

ASTROFİZİKTE SON GELİŞMELER

Bengt STRÖMGREN

(Yazı serisinin sonu)

Son olarak, kütlesi güneşinkinin 8 - 50 katı olan çok yoğun yıldızları gözönüne alalım. Bunlar, kütleleri güneşinkinin 4 - 8 katı olan yıldızlarda açıklandığı gibi, merkez bölgesindeki hidrojenini yakarlar ve çok hızlı bir şekilde kırmızı dev dönemine yönelirler. Bundan sonra, ısı bakımından kararlı olan bir helyum yanması aşamasından geçerek, merkez bölgesindeki sıcaklığın çok fazla (700 milyon derece) olduğu ve karbonun yandığı bir başka döneme erişirler. Bu kütle sınırları içinde bulunan yıldızlarda çok önemli bir fark ortaya çıkar: bu olay başladığında yoğunluk oldukça düşüktür (10^4 gr. cm^3 mertebesinde) ve bu, elektron gazının yozlaşmadığı ve bir ısı kaçağının bulunmadığı anlamına gelir. Diğer bir deyimle, karbonun yanma dönemi bir patlama ortaya çıkmaksızın devam eder ve yıldız evrimini sürdürür.

Evrimin bundan sonraki dönemi, astrofizikçiler için son derece ilginçtir ve bu konudaki buluşlarda son birkaç yılda önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Bu dönem süresince yıldızın merkez bölgelerindeki sıcaklık ve yoğunluk artmaya devam eder ve sonuç olarak, ortaya çıkan çok sayıda nükleer reaksiyonlar önem kazanmaya başlar. Evrimi ayrıntıları ile izlemek çok geniş ölçüde hesap bilgisini gerektirir. Evrimsel değişikliklerin belirli genel özellikleri ortaya çıkar. Aşağıda, onların en önemlilerinden birisi açıklanacaktır.

Tipik ve önemli bir örnek olmak üzere, kütlesi güneşinkinin 20 katı olan bir yıldızın evrimini ele alalım. Evrimin ilk dönemlerinde, kütlesi güneşinkinin 8 katı bir helyum çekirdeği gelişir ve bu çekirdekte helyum yanarak karbona (ve bir dereceye kadar da oksijene) dönüşür. Sıcaklık 400 milyon dereceye erişince karbon, daha ağır çekirdekler oluşturmak üzere, yanmaya başlar. Bu işlem, yukarıda da önemle üzerinde durulduğu gibi, yeterli kadar düşük bir yoğunlukta (yaklaşık 10^8 gr cm^3) sürdürüldüğünden bir ısı kaçağı ortaya çıkmaz, böylece evrim kararlı bir karbon yanması sürecinde gelişimini sürdürür.

Çekirdeğin yoğunluğu, yıldızın ortalama yoğunluğunu artık öylesine aşmıştır ki, çekirdeğin evriminin dış örtü içerisindeki evrimsel değişikliklere olan bağlılığı gittikçe zayıflar yani, çekirdek yaşamını tek başına sürdürmeye başlar. Bu, evrimsel değişikliklerin sayısal hesaplarını kolaylaştırır.

Merkez kesiminde karbon yakıtı tükenince karbon yanışı ve enerji üretimi dış tabakalara doğru genişler. Dış karbon tabakaları peşpeşe yanarak tükenince bir neon çekirdeği oluşur ve bu büyümeye başlar. Neon çekirdeği irileştikçe merkez bölgesinin sıcaklığı, ve neon yanışı sonunda daha ağır elementlerin çekirdekleri oluştuğundan, yoğunluğu artar. Bu olay çekirdek yakıtının tüketilmesi, dış tabakaların yakılması, merkezdeki sıcaklık ve yoğunluğun artması ile birlikte çekirdeğin büyümesi ve son olarak yeni ve daha ağır çekirdeklerin tutuşması ile sürer gider. Elementler silisyumdan başlayarak demir ve nikel haline gelene kadar değişirler. Bununla birlikte, çok öncedenberi bilindiği gibi, bu noktada artık enerji üretimi ile birlikte çekirdek büyümesi de durur, bundan sonra önemli ölçüde nükleer enerji üretimi olanaksız hale gelir.

Kütlesi güneşinkinin 20 katı olan bir yıldızın çekirdeğini, merkez sıcaklığı 8×10^8 derece ve yoğunluğu 4×10^8 gr cm^3 olana dek izledik. Başlangıç kütlesi güneşinkinin 8 katı olan bir helyum çekirdeği, kütlesi güneşinkinin 1,4 katı olan bir demir çekirdeğini oluşturur, bunun çevresinde de peşpeşe esas olarak silisyum, oksijen, neon ve karbondan oluşan kabuklar meydana gelir. Bu noktada koşullarda son derece belirgin bir değişiklik ortaya çıkar.

Bu değişiklik, çekirdekler tarafından — bunlar sözü edilen çok yüksek yoğunluğa sahiptir— elektronların çok büyük bir hızla yakalanması işlemiyle başlatılır. Bu durumda plazmanın etkin adyabatik (ısıya karşı etkisiz) sabiti kritik 4/3 değerinin altına kadar düşer, bunun sonucunda da demir çekirdeği dinamik olarak belirsiz bir konuma girer ve dehşetle büzülür.

Çekirdeğin merkez kısmının şiddetle büzülmesi veya çökmesi yukarıda sözü edilen merkez

yoğunluğunun artmasına yol açar, bu artış 4×10^9 gr cm^3 'den $1,5 \times 10^{13}$ gr cm^3 değerine kadar devam eder, aynı anda merkez sıcaklığı 1×10^{11} dereceye yükselir. Fiziksel parametrelerdeki bu değişikliğin sonucu olarak nükleer bileşim de büyük ölçüde farklılaşır. Demir çekirdekleri fotoiyonizasyon yolu ile önce α partiküllerine sonra da protonlar ve nötronlar oluşturacak şekilde parçalanır. Elektronlar çok yüksek bir hızla yakalandığından sonuç nötronizasyondur. $1,5 \times 10^{13}$ yoğunluğundaki maddenin ağırlığının yarısından fazlası nötronlardan oluşur, α partikülleri ağırlığın üçte birinden daha azını ve daha ağır çekirdekler ise altıda birinden daha azını oluşturur.

Bütün bunlar, yaklaşık, bir saniye içerisinde tamamlanır. Her ne kadar çökme çok şiddetli ise de büzülme hızı, merkeze doğru olan serbest düşmeye göre hâlâ bir büyüklük mertebesinde de daha küçüktür. Diğer bir deyimle zıt yöndeki basınçta bir artış ortaya çıkar. Bütün bu süreç uygun hidrodinamik denklemlerin bilgisayar yardımı ile çözümlenmesi yoluyla izlenmiştir.

Kırmızı dev evriminin geç dönemleri boyunca nötrino yayınlarının önemli olduğunu daha önce söylemiştik. Çöküntü dönemi süresince yukarıda sözü edilmiş olan elektron yakalanması aşaması, tipik olarak, enerjileri 8 Mev (Mikro elektron volt) olan nötrinoların yayınlanması ile birlikte gelişir. Maddenin daha önceki aşamalarında olanın tersine, madde yoğunlukları okadar yüksektir ki nötrinoların çekirdekteki madde içerisinde engele rastlamaksızın hareket edemezler. Aksine kapana kısılmışlardır. Nötrinoların büyük bir bölümü, yoğunluğu $1,5 \times 10^{13}$ gr cm^3 olan merkeze göçmeye 0,01 - 0,02 saniye kala yayımlanır. Her ne kadar nötrinolar sonunda çevrede bulunan dış örtüye büyük ölçüde kaçacaklarsa da bu kapana kısılma nötrinoları sözü edilen göçme süresinden bir mertebe daha büyük bir süre çekirdeğin iç kısmında hapseder.

Nötrinolar biçimindeki enerji boşalması çok şiddetlidir, yoğunluk $1,5 \times 10^{13}$ gr cm^3 değerine yükseldiğinde nötrino ışınım gücü saniyede yaklaşık 10^{53} erg'dir, ve bir saniyelik çökmede yayınlanan nötrinoların toplam enerjisi hemen hemen 10^{51} erg'dir. Bir karşılaştırma yaparsak güneşin ışınım gücü saniyede 4×10^{33} erg, galaksimizdeki tüm yıldızların toplam ışınım güçleri ise saniyede 2×10^{44} erg iken sözü edilen ve kütlesi güneşinkinin 20 katı olan yıldızın tüm geçmiş süresince yayımladığı toplam enerji 10^{53} erg civarındadır.

Şimdi çok önemli bir soruya geliyoruz: çekirdeğin merkez kısmının çökmesi sonucu yıldız bir süpernova olarak patlayacak mıdır?

Yıldızın hidrodinamik evrimleri konusundaki daha ileri kuramsal hesaplar bu soruya henüz kesin bir cevap verememiştir, ancak çok önemli iki ipucu bulunmuştur.

Hidrodinamik denklemlere dayanarak yapılan sayısal hesaplar, yoğunluğun $1,5 \times 10^{13}$ gr cm^3 değerine ulaşmasından hemen sonra, yıldız çekirdeğindeki madde akımının temel özelliklerinin değiştiğini göstermiştir. Büzülme durur ve içeri doğru olan sıkışmayı geriye doğru bir sıçrama izler. Dışa doğru olan güçlü hızlanmalar yalnızca çekirdekte değil dış örtüde de meydana gelir. Bu gelişmenin başka çerçevelerde de benzerleri vardır.

Çekirdeğin iç kısmının çok yüksek nötrino ışınım gücünün sonucu olarak yıldızın dış kısımlarında da bir nötrino akımı meydana gelecektir. Nötrinoların enerjileri o kadar yüksektir ki madde ile etkileşme enkesidi de büyük ölçüde artar ve sonunda dış örtüye fazla miktarda enerji ve dışa yönelik bir momentum iletilir.

Daha önce açıklanan süpernova patlamaları ve nötron yıldızları ile ilişkili gözlemlerin ışığında şu sonuçların ortaya çıktığını söylemek akla yakındır. Kütlesi güneşinkinin 20 katı olan bir yıldız çekirdeğinin çökmesi gerçekten bir nötron yıldızı oluşmasıyla sonuçlanan bir süpernova patlamasıdır. Kalan yıldızın kütlesi güneşinkinin 1 - 2 katı arasında olup bu geri kalan kütlenin büyük bir kısmını içeren ve genişleyen bir zarfın içerisinde yer alır. Bu zarf da eninde sonunda çevredeki yıldızlararası maddeye karışacaktır. Kuramsal hesaplar yolu ile olayın bu olduğunu gösterilmesi henüz başarılamamıştır, ancak bu alandaki kuramsal deneyimler gelecekteki çalışmaların başarı sağlamasına katkıda bulunabilir.

Bu çerçeve içerisinde bir soru daha akla gelmektedir: bazı koşullar altında, daha da büyük kütleli bir yıldızın süpernova şeklindeki patlamasından sonra, bir nötron yıldızından daha değişik özellikleri olan bir kalıntının oluşması mümkün müdür?

Nötron yıldızlarının yapılarına ilişkin hesapların gösterdiğine göre, kararlı nötron yıldızının oluşabilmesi için kütlenin bir üst sınırı vardır. Bu üst sınır kesin olarak bilinmemekle birlikte kütlesi güneşinkinin 3 - 4 katı mertebindedir. Kütlenin bu sınırı aşıldığında, kalıntı büzülmeye devam edecek ve bir "kara delik" meydana gelecektir. Kara deliğin yüzey çekimi o kadar yüksektir ki ışınım yayını çevreye kaçamaz, buna karşı çevredeki madde kara deliğin çekimine maruz kalır.

Kararlı nötron yıldızlarının kütlelerinin bir üst sınırı bulunmasına ilişkin sonuca, söz konusu olan son derecede yüksek madde yoğunluklarına

ilişkin genel kuramın sonuçlarının geçerliliği kabul edilerek ulaşılmıştır. Bu gerçeğin ise, çekim kuramının deneysel doğrulamalarının mümkün olduğu bölgenin çok dışında kaldığı açıktır.

Kütleleri fazla olan yıldızların evrimi sonucunda bildirilen üst sınırdan daha fazla kütleli kalıntıların oluşup oluşmayacağı sorusuna kuramsal çalışmalar henüz bir yanıt vermemiştir ve halen gözlemlerden de çıkarılmış kesin bir yanıt yoktur.

Gözlem yoluyla, kütlesi, kararlı nötron yıldızı kütlelerini aşan bir ögesinin bulunduğu çift yıldız sistemlerinin varlıkları kesin olarak saptanabilir ve yine gözlem yolu ile bu ögenin gözlenen kütleyle göre beklenen ışımayı yaklaşık olarak bile yayımlamadığı görülürse bu kanıtların bir kara deliğin varlığını gösterdiği sonucuna ulaşılabılır. İlginç çift yıldız sistemi adayları incelenmektedir, ancak henüz kesin bir sonuç elde edilememiştir. Beşinci bölümde kara deliklerin olası varlıkları genel sorusuna, galaksimizin etkin çekirdeğinden söz ederken tekrar döneceğiz.

Yıldız evrimi konusunu özetlersek, eğilimin *büzülme* olduğunu görürüz. İlk yıldızlar asal-diziye büzülen hafif gök cisimleridir. Burada büzülme, hidrojenin helyuma dönüşmesinden serbest kalan nükleer enerjinin boşalması nedeni ile durur. Bu duruş o kadar etkilidir ki yıldız ömrünün büyük bir bölümünü, bu aşamada, parlak bir cisim olarak sürdürür.

Hazır bulunan hidrojen yakıtının tükenmesinden sonra yıldız kırmızı dev dönemine yönelir, ancak *merkez bölgelerinde büzülme* vardır. Bu büzülmenin sonucu sıcaklık ve yoğunluk artar ve yeni nükleer yakıtlar devreye girer. Bunlar da tükendikçe yeni büzülmeler oluşur, ve kütlesi fazla olan yıldızlarda bir büzülme nötronizasyon oluşana kadar sürer. Yoğunluğu çok yüksek bir nötron yıldızı kalıntısı ancak bir süpernova patlaması sonucunda oluşur. Kütlesi daha az yıldızlarda ürün yoğun bir beyaz cüce kalıntısıdır. Bu, yıldız yüzeyinden dışarı doğru hafif bir kütle akışı ile belirlenen bir evrimin sonucudur.

Yıldızlararası maddenin büzülmesi sonucu yoğun bir ilk yıldız ve oradan kalıntı bir nötron yıldızına yönelik olan evrimi sonunda yoğunluğun şiddeti kırk katı mertebesinde artar. Bu, maddenin fiziğinde esaslı değişikliklerin ortaya çıkacağı anlamına gelir. Bu durumda, *kuramsal astrofiziğin hesaplarına bir girdi olarak, elementer fiziğin temel bilgilerini çok değişik bir açıdan ele almanın gerektiği açıktır.*

Yıldız maddesinin yukarıda bazı ayrıntıları açıklanmış olan evrimsel büzülmesine, hidrojen

çekirdeklerinin helyumdan demire kadar, daha ağır çekirdeklere dönüşmesi işlemi eşlik eder. Dönüşmüş olan maddenin bir bölümü yıldızlararası uzaya geri döner. Bu, galaksideki yıldızlararası maddenin daha ağır elementler cinsinden asırlarca süren bir zenginleşmesine sebep olur. Diğer bir deyimle, yıldızlararası maddeden çok sayıda yıldız oluşturur ve bunları geliştirerek zenginleşmiş maddeler halinde yeniden yıldızlararası uzaya geri gönderen büyük bir mekanizma çalışmaktadır. Bunun bir sonucu olarak daha genç kuşaktan olan ve zenginleşmiş maddeden oluşan yıldızlar, büyük ölçüde daha ağır elementleri kapsayacaklardır. Bu soruya beşinci bölümde, galaksimizin evrimi problemlerini göz önüne alırken yeniden döneceğiz.

Yukarıda açıklanmış olan yıldızların evrimine ilişkin araştırmaların sonuçlarına dayanarak galaksi maddesini zenginleştiren büyük mekanizmanın bazı önemli özelliklerini tanımlamaya çalışacağız.

Herşeyden önce, yıldızlararası maddeden yıldız oluşumu aracılığı ile yıldızlara geçen kütleinin oldukça büyük bir kısmının, galaksimizin yaşam süresi boyunca zenginleşmesine katkıda bulunmadıkları açıktır. Zira, kütlesi güneşinkinin 0,7 katından küçük yıldızlar o kadar yavaş bir gelişim gösterirler ki bunlar, söz konusu 10 - 15 milyar yıl süresince, asal-dizi aşamasının dışına çıkamazlar.

Bundan sonra kütlesi güneşinkinin 0,7 - 4 katı olan ve evrim sonu ürünü beyaz cüce şeklinde ortaya çıkan yıldızları ele alalım. Burada durum öyledir ki daha ağır elementlere dönüşen hemen hemen tüm madde bir beyaz cüce içinde kilitlenir, öte yandan yıldız maddesinin yıldızlararası uzaya akan kısmı zenginleşmemiş ya da çok düşük oranda zenginleşmiştir. Böylece bu kütle aralığında oluşan yıldızlar zenginleşmeye pek katkıda bulunmazlar.

Kütlesi güneşinkinin 4 - 8 katı olan yıldızlar için de durum büyük ölçüde aynıdır. Cörmüş olduğumuz gibi, burada ürünün bir nötron yıldızı kalıntısı olması mümkündür. Durum bu ise o zaman daha ağır elementleri içeren işlenmiş maddenin büyük bir kısmı gene bir kalıntıda kilitlenir ve böylece yıldızlararası maddenin zenginleşmesine katkı düşük bir düzeyde kalır.

Ancak, kütlesi güneşinkinin 8 katından daha fazla olan yıldızlar için durum farklıdır. Yukarıda sözü edilen ve kütlesi güneşinkinin 20 katı olan yıldız ele alalım. Burada evrim süresince daha ağır elementlere dönüşen ve kütlesi güneşinkinin 8 katı olan helyum çekirdeğindeki maddenin ancak görece küçük bir bölümü bir nötron yıldızı

kalıntısında kilitlenir, bu yıldızın kütlesi ise güneşinkinin ancak 1 - 2 katı kadardır. Süpernova patlaması süresince zenginleşmiş maddenin çok büyük bir bölümü çevredeki uzaya saçılır ve sonunda, varolan yıldızlararası madde ile karışır.

Zenginleşme sürecine yalnızca, kütlesi fazla olan yıldızlar katkıda bulduklarından bu sürecin verimi oldukça düşüktür. Yıldızlara büzülen yıldızlararası maddenin, her güneş kütlesi başına yaklaşık 0,4 - 0,5 güneş kütleli bir kısım hiçbir işleme tabi tutulmaksızın geriye dağılır, öte yandan diğer bir 0,4 - 0,5 güneş kütleli kısım hâlâ asal-dizide, beyaz cüce ya da nötron yıldızı aşamalarında bulunan küçük kütleli yıldızlarda kilitlidir. Kütlesi fazla olan yıldızlarda üretilen ve yıldızlararası uzaya geri dönen ağır element maddesinin miktarı belki 0,02 güneş kütlesi kadardır. Buna karşı gelen yaklaşık verim böylece 0,04 olur.

Galaksimizin şimdiki evrimi aşamasında başlangıçta varolan seyreltik maddenin büyük bir kısmı yıldızlara dönüşmüştür. Yukarıda sözü edilmiş olan yaklaşık verim tahmini, şimdi bulunduğumuz aşamada, galaksimizdeki ağır element miktarının sadece yüzde birkaçı olduğu gözlemsel sonucu ile uyumaktadır. Bu soruya 5. bölümde tekrar döneceğiz.

Galaksimizde etken olan büyük zenginleşme mekanizması üzerinde son bir yorum olarak, mekanizmanın veriminin, zenginleşmeye katkıda bulunan fazla kütleli yıldızların, yıldızlararası maddeden oluşan kütle içerisindeki payı ile orantılı olduğunun üzerinde durmamız gerekir. Sözü ettiğimiz olduğumuz payın galaksimizin daha önceki evrim dönemlerinde şimdiki değerinden farklı olması oldukça akla yakındır.

Yıldız yapısı ve yıldız evrimi alanında 1958-78 döneminde elde edilen önemli sonuçları incelemiş olduğumuza göre sözü edilen problemlerle ilişkili olan güneş fiziği sorunlarına kısaca değineceğiz. Yarıçapla karşılaştırılınca küçük olan yüzey ayrıntılarının incelenmesinin mümkün olduğu tek yıldız güneştir. Güneş konusunda bu tür çalışmalar doğrudan doğruya görülebilen dış tabakaların belirgin özelliklerinin yaygın bir şekilde bilinmesine yol açmıştır. Bu dış tabakalar danelenmiş ışık küresi, güneş lekeleri, renkküre, ani alev fıskırmaları, çıkıntılar (güneş diskinin kenarından görülen alevden çıkıntılar) ve taçdır.

Daha 1950'lerde, uzak mor-ötesi konusunda füzelerin yardımı ile yürütülen güneş araştırmaları yapılmış ve 1958-78 yıllarında uydulardan yapılan gözlemler uzak mor-ötesi ve X ışınları alanlarında önemli sonuçlara varılmasına yol açmıştır. Bu araştırmalar taç maddesinin seyreltik, yüksek sıcaklıklı (1 milyon derece mertebesinde) özelliklerinin incelenmesinde çok yararlı olmuşlardır.

Zemine bağlı güneş spektroskopisi, görülebilen güneş tabakalarındaki hareketlerin şemaları ve söz konusu tabakalardaki manyetik alanın yapısına ilişkin yeni bilgiler sağlanmıştır. Bu olaylar, büyük ölçekteki yapı, mevcut enerji ve güneş tipindeki yıldızların evrimlerinin incelenmesinde doğrudan doğruya bir önem taşımazlar. Ancak gene de incelenmeleri kozmik hidrodinamik ve manyeto-hidrodinamik sorunlarında genel bir anlayışa yol açar ve bunlarda yıldız içlerinde bu sorunlar ortaya çıktıkça, bunlara yaklaşmada çok yararlı olabilirler.

Çeviren: Prof. Dr. Sacit TAMEROĞLU

- *Ne kadar az korkarsak o kadar az tehlikeliyiz.*

Titus-LIVIUS

- *Gününü faydalı bir şekilde kullanmayı bilen insan için asıl mutluluk akşam vaktinde gelir.*

CORNEILLE

- *Başkalarının bilgisiyle bilgin olabilirsek bile, ancak kendi aklımızla akıllı olabiliriz.*

MONTAIGNE

- *Birçok insanlar kusur yapmak korkusuyla suç işlerler.*

HORATIUS