



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Warm and cold gas in low-mass protostars : Herschel Space Observatory and ground-based surveys

Yildiz, U

Citation

Yildiz, U. (2013, May 1). *Warm and cold gas in low-mass protostars : Herschel Space Observatory and ground-based surveys*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/20855>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/20855>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/20855> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Yildiz, Umut

Title: Warm and cold gas in low-mass protostars : Herschel Space Observatory and ground-based surveys

Issue Date: 2013-05-01

Türkçe özet

Düşük Kütleli Yıldız Oluşumunda Gaz¹

Herschel Uzay Gözlemevi ve Yer Tabanlı Gözlemsel Taramalar

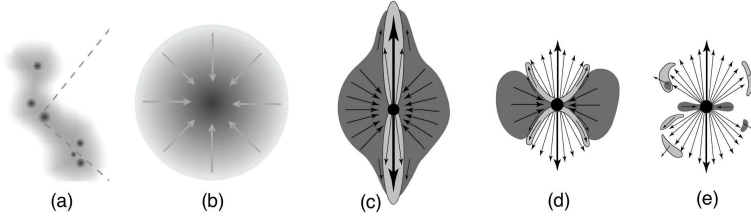
Özet

Henüz yeni oluşmakta olan ilkel yıldızların (protostars) çevresinde bulunan çok miktardaki soğuk gaz ve toz parçacıkları, gelen ışınımın soğurulmasına neden olur. Bu nedenle düşük kütleli ($\sim 1 M_{\odot}$) 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) dalga boylarında 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 fışkırmalarını gözlemlememizi sağlar. Örneğin, CO molekülü yıldızlararası ortamda H_2 'den sonra en yüksek bolluğa sahip molekül olarak bilinir. Basit yapısıyla ve izotopologlarıyla 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 fışkırmalar neticesiyle süpürülen, sıcaklığı çok daha az olan gazı (~ 100 K) incelememize olanak sağlar. Mm-/altı molekül tayf gözlemleri böylelikle evrendeki soğuk ve karanlık bölgelerin araştırılmasında en önemli araç olarak öne çıkmaktadır.

Yıldız oluşumu

Yıldızlar arasında bulunan bölgeye yıldızlararası ortam (Interstellar Medium - ISM) adı verilir. Bu ortamda bulunan madde kütleli olarak karşılaştırıldığında yaklaşık %99'u gaz

¹ Bu Türkçe özet 18. Ulusal Astronomi Kongresi'nde (Malatya, 27-31 Ağustos 2012) gerçekleştirilen davetli konuşmanın bildirisi olarak yayınlanmıştır ancak birkaç düzeltme de içerir. Detayları *Publications* bölümünde bulabilirsiniz.

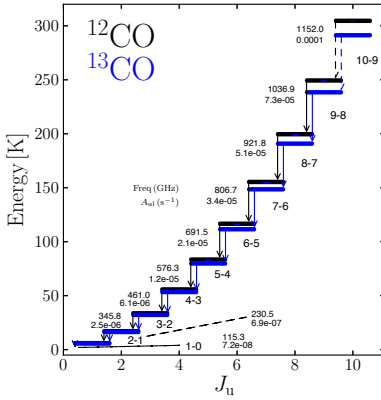


Şekil 1 – (a) Karanlık molekül bulutları. (b) Bulutun içerisinde bir yoğunlaşma bölgesi yıldız oluşturmaya başlıyor. (c) Class 0 denen ilk gömülü safha; yüksek şiddette fişkirmalar var (d) Class I safhası; fişkirmaların gücü azalıp birikim (accretion) diski oluşmaya başlar. (e) Fişkirmalar artık tamamen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

ve %1'i toz halindedir. Bu gazın da sayıca %90'ı Hidrojen (H veya H_2), %8'i Helyum (He) ve ~%1-2'si ağır elementlerden oluşur. 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 basınca 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 ~10 K, yoğunluklar 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.

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 fişkırmaya meydan getirir (Class 0, Şekil 1c). Zamanla madde aktarımı bir birikim (accretion) diski vasıtasıyla devam eder ve fişkirmalar azalır. Bu safhada artık zarfın kütlesi merkezdeki ilkel yıldızın kütlesinden daha düşüktür (Class I, Şekil 1d). Daha ileri safhada artık fişkirmalar 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



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 sn^{-1} cinsinden verilmiştir. Değerler JPL, CDMS ve LAMDA veritabanlarından alınmıştır. Bu resmin renkli versiyonunu Resim 1.4’de bulabilirsiniz.

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.

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 bileşikleri olan grafiten ibarettir. Her ne kadar yıldızlararası ortamın sadece %1’ini meydana getirir de toz, optik dalgaboyundaki bütün ışınımı soğurma konusunda yeteneklidir. Milimetre-altı ışınım da boyutları yaklaşık 0.1 mikrometre olan bu toz parçacıklarından yayılır.

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.

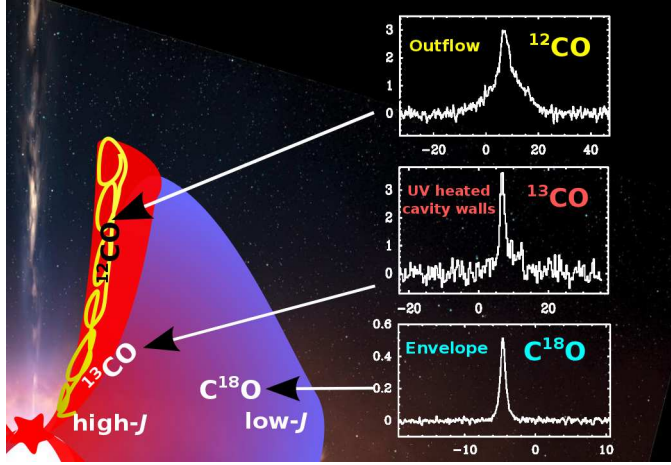
Bu çizgilerin enerjisi çok düşük olduğundan bize gelen sinyal de bir o kadar zayıftır. Bu frekans aralığının astronomide önemli bir ihtiyaç olduğu anlaşıldığı sıralarda gökcisimlerinden gelen zayıf sinyalleri güçlendirip bize sunacak bir teknoloji mevcut değildi.

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 yapılabiliyordu. Milimetre-altı tam bu iki bölgenin arasında yer aldığından dolayı optik ve radyoyu birleştirip melez teknoloji (heterodyne technique) meydana getirildi. Teleskop aynası aynı optikteki gibi pürüzsüz olmakla beraber teleskoba gelen sinyaller bir radyo dalgası gibi yükseltilebildi. Yapılan şey, gökcisminden gelen sinyalin teleskoptaki dedektörden yayınlanan sabit bir sinyal ile çarpılıp radyo dalgalarının bulunduğu bölgeye karşılık getirilmesiydi. Böylece elde edilen sinyal düşük frekansta ancak gökcisminden 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 170'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 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. 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 durumdadır. 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 ye-

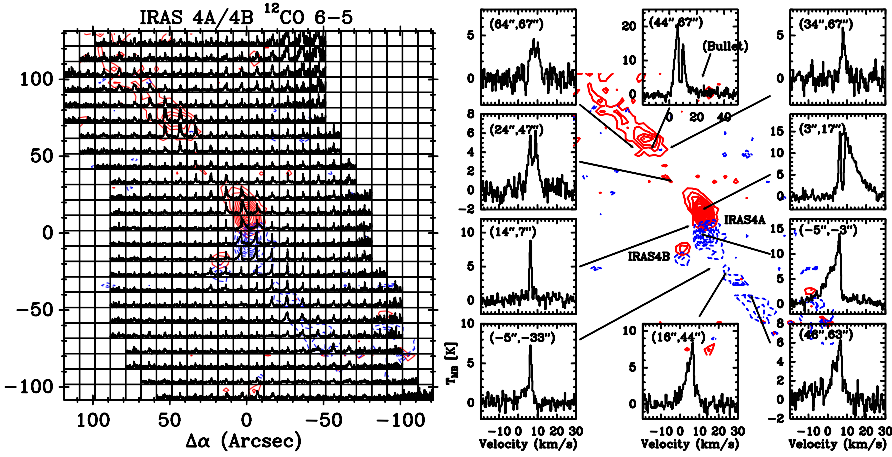


Şekil 3 – Bir ilkel yıldız ve çevresinin anatomisi. Merkezde jet fişkırtan ilkel yıldız (protostar), kırmızı-mavi ile gösterilen gaz ve tozdan meydana gelen zarfı, kırmızı ile gösterilen fişkırmaların ardında kalan kavite duvarları. Bu resmin renkli versiyonunu Resim 1.5'de bulabilirsiniz.

teneğine 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.

Gömülü Class 0 safhası

Şekil 3'te görüldüğü gibi küçük kütleli ilkel yıldızlar farklı fiziksel yapılardan meydana gelir. Bunlar arasında, çift kutuplu moleküler fişkırmalar, fişkırmayı sağlayan jetler, merkezde oluşmakta olan ilkel yıldız, çevresinde bulunan ilkel yıldız madde sağlayan zarf ve onu da çevreleyen moleküler bulut ile kompleks bir yapıya sahiptir. İlkel yıldız 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 fişkırmalar, akresyon diskine dik olarak yayıldığından merkezdeki ilkel yıldızın düzenli bir şekilde dönmesini ve akresyonun artmasını sağlar. Fişkırmaların yönünü Doppler yasası gereği bir kutbu maviye, diğer kutbu da kırmızıya kayma ile tespit edebiliriz. Fişkırmalar 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 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 tayfsal haritasının büyütülmüş hali görülmüyor (Yıldız et al. 2012). Bu resmin renkli versiyonunu Resim 4.1 ve 4.3’de bulabilirsiniz.

Sıcak gaz

Daha önceden belirtildiği üzere CO, yıllardır ilkel yıldızların fiziksel yapısını incelemek için çok iyi bir araç olarak kullanılıyor. Teknolojinin ve ideal gözlem merkezlerinin elde ettiği ölçüde günümüze kadar yapılan tüm araştırmalar genelde CO’nun düşük rotasyonel geçişleri ($J_{\text{up}} \leq 3$) 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 gözlemlemize 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. 2009b, Yıldız et al. 2012). Şekil 4’de bize uzaklığı 235 parsek olan NGC 1333 IRAS 4A ve IRAS 4B adlı iki ilkel yıldızın bu teleskoptan ^{12}CO 6–5 geçişi ile gözlenmiş haritası sunulmuştur. Burada her bir karecik yaklaşık $10'' \times 10''$ yaysaniyesi genişliğinde olup dolayısıyla $2350 \text{ AB} \times 2350 \text{ AB}$ (AB: Astronomik Birim) büyüklüğünde bir bölgeyi temsil eder. Böylelikle fıskırmaların 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 yıldıza ait ortamda farklı 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⁻¹ olan bileşenler yüksek hızlı fişkırmalar neticesinde ilerleyen gazı (outflowing gas) gösterir.

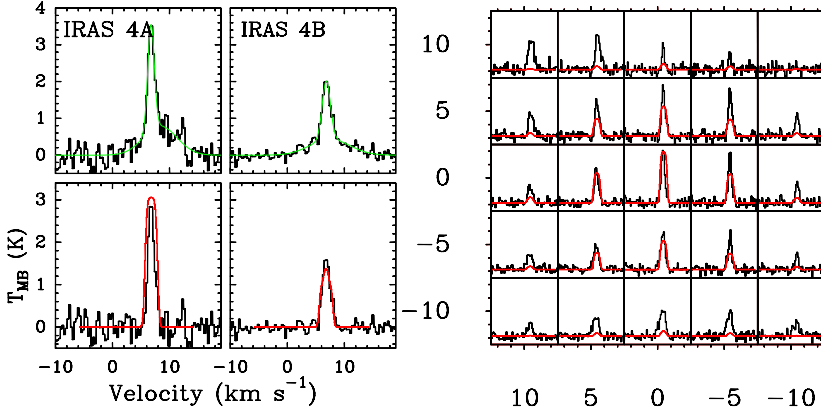
Elde edilen salınım tayfinin ayrı ayrı maviye veya kırmızıya kayan bölgelerinin altında kalan alanı (integrated intensity) hesapladığımızda yüksek hıza sahip fişkırmaların boyutunu ve yönünü tespit edebiliriz. Şekil 4 *sağda* da bazı özel bölgelerin tayflarının büyütülmüş hali verilmiştir.

IRAS 4A ilkel yıldızı çok yüksek kolimasyona sahip fişkırmalar oluştururken, IRAS 4B ilkel yıldızı bundan çok daha az fişkırmaya gösteriyor. CO'nun düşük- J 'ye sahip çizgilerinde çözünürlük çok daha düşük olduğundan ancak bu yeni gözlemler ile IRAS 4B ilkel yıldız fişkırmalarının yönünün bize doğru olduğunu (face-on inclination) tespit edebildik.

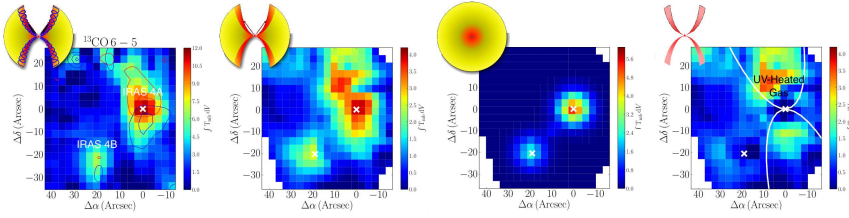
UV ile ısınan kavite duvarları

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 ¹³CO $J=(6-5)$ sayesinde aynı ilkel yıldızların merkez bölgelerini ve yakın çevresinin de gözlemleri yapılabildi (Şekil 6a). ¹²CO/¹³CO 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 fişkırmaları 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 fişkırmaların ardında kalan kavite duvarlarından gelen ışığa neticesinde oluşmuştur. Aynı çalışmada bolluğu çok daha düşük olan C¹⁸O çizgileri ($X(^{12}\text{CO})/X(\text{C}^{18}\text{O})=540$) kullanılarak durgun zarf gazının modellenmesi yapılmıştır. Modelleme için C¹⁸O 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 5a'da alt hücrelerde gözlemlenen durgun gaza ait tayfin 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 tayfin yeğİnliğinin 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. (6a) Bölgenin ¹³CO 6-5 ile direk gözlemlerinden, (6b) yukarıda açıklandığı üzere bütün tayflardan geniş çizgi genişliğine sahip Gauss fitleri çıkarılıp arta kalan ışınım bulunmuştur. (6c) RATRAN ile yapılan ışınım transferi modeli, (6d) de 6c'den çıkarıldığında arta kalan ışınımı verir. Görüldüğü



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). Bu resmin renkli versiyonunu Resim 4.18 ve 4.19'de bulabilirsiniz.



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.

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.

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* Gözlemeviden ve 5100

metre yükseklikte bulunmasının avantajı ile yüksek çözünürlüklü haritalama kabiliyetini birleştiren APEX teleskobundan alınan yüksek frekans CO gözlemlerinden faydalandık. ^{12}CO gözlemleri ile fışkırmaların yerlerini ve miktarını tespit edebildik. ^{13}CO gözlemleri ile fışkırmaların ardında kalan kavite duvarlarında bulunan UV ışınımı ile ısınan gazın ilk direk gözlemsel kanıtını elde etmiş olduk.

