretében – meg tudjuk adni a csillag luminozitását, azaz a teljes kibocsátott energiáját. A két paramétert együtt vizsgálva érdekes összefüggést találunk. Ezt szemlélteti sematikusán a 2. ábra, a csillagászat talán leghíresebb és legfontosabb diagramja, az ún. Hertzsprung–Russell-diagram. A vízszintes tengelyen a csillag felszíni hőmérséklete, míg a függőleges tengelyen az abszolút fényessége (luminozitása) látható. Szembetűnő, hogy a csillagok korántsem véletlenszerűen elszórva helyezkednek el a diagramon, hanem határozott csoportokba rendeződnek. Az ismert csillagok mintegy 90%-a egy keskeny sáv, az ún. fősorozat mentén található. A sáv fölött, illetve alatt van a fényes óriások és a halvány fehér törpék tartománya.

Ennek a csoportosulásnak az oka a csillagok működési mechanizmusában keresendő. A részletesebb vizsgálatok azt mutatják, hogy a fősorozati csillagokat, tehát a csillagok döntő többségét ugyanaz a hidrogénfúzió működteti, mint a mi Napunkat. Az, hogy egy csillag pontosan hol található a fősorozaton, a csillag tömegétől és korától függ.



2. *ábra* • A csillagok felszíni hőmérséklete és fényessége között kapcsolatot teremtő Hertzsprung–Russell-diagram. Az ábra csak szemléltető jellegű, nem szerepelnek rajta például csillagok bizonyos csoportjai. A szokásnak megfelelően a hőmérsékleti skála jobbról balra növekszik.

Ha egy csillag elhasználja hidrogén-üzemanyagát, vagy a fúzió más módjára tér át, lassan elhagyja a fősort. A csillag tömegétől függően vörös óriássá válik, majd eltérő életutakat követve vagy szupernóvaként felrobban, vagy esetleg a fehér törpék régiójába kerül, ahol sok milliárd évig hűl és halványul, míg végül el nem tűnik a szemünk elől.

Lássuk a nem látható fényt!

Mindössze a látható fény segítségével a Nap és a csillagok működésének és összetételének számos titkát sikerült felkutatnunk. Ám további, igen gazdag információforrást nyerhetünk, ha az elektromágneses színek látható fényen kívüli részét is hadra fogjuk.

A látható fény csak elenyészően keskeny szelete az elektromágneses sugárzás spektrumának, amely a rövid hullámhosszknál (nagy frekvenciáknál) található gammasugárzástól a hosszú hullámhosszú rádióhullámokig terjed. Ezt szemlélteti a 3. *ábra*, ahol a hullám-

hossz függvényében az elektromágneses spektrum különböző tartományai vannak feltüntetve. A modern csillagászat szinte minden tartományt kihasznál a csillagok vizsgálatára, s az egyes részek vizsgálata már-már külön tudományágnak tekinthető a csillagászaton belül. Az írás hátralévő részében három területről, a rádióhullámok, illetve a röntgen- és gammasugárzás észleléséről, illetve a belőlük levonható következtetésekről lesz szó.

Ez a három tartomány elég messze esik a látható fény hullámhosszaitól. Így a Naphoz hasonló csillagok spektrumában ezeknek a tartományoknak az intenzitása a hőmérsékleti sugárzásból kifolyólag elhanyagolható. Ha ilyen sugárzást észlelünk tehát csillagászati objektumokból, akkor azok kibocsátásáért valamilyen különleges mechanizmus lehet a felelős, nem pedig egy néhány ezer fokok felszíni hőmérsékletű test feketetest-sugárzása. Számos érdekes és fontos asztrofizikai jelenségre bukkantak rá ily módon.

Rádióhullámok

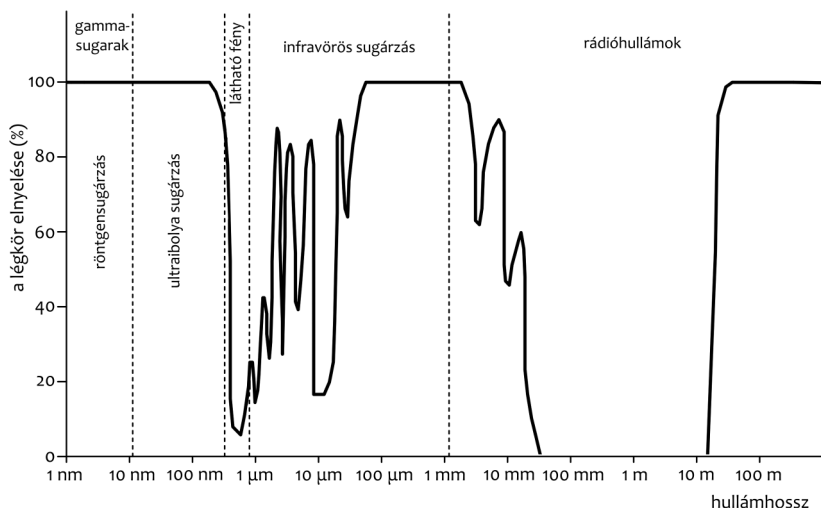
A 3. ábra azt is szemlélteti, hogy a földi légkör mely hullámhossztartományokban engedi át az elektromágneses sugárzást. Azt tapasztaljuk, hogy a látható fényen, illetve a nem túl helyesen hőszugárzásként is ismert infravörös sugárzáson kívül a légkörünk csak a rádióhullámok egy részét engedi át. Így egy földi távcsővel csak ezekben a tartományokban tudunk csillagászati megfigyeléseket végezni.

Az űrből jövő rádióhullámokat már az 1930-as években, a rádiótechnika fejlődése során felfedezték. Mára számos különböző objektumot azonosítottak, amelyek rádióhullámokat bocsátanak ki. Ezek közül most csak néhány érdekesebbet említünk meg. Rádióhullámok asztrofizikai körülmények között leginkább akkor keletkeznek, ha nagy energiájú töltött részecskék haladnak mágneses térben, illetve ütköznek anyaggal. Számos asztrofizikai folyamatban keletkeznek ilyen nagyenergiás töltött részecskék, ame-

lyekről így a rádióhullámok detektálásával szerezhetünk információt. Ilyen égi rádióforrást fedeztek fel a galaxisunk középpontja körül, ahol a jelenlegi elméletek szerint egy szupernagy tömegű (a Nap tömegének néhány milliószorosát tartalmazó) fekete lyukba hulló anyag kelt rádióhullámokat.

Nagy tömegű csillagok életének végső eseménye a szupernóva-robbanás. Az ilyen robbanások után visszamaradó objektumok jelentős rádióhullám-források lehetnek. A szupernóva felvillanása után bizonyos esetekben gyorsan forgó neutroncsillag, pulzár keletkezik. A pulzár a mágneses tengelye mentén intenzív részecskenyalábot bocsát ki, amely szinkrotronsugárzást hoz létre részben a rádióhullámok tartományában. Ilyen objektumok felfedezése a rádióhullámok megfigyelésével vált lehetővé.

Az igen távoli aktív galaxismagok, a kvazárok felfedezését is a rádióhullámok észlelése tette lehetővé. Ezekben az objektumokban valószínűleg szintén a nagyenergiás részecskék



3. ábra • Az elektromágneses spektrum a röntgensugarktól a rádióhullámokig, illetve a földi légkör elnyelőképesége

által keltett szinkrotronsugárzás felelős a rádióhullámok kibocsátásáért.

Röntgensugárzás

Térjünk most át az elektromágneses spektrum rövid hullámhosszú, azaz nagyenergiás oldalára (Szatmáry et al., 2002)! Ezeket a sugárzásokat a légkörünk hatékonyan elnyeli, így a föld felszínéről nem tudunk megfigyelni ilyen sugárzást kibocsátó égi objektumokat. A világűrből érkező röntgensugárzás első észlelései ezért magaslégtörési rakéta- vagy ballongkísérletekhez köthetők, de a röntgensugárzás gyors fejlődését az űrbe, műholdakra telepített röntgentávcsövek tették lehetővé.

Ahhoz, hogy egy test hőmérsékleti sugárzóként a röntgentartományban bocsásson ki elektromágneses sugárzást, igen magas hőmérsékletre van szükség. Ez a hőmérséklet-tartomány eléri az 1–10 millió K értéket, ami több nagyságrenddel magasabb, mint a Nap felszíni hőmérséklete. (Emlékezzünk, hogy bár a Nap magja mintegy 15 millió K hőmérsékletű, a kívülről látható felszínén „csupán” mintegy 5800 K a hőmérséklet.) Vannak azonban csillagászati jelenségek, amelyek során ilyen magas hőmérsékletekkel is találkozhatunk egy objektum felszínén, legtöbbször abban az esetben, ha egy kettős csillagrendszer tagjai között anyag áramlik át. Ha például egy fősorozati csillag anyaga egy fehér törpe vagy neutroncsillag felszínére áramlik, akkor a mély gravitációs potenciálgödörbe hulló anyag felmelegedhet a kívánt hőmérsékletre, s így röntgensugárzást bocsáthat ki. Néha ez a folyamat robbanásszerűen megy végbe, amit röntgenkitörések formájában észlelhetünk.

Számos más folyamat is vezethet röntgensugárzás kibocsátásához különböző asztrofizikai helyszíneken és eseményekben. Észlelhetünk röntgensugárzást a fent említett kvazá-

rokból, szupernóva-maradványokból, valamint fekete lyukakba hulló anyag esetén is. Ezek részletezése túlmutat cikkünk keretein.

Gammasugárzás

Ha még tovább megyünk az elektromágneses spektrumban a rövidebb hullámhosszak irányába, elérünk a gammasugarakig. Mivel a légkör ezt a nagyenergiás sugárzást is elnyeli, megfigyelése szintén csak magaslégtörési vagy légkörön kívüli berendezésekkel lehetséges.

A gammasugárzás olyan nagy energiájú, hogy forrása nem lehet hőmérsékleti sugárzás. Ehhez olyan nagy hőmérsékletre lenne szükség, amekkora nem fordul elő csillagászati objektumokban, legalábbis nem olyan körülmények között, ahonnan a sugárzás közvetlenül eljuthat hozzánk. Több más módon is keletkezhet azonban gammasugárzás, ezek között most egyet tárgyalunk részletesebben.

Nagy energiáján kívül a gammasugárzást úgy is definiáljuk, illetve úgy különböztetjük meg a röntgensugárzástól, hogy gammasugarak atommagok energiaszintjei közötti sugárzásos átmenetekben keletkeznek (míg a röntgensugarakat a belső atomi héjakon található elektronok átmenetei során kapjuk). Ilyen jelenség játszódik le például radioaktív magok bomlását követően. Azt már láttuk a cikkünk elején, hogy a fősorozati csillagok hidrogénből héliumot állítanak elő. Az asztrofizika iránt érdeklődő olvasónak azonban valószínűleg az sem lehet újdonság, hogy az összes nehezebb kémiai elem, ami világunkat felépíti, szintén csillagokban keletkezik. Sok különböző folyamat játszik szerepet az elemszintézisben, és számos olyan folyamat is van, amelyben radioaktív izotópok is keletkeznek. Ha ezek az izotópok elég hosszú élettartamúak ahhoz, hogy még elbomlásuk előtt kijussanak az őket létrehozó csillagból, akkor ké-

sőbbi bomlásukat az azt követő gammasugárzás detektálásával megfigyelhetjük.

Számos radioaktív izotóp jelenlétét sikerült ily módon kimutatni a csillagközi térben. Mivel ezek között vannak viszonylag rövid felezési idejűek is, bomlásuk közvetlen bizonyítékot szolgáltat arra, hogy az elemszintézis jelenleg is aktívan zajlik világunkban. Sikerült például kimutatni a kobalt 56-os tömegszámú izotópjának jelenlétét szupernóva-robbanásokat követően. Nagyrészt ez a 77 nap felezési idővel bomló izotóp felelős a szupernóvának a robbanás utáni hosszán elnyúló nagy fényességéért. A közel egymillió éves felezési idejű, 26-os tömegszámú alumíniumizotóp galaxisbeli eloszlását pedig nagy pontossággal fel tudták térképezni a gammasugárzása segítségével, s így következtetni tudtak csillagbéli keletkezésére. És még számos izotópot említhetnénk, amelyek jelenlétét sikeresen megfigyelték gammacsillagászati űrszondákkal.

A radioaktív bomláson kívül más folyamatok is eredményeznek gammasugárzást, például a nagyenergiás atommagok által kiváltott magreakciók. Említhetjük a naptevékenység egyik formáját, az úgynevezett fler jelenlétét is, amelyből gamma- és röntgensugárzás is származik. A Nap tehát a hőmérsékleti sugárzásán kívül az elektromágneses spektrum távoli tartományában is „lesüt ránk”, bár légkörünk megakadályozza a nagyenergiás sugárzás felszínre jutását.

IRODALOM

- Cserépes László – Petrovay Kristóf (2002): *Kozmikus fizika*. Egyetemi jegyzet. ELTE, Budapest • <http://mek.oszk.hu/00500/00559/>
- Gyürky György (2008): Csillagok és atommagok. *Magyar Tudomány*. 4, 486–493. • <http://www.matud.uif.hu/08apr/11.html>
- Kereszturi Ákos – Tepliczky István (1996): Csillagászati tankönyv kezdőknek és haladóknak. Magyar

Zárszó

Jelen írás célja, hogy megmutassa: a csillagok tágabb értelemben vett „fénye” milyen gazdag információforrást jelent a világunk működésének megértése szempontjából. Minden, a földünkön kívüli világra vonatkozó tudásunk valamilyen, a Földet elérő sugárzás mérésével és megértésével vált elérhetővé. Néhány oldal terjedelemben lehetetlen még csak nagy vonalakban is teljes képet adni az elérhető információk köréről. Itt csak az elektromágneses spektrum különböző tartományaival foglalkoztunk, azokkal is csak érintőlegesen. Pedig más sugárzások is vannak. Nem említettük az ősröbbség egyik bizonyítékát jelentő kozmikus mikrohullámú háttérsugárzást (ami elektromágneses sugárzás ugyan, de nem csillagokból származik). Nem szóltunk a neutrínókról, amik a Nap működéséről és a szupernóvákról szolgáltattak fontos adatokat. Szintén nem szóltunk a kozmikus sugárzás nagyenergiás részecskéiről vagy a még felfedezésre váró gravitációs hullámokról. Mind ez a „fény” kellett ahhoz, hogy megszűnjön a sötétség, azaz megértsük világunk működését, és ez fog a jövőben is segíteni minket, hogy megértsük, amit még nem tudunk.

Kulcsszavak: *csillag, fény, rádióhullám, röntgensugárzás, gammasugárzás, magreakciók, spektrum, nukleáris asztrofizika*

Csillagászati Egyesület, Budapest • <http://mek.oszk.hu/00500/00556/00556.htm>

Lovas István (2000): *Asztrofizika*. Egyetemi jegyzet. KLTE, Debrecen • <http://www.phys.unideb.hu/jegyzetek/asfiz.pdf>

Szatmáry Károly – Kiss L. – Mészáros Sz. – Vinkó J. (2002): Röntgen- és gammacsillagászat. *Meteor csillagászati évkönyv*. • <http://astro.u-szeged.hu/ismetret/rontgam/rontgam.html>