Az első csillagok és kvazárok kialakulása

Haiman Zoltán

Astronomy Department, Harvard University
Fermi National Accelerator Laboratory

A minket jelenleg körülvevő világegyetem tele van számos égitesttel, amelyek egy szabályos, hierarchikus rendszert alkotnak: a csillagok galaxisokba, a galaxisok galaxis–csoportokba, a galaxis–csoportok pedig szuper–csoportokba tömörülnek. Pedig tudjuk, hogy a Big Bang után, 10–20 milliárd éve, az univerzumot kitöltő gáz majdnem tökéletesen homogén volt; égitestek vagy más strukturák nem léteztek. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (cosmic microwave background, CMB) nemrég lemért izotrópiájából következik, hogy a Big Bang után párszázezer évvel a sűrűség–fluktuáció amplitúdója maximum $\sim 10^{-5}$ lehetett. Felmerül tehát a kérdés, hogy hogyan jöttek létre a mai világegyetemben megfigyelhető égitestek? Ebből az általános kérdésből motivációt merítve megvizsgáltunk számos, a legelső generációs asztrofizikai objektumokhoz kapcsolódó kérdést.

A legelső objektumok alapvető fontosságúak, mert a kozmológiai "sötétkor" végét jelzik, azaz az átmenetet a világegyetem majdnem homogén alapállapota, és a mai, sokfajta objektumot tartalmazó, struktúrákban gazdag felépítése között. Ezt a korszakot eddig nem lehetett közvetlenül, kisérletileg vizsgálni, sem a CMB–n keresztül, mert az csak a $z \gtrsim 10^3$–as vöröseltolódásnál lévő lineáris sűrűség–fluktuációkról nyújt információt, sem a nemlineáris objektumok közvetlen megfigyelésével. Az utóbbi pár évben nagy érzékenységű csillagászati műszerekkel, mint a Hubble Űrtávcsővel, vagy a Hawaii–n lévő Keck távcsővel, felfedeztek számos nagy vöröseltolódású kvazárt, galaxist, valamint a kvazárok nagy felbontású spektrumaiban sokszáz ún. Lyman–α felhőt. Ezek a megfigyelések jelenleg $z \lesssim 5$–ös vöröseltolódásra korlátozódnak, tehát nyomon követhető a Big Bang óta eltelt 10–20 milliárd évnek az utolsó 50–90%–a. Ez jelentős eredmény, azonban az intergalaktikus gáz (intergalactic medium, IGM) magas ionizáltsági foka és nem elhanyagolható nehézelemtartalma egészen $z \lesssim 5$–ös vöröseltolódásig arra utal, hogy asztrofizikai objektumok már a világegyetem ennél korábbi szakaszában is képződtek. Valóban, az elfogadott kozmológiai modellek szerint a legelső objektumok gravitációs csomósodással $10 \lesssim z \lesssim 30$–as vöröseltolódásnál jöttek létre, azaz az optikai észlelések jelenlegi vöröseltolódás korlátján túl (de nem reménytelenül messze attól).

Az "alulról hierarchikus" kozmológiai szerkezetképződési modellek szerint először a kisebb tömegű égitestek jöttek létre, amelyek azután nagyobb struktúrákba rendeződtek. Az elsőként csomósodó gázfelhők tömege megegyezik a kozmológiai Jeans tömeggel, $M_J \sim 10^5$ $M_\odot$. Következésképpen az $M \sim 1 - 100$ $M_\odot$ tömegű csillagok csak ezeknek a nagyméretű gázfelhőknek a széttöredezésével képződhettek, mert a kisebb méretű gázfelhők nyomása nagyobb, mint a gravitációs húzóerejük, és így egy M_J–nél kisebb tömegű kozmológiai perturbáció stabil, tehát nem csomósodik. Azonban két olyan effektus is van, ami ezt a következtetést elvben érvénytelenné tehetné: a hidrogén molekulák (H_2) jelenléte, amelyek hőt sugároznak el, és csökkentik a nyomást, valamint a hideg sötét anyag (cold dark matter, CDM) jelenléte, ami növeli a gravitációs erőt. Ezeknek az effektusoknak a tanulmányozására kifejlesztettünk egy egydimenziós Lagrange hidrodinamikai számítógépes programot, amellyel egy izolált gömbszimmetrikus rendszer dinamikus, kémiai, és termodinamikai fejlődését nyomon tudtuk követni . Ezzel a programmal kiszámítottuk egy sötét anyagból, valamint H, H^-, H^+, He, He^+, He^{++}, H_2, H_2^+, és e^- –t tartalmazó hidrogéngázból álló perturbáció csomósodását. Eredményeink azt mutatták, hogy a hőelsugárzás csak azután elég hatékony a gáz dinamikájának a megváltoztasához, amikor ez a gáz már sűrűvé csomósodott, és egy lökéshullámon keresztüljutva egy központi, viriális egyensúlyban lévő test részévé vált. Ebből következik, hogy a H_2 molekulák nem válthatták ki a kistömegű perturbációk csomósodását. Azonban megmutattuk, hogy $\lesssim 10^3 M_\odot$ tömegű gázfelhők (jóval a Jeans tömeg alatt) csomósodni tudnak a sötét anyag extra gravitációs vonzásának a segítségével [6]. Ezek az objektumok lehetnek nagytömegű primordiális csillagok elődjei, amelyeknek a maradványai jelenleg benépesíthetik az IGM–et.

Bármekkorák is voltak az első generációs objecktumok, nagy valószínűséggel kibocsájtottak ultraibolya (UV) sugarakat. Amíg az galaxisok közötti hidrogéngáz semleges atomokból áll (nem ionizált), addig a 13.6 eV–nál nagyobb energiával rendelkező fotonokat lokálisan elnyeli, azonban az ennél kisebb energiájú fotonok szabadon terjedhetnek az IGM–ben. Ennek az alacsony energiájú sugárzásnak az egyik fontos következménye, hogy fotodisszociálni tudja a H_2 molekulákat a fényforrástól nagy távolságokig. A nehézelemektől mentes primordiális gázban a hidrogénmolekula az egyetlen, amely effektíven el tudja sugározni a 10^2 K $\lesssim T \lesssim 10^4$ K hőmérsékletű gáz hőenergiáját (10^2 K alatt a gáz nem tud hűlni, 10^4 K felett pedig semleges H atomok gerjesztésével hűl). Következésképpen a H_2 molekulák gyakorisága határozza meg, hogy a $10^5 \mathrm{M}_\odot \lesssim \mathrm{M} \lesssim 10^8 \mathrm{M}_\odot$ tömegű gázfelhők hőelsugárzása elég hatékony–e ahhoz, hogy széttöredezzhessenek csillagméretű darabokká. A H_2 molekulák fotodisszociációjának a felméréséhez egy stacionárius, homogén $H + H_2$ gázfelhő modellt alkalmaztunk, a világegyetem korai szakaszában képződött objektumok körül várható kémiai összetétellel, sűrűséggel, és mérettel. Az eredményeink megmutatták, hogy ha egy ilyen felhőt megvilágít egy primordiális fényforrás, akkor ez a sugárzás gyakorlatilag az összes H_2 molekulát fotodisszociálja. Ebből következik, hogy a H_2 molekulák valószínűleg rövidesen az első fényforrások megjelenése után eltűntek a világegyetemből, és így a $\sim 10^8$ $\mathrm{M}_\odot$–nál kisebb tömegű gázfelhők nem tudtak továbbcsomósodni, és széttöredezni. Ez viszont azt jelenti, hogy a primordiális csillagok legalább $\sim 10^8$ $\mathrm{M}_\odot$ tömegű csoportosulásokban kellett, hogy képződjenek [5], ami

~ 1000–szer nagyobb, mint az erre eddig feltételezett tömeg.

A naív elvárás, hogy ha egy hideg gázfelhőt UV sugárzás ér, akkor ez a gáz hőmérsékletét csak *növelheti*, a hidrogénatomok fotoionizálása miatt. Ez az állítás azonban figyelmen kívűl hagyja a hidrogénmolekulák képződését. Ismét egy stacionárius, homogén gázfelhő modellt alkalmaztunk, primordiális kémiai összetétellel, de ezúttal nagy sűrűséggel, amit megvilágít egy primordiális fényforrás. Eredményeink azt mutatták, hogy egy ilyen felhőben a sugárzás által ionizált hidrogénatomokból származó szabad elektronok katalizálják a $\mathrm{H_2}$ molekulák képződését a $\mathrm{H} + \mathrm{e}^- \rightarrow \mathrm{H}^- + \gamma$ majd a $\mathrm{H}^- + \mathrm{H} \rightarrow \mathrm{H_2} + \mathrm{e}^-$ kémiai reakciókon keresztül. Elegendően magas gázsűrűségnél ($n \gtrsim 1\ \mathrm{cm}^{-3}$) az extra $\mathrm{H_2}$ molekulákból eredő elektromágneses hőelsugárzás erősebb a H–fotodisszociációk melegítő hatásánál, és a végeredmény, hogy a gáz hőmérséklete *csökken*. Ez az intuíciónak ellentmondó eredmény [4] azt jelenti, hogy a sűrű gázfelhők középpontja körül létezhet egy pozitív visszacsatolás: egy ottlévő csillag lehűtheti a környező gázt, amiből következésképpen nagyobb hatásfokkal képződhetnek újabb csillagok.

Jelenleg három közvetett kisérleti bizonyíték utal a $z \gtrsim 5$–nál magasabb vöröseltolódásnál képződött objektumok létezésére: (1) a különböző Lyman–α felhőkben felfedezett nehézelemek, mint pl. szén vagy szilikonatomok [12], amelyek a Big Bang–ből nem származhatnak, (2) az ezek között a felhők között lévő hidrogéngáz magas ionizációs állapota (az úgynevezett Gunn–Peterson effektus [3] hiánya), amihez UV sugárzás volt szükséges, és (3) a galaxisok körüli hélókban nemrég felfedezett kompakt $\sim 0.5 M_\odot$ tömegű gravitációs lencsék (Massive Compact Halo Objects, MACHO–k [1]) amelyeknek az össztömege Tejút esetében a sötét héló $\sim 50\%$–a. Egy fél–analitikus módszerrel egyesítettünk egy egyszerű csillagképződés–leírást a gravitációs struktúrák képződését leíró Press–Schechter elmélettel [10], és megmutattuk, hogy primordiális csillagokkal meg lehet magyarázni mind a három megfigyelést. Scalo–szerű csillagtömeg eloszlásfüggvényeket (initial mass function, IMF) alkalmaztunk, és a csillagképződés hatékonyságát úgy kalibráltuk, hogy a csillagok reprodukálják a Lyman–α felhőkben $z \sim 3$–as vöröseltolódásnál mért C/H arányt. Megmutattuk, hogy ilyen feltételek mellett a csillagok a $10 \lesssim z \lesssim 20$ vöröseltolódás intervallumban ionizálják az IGM–et [7]. A csillagképződés a világegyetem korai szakaszaiban tovább behatárolható jövőbeli kisérletekkel: az IGM ionizálása, és az ebből adódó Thomson elektron–szórás a CMB anizotrópiájának kb. $\sim$ 10–25%–os tompításához vezet, ami mérhető lesz a MAP és a Planck Surveyor műholdakkal [13]. Továbbá a NASA által 2007–re tervezett Next Generation Space Telescope (NGST, [11]) 8m átmérőjű Űrtávcső hosszú exponálású $4' \times 4'$ látószögű infravörös megfigyeléseivel többezer $z \lesssim 10$ vöröseltolódású csillagcsoportosulást lehet majd képenként látni. Az NGST–vel remény nyílik a legfényesebb csoportosulások felbontására is. Végül megmutattuk, hogy a korai csillagcsoportosulásokból származó Bremsstrahlung sugárzás eltorzítja a CMB spektrumát, és ez a torzítás körölbelül megegyezik a jövőbeli DIMES kisérlet előrejelzett érzékenységével.

A korai csillagok képződése elkerülhetetenül maga után vonja a Type II szupernóvahéjakban valamennyi csillagpor keletkezését. Ennek a csillagpornak két következménye is van. Egyfelől, a csillagok fényének az elnyelése és infravörös visszasugárzása eltorzítja a CMB spektrumát. Másfelől, a csillagpor opacitása az IGM–ben $z \gtrsim 10$–nál nagyobb vöröseltolódású fényforrásokig jelentős lehet. Ekkora vöröseltolódásnál az általunk mért infravörös sugárzás eredetileg UV sugárzásként volt kibocsájtva – azokon a frekvenciákon ahol a csillagpor fényelnyelő képessége maximális. Az NGST–hez hasonló jövőbeli infravörös távcsövek teljesítőképességének a felbecsülésekor tehát számolni kell a csillagpor opacitásával. A modelljeinkben számszerűen felbecsültük az intergalaktikus csillagpor következményeit, feltételezve, hogy minden Type II szupernóva $0.3\mathrm{M}_{\odot}$–nyi csillagport termel, ami ezután egyenletesen keveredik az IGM–mel. Ezenkívül feltételeztük, hogy a csillagpor termodinamikai egyensúlyban van a háttérsugárzással, valamint, hogy a fényelnyelő képességének a hullámhossztól való függése megegyezik a Tejútban lévő csillagporéval. Eredményeink azt mutatták [9], hogy az IGM–be kevert csillagpor optikus mélysége egy $z \gtrsim 10$–es fényforrásig $\tau_{\rm dust} = (0.1–1)$, elég jelentős ahhoz, hogy megváltoztassa az egyes fényforrások mért spektrumát. A csillagpor által visszasugárzott infravörös fény eltorzítja a CMB spektrumát is, ami $y = (0.05–5) \times 10^{-5}$–ös Compton y paraméternek felel meg – ez közel áll a COBE műhold által megállapított jelenlegi felső korláthoz [2].

Az első asztrofizikai objektumok nem voltak szükségszerűen csillagok. A struktúraképződést leíró CDM modellek csak a gravitációs erőket veszik figyelembe, és a csomósodást csak addig írják le, amíg egy gázfelhő virializálódik, és egy gravitáció által kötött, egyensúlyban lévő objektumot nem alkot. A virializálódást követően az ezekben a felhőkben található gáz sorsa bizonytalanabb. A hőelsugárzási és perdület–disszipációs mechanizmusainak a részleteitől függően a gáz vagy szétesik kisebb darabokra, amelyekből csillagok képződnek, vagy a tömegközéppontba esve egy nagytömegű központi fekete lyukat formál, ami kvazárként kezd működni. A kozmikus gáz elenyészően kis részének akár csillagokká, akár kvazárokká alakulásának jelentős hatása lehet a környező IGM–re. Ezért a csillagok tanulmányozása mellett számszerűen megvizsgáltuk egy potenciális nagy vöröseltolódású kvazárpopuláció lehetséges következményeit. Levezettük a kvazárok fényesség–eloszlás függvényének az evolúcióját a jelenlegi méréseknél nagyobb vöröseltolódásokra és kisebb fényességekre. Ezt három feltevésre alapoztuk [8]: (1) a sötét hélók képződését leírja a Press–Schechter elmélet, (2) mindegyik hélóban ugyanaz a központi fekete lyuk és a sötét héló tömegaránya, és (3) Eddington mértékegységgel mérve a kvazárok fényessége univerzális, és csak az idő függvénye. Ezekkel a feltevésekkel a $2.6 < z < 4.5$ vöröseltolódás intervallumban kíválóan tudtuk modellezni a már ismert kvazárok fényességeloszlás függvényét. Az ebben a modellben levezetett korai halvány kvazárok a primordiális csillagokkal összeegyeztethető energiájú UV sugárzást termelnek. Következésképpen, a korai kvazárok $z \sim 12$–es vöröseltolódásnál ionizálják az IGM–et, és a korai szupernovákban termelt csillagpor által visszavert az UV fényük a CMB spektrumát $y \sim 10^{-5}$–es Compton y–paraméterrel torzítja el. A tervezett 1 nJy érzékenysége mellett az NGST ívpercnégyzetenként többezer $z > 10$ vöröseltolódású kvazárt tud majd észlelni, ami nagyjából megegyezik az észlelhető csillagcsoportosulások számával.

Összefoglalva: elméleti megközelítéssel vizsgáltuk a világegyetemben megjelenő első generációs objektumokat, de hangsúlyt helyeztünk a megfigyelhető hatásaik számszerű becslésére. Kiszámoltuk gömbszimmetrikus, alacsony tömegű, sötét anyagból és barionikus gázból álló felhők gravitációs csomósodását, figyelembe véve a gáz nyomását, valamint a primordiális gáz kémiai és hőelsugárzási folyamatait. Kiszámoltuk a H_2 molekulák kozmikus gyakoriságát, figyelembe véve a korai csillagok és kvazárok fotodisszociációs hatását. Ezeket az eredményeket felhasználva, egyszerű fenomenológiai csillag, illetve kvazárképződés receptek, és a nagyléptékű strukturák képződését leíró CDM modellek segitségével modelleztük az első generációs csillagokat és kvazárokat. Kiszámítottuk az első objektumok által okozott IGM ionizációt és csillagpor termelést, és megmutattuk, hogy az ezekkel járó effektusok mérhetőek lesznek olyan jövőbeli műszerekkel, mint a MAP, Planck Surveyor, vagy a DIMES. A Next Generation Space Telescope ívpercnégyzetenként többezer korai, $z > 10$ vöröseltolódású kvazárt és csillagcsoportosulást tud majd közvetlenül észlelni.

Hivatkozások

[1] Alcock, C., et al. 1997, ApJ, 486, 697
[2] Fixsen, D. J., et al. 1996, ApJ, 473, 576

[3] Gunn, J. E., & Peterson, B. A. 1965, ApJ, 142, 1633
[4] Haiman, Z., Rees, M. J., & Loeb, A. 1996, ApJ, 467, 522
[5] Haiman, Z., Rees, M. J., & Loeb, A. 1997, ApJ, 476, 458
[6] Haiman, Z., Thoul, A., & Loeb, A. 1996, ApJ, 464, 523 (HTL96)
[7] Haiman, Z., & Loeb, A. 1997, ApJ, 483, 21
[8] Haiman, Z., & Loeb, A. 1998, ApJ, 503, 505
[9] Loeb, A., & Haiman, Z. 1997, ApJ, 490, 571
[10] Press, W. H., & Schechter, P. L. 1974, ApJ, 181, 425
[11] Smith, E. P., & Koratkar, A. eds, 1998, Science with the Next Generation Space Telescope, Ast. Soc. of the Pacific Conf. Series, v. 133
[12] Songaila, A. 1997, ApJL, 490, 1
[13] Zaldarriaga, M., Spergel, D., & Seljak, U. 1997, ApJ, 488, 1