

MİLİMETRE/MİLİMETRE-ALTI GÖZLEMLERİ İLE YILDIZ OLUŞUMU

Umud A. YILDIZ¹, Ewine F. van DISHOECK^{1,2}, Lars E. KRISTENSEN^{1,3}

¹ Leiden University, Leiden Observatory, Niels Bohrweg 2, 2333CA, Leiden Hollanda
(eposta: yildiz@strw.leidenuniv.nl)

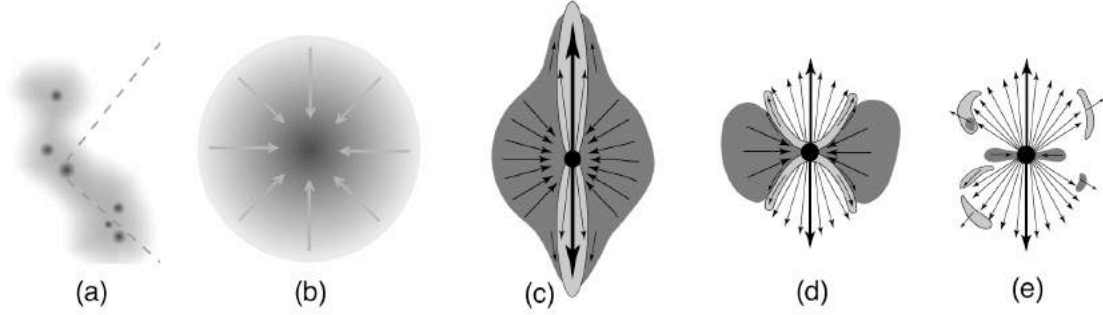
² Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik, Giessenbachstrasse 1, 85748 Garching, Almanya

³ Harvard University, Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA

Özet: Henüz yeni oluşmakta olan ilkel yıldızların (protostars) çevresinde bulunan çok miktardaki soğuk gaz ve toz parçacıkları, gelen ışınının soğurulmasına neden olur. Bu nedenle küçük kütleli ($\sim 1M_{\odot}$) ilkel yıldızları optik veya kırmızı-ötesi dalgaboylarında tespit etmek imkansızdır. Ancak, bu tür soğuk cisimleri daha uzun dalga boylarında yani milimetre veya milimetre-altı (mm-/altı) dalgaboylarında gözlemek ancak son birkaç on yıldır gelişmekte olan teknoloji ile mümkün olmuştur. Mm-/altı bölgede yapılan molekül tayf gözlemleri bu bölgelerdeki yoğun gaz moleküllerinin varlığını ve bolluğunu tespit etmemize yardımcı olur. Bununla beraber, ilkel yıldız çevresinde bulunan zarfın yıldız üzerine hareketi ile ilgili kinematik bilgilerin yanı sıra, bu sırada meydana gelen ilkel yıldız fıskırmalarını gözlemlememizi sağlar. Örneğin, CO molekülü yıldızlararası ortamda H_2 'den sonra en yüksek bolluğa sahip molekül olarak bilinir. Basit yapısıyla ve izotopolojileriyle birlikte (^{13}CO , $C^{18}O$, $C^{17}O$) rotasyonel geçişlerinin de kolayca uyarılması sonucu mm-/altı bölgelerde gözlemlenip bu tür soğuk bölgeler hakkında geniş bilgi verir. H_2 molekülü sıcaklıkları binlerce Kelvin derecede bulunan şoklanmış gazı ölçerken, CO ilkel yıldızlardaki moleküler fıskırmalar neticesiyle süpürülen, sıcaklığı çok daha az olan gazı ($\sim 10K$) incelememize olanak sağlar. Mm-/altı molekül tayf gözlemleri böylelikle evrendeki soğuk ve karanlık bölgelerin araştırılmasında en önemli araç olarak öne çıkmaktadır.

1. Giriş, Yıldız Oluşumu:

Yıldızlar arasında bulunan bölgeye yıldızlararası ortam (Interstellar Medium - ISM) adı verilir. Bu ortamda bulunan maddenin yaklaşık %99'u gaz halindedir. Bunlar genellikle %70 Hidrojen (H yada H_2), %28 Helyum (He) ve kalan %2 de Oksijen (O), Karbon (C) veya Azot (N) gibi diğer ağır elementlerden meydana gelir. Yıldızların doğumunu, yaşamını ve ölümünü belirleyen iki kuvvetten birincisi maddeyi merkeze doğru çökmeye zorlayan kütleçekim kuvveti ve diğeri de yıldızlararası maddeyi dışarı doğru itmeye zorlayan basınç kuvvetidir. Yıldız oluşumunun ilk safhalarında, yıldızın çökebilmesi için kütleçekiminin basınçtan daha baskın olması gerekir. Böyle olduğunda madde yoğun merkeze doğru akmaya başlar. İdeal gaz yasasına göre düşük basınca sahip bölgeler olabildiğince soğuk bölgelerdir. Yıldızlararası ortamda yıldız oluşumunu başlatacak denli yoğunluğa ve çok düşük sıcaklığa sahip bölgelere karanlık molekül bulutlar (dark molecular clouds) adı verilir. Bu tür bulutların en basiti Bok bulutlarıdır ve buralarda sıcaklıklar $\sim 10 K$, yoğunluklar $\sim 10^3$ - $10^4 cm^{-3}$ olup, kütleleri de $10 M_{\odot}$ ile $100 M_{\odot}$ arasında değişim gösterebilir. Bok bulutları birkaç parsek büyüklüğünde olabilirken, karanlık molekül bulutlar da birkaç on parsek genişliğinde olabilir. Bu tür bölgeler yıldız oluşumu için en uygun bölgelerdir.



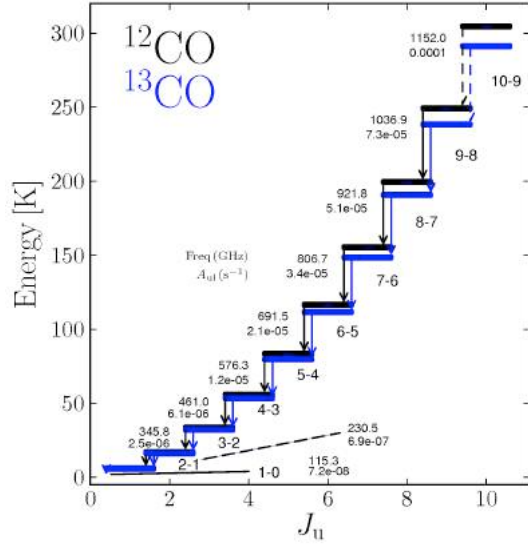
Şekil 1. (a) Karanlık molekül bulutları. (b) Bulutun içerisinde bir yoğunlaşma bölgesi yıldız oluşturmak üzere çökmeye başlıyor. (c) Class 0 denen ilk gömülü safha; yüksek şiddette fışkırmalar var (d) Class I safhası; fışkırmaların gücü azalıp birikim (accretion) diski oluşmaya başlar. (e) Fışkırmalar artık tamamen durur ve gezegen oluşturan disk meydana gelir.

2. Düşük kütleli yıldız oluşumu

Düşük kütleli yıldızlar, kütlesi $5 M_{\odot}$ 'den ve bolometrik parlaklığı $100 L_{\odot}$ 'den az olan yıldızlar olarak tanımlanır. Şekil 1'de küçük kütleli yıldız oluşum (low-mass star formation) süreci özetlenmiştir. Karanlık moleküler bulut içerisinde madde, bazı bölgelerde kümelenerek ortama göre biraz daha yoğun bölgeler meydana getirir (Şekil 1a). Bulutta bulunan gaz ve toz parçacıkları kütleçekimi vasıtasıyla bu küme bölgelerde çökmeye başlarlar (Şekil 1b). Bu gaz ve toz bulutu aynı zamanda merkezdeki ilkel yıldızın madde aktarılan zarfı da oluşturur. Bu zarfın kütlesi henüz merkezindeki ilkel yıldızın kütlesinden daha fazladır. Çökmekte olan merkezdeki ilkel yıldız, üzerindeki fazla açısal momentumdan kurtulmak için çift kutuplu moleküler fışkırmaya meydana getirir (Class 0, Şekil 1c). Zamanla madde aktarımı bir birikim (accretion) diski vasıtasıyla devam eder ve fışkırmalar azalır. Bu safhada artık zarfın kütlesi merkezdeki ilkel yıldızın kütlesinden daha düşüktür (Class I, Şekil 1d). Daha ileri safhada artık fışkırmalar tamamen durur, çevresindeki zarf ya ilkel yıldızın aktarılır ya da birikim diskinde gezegenleri oluşturmak üzere dönmeye devam eder (Class II, Şekil 1e). Class 0, I, II şeklinde sınıflandırma biçimi Lada (1999) tarafından yüzlerce ilkel yıldızın tayfsal enerji dağılımı incelenerek oluşturulmuştur. Bu şekilde birkaç farklı safha tanımlanmış olsa da yıldız oluşumu hala tam olarak açıklanamamış bir problem olmaya devam etmektedir.

3. Milimetre ve milimetre-altı Gözlemler

Bilindiği üzere termal kameralar kırmızı-ötesi ışınımı görüntüye dönüştürerek çalışır. Kırmızı-ötesi ışınım da aslında ısıdan kaynaklanan bir ışınımdır. Özellikle bu ışınımı gözlemek istiyorsak teleskobumuz gözlemek istediğimiz cisimden daha soğuk olmalıdır. Moleküler bulutların karanlık görünmesinin nedeni, %99 oranında gazdan meydana gelmesinden ziyade bu ortamda toz parçacıklarının etkin olmasındandır. Bu toz parçacıkları 1 mikrondan çok daha küçük olan silikatlar (kum) veya karbon bileşikleridir olan grafiten ibarettir. Her ne kadar yıldızlararası ortamın sadece %1'ini meydana getirirse de toz, optik dalgaboyundaki bütün ışınımı soğurma konusunda yeteneklidir. Milimetre-altı ışınım da boyutları yaklaşık 0.1 mikrometre olan bu toz parçacıklarından yayılır.



Şekil 2. Karbonmonoksit molekülünün ^{12}CO (siyah) ve ^{13}CO (mavi) için gösterilen rotasyonel enerji geçişi diyagramı. Kesikli çizgi ile gösterilen geçişler *Herschel-HIFI* tarafından gözlemlenmiştir. Solda görülen frekans değerleri GHz ve Einstein A katsayıları da s^{-1} cinsinden verilmiştir. Değerler JPL¹, CDMS² ve LAMDA³ veritabanlarından alınmıştır.

Atom ve moleküllerde üç çeşit enerji geçişi gerçekleşir ve her bir geçiş belli bir frekansa ve enerjiye karşılık gelir. Bunlar; optik dalgaboylarında görülen elektronik geçişler, yakın kırmızı-ötesi dalgaboylarında görülen titreşimsel (vibrasyonel) geçişler ve milimetre ve milimetre-altı dalgaboylarında görülen dönme (rotasyonel) geçişleridir. Moleküllerin rotasyonel geçişlerinde diğer geçiş türlerine göre enerji çok az olduğundan, sıcaklığı 10 ile 250 K arasında değişen çok soğuk bölgeleri gözlemek mümkündür. Bu geçişler de optik bölgede olduğu gibi salınım ve soğurma çizgi tayfları oluşturarak yıldızlararası ortamın fiziksel ve kimyasal yapısı hakkında önemli bilgiler verirler.

Bu çizgilerin enerjisi çok düşük olduğundan bize gelen sinyal de bir o kadar zayıftır. Bu frekans aralığının astronomide önemli bir ihtiyaç olduğu anlaşıldığı sıralarda gökcisimlerinden gelen zayıf sinyalleri güçlendirip bize sunacak bir teknoloji mevcut değildi. Yakın-kırmızı-öte (near-IR) dalgaboyları bile optik teleskoplarla gözlenebiliyorken, uzak-kırmızı-öte (far-IR) ve milimetre-altı (0.1 – 1 mm) için geliştirilmiş bir teknoloji yoktu. Ancak radyo bölgesinde yıllardan beri süren gelişmelerin sonucunda çok güçlü alıcılar yapılabildi. Milimetre-altı tam bu iki bölgenin arasında yer aldığından dolayı optik ve radyoyu birleştirip melez bir teknoloji (heterodyne technique) meydana getirildi. Teleskop aynası aynı optikteki gibi pürüzsüz olmakla beraber teleskoba gelen sinyaller bir radyo dalgası gibi yükseltilebildi. Yapılan şey, gökcisiminden gelen sinyalin teleskoptaki dedektörden yayılan sabit bir sinyal ile çarpılıp radyo dalgalarının bulunduğu bölgeye karşılık getirilmesiydi. Böylece elde edilen sinyal düşük frekansta ancak gökcisiminden gelen tüm bilgiler de korunarak işleme hazır hale getirildi.

Yıldız oluşumunun ilk sahneleri soğuk ve karanlık moleküler bulutlardaki gaz ve tozun içerisine gömülü olduğundan ancak uzun dalga boyunda çalışan teleskoplar tarafından çeşitli molekülleri kullanarak dolaylı olarak gözlemlenir. Bu ortamlardaki moleküller de ortamın ısınması ve/veya soğumasında büyük öneme sahiptir. Biz de bu molekülleri gözleyerek bu ortamlardaki fiziksel ve kimyasal yapı hakkında bilgi sahibi olabiliyoruz. Yıldızlararası ortamda bugüne kadar 150'den fazla molekül keşfedilmiştir. Her bir molekül, sahip olduğu kendine özgü enerji geçişleri sonucu oluşan tayflar yoluyla bize farklı bilgiler verir. Örneğin siyanür (CN ve HCN) bu bölgelerdeki UV ışınımı hakkında

¹ <http://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catdir.html>

² <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/>

³ <http://www.strw.leidenuniv.nl/~moldata/>

bilgi verirken, karbonmonosülfid (CS) ortamın yoğunluğu hakkında bilgi verir. Silisyumoksit (SiO) özellikle yüksek hızlı jetleri bulmamıza yardım ederken, karbonmonoksit (CO veya HCO, HCO⁺) farklı sıcaklıklardaki bölgeleri bulmamıza yardım eder. Özellikle CO yıllardır yıldızların ilk doğum anları olan ilkel yıldızları araştırmak için kullanılıyor. CO'nun en önemli özelliği yıldızlararası ortamda hidrojen gazından sonra ikinci en çok bolluğa sahip molekül olmasının yanında (her CO molekülüne karşılık 10 000 H₂ molekülü) rotasyonel geçiş enerjileri 5 K ($J=1-0$) gibi çok düşük bir değerden başlar. HIFI dedektörü ile de görebildiği 750 K'e ($J=16-15$) kadar gözlemlenebilir. Milimetre-altı astronomlarının enerji birimi olarak Kelvin kullanması buraya önemli bir not olarak düşülebilir. Karbonmonoksitin her bir geçişi farklı bir bilgi verdiği için neredeyse her bir geçiş için ayrı bir teleskop yapılmış durumda. Örneğin $J=(1-0)$ geçişi İsveç'teki Onsala Radyoteleskobuyla, $J=(2-1)$ İspanya'daki IRAM 30 metre teleskobuyla, $J=(2-1)$, (3-2), (4-3) için Hawaii'deki James Clerk Maxwell Teleskoplarıyla gözlenebiliyor. Daha yüksek geçişler için daha yüksek ortamlara çıkmak gerekiyor. $J=(6-5)$ ve (7-6) için Şili'deki APEX teleskobu kullanılırken daha sonrası için artık atmosfer dışına yada uzaya gidilmesi gerekiyor. İşte bu noktada *Herschel*-HIFI imdadımıza yetişiyor ve yüksek- J 'ye sahip geçişleri ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklıkları gözlemleyebiliyoruz.

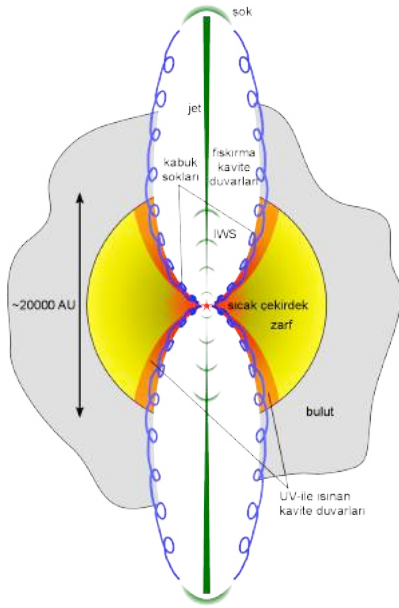
Bu çalışmada kullanılan mm-/altı teleskopları aşağıda sıralanmıştır;

Herschel Uzay Gözlemevi (Herschel Space Observatory) bir ESA/NASA görevi olup, 3.5 metrelik ayna çapıyla bugüne kadar uzaya gönderilen en büyük aynaya sahip uzay teleskobudur. Toplam 3.5 yıl ömür biçilen *Herschel*, 14 Mayıs 2009 yılında fırlatılmış olup Dünya'dan yaklaşık 1.5 milyon km uzaklıkta L2 Lagrange noktasında yer alır ve Dünya ile eşzamanlı olarak Güneş çevresinde hareketini sürdürür. Gözlem dalgaboyu uzun-kırmızı-öte (far-IR) ile milimetre-altı dalgaboyu arasındadır. Bu çalışmada kullanılan *Herschel*'in içerisinde yer alan 3 dedektörden biri olan HIFI, 476 GHz ile 1910 GHz arası gözlem yapma yeteneğine sahiptir.

Atacama Pathfinder Experiment (APEX) teleskobu, Şili'nin Atacama Çölü'nde 5100 metre yükseklikte kurulmuş olup 12 metrelik çanak çapına sahiptir. Teleskopta bulunan CHAMP⁺ adlı enstrüman 650/850 GHz arası yüksek frekans alıcısı, 2x7 piksel çözünürlüğü ve haritalama kabiliyeti ile dünyanın bu frekanslarda gözlem yapan en etkin dedektörlerinden biridir.

4. Gömülü Class 0 safhası

Şekil 3'te görüldüğü gibi küçük kütleli ilkel yıldızlar farklı fiziksel yapılardan meydana gelir. Bunlar arasında, çift kutuplu moleküler fışkırmalar, fışkırmayı sağlayan jetler, merkezde oluşmakta olan ilkel yıldız, çevresinde bulunan ilkel yıldızın madde sağlayan zarf ve onu da çevreleyen moleküler bulut ile kompleks bir yapıya sahiptir. İlkel yıldızın zarfını merkezinden dışına doğru tanımlayan sıcaklık ve yoğunluk yapısı Güç Yasası (Power Law) ile ifade edilir (Jørgensen et al. 2002). Böylelikle sıcaklık ve yoğunluk çökme devam ettikçe dışarıdan içeriye doğru sürekli artma gösterir. İlkel yıldızın merkezine yakın bir bölgede geniş açılı ve yüksek hızlı rüzgarlar oluşmasıyla fazla olan açısal momentum taşınır. Bunun sonucu olarak da çift kutuplu moleküler fışkırmalar, akresyon diskine dik olarak yayıldığından merkezdeki ilkel yıldızın düzenli bir şekilde dönmesini ve akresyonun artmasını sağlar. Fışkırmaların yönünü Doppler yasası gereği bir kutbu maviye, diğer kutbu da kırmızıya kayma ile tespit edebiliriz. Fışkırmalar çok yüksek hızlarda olduğundan ortamı ısıtıp çevresindeki maddeyi etkiler ve çeşitli kimyasal tepkimeler vasıtasıyla yeni yeni moleküllerin oluşmasını sağlarlar (Snell et al. 1980, Bachiller & Tafalla 1999).

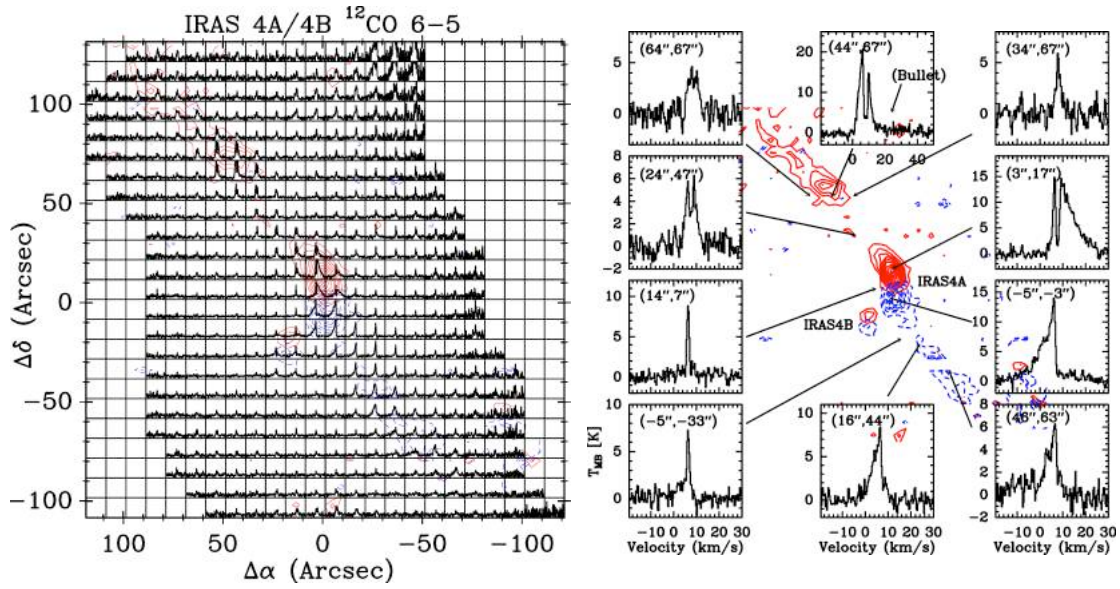


Şekil 3. Bir ilkel yıldız ve çevresinin anatomisi. Merkezde ilkel yıldız (protostar), sarı ile gösterilen gaz ve tozdan meydana gelen zarfı, yeşil ile gösterilen jet ve yanlarındaki beyaz bölge fişkırmaların yol açtığı bölge, kırmızı ile gösterilen fişkırmaların ardında kalan kavite duvarları, ve gri ile gösterilen de yıldızın oluşmasını sağlayan moleküler bulut.

4.1. Yüksek Sıcaklıktaki Gaz

Daha önceden belirtildiği üzere CO, yıllardır ilkel yıldızların fiziksel yapısını incelemek için çok iyi bir araç olarak kullanılıyor. Teknolojinin ve ideal gözlem merkezlerinin elverdiği ölçüde günümüze kadar yapılan tüm araştırmalar genelde CO'nun düşük rotasyonel geçişleri ($J_u \leq 3$) ile yapılan gözlemler neticesinde elde edilmişti (Blake et al. 1995, Shirley et al. 2002). Böylelikle soğuk gaz (< 50 K) içeren bölgeler incelenebiliyordu. Ancak günümüzde yerden yada uzaydan yeni yeni gerçekleştirilen yüksek frekans gözlemleri, CO'nun yüksek rotasyonel geçişlerini gözlememize olanak sağladı. Bununla beraber, soğuk gazın yanında artık ılık (100 K - 150 K) veya sıcak gazın (>150 K) da karakterize edilmesiyle bu tür cisimlerin sıcaklık ve kolon yoğunlukları çok daha iyi tespit edilebilir oldu.

APEX teleskobunun CHAMP⁺ dedektörünün hızlı ve etkin harita yapabilme kabiliyeti ile ilk defa ilkel yıldız çevrelerinin yüksek frekanslarda (CO'nun $J = 6-5$ ve $7-6$ geçişlerinin) haritaları elde edilmeye başlandı (van Kempen et al. 2009; Yıldız et al. 2012). Şekil 4'de bize uzaklığı 235 pc olan NGC 1333 IRAS 4A ve IRAS 4B adlı iki ilkel yıldızın bu teleskoptan ¹²CO 6-5 geçişi ile gözlenmiş haritası sunulmuştur. Burada her bir karecik yaklaşık 10''x10'' yaysaniyesi genişliğinde olup dolayısıyla 2350 AB x 2350 AB (AB: Astronomik Birim) büyüklüğünde bir bölgeyi temsil eder. Böylelikle fişkırmaların boyutlarının yaklaşık 20 000 - 30 000 AB kadar çok geniş bir bölgeyi kapladığını görebiliriz. Tek çanak (single dish) milimetre teleskoplarından bugün itibariyle bu frekanslarda elde edilen en iyi çözünürlüğü APEX teleskobu sunar ve bir pikselin boyutu 8'' mertebesindedir. Şekil 4 solda verilen tayfsal haritada ilkel yıldızın etrafındaki CO ışınımını niceliksel olarak bölge bölge ölçebilme olanağına kavuşuyoruz. Elde edilen tayfların yüksek çözünürlüğü vasıtasıyla belli bölgelerdeki tayflara bir yada birkaç Gauss fiti yaparak çözümleyebiliyoruz. Bu fitler ilkel yıldızın etrafındaki fiziksel bileşenleri incelemeye olanak tanır. Çizgi genişliği birkaç km/s olan bileşenler düşük hıza sahip durgun gazı (quiescent envelope gas) tespit etmeye olanak sağlarken, genişlikleri 15-25 km/s olan bileşenler yüksek hızlı fişkırmalar neticesinde ilerleyen gazı (outflowing gas) gösterir.



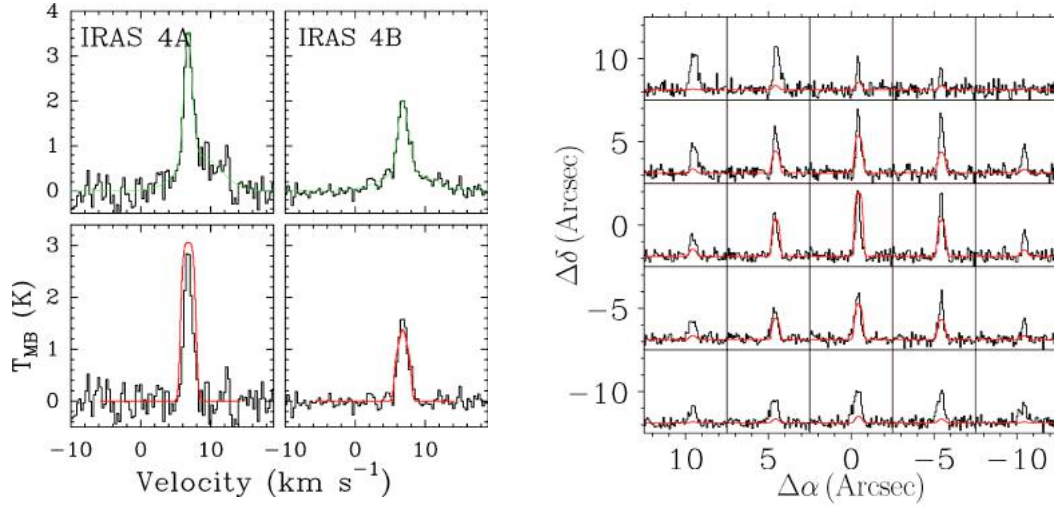
Şekil 4. Sağda, NGC1333 IRAS 4A ve IRAS 4B ilkel yıldızlarının ^{12}CO 6-5 gözlemleri ile hazırlanan tayfsal haritası görülmüyor. Solda, aynı haritadan bazı bölgelerin tayflarının büyütülmüş hali görülmüyor (Yıldız et al. 2012).

Elde edilen salınım tayfının ayrı ayrı maviye veya kırmızıya kayan bölgelerinin altında kalan alanı (integrated intensity) hesapladığımızda yüksek hıza sahip fışkırmaların boyutunu ve yönünü tespit edebiliriz. Şekil 4 sağda da bazı özel bölgelerin tayflarının büyütülmüş hali verilmiştir.

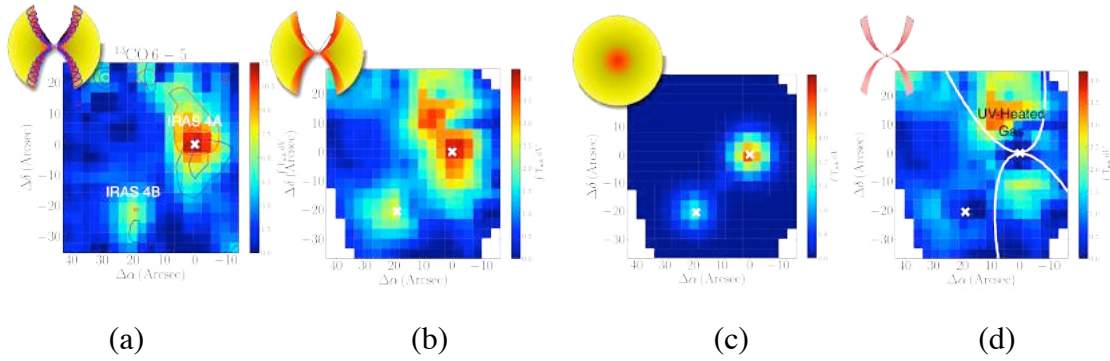
IRAS 4A ilkel yıldızı çok yüksek kolimasyona sahip fışkırmalar oluştururken, IRAS 4B ilkel yıldızı bunun çok daha az fışkıрма gösteriyor. CO'nun düşük- J 'ye sahip çizgilerinde çözünürlük çok daha düşük olduğundan ancak bu yeni gözlemler ile IRAS 4B ilkel yıldız fışkırmalarının bize doğru olduğunu (inclination) tespit edebildik.

4.2. UV ile ısınan kavite duvarları

Elde edilen yüksek çözünürlüklü veri ile CO'nun yüksek geçişleri bize hangi tür gazın nerede bulunduğunu tespit etmemize olanak sağlar. APEX ile aynı zamanda CO'nun izotopologu olan ^{13}CO $J=(6-5)$ sayesinde aynı ilkel yıldızların merkez bölgelerini ve yakın çevresinin de gözlemleri yapılabildi (Şekil 6a). $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ bolluk oranı 65'tir. Şekil 5'te üst hücrelerde IRAS 4A ve IRAS 4B ilkel yıldızlarının tam merkezlerinden alınan tayflar verilmiştir. Tayflar üzerinde iki Gauss fiti yeşil ile gösterilmiştir. Bunlardan geniş çizgi genişliğine sahip Gauss fiti fışkırmaları temsil ettiğinden dolayı gözlenen tayftan çıkarılmıştır (Şekil 5a'da alt hücrelerde siyah olarak gösterilen). Geriye kalan dar çizgi genişliğine sahip tayf, ilkel yıldız zarfından ve fışkırmaların ardında kalan kavite duvarlarından gelen ışığa neticesinde oluşmuştur. Aynı çalışmada bolluğu çok daha düşük olan C^{18}O çizgileri ($X(^{12}\text{CO})/X(\text{C}^{18}\text{O})=540$) kullanılarak durgun zarf gazının modellenmesi yapılmıştır. Modelleme için C^{18}O çizgilerinin $J=(1-0)$ 'dan, *Herschel* ile gözlenen $J=(9-8)$ ve $(10-9)$ 'a kadar olan çizgileri kullanılmış ve RATRAN (Hogerheijde & van der Tak, 2000) ışınım transfer model kodu (radiative transfer code) kullanılarak durgun gazın miktarı modellenmiştir.



Şekil 5. Solda, IRAS 4A ve IRAS 4B ilkel yıldızlarının merkezlerinden alınan ^{13}CO 6-5 tayfı. Üstte yeşil ile tayfa yapılan iki Gauss fiti görülüyor. Altta ise ışınım transfer kodu ile modellenen zarfın gözlemlerle uygunluğu görülüyor. Sağda ise sadece IRAS 4A'nın yakın çevresinin tayfı ve model tayfı üst üste konarak karşılaştırılıyor (Yıldız et al. 2012).



Şekil 6. NGC1333 IRAS 4A ve IRAS 4B ilkel yıldızlarının ^{13}CO 6-5 ile gözlemlenmiş haritası. (a) Gözlenen ışınım, (b) fişkırmalar çıkarılıp kalan durgun gaz, (c) zarfın modellenmiş görüntüsü, (d) UV ile ısınan kavite duvarlarının ilk gözlemsel kanıtı elde edildi.

Şekil 5a'da alt hücrelerde gözlemlenen durgun gaza ait tayfın üzerinde kırmızı ile modelleme sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5b'de aynı model kullanılarak IRAS 4A ilkel yıldızının yakın çevresindeki durgun gazın dağılımı görülüyor. Burada ilkel yıldızın çevresindeki tayfın yeğniliğinin modelden daha fazla olduğu dikkat çekiyor. Buradan hareketle Şekil 6'da aslında bir nevi matematiksel bir işlem yaparak, fişkırmaların ardında kalan kavite duvarlarında bulunan gazı niceliksel olarak ölçebildik. (a) Bölgenin ^{13}CO 6-5 ile direk gözlemlerinden, (b) yukarıda açıklandığı üzere bütün tayflardan geniş çizgi genişliğine sahip Gauss fitleri çıkarılıp arta kalan ışınım bulunmuştur. (c) RATRAN ile yapılan ışınım transferi modeli, (d)'de c'den çıkarıldığında arta kalan ışınımı verir. Görüldüğü üzere fişkırmaların kavite duvarlarında (outflow cavity walls) çok yüksek oranda gazın kaldığı ortaya çıkmaktadır. Hatta bu gazın kütlesi hesaplandığında, fişkırmalarla itilen gazın kütlesi ile neredeyse aynı olduğu bulundu. Bu gözlemler sonucu UV ışınımı ile ısınan gazın ilk direk gözlemsel kanıtını elde etmiş olduk.

5. Sonuç

Gelişen teknoloji ile birlikte birçok yeni sorulara ve cevaplara ulaştığımız yıldız oluşumu hala tam olarak açıklanamamış bir problem olmaya devam etmektedir. Soğuk ve karanlık moleküler bulutlarının içerisine ancak uzun dalga boyları ile ulaşılabilirdiğinden milimetre ve milimetre-altı teknolojisindeki gelişmeler, uygun gözlem yerlerinin bulunması ve dizge teleskoplarının (interferometre) üretilmesiyle bu sorular kuşkusuz zamanla yerini daha yeni sorulara bırakacaktır. Bu çalışmada, uzay-konuşlu *Herschel* Gözlemevinden ve 5100 metre yükseklikte bulunmasının avantajı ile yüksek çözünürlüklü haritalama kabiliyetini birleştiren APEX teleskobundan alınan yüksek frekans CO gözlemlerinden faydalandık. ¹²CO gözlemleri ile fişkırmaların yerlerini ve miktarını tespit edebildik. ¹³CO gözlemleri ile fişkırmaların ardında kalan kavite duvarlarında bulunan UV ışınımı ile ısınan gazın ilk direk gözlemsel kanıtını elde etmiş olduk.

6. Teşekkür

Bu çalışma Leiden Üniversitesi, Leiden Gözlemevi tarafından desteklenmiştir. UAY gözlemleri yapan yada yapılmasına katkıda bulunan *Herschel*, APEX ve JCMT çalışanlarına teşekkür borçludur. Özgür Etlî'ye de okuyup, gerekli düzeltmeleri yaptığı için teşekkür ederim.

7. Kaynaklar

- Bachiller, R., & Tafalla, M. 1999, in *The Origin of Stars and Planetary Systems*, NATO ASIC Proc., 540, 227
Blake, G. A., Sandell, G., van Dishoeck, E. F., et al. 1995, *ApJ*, 441, 689
Hogerheijde, M. R., & van der Tak, F. F. S. 2000, *A&A*, 362, 697
Jørgensen, J. K., Schöier, F. L., & van Dishoeck, E. F. 2002, *A&A*, 389, 908
Kristensen L. E., Visser, R., van Dishoeck, E. F. et al. 2010, *A&A*, 521, L30
Kristensen, L. E., van Dishoeck, E. F., Bergin, E. A., et al. 2012, *A&A*, 542, A8
Lada C., 1999, *The Origin of Stars and Planetary Systems*, p.143
Shirley, Y. L., Evans, II, N. J., & Rawlings, J. M. C. 2002, *ApJ*, 575, 337
Snell, R. L., Loren, R. B., & Plambeck, R. L. 1980, *ApJ*, 239, L17
van Dishoeck, E. F., Kristensen, L. E., Benz, A. O., et al. 2011, *PASP*, 123, 138
van Kempen, T. A., van Dishoeck, E. F., Güsten, R., et al. 2009, *A&A*, 501, 633
Yıldız, U. A., van Dishoeck, E. F., Kristensen, L. E., et al. 2010, *A&A*, 521, L40
Yıldız, U. A., Kristensen, L. E., van Dishoeck, E. F., et al. 2012, *A&A*, 542, A86