

Egy neutroncsillag élete

A neutroncsillagokról szóló írások kétféleképpen szoktak kezdődni. Az egyik megközelítés arról kívánja az olvasót meggyőzni, hogy mennyire lenyűgöző az a tény, hogy egy kávéskanálnyi neutroncsillag-anyag a Föld felszínén 3 milliárd tonnát nyomna. Esetleg azzal próbálnak hasonló hatást kiváltani, hogy elmesélik: a neutroncsillag felszínén bármely testet 1 m magasról leejtve az a becsapódáskor már a fénysebesség harmadával mozogna!

A másik hagyományos bevezetés Jocelyn Bell és Antony Hewish 1967-es szerencsését idézi meg, amely elvezetett ezen fantasztikus sűrűségű égítetek felfedezéséhez. Miközben a cambridge-i (Anglia) rádiótávcső-hálózattal a kvazárok rádiósugárzásának szcintillációját vizsgálták, az ég egy pontjáról nagyon szabályos, 1,3 mp-enként ismétlődő jeleket fogtak. A jelenség magyarázataként mindenféle lehetőséget számba vettek, még a „kis zöld emberkék” is felmerültek... Hosszas vizsgálatok révén végül sikerült felvázolni a gyorsan forgó neutroncsillagok képét, amely részleteiben is magyarázatot adott a megfigyelésekre.

Elméleti vizsgálatok már korábban is utaltak a neutroncsillagok egzotikus fajának léteire. Senki nem gondolta azonban, hogy kozmikus világítótornyokként akár másodpercenként több tucatszor is megfordulva intenzív sugárnyalábokkal bombáznak a megfelelő irányba eső világot.

Mindkét klasszikus megközelítés érinti a lényegét, ám valahogy mégsem segítenek igazán. Egyszerűen arról van szó, hogy a neutroncsillagok *nagyon* szélsőséges tulajdonságú égítetek, amelyeket nehéz földi ésszel felfogni. Hiszen mit jelent az, hogy 10^{14} g/cm³ a sűrűsége? Vagy a „10 km átmérőjű atommag”? Ezek a történeti megközelítések érdekesek a megismerés bonyolult útvonala szempontjából, ám mégis elrejtik a háttérben levő tiszta fizikai képet. 30 év intenzív kutatásai után immáron visszaléphetünk egyet és felvázolhatjuk egy neutroncsillag életrajzát, a születésétől egészen a lehetséges végállapotig, a különböző fejlődési szakaszokon keresztül.

Élet a halál után

Az életrajzok általában a születéssel kezdődnek. Ezúttal azonban halállal kell indítani, ugyanis egy neutroncsillag létrejöttéhez egy durván 10 naptömegű csillag gyors pusztulására, egy szupernóva-robbanásra van szükség.

Több tízmillió évig békésen zajlott a hidrogén-hélium fúzió a csillag magjában, ami biztosította a szabályozott „fúziós erőmű” egyensúlyát. Egy idő után kifogyott a hidrogén, akkor a csillag belseje kicsit összehúzódott, a magjának megnőtt a hőmérséklete és a hélium így „begyulladt”, elkezdte átalakulását szénre és oxigénre. Természetesen ezek is elfogytak valamikor, amit további összehúzódások és fajlagosan sorra kisebb energiát termelő fúziós reakciók beindulása követett.

Az egyre gyorsuló folyamat során elérkezett a csillag azon ponthoz, amikor a szinte tiszta szilíciumból álló mag átalakult vassá, ami a halál pillanatát jelentette — a vasmagok fúziója már nem termeli, hanem igényli az energiát. Ilyenkor a gravitációs vonzás legyőzi a fúziós reakciók egyensúlytartó sugárnyomását, a csillag összeomlik, méghozzá igen gyorsan. Egy másodpercnél (!) valamivel rövidebb idő alatt a csillag nagyjából Föld-méretű magja összehúzódik kb. 10–15 km átmérőjűvé, ezzel az elektronokat és protonokat annyira összezsúfolva, hogy elegyük átalakul neutronokká. A további zsugorodást az összepréselt neutronok között ható taszító erők

állítják le. Ekkor a mag egy kicsit visszapattan és elindít egy halálos lökéshullámot kifelé, ami szétveti a csillag külső rétegeit — felvillan egy II-es típusú szupernóva. A robbanás széttépi az egész objektumot, aminek a helyén egy olyan, lassan táguló gázfelhő marad, mint amilyen pl. a Rák-köd a Taurus csillagképben (I. címlapunkat).

A gigászi pirotechnikai bemutató egyrészt egy nagy tömegű csillag hattyúdala, másrészt bevezetője egy új égitestnek, a valamikori csillagmagból létrejött neutroncsillagnak. Ennek egy néhány centiméteres légköre van, lejjebb egy szilárd és szuper-sűrű kérge, legbelül pedig egy szuperfolyékony, egzotikus állapotú magja, ami leginkább egy óriási atommagra hasonlít.

Ahhoz, hogy a fentiek lejátszódhassanak, a szülőcsillagnak jól meghatározott tömeggel kell rendelkeznie, kb. 8 és 15 naptömeg közötti értékkel. A kisebb csillagok nem robbannak fel, hanem csak egy nagy „pöffenéssel” ledobják külső rétegeiket, majd egy fehér törpét hagynak maguk után. Ezzel szemben a hízóttabb csillagok akkora erővel robbannak szét, hogy vagy semmi nem marad még a magjukból sem, vagy pedig átlendítik magjukat a neutroncsillag állapotból a fekete lyukak közé.

A pulzárrok ifjúsága

Az újszülött neutroncsillag négy rendkívüli ajándékot kap halott szülőjétől. Elsőként a gyors (tipikusan másodpercenként 50-szeres) forgást említhetjük. Ennek oka a korábbi csillagmag összehúzódása és a perdület-megmaradás törvénye (emlékezzünk a piruettező korcsolyázóra, aki felgyorsulva pörög, amikor behúzza kinyújtott karjait).

A gyors forgás részben a második ajándéknak is köszönhető, ami egy olyan erős ütés, ami nagy, akár 1000 km/s-os sebességgel szinte kilövi a neutroncsillagot a robbanás színhelyéről. Ennek feltehetően az erősen aszimmetrikus szupernóva-robbanás az oka.

Harmadikként az igen magas hőmérsékletét örökli a neutroncsillag. Mivel tömegéhez képest igen kicsiny a felülete, ezért nagyon rossz hatékonysággal sugározza ki belső hőjét. Néhány közeli neutroncsillagnál sikerült is megmérni hőmérsékletüket, ami százezer és 1 millió K közé esik.

Végül szintén a progenitortól származik igen erős mágneses térük, ami tipikusan 10^{12} -szer nagyobb a földinél. Az ilyen erős mágneses tér az elméletek szerint még a kéregben található vas atommagokat is képes gömb alakúból hosszú tűkké nyújtani — izgalmas jóslat, még megerősítésre vár.

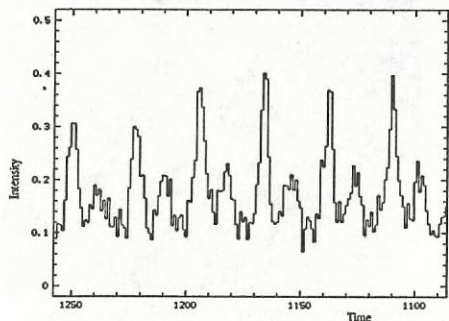
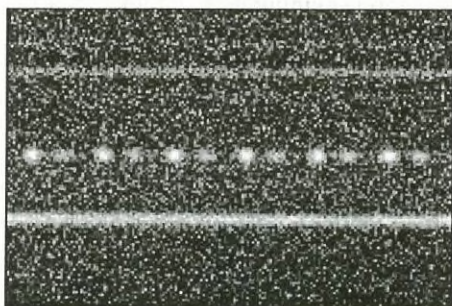
Vannak persze más effektusok is, amiket sokkal könnyebb megfigyelni. Már 1831-ben kimutatta Michael Faraday, hogy a forgó mágneses tér elektromos feszültséget generál. Egy neutroncsillag nem más, mint egy gigantikus pörgő óriásmágnes, így nem csoda, hogy hatalmas elektromos tér keletkezik felszínén. Ez aztán a mágneses erővonalak mentén kifújja a töltött részecskéket, az elektronokat, pozitronokat, ionokat. Így jön létre a pulzárszél.



A kép közepén a Rák-köd pulzárja, melynek szele jól látható koncentrikus íveket hoz létre a neutroncsillag körüli anyagban



A PSR J0437-4715 ívelt pulzárszél-frontja, melyet a csillagközi gázzal való kölcsönhatás gerjeszt. A nyíl a pulzár mozgási irányát mutatja



A Rák-köd pulzárjának villanásai, illetve a megfelelő optikai tartománybeli fénygörbe. Az ESO VLT második egységével és FORS2 detektorával készült felvétel során a CCD-t vezérlő elektronika 1,2 ms-onként 1 pixelnyit léptette a már felvett képet. A pulzár minden 0,033 másodpercben felvillanva hozta létre a közepén látható pontsort

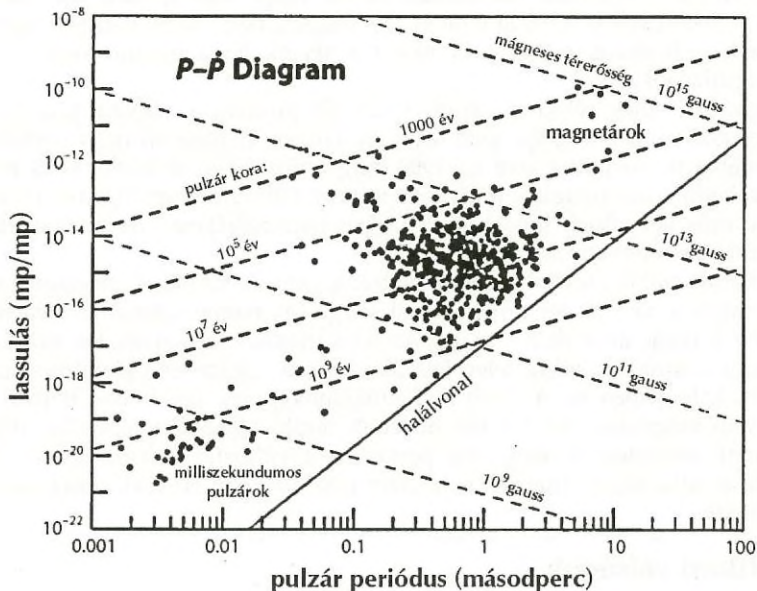
A szél magában láthatatlan, ám ha kölcsönhatásba lép az esetleg sűrű csillagközi anyaggal, akkor látványos alakzatok alakulhatnak ki a turbulens pulzárszél által gerjesztett anyagban.

Az erős mágneses tér második következménye maga a „pulzálás” (nem keverendő az időben változó geometriai méretet jelentő pulzációval). A neutroncsillagok mágneses pólusaik mentén intenzív nyalábokban sugároznak, amelyek szerencsés esetben a forgás miatt gyorsan ismétlődve a földi észlelő felé fordulhatnak. A legtöbb fiatal pulzár a teljes hullámhossztartományban „villog”, a rádióhullámoktól az optikai tartományon keresztül egészen a nagy energiájú gamma-sugárzásig.

Hogyan kelti a mágneses tér az intenzív sugárnyalábot? Egy másik 19. századi fizikai eredmény szerint egy gyorsan forgó mágnes elektromágneses hullámokat sugároz. Ez azonban nem ad magyarázatot a sugárzás nyalábba fókuszáltságára, ami mind a mai napig az elméleti szakemberek egyik legnagyobb kihívása. A különböző elméletek jelentős része azt tételezi fel, hogy a nyalábokat szakaszosan kidobott relativisztikus elektronok keltik, amelyek koherens módon sugároznak, hasonlóan a lézerek aktív anyagának atomjaihoz.

Bármennyire is nagy energiájúak a pulzárak nyalábjai, mégis alig egy ezred részét képviselik a neutroncsillag által a környezetének átadott teljesítménynek. Ez utóbbit a pulzárak megfigyelt lassulásából számítják ki. Ha egy forgó test lassul, akkor a forgási energiáját valamilyen módon elveszti. A mérések szerint a lassulásért 99,9%-ban a pulzárszél és esetleg még eddig ismeretlen egyéb folyamatok felelősek. A Rák-köd pulzárja például 0,033 másodpercenként villan, ám a periódusa naponta 0,0000000364 másodperccel hosszabbodik. Az átalakuló forgási energia felelős a köd gerjesztéséért, annak sugárzásáért.

A pulzárók két legfontosabb mérhető jellemzője a P periódus, illetve a lassulás mértéke, \dot{P} (olv. „pé-pont”). Ha elfogadjuk azt a képletet, ami leírja egy forgó mágnes sugárzási teljesítményét, akkor a P és \dot{P} értékéből kiszámíthatjuk a mágneses térerősséget. Így kapták meg először azt az említett fantasztikusan magas értéket.



722 pulzár lassulása periódusuk függvényében. Ez a $P-\dot{P}$ ábra a pulzárók „Hertzsprung–Russell-diagramja”, amelyen az elfoglalt pozíció mind a korról, mind a mágneses térerősségről hírt ad. A neutroncsillagok fejlődése a diagramon jobbkéz felé való haladást jelent; a „halálvonalat” elérve megszűnnek pulzárként sugározni.

A csillagászatban ha van két mennyiség egy égitest-típusra, akkor szinte reflexből szokás felrajzolni egy diagramot, amelyen a kettőt egymás függvényében ábrázoljuk. Normális csillagokra a hőmérséklet (színképosztály) és luminozitás (abszolút fényesség) segítségével kapjuk meg a Hertzsprung–Russell-diagramot, amely kulcsfontosságú volt a csillagfejlődés megértésében. Hasonlóan hasznos a $P-\dot{P}$ diagram a pulzárokra: egy adott objektumra a diagramon való elhelyezkedés alapján megbecsülhetjük a mágneses térerősséget (P -szer \dot{P} négyzetgyökével arányos), illetve korát (durván P/\dot{P}). Mellékelt ábránkon 722 pulzárt tüntettünk fel, amellyel kapcsolatos legfontosabb pontokat az alábbiakban tekintjük át.

Furcsa gyermekkor

A $P-\dot{P}$ ábra tetején négy pulzár található, amelyek az elmúlt néhány évben intenzív kutatásokat váltottak ki furcsaságaiknak köszönhetően. Fiatal objektumok, amelyek még a „közönséges” pulzárokhoz képest is rendkívül erős (100-szor nagyobb) mágneses térrel rendelkeznek. Ennek következtében sugárzásuk is nagyon intenzív, így gyorsan sok energiát elvesztettek, azaz már meglehetősen hosszú a periódusuk (5–10 másodperc). Valami (talán a túl erős mágneses tér?) miatt csak a röntgen-

tartományban villognak, így „anomális röntgenpulzárak” (anomalous X-ray pulsars, AXP) néven vonultak be a csillagászatba.

További két objektum található a diagram közeli pozícióiban, amelyeket „lágy gamma-ismétlőknek” (soft gamma-ray repeater, SGR) hívnak, mivel időnként gamma-viharok történnek körülöttük. Eddig négy SGR ismert, ám csak kettőre mérték ki lassulásukat. 1998-ig nem is volt világos, hogy az SGR-eknek bármi közük lenne a pulzárakhoz, mivel csak akkor fedezték fel a gamma-kitörések közötti röntgen-pulzusokat.

Ne tévesszen meg senkit a „lágy” jelző. Ez pusztán az egyedi gamma-fotonok viszonylagosan kis energiáját jelzi, egy-egy kitörés meglepően nagy teljesítményekkel rendelkezik. Jó példa erre az 1998. augusztus 27-én detektált SGR-felvillanás, amely a Sagittarius csillagkép irányában történt, több űrobszervatórium is detektálta, és olyan erős volt, hogy még a földi légkör ionoszférájának ionizációs állapotát is kimutathatóan megváltoztatta egy kis időre!

A legvalószínűbbnek tűnő magyarázatok a gamma-kitörések okaként a pulzárak csillagregéseitek nevezik meg. A pulzárak kérge egy merev, szupersűrű vasmagokból álló vékony réteg, amelyben a mágneses tér változásai feszültségeket keltenek. Ezek felhalmozódhatnak, majd hirtelen felszabadulásuk gigászi energiakitörést produkál. Mindennek fényében az AXP és SGR tulajdonképpen ugyanazon fizikai rendszer (rendkívüli mágneses pulzár) két nevének tűnik. Néhányan összefoglalóan magnetároknak nevezték el őket, ami persze nem változtat a legfontosabb kérdések megválaszolatlanságán: honnan az extrém térerősség; miért csak röntgenben látunk pulzusokat?

Felnőttkori válságok

A $P-\dot{P}$ ábra központi részén található pulzárak sokkal érthetőbbek. Fiatal korukban egyszerű rádiópulzárak, egyenletesen lassuló forgással, ami a diagramon jobbra történő elfejlődést jelent. Ez a folyamat igen stabil az esetek többségében. Néhány fiatal pulzár azonban nem követi ezt a képet, olyan „felnőttkori válságokon” esnek át, amikor látványosan tiltakoznak az egyenletes lassulás monotoníája ellen. Néhány millió-milliárd rotációnként (azaz éves időskálán) hirtelen megugrik periódusuk értéke, majd ismét jön az egyenletes lassulás. Jó példa a Vela pulzár, amely évente néhányszor néhány milliomod résszel megnöveli forgási periódusát, hogy aztán folytassa a lassulást. Ez persze nem tűnik soknak, ám az olyan nagy tömegű és kis sugarú objektumoknál, mint a pulzárak, ez a forgási energia igen nagy változásait jelenti.

Kezdetben az uralkodó elképzelés szerint az ugrások oka a neutroncsillag kérgének mikroszkópikus (mikrométer nagyságrendű!) átrendeződései lettek volna. Újabbban egy kevésbé kézenfekvő elmélet kezd hódítani, amely szerint a külső kéreg alatti szuperfolyékony magban rejlik a magyarázat. A szuperfolyékony anyagok egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy belső súrlódásuk nulla, így a kialakuló örvények időtlen időig megmaradnak bennük. A neutroncsillagok belsejét modellezők szerint a szuperfolyékony anyag perdülete kicsiny diszkrét csomagokban, kvantált örvényképekben nyilvánul meg, amelyek a pulzár lassulásával párhuzamosan a magból kifelé vándorolnak az új sebességhez való igazodásnak megfelelően. A kéreghez érve kölcsönhatásba lépnek annak atommagjaival, amelyek egy ideig ellenállnak, aztán hirtelen nagyobb mennyiségben átveszik az örvények perdületét és a pulzár felgyorsul.

Házasság

Durván 10 millió évvel a szupernóva-robbanás után a pulzárak leállnak pulzusaikkal. Ennek oka a túl lassú forgás, ami miatt a forgó mágneses tér nem kelt akkora feszültséget, ami fenntartaná a nyalábokat. Ezért nem látunk pulzárokat egy jól meghatározott vonal alatt a \dot{P} - \dot{P} diagramon („halálvonal”). Magányos pulzároknál itt véget ér az életrajz, ám egészen más a helyzet a kettős rendszerekben található neutroncsillagok esetében. Miként az emberi kapcsolatokban a házasság, úgy a pulzároknál is az életrajz jelentős változását hozza a közeli társ jelenléte.

Első pillantásra akár hihetetlennek is tűnhet, hogy egy pulzárnak kísérő csillaga legyen, hiszen egy egész galaxist túlfénylő és a neutroncsillagot akár 1000 km/s-os sebességre felgyorsító szupernóva-robbanást túlélni komoly feladatnak látszik. Azonban egyszerű számítással belátható, hogy ha egy gömbszimmetrikus robbanás során a rendszer össztömegének fele eltávozik, akkor a kettős rendszer egyben marad. Aszimmetrikus explózió kicsit bonyolítja a képet, de ott sem lehetetlen egyben tartani a csillagokat.

Mint minden asztrofizikai példában, itt is külön kell választani a további fejlődés tárgyalásához a nagy- és kistömegű kísérő esetét. Ha a másodkomponens tömege elegendően nagy, mondjuk 10–15 naptömeg, akkor úgy 10 millió év után felfúvódik vörös óriássá. A külső rétegeit a neutroncsillag gravitációs hatásai eltorzíthatják, ami után anyagátadás lép fel az óriás- és a neutroncsillag között. Az átadott anyag a perdület-megmaradás miatt egy akkréciós korongot hoz létre a kompakt neutroncsillag körül, amelyben a kialakuló magas hőmérséklet miatt a gáz főleg a röntgen-tartományban sugároz. Így jönnek létre a nagytömegű röntgen-kettősök (high-mass X-ray binary, HMXB). Ebben az állapotban a neutroncsillag ismét sugározhat periodikusan, de csak a röntgen-tartományban. A mechanizmus lényege a neutroncsillag mágneses tere és az akkréciós korong közötti kölcsönhatás, ami forró foltot hoz létre a neutroncsillag felszínén.

Egy idő után a nagytömegű csillag is felrobbanhat szupernóvaként (ha az akkréció során nem veszett el túl sok anyagot) és létrejöhet egy igazán egzotikus objektum, egy kettőspulzár. Jó példa erre a PSR 1913+16 az Aquila csillagképben, ahol a két neutroncsillag 7,75 óra alatt kerüli meg egymást. Közülük már csak az egyik „villog”, amelynek periódusa szépen mutatja a pályaperiódus szerinti modulációt. Ez a pulzár arról nevezetes, hogy a pályaperiódus hatásait olyan pontosan nyomon lehetett követni közel 20 éven keresztül, hogy sikerült kimutatni a keringési idő lassú csökkenését, ami tökéletes egyezésben volt a gravitációs hullámok által történő energiavesztés számított hatásával. (1993-ban Joseph Taylort és Andrew Hulse-t fizikai Nobel-díjjal honorálták a fontos mérés elvégzéséért.)

Kistömegű másodkomponens esetében (mondjuk 2 naptömegnél) tovább kell várni, jellemzően néhány milliárd évet, amíg röntgen-kettőssé alakul a rendszer. Addigra azonban a neutroncsillag mágneses tere gyengül, forgása túl lassú lesz, így nem jön létre a HMXB-k sugárzási mechanizmusa, pusztán véletlenszerű röntgenvillanásokat mutat a kistömegű röntgen-kettősnek (low-mass X-ray binary, LMXB) nevezett rendszer.

Feltámadás

Az LMXB-k neutroncsillagával a röntgenvillanások mellett egy sokkal csodásabb dolog is történhet. A kistömegű kísérőről szép lassan csordogáló gázanyag jóval

nyugodtabb akkréciós korongot hoz létre, mint a HMXB rendszerekben, így a neutroncsillagra hosszú időn keresztül egyenletesen érkezhethet külső anyag. Ennek jelentős perdülete van, ami folyamatosan hozzá-hozzáadódva a neutroncsillag perdületéhez brutálisan felgyorsíthatja a forgást: közel ezer rotáció másodpercenként!

Az újjászületett neutroncsillag három módon adhatja hírül a nagy eseményt a külvilágnak. Ha még elég erős a mágneses tere, hogy a nagyobb sebességű forgás létrehozzon egy forró foltot, mint amilyen a HMXB-kben van, akkor a röntgen-tartományban villoghat szédítő sebességgel. Ez azonban igen ritka, eddig csak egy ilyen „újrahasznosított” röntgenpulzárt találtak, a SAX J1808.4-3658-t. Az 1998 májusában felfedezett pulzár másodpercenként 402-szer villan!

A másik híradás az akkréciós korong segítségével történhet. Ha elég nagy hőmérséklet és sűrűség alakul ki a korongban, akkor a klasszikus növőkhöz hasonlóan beindulhat a fúzió, csak a maximális energiasugárzás a röntgentartományba esik. Ezekben az ún. röntgennövőkhöz szinte mindig észlelhető egy gyors és periodikus ingadozás, amit a gyorsan pörgő neutroncsillagon *valahogyan* létrejövő forró folt okoz.

Végül úgy is szétkürtölheti a pulzár a feltámadását, ha vár egy kicsit, amíg leáll az akkréció (elfogy a kísérő átadható anyaga), majd átkapcsol a röntgenvillogásról a rádiópulzusok kisugárzására. Hogy ez miért és hogyan történik, eddig nem ismert. Ám az újszülött milliszekundumos pulzárok — a \dot{P} - \ddot{P} diagram bal alsó sarkában található — igen sajátos objektumok. Az eddig ismert leggyorsabb másodpercenként 607-szer fordul meg tengelye körül, és periódusukat nagyon stabilan tartják. Soha nem ugranak véletlenszerűen, így az Univerzum ismert legpontosabb óráit jelentik. Egy város méretű gömb, tömege durván megegyezik a Nap tömegével és másodpercenként több százszor megfordul: a lehető legpontosabb mechanikai óra, még ha csillagászati léptékű is!

Mint az több pontnál is kiderült, sok tisztázatlan kérdés várja még a választ a neutroncsillagok területén. Több olyan objektum is van, amelyik nem illik bele az általános képbe, elég például megemlíteni a PSR B1257+12-t a Virgo csillagképben, amely körül legalább két bolygót ki lehetett mutatni gravitációs hatásuk révén. Ám talán sikerült rámutatni arra, hogy az elmúlt 30 évben több olyan felfedezés történt a pulzárokkal kapcsolatban, ami az asztrofizika legkülönbözőbb területeit kötötte össze — igen sikeresen.

J. Winn (Sky & Telescope 1999. július) cikkét fordította: Kiss László

Nem csak tükröt, hanem távcsövet is Csatlóstól!

Készít, javít, átalakít!

Csatlós Géza (1021 Budapest, Szajkó u. 4. II/7., tel: 274-3070)