

Galaxishalmazok fagvatása

Miről árulkodik a galaxisok közötti térség vastartalma?

SZABADOS LÁSZLÓ

A csillagászati kutatások jellegzetesége, hogy a vizsgálandó égitestekről minden információt távolról kell begyűjteni (kivételet csak néhány naprendszerbeli objektum képez, amelyeket már ember alkotta űrszondák is felkerestek), hiszen a csillagok és azok rendszerei az ember számára felfoghatatlanul nagy távolságban vannak. Mivel az elektromágneses sugárzás fénysebességgel terjed – azaz egy tetszőleges frekvenciájú foton másodpercenként 300 000 kilométert tesz meg –, ezért minél távolabba tekintünk, annál korábbi állapotában vizsgálhatjuk a kiszemelt kozmikus objektumot. A Nap fénye körülbelül 8 perc alatt jut el a Földre. Saját galaxisunk, a Tejútrendszer nagyjából százezer fényév átmérőjű, vagyis mintegy 100 000 évbe telik, mire az egyik szélétől az átellenes széléig eljut a fény. A Világegyetemben azonban a százezer év rövid időnek számít, mivel a csillagok fejlődése millió-milliárd éves időskálán zajlik. Az igazi időutazás a galaxisok világában kezdődik. A millió vagy milliárd fényévre levő galaxisokat és azok halmazait vizsgálva a régimúltba tekinthetünk vissza, egyfajta régészeti tevékenységet végezve a csillagászat tudományának keretein belül.

A kémiai elemek felépülése a hidrogéntől a vasig

Az Univerzumban megfigyelhető nagy skálájú szerkezet kialakulása és az egész Világegyetem fejlődése napjaink tudományának legizgalmasabb kérdései közé tartozik. Ezért egyáltalán nem meglepő, hogy az extragalaxisok vizsgálatával és kozmológiai kutatásokkal egyaránt sokan foglalkoznak.

Az Univerzum időbeli fejlődéséről úgy alkothatunk képet, hogy tőlünk

egyre messzebbre levő galaxisokat és galaxishalmazokat vizsgálunk, a különböző távolságban levő objektumok éppen megfigyelhető állapotából következtetve a különféle kozmikus objektumoknak, illetve az egész Univerzumnak a fejlődésére. Természetesen azt viszonylag pontosan kell tudni, hogy a vizsgált égitest vagy

Ismereteink szerint az Univerzum az ősrobbanással vette kezdetét, és az eredetileg kiterjedés nélküli szingularitásból egy igen rövid felfúvódási fázison túljutva folyamatos a tágulása. A kezdetben nagyon forró állapotú Univerzum a tágulás során fokozatosan hűl, és egy megfelelő pillanatban bekövetkezett az elemi

részecskék kialakulása, majd a legegyszerűbb atomok, a hidrogén és a hélium magjai is létrejöttek. A következő fontos állomás az Univerzum fejlődésében a csillagok kialakulásával vette a kezdetét. A csillagok belsejében olyan magas a hőmérséklet, hogy be tudnak indulni a magfúziós folyamatok, amelyek során nehezebb elemek is létrejönnek a két legkönnyebb kémiai elemből, és nem mellesleg még hatalmas mennyiségű energia is felszabadul. A csillagok sugárzási energiáját éppen ez a fúziós energia adja. A csillagok belsejében zajló folyamatok hatására a nehezebb elemek fel is keverednek, és eljutnak a csillag atmoszférájába, majd onnan az ún. csillagszéllel vagy a csillagfejlődés bizonyos fázisában bekövetkező burokledobással a csillagközi anyagba is bekerülhetnek. Az eredetileg hidrogénből és héliumból álló (és némi lítiumot tartalmazó) csillagközi anyag így az idők során nehezebb elemekben is feldúsul, főleg a szén, az oxigén és a nitrogén gyakorisága nő. A fúziós reakciók során azonban a csillagok belsejében nem tud tetszőleges elem létrejönni a periódusos rendszer százánál is több ismert eleméig. A vas a legnehezebb elem, amelynek magja még energiafelszabadulással kialakulhat; a vasnál nagyobb rendszámú elemek termeléséhez már energiát kell befektetni. Ezért a vas előfordulási gya-



1. ábra. Az Abell 1689 jelű galaxishalmaz a Hubble-űrtávcső felvételén. A galaxishalmazokról készített képeken jól látszanak a halmazt alkotó galaxisok, az intergalaktikus anyag észleléséhez viszont hullámhosszat kell váltani – röntgencsillagászati mérésekre van szükség

csillagrendszer milyen távol van tőlünk, mert a távolságból következik az, hogy mennyi ideig tartott, amíg a fény (vagy más hullámhosszú elektromágneses sugárzás) onnan hozzánk ért. Ez az ún. visszatekintési idő.



2. ábra. A tőlünk 240 millió fényévre levő Perseus-galaxishalmaz meghatározó galaxisa, a Perseus A környezetete több színeképtartományból összetett képen. A pirossal jelölt rádiólebenyek jelzik a galaxis magjából kiáramló nyalábokat, amelyek a röntgentartományban sugárzó (kékre színezett) forró plazmát fűtik (röntgen: NASA/CXC/IoA/A. Fabian et al.; rádió: NRAO/VLA/G. Taylor; optikai: NASA/ESA/Hubble Heritage/STScI/AURA)

korisága a csillagközi anyagban azt jelzi, hogy milyen ütemű volt a csillagok kialakulása az adott környezetben. Mivel itt a Földön is előfordulnak a vasnál nehezebb elemek, a természetben azok is ki tudnak alakulni, de nem a csillagok belsejében, hanem a csillagok végállapotához vezető szupernóva-robbanások során.

A galaxishalmazokról

A Világegyetem nagy skálájú szerkezetét kirajzoló legnagyobb „egyedi” képződmények a galaxishalmazok (1. ábra). Egy-egy ilyen galaxiscsoportosulás sok száz, olykor több ezer galaxist is tartalmaz egy hozzávetőleg 3–50 millió fényév átmérőjű térségben, és a halmaz összömege még nőhet is az idők folyamán, részben a környező anyag bekebelezésével, részben pedig a gravitációs eredetű kannibalizmussal, amikor a galaxishalmaz legnagyobb tömegű tagjai magukba vonzzák a hozzájuk túlságosan került kisebb-nagyobb – de eredetileg nem a halmazhoz tartozó – galaxisokat. Saját galaxisunk, a Tejútrendszer egy viszonylag kis galaxiscsoportosulás, az ún. Lokális Csoport tagja, két nagy társával (az Andromeda-köddel és a Triangulum-galaxissal), valamint az e három spirális galaxis körül található több tucatnyi törpegalaxissal együtt.

Nem minden galaxis tartozik galaxiscsoporthoz vagy -halmazhoz. Sőt éppenséggel a galaxisok többsége nem tagja ilyesfajta rendszernek, hanem egyedül, társak nélkül mozog valahol az Univerzumban.

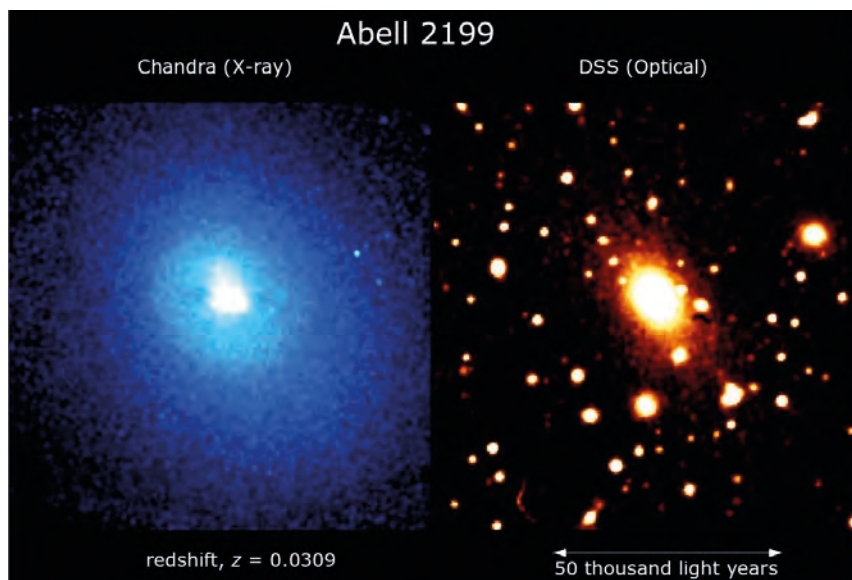
A Tejútrendszer spirális galaxis, de a galaxisok között kisebbségben vannak a spirális szerkezetűek, a legtöbb galaxis szferoidális vagy ellipszoidális törpegalaxis. Az ilyen kis galaxisok (sok millió éves időskálán lezajló) összeolvadásból keletkeznek a spirálgalaxisok. Léteznek ugyanakkor óriás elliptikus galaxisok is, általában a galaxishalmazok közepén található belőlük egy-egy példány.

Az, hogy mi történik a galaxishalmazokkal és a galaxishalmazokban, nemcsak a kozmológia számára fontos, hanem az asztrofizika szempontjából is, hiszen az

egyedi galaxisok csillagokból és csillagközi

Mivel a galaxishalmaz mégis stabil képződmény, kell lennie olyan anyagnak is, amely az optikai színeképtartományban nem látszik. Ilyen a galaxisok közti térségben levő intergalaktikus anyag, de még annak mennyisége is kevés ahhoz, hogy a halmaz kötött rendszer maradjon. Az Univerzumnak lényeges alkotóeleme még az ún. sötét anyag, amelynek gravitációs hatása érvényesül, de létéről közvetlenül, azaz elektromágneses sugárzása alapján nem lehet tudomást szerezni. A sötét anyag természetének kiderítése ugyancsak előtérbe helyezi a galaxishalmazokkal kapcsolatos vizsgálatokat. Az elmúlt évtizedek alapos vizsgálatai során kiderült, hogy egy tipikus galaxishalmazban maguk a galaxisok csak a tömeg egy százalékát képviselik, a galaxisközi anyag összömege ennél egy nagyságrenddel több, de a halmaz gravitációs mezejében a sötét anyag dominál, tömege kilencszer akkora, mint a galaxisok és a galaxisközi térség ismert atomi alkotórészekből álló (ún. barionos) anyaga.

Az egyik legalaposabban tanulmányozott galaxishalmaz a Perseus csillagkép irányában levő Perseus-halmaz,



3. ábra. Az Abell 2199 galaxishalmaz röntgenképe (balra) a Chandra mesterséges hold mérései alapján, jobbra pedig ugyanennek a galaxishalmaznak az optikai képe látható a Digitized Sky Survey felvételén

anyagból állnak, és a csillagok fejlődése befolyásolja a galaxis mint egész viselkedését.

A galaxishalmazok gravitációsan kötött rendszerek, maguktól nem bomlanak fel. Ugyanakkor a galaxishalmazok tagjainak mozgását vizsgálva kiderült, hogy olyan nagy egyedi sebességgel mozognak a halmaz tagjai, amely már meghaladja a halmazból való távozáshoz szükséges szokási sebességet – ha azt a halmazbeli galaxisok összömege alapján számítják ki.

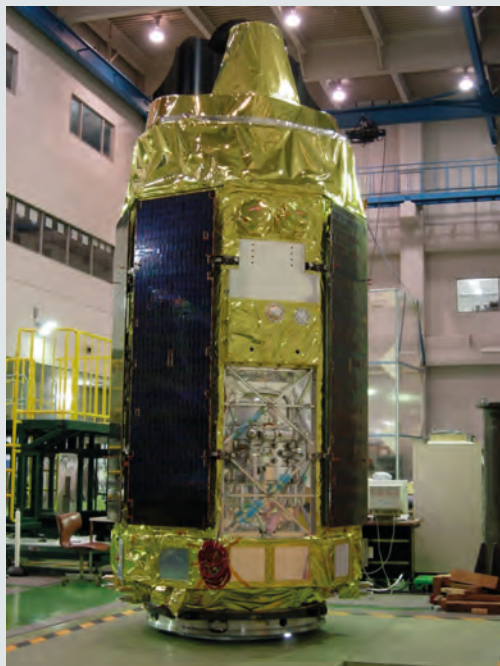
amely egyébként a nagy összömege galaxishalmazok egyik tipikus képviselője (2. ábra).

Az intergalaktikus anyag vizsgálata

Egy nemzetközi kutatócsoport, amelynek magyar tagja is van – Werner Norbert, a Magyar Tudományos Akadémia Lendület-programjának támogatásával az ELTE Fizi-

Röntgensillagászati műholdak

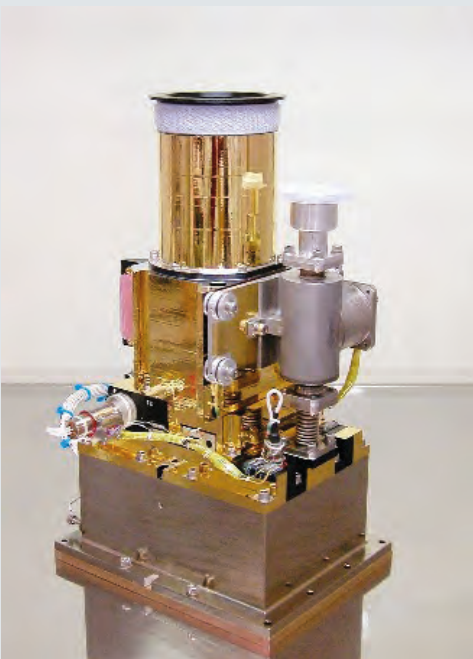
A kozmoszból érkező röntgensugárzást bolygónk légköre elnyeli, ezért az égitestek röntgentartománybeli viselkedését csakis a Földön kívül működő műszerekkel lehet vizsgálni. Az égitestek röntgensugárzása lényeges információkkal szolgál a csillagászok számára. A nagy energiájú folyamatok, jelenségek röntgensugárzással kibocsátásával járnak, például a több millió fok hőmérsékletű tartományok leginkább röntgenhullámhosszakon sugároznak. E folytonos sugárzás mellett bizonyos hullámhosszakon, keskeny színekvonalakban is felléphet röntgensugárzás. Ilyen spektrális vonalakat keltenek például a nagy rendszámú elemek belső elektronhéjaiban bekövetkező átmenetek.



4. ábra. A japán Szuzaku mesterséges hold, itt még a Földön

hold is működött rövidebb-hosszabb ideig. Ezek közül mindenképpen említésre méltó a kb. negyedszázaddal ezelőtt működött ROSAT és a 2005 és 2015 között működött Szuzaku (4–5. ábra). Ez utóbbi nagy előnye a nagy érzékenységgel párosuló alacsony háttér és a nagy spektrális felbontás. A röntgentartományt vizsgáló legújabb mesterséges holdak közül pedig a még aktív NuStar érdemel említést.

A röntgensugárzást észlelő mesterséges holdak általában nagyon elnyúlt pályán keringenek a Föld körül. Az ilyen pályának két előnye is van. Az egyik az, hogy a keringés során hosszú ideig távol van a nagy energiájú sugárzás észlelésekor zavaró hatású magnetoszférától, a másik pedig az, hogy a gyenge jelek észlelése során hosszú ideig (akár napokig is) lehet egyfolytában észlelni egy-egy röntgenforrást.



5. ábra. A Szuzaku röntgensonda képalkotó röntgenspektrométere

kai Intézetében működő Forró Univerzum kutatócsoport vezetője –, nagy felbontású röntgenspektrumokat és egyéb megfigyelési adatokat használ a galaxisok közötti teret kitöltő gáz (vagy inkább plazma, hiszen nagyon magas, több millió fokokos anyagról van szó) tulajdonságainak vizsgálatára. Ennek feltárása kulcsszerepet játszik annak megértésében, hogyan válhatott a Világegyetem olyanná, amilyenek ma észleljük.

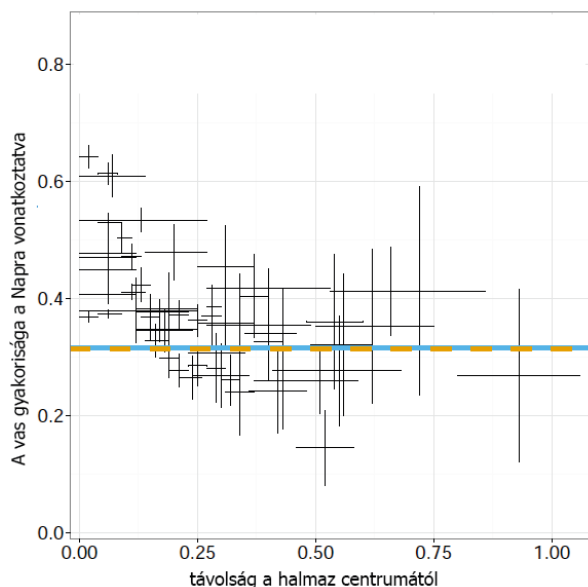
Az intergalaktikus térben rengeteg anyag van, amelynek sűrűsége viszont roppant alacsony. Az intergalaktikus anyag össz- tömege egy-egy galaxishalmazban a Nap tömegének billiószorosát (azaz milliószor millió naptömeget) is elérheti, hiszen a galaxisok közötti térség hatalmas. A 10–100 millió fokokos hőmérséklet pedig úgy alakul ki, hogy az elektromágneses sugárzás intergalaktikus térségben fénysebességgel száguldó nagy energiájú fotonjai egy-egy töltött részecskével (szabad elektronnal) ütközve átadják az energiájukat az anyagnak. Ez az ún. fékezési sugárzás folytonos színeképet hoz létre a röntgenhullámhosszakon, de színekvonalak is létrejöhetnek a röntgentartományban az atommagokhoz kötött elektronok nagy energiájú átmenetei során.

A galaxishalmaz nagy össz- tömege nem engedi, hogy a benne levő anyag elszökhessen a rendszertől az idők folyamán. Ezért egy galaxishalmazon belüli intergalaktikus anyag vizsgálatából meg lehet állapítani a benne lezajlott integrált csillagkeletkezés időbeli változásait, sok halmaz tanulmányozása alapján pedig a kozmikus nukleoszintézis és az Univerzum kémiai fejlődésének történetét.

Azonban az intergalaktikus anyag vizsgálata, de még a kimutatása sem egyszerű. A rendkívül magas hőmérséklet miatt a sokszorosan ionizált elemek atomjai a röntgentartományban sugároznak, ezért a Földön kívül észlelő csillagászati röntgendetektorokkal lehet egyáltalán tanulmányozni a ritka közeget (3. ábra). Mivel az intergalaktikus anyag ionizációs egyensúlyban van, és a sugárzás számára átlátszó, a röntgentartományban felvett színeképek emissziós vonalainak erőssége közvetlenül jelzi a vonalat kibocsátó elem gyakoriságát.

Egy galaxishalmaz meg tíz másik

A Perseus-galaxishalmazt már korábban vizsgálták a benne levő intergalaktikus anyag elemösszetételének meghatározására. Ennek során azt is vizsgálták, hogy a vas ionjai hogyan oszlanak el a halmaz centrumától való radiális távolság függvényében. A vas előfordulási gyakoriságából ugyanis a csillagkeletkezési ütem időtől való függésére lehet következtetni.



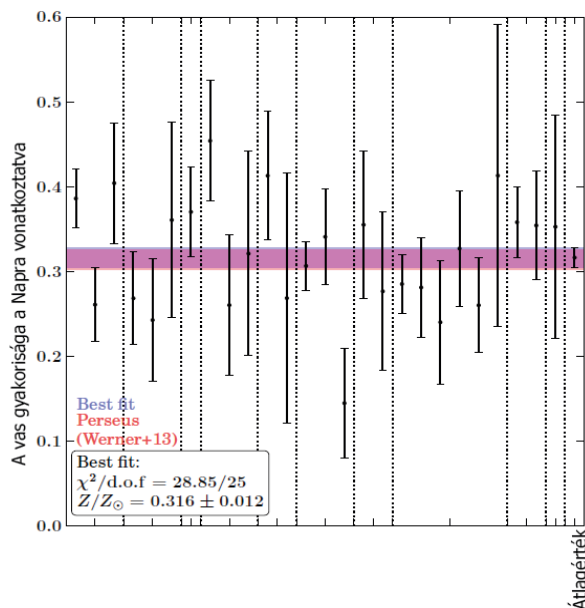
6. ábra. A vasatomok gyakorisága a vizsgált galaxishalmazok intergalaktikus anyagában a halmaz centrumától mért távolság függvényében. Az átlagos fémtartalmat a kék színű vonal jelzi. A szaggatott vonal a Perseus-galaxishalmazra korábban megállapított értéket mutatja

A Perseus-halmaz vizsgálatát a japán Szuzaku mesterséges hold egyik észlelési kulcsprojektje keretében már korábban elvégezte Werner Norbert kutatócsoportja. A halmaz központjától kifelé nyolc irányban végeztek méréseket az űreszközön elhelyezett röntgenspektrométerrel. A műszer több mint egymillió másodpercig gyűjtötte a galaxishalmaz felől érkező röntgensugárzást. Az eredmény meglepő volt: a centrális rész kivételével (ahol a vas ionjainak előfordulási gyakorisága viszonylag nagy volt) a vas ionjainak egyenletes eloszlása tapasztalható sugárirányban kifelé haladva, de azimutálisan is (azaz körbehaladva a halmaz középpontjából húzott sugarak mentén). Maga a vas gyakorisága a Nap esetében mért jelenlegi gyakoriságnak mintegy harmada (pontosabban 31,4%-a).

Mit jelent ez a homogén vaseloszlás? Azt a meglepő tényt sugallja, hogy a vasatomokban való feldúsulás nagyon régen következett be, akkor, amikor maga a galaxishalmaz még ki sem alakult, csak egyedi csillagok voltak nagyon nagy számban, és azok életútja végén bekövetkezett szupernóva-robbanások „szennyezték be” a térséget vassal. A Perseus-galaxishalmaz nagyjából 10 milliárd éves, tehát a benne levő intergalaktikus anyag viselkedése tízmilliárd évnél régebbi állapotról nyújt hasznos és érdekes információt.

Mennyire egyediek a Perseus-halmazban uralkodó viszonyok? Erre a kérdésre keresték a választ annak az európai és amerikai csillagászközből álló kutatócsoportnak a tagjai, amelyben Werner Norbert is részt vesz. A Szuzaku röntgenműhold méréseinek archívumából tíz másik galaxishalmazra vonatkozó adatokat gyűjtöttek ki. E halmazok közös jellemzője az, hogy viszonylag közeliak, hiszen a távolabbi halmazok esetében használhatatlanul alacsony a műszerbe érkező röntgenfluxus, és kiválogatás során arra törekedtek, hogy a mintában kis, közepes és nagy össz tömegű galaxishalmazok is legyenek. A munka során elemzett adatokat 2005 és 2014 között mérte a Szuzaku röntgenspektrométere, egy-egy halmazra fél óra és egy nap közötti ideig gyűjtve a jeleket. A jellemző „expozíciós idő” három óra volt. Az a tartomány, amelyet az egyes galaxishalmazok belsejében vizsgáltak, jellemzően ötmillió fényév átmérőjű.

Az adatfeldolgozás menetének részletezésétől itt eltekintünk, pedig a munka nagy részét az aprólékos és gondos analízis teszi ki, amelynek során egyebek között ki kell zárni minden szisztematikus hibaforrást. A röntgenszámlálásban például ilyen az előtérből és a háttérből eredő röntgenfluxus. Egy galaxishalmaz esetében előtérnek minősül a látóirányba eső tejútrendszerbeli röntgensugárzás, háttérnek pe-



7. ábra. A vas előfordulási gyakorisága az egyes galaxishalmazok intergalaktikus anyagában. Az egyes halmazok növekvő össz tömeg szerint vannak rendezve balról jobbra. A kék sáv jelzi a vasgyakoriság átlagértékét. A sárga szaggatott vonal a Perseus-halmazra korábban megállapított értéket mutatja. A halmaz azonosítójában az A betű a George Abell által összeállított galaxishalmaz-katalógusra utal

dig a kozmológiai távolságokban levő objektumok összemosódó röntgenháttére. Az ilyen effektusok kiküszöbölésére a kutatócsoport igénybe vette más röntgenszondák (pl. ROSAT) archivált mérési adatait is.

A munka végeredményeként az derült ki, hogy a Perseus-galaxishalmaz területére kapott homogén vaseloszlás nem egyedi kivétel, hanem ez az általános viselkedés a galaxishalmazok esetében. A vasban (és más fémekben) viszonylag gazdag centrális térségen kívül a vasionok gyakorisága állandó, ráadásul nagyjából azonos valamennyi galaxishalmazra, függetlenül annak tömegétől (6–7. ábra). Ugyancsak nem tapasztalható összefüggés a vas gyakorisága és az intergalaktikus anyagra jellemző hőmérséklet között.

Ez az eredmény megerősíti és általánossá teszi annak a korábbi felismerésnek az érvényességét, amely szerint a vas feldúsulása az intergalaktikus közegben több mint tízmilliárd évvel ezelőtt következett be, amikor maguk a galaxishalmazok még ki sem alakultak, de csillagok már léteztek, méghozzá igen nagy számban, és akkoriban nagyon nagy lehetett a csillagkeletkezés üteme.

A cikk az mta.hu hírportálon korábban megjelent ismertetés kibővített változata