

# Evrende Moleküler Bölgeler ve Astrokimya

Şengül Yalgın<sup>\*</sup> 

Ankara University, Astronomy and Space Science Department, Ankara 06100, Turkey

Accepted: January 14, 2022. Revised: January 6, 2022. Received: December 19, 2021.

## Özet

1940'lı yıllardan beri yıldızlararası ortamlarda 13 atomlu molekül ve 60 ve 70 karbonlu nano kafesler dahil yüzlerce molekül keşfedilmiştir. Teleskoplarda yüksek çözünürlüğün elde edilmesi, uyarlanmış optik teknolojilerinin kullanımı, IR, mm-altı ve radyo teleskoplarının sayısının artması, moleküllerin bıraktığı parmak izlerini okumaya önemli katkılar sağlamakta ve astrokimya için çok önemli bir çağ başlatmaktadır. Dünya atmosferindeki su çizgilerinin yakın-IR bölgede elde edilen tayflarda çizgi örtüşmelerine sebep olması uzay teleskoplarından elde edilen tayflar sayesinde ortadan kalktığı için, bu bölgedeki çizgi geçişlerini okumak kolaylaşmıştır. Fizik, kimya ve astronomi gibi birkaç disiplinin birlikte çalıştığı disiplinlerarası bir alan olan astrokimya, kozmik ortamda elde edilen gözlem sonuçlarını ilgili koşullardaki laboratuvar modelleriyle tutarlı hale getirmekle ilgilidir. Moleküler reaksiyonların ihtiyaç duyduğu enerjiyi başlatan koşullar, evrendeki madde dokusunun evrim süreçlerindeki dinamikleri ile iç içedir. Yıldızlararası ortam maddesi, yıldızların kütle atımı ile ortama gaz aktarımı ve nükleer yanmaların külleriyle birlikte sürekli yenilenir. Kozmik ortamda moleküler reaksiyonların oluşması, gazları iyonlaştırabilen enerji koşulları sayesinde mümkündür. Moleküler bulutlarda madde yoğunluğu ve sıcaklık düşük değerlerde olmasına rağmen, gözlemlenebilir miktarlarda karmaşık moleküller sentezlenebilmesi uzun ömürlü ve devasa büyüklükleri sayesinde mümkündür. Döteryum bolluğu bulunan ortamlar, moleküllerin elektronik, dönme ve titreşimsel geçişleri, manyetik yarıma ve spin seçim kuralları gibi olgular, moleküler bolluk hesaplamaları için kullanılabilir. Moleküler bolluk hesaplamaları için kullanılabilir.

## Abstract

Since the 1940s, hundreds of molecules have been discovered in interstellar mediums, including molecules of 13 atoms and nanolattices of 60 and 70 carbons. Achieving high resolution in telescopes, the use of adapted optical technologies, and the increase in the number of IR, sub-mm and radio telescopes make important contributions to reading the fingerprints left by molecules and start a very important era for astrochemistry. Since the water lines crowding the near-IR region in the Earth's atmosphere are eliminated by the spectra obtained from space telescopes, it is easier to read the line crossings in this region. Astrochemistry, an interdisciplinary field in which physics, chemistry and astronomy work together, is concerned with making observations obtained in the cosmic environment consistent with laboratory models in the relevant conditions. The conditions that initiate the energy needed by molecular reactions are intertwined with the evolutionary processes of the dynamics of the material tissue in the universe. The interstellar medium is constantly replenished, along with the stellar mass ejection, gas transfer to the medium, and the ashes of nuclear combustion. The occurrence of molecular reactions in the cosmic environment is possible only with the energy conditions that can ionize gases. Although the matter density and temperature are low in molecular clouds, their long lifetimes and gigantic sizes make it possible to obtain data for the observable amounts of complex molecules. Environments with deuterium abundance, electronic, rotational and vibrational transitions of molecules, magnetic splitting and spin selection rules can be used for molecular abundance calculations.

**Anahtar Kelimeler:** interstellar molecules, astrochemistry, molecular spectra

## 1 Giriş

Samanyolu galaksisinin ortalama özkütlesi  $1/\text{cm}^3$  hidrojen atomudur. Bulutsulardaki yıldız oluşumları ancak bu yoğunluğun  $10^6$  katından büyük olduğu zaman mümkündür. Hatta gezegen oluşumu için madde yoğunluğunun minimum  $10^{12}\text{cm}^{-3}$  olması gerekir (Fraser et al. 2002). Yıldızlararası ortama gaz aktarımının oluşması için aktarılan gazın yıldızlararası ortamdan daha yoğun olması gerekir. Yüksek yoğunluğa sahip gazların yüksek çarpışma oranı taşınması, astrokimyacıları gazların kinetiğini çalışmaya teşvik etmiştir. Moleküllerin elektromanyetik ışınım soğurması ya da salması, ortama göre daha yoğun gazların çalışılması için en etkili yoldur. Moleküllerin elektronik geçişleri ultraviyole ya da görünür bölgede gözlemlenir. Titreşimsel, dönme ve spin

geçişleri ise infrared, mikrodalga ve radyo bölgede gözlenir. 3 K ile birkaç bin K sıcaklık aralığında bir bölgeye tanı olmak üzere neredeyse her zaman uygun bir moleküler geçiş vardır. Örneğin, UV ve görünür bölgeye opak olan bölgelerden elde edilen radyo emisyonları yüksek yoğunluk ve toz habercisi olabilmektedir. CO (karbonmonoksit) gibi soğutucu moleküller basıncı düşürerek bulutsuların çökmesini engelleyebilir. Yine soğutucu moleküllerin bol olduğu bir bölgede gazların iyonlaşma seviyeleri düştüğü için manyetik alan değerleri de düşer ve bulutsunun çökme sürecini etkiler. Moleküller her ne kadar evrenin çok küçük bir yüzdesini oluşturuyor olsa da yüksek yoğunluk bölgesine transferleri incelemek için önemli ipuçları oluşturmaktadır (Fraser et al. 2002).

\* sengulyalgin@gmail.com

**Çizelge 1.** Kozmik mekanizma çeşitlerine göre zaman çizelgesi (Fraser et al. 2002).

Oluşum süreci	Mekanizma	Zaman (yıl)
Kimya	Kozmik ışın iyonizasyonu	$3 \times 10^5$
Donma	Gaz toz çarpışması	$3 \times 10^5$
Soğutma	Işınımsal salınım	$10^6$
Çökme	Kütleçekimi	$10^6$
Ambipolar difüzyon	İyon-nötr sürüklenmesi	$4 \times 10^5$

## 2 Kimyasal Reaksiyon Mekanizma Çeşitleri

Benzer ortamlarda aynı atomlarla farklı moleküllerin oluşması, kimyasal reaksiyon tipinin farklı seçilimi ile olur. Moleküler reaksiyonların meydana gelebilmesi için çok çeşitli mekanizmalar olduğunu düşünürsek, günümüzde yıldızlararası ortamda keşfedilen moleküllerin sayısına kıyasla henüz keşfedilmemiş çok fazla molekül olduğunu tahmin edebiliriz. Diğer yandan bazı moleküllerin tayfları doğrudan elde edilemez. Mesela dipol momenti olmayan moleküllerin dönme geçişleri yasaktır. Ancak heterojen bir şekilde döteryumlanmışsa molekülün kozmik döteryumlanma sabitleri kullanılarak bolluğu hesaplanabilir. Radikaller ise kimyasal olarak çok reaktif olup çabuk bozunduğu için gözlenmesi zor olmaktadır. Yine de zamana bağlı kinetik ağ modelleri oluşturularak bolluk hesabı yapılabilmektedir. Çok atomlu karbonların belli bir bölgeye bağlı spektrum aralığı olsa da hangi tür PAH (poli-cyclic-aromatic hydrocarbon) olduğunu belirlemek için modeller kurmak gerekir. Atomlara nazaran moleküllerin spektrumunda bıraktıkları imza her zaman keskin değildir.

Bir astrokimyacı, gözlem ve model sonuçlarını karşılaştırabilmek için olası tepkime mekanizmalarını araştırarak, tepkimelerin birbirleri ile kimyasal örgüleri inceleyip, ilgili astrofizik koşullarla uyumlu kimyasal modeller oluşturur. Kimyasal model ve reaksiyon ağlarını kullanarak, birbirine bağlı olan tepkimeleri zamanın fonksiyonu olarak çözebilmek mümkündür. Kozmik kimya için rol alan reaksiyon mekanizma çeşitleri;

- Fotokimyasal birleşme ya da fotokimyasal ayrışma reaksiyonları
- Katalizörlü birleşme ya da parçalanma reaksiyonları
- Yerdeğiştirme reaksiyonları
- İyon-molekül ya da iyon transfer reaksiyonları
- Elektron yakalama reaksiyonları
- Elektron verme reaksiyonları
- Yoğunlaşma reaksiyonları
- Yüzey reaksiyonları
- Karbonlanma reaksiyonları
- Kozmik tozların toplanması ya da parçalanması reaksiyonları

şeklinde listelenebilir (Fraser et al. 2002).

Kozmik çevrede bu reaksiyonların en önemlisi, hidrojen atomunu hidrojen molekülüne çeviren reaksiyonlardır. Bunun sebebi sadece evrende en fazla bolluğa sahip atom olmasından değil, aynı zamanda hidrojenin diğer moleküllerin oluşması için anahtar bir görevi olmasındandır. Günümüz evreninde yıldızlararası ortamda hidrojen atomunun hidrojen moleküllerine dönüşmesi yüzey katalizasyonu ile olur.  $H_2$  (hidrojen molekülü) kozmik ışınlarla bir elektronu kaybettiği zaman ( $H_2^+$ ) oldukça reaktif olup hemen diğer  $H_2$  ile reaksiyona girerek  $H_3^+$  oluşturur. Meydana gelen bu ürün her ne kadar daha

**Çizelge 2.** Yıldızlararası ortamda bulutsu tipleri (Millar 2015).

Bulutsu tipi	(pc)	T (K)	n ( $cm^{-3}$ )	f(e)=n(e)/n
DICs	1-3	70-100	10-100	$10^{-3}-10^{-4}$
DMCs	1-5	8-15	$10^4-10^6$	$10^{-7}-10^{-8}$
HMCs	0,01-0,1	100-300	$10^7-10^9$	$<10^{-4}$
GMCs	100-500	30-70	$<10^3>$	-

kararlı olsa da pozitif yükünden kurtulabilmek ve yeni bir molekül oluşturmak için fırsat bekler (Geballe & Oka 1996). Düşük sıcaklık ortamlarında hidrojen molekülü nötr moleküller ile reaktif değildir. Dolayısıyla kozmik ortamda meydana gelen kimya genel olarak iyon-molekül kimyasıdır. İyonlaşma kaynakları ise yıldızlardan gelen UV ışınması ve yüksek enerjili parçacıklar, ya da madde akışlarındaki şok dalgalarından yayılan yüksek enerjili fotonlardır.

Yıldızlararası ortamda  $CH_3OH$  (metanol) ve  $C_2H_5OH$  (etanol) gibi alkollerin oluşması için su buzlarının ortamda reaksiyon yüzeyi oluşturması gerekir. Çok atomlu hidrokarbonların oluşması için karbondan oluşan tanecikli yapılar sıcak gaz ortamına ihtiyaç duyar. Bu sıcaklık örneğin, yıldızlararası ortama verilmiş şok dalgaları ile oluşabilir. Gaz fazında büyük moleküllerin oluşması sadece yüksek yoğunluk ve yıldız atmosferleri gibi sıcak gaz ortamlarında mümkündür. Aslında karbon yıldızlarının dış zarflarını uzaya açılan bir fabrika bacası gibi düşünebiliriz (Fraser et al. 2002).

## 3 Enerji Kaynakları

Evrenin herhangi bir yerinde bir reaksiyonun başlaması için o reaksiyonu başlatacak aktivasyon enerjisine ihtiyacı vardır. Evrende nitrojen, oksijen ve karbon bolluğu çok olmasına rağmen nötr hidrojen molekülü ile direk reaksiyona girmezler. Ancak aktivasyon enerjisi bariyerini aştıkları zaman reaksiyon başlayabilir. Tanecikler birbirleri ile yeterince yakın değilse yine reaksiyon başlamaz, taneciklerin birbiri ile çarpışabilmesi sağlayan fiziksel etken yüksek sıcaklık ile oluşur. Bu durumda ortamdaki gaz yüzlerden binlerce Kelvin'e değişen aralıktaki sıcaklığa sahip olmalıdır. Yüksek sıcaklık ortamı elde edilebile kimyasal kinetikler sterik etkilerden dolayı enerji bariyerini aşmak için karmaşık hale gelir. Bu karmaşıklıkta en önemli kriter ortamda yeterince iyon olup olmamasına bağlıdır, çünkü iyonlar tepkimelere, aşması gereken enerji bariyerine ihtiyaç duymadan kolayca girer. Kimyasal mekanizmayı yürüten enerji, iyonlaşma durumu, radikal oluşumu ya da enerji bariyerini aşabilmek şeklinde bu üç koşuldaki birine ihtiyaç duyar. Kozmik ışınlar, foto iyonizasyon, fotoelektrik etki, tepkimelerden salınan elektronlar, egzotermik tepkimeler, parçacık çarpışmaları, süpernova patlamaları, yıldız rüzgarları, türbülans, süpernova patlamaları ile oluşan manyeto-hidrokinamik dalgalar, bulutun kütle çekimsel çökmesi, H II bölgelerinin genişlemeleri, ambipolar difüzyon gibi her bir ortam kendine özel bir karakterde kimya yaratır. Örneğin, sülfürlü bileşikler şok dalgaları ortamlarında oluşur, çünkü yavaş süren kozmik ışın iyonlaşma ortamında oluşamazlar. Yüksek kütleli yıldız oluşum bölgelerinde ise ortamdaki yüksek ısının çevredeki buz tozlarını eritmesi ile çok atomlu karbon kimyası oluşabilmektedir. Diğer yandan fotoelektrik etki ile meydana gelen tepkimeler çoğunlukla toz parçacıkları yüzeylerinde gerçekleşir (Fraser et al. 2002).

Bir astrokimyacı kozmik bir kimyasal mekanizma modelini

oluştururken ortamı domine eden enerji kaynağını dikkate alarak model ve gözlemleri karşılaştırmalıdır. Evrimleşen bir model içindeki kimya da sürekli değişeceği için dinamik durumlar dikkate alınmalıdır. Örneğin bir kimyasal mekanizma bir bulutsu kendi kütlesi içinde çökerken, genişleyen bir akış içerisinde ya da soğuk bir yıldızın rüzgarlarında oluşabilir. Kimyasal reaktivlik güçlü bile olsa sistem yeterince dinamik değilse, evrimsel sürecin her bir aşamasında yarı kararlı yani zamana bağlı kararlılık gösteren moleküller oluşur (quasy-steady state) (Fraser et al. 2002). Yıldızlararası bulutsularda ve yıldız oluşum bölgelerindeki bazı süreçlerin zaman çizelgeleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

#### 4 Moleküler Bölgelerde Astrokimya

Astrokimyanın gelişimi yıldızlararası bulutsuların teorik ve gözlemsel olarak çalışılması ile meydana geldi. İlk başlarda UV fotonları ile dolu olan yaygın bulutsular (diffuse) bulutsular üzerinde duruldu. Daha sonra ise yıldız ışığına geçirmen olmayan karanlık bulutların birer molekül fabrikası olduğu saptandı. Böylece bu bölgelerin dev kütleli yıldız oluşum bölgeleri olduğu ortaya çıktı. Çizelge 2'de yaygın bulutsular, karanlık bulutsular, dev moleküler bulutlar ve yıldız oluşum bölgeleri olan sıcak çekirdeklerin büyüklüğü, sıcaklığı, tanecik yoğunluğu, iyonlaşma dereceleri listelenmiştir.

##### 4.1 Yaygın Bulutsular (DICs)

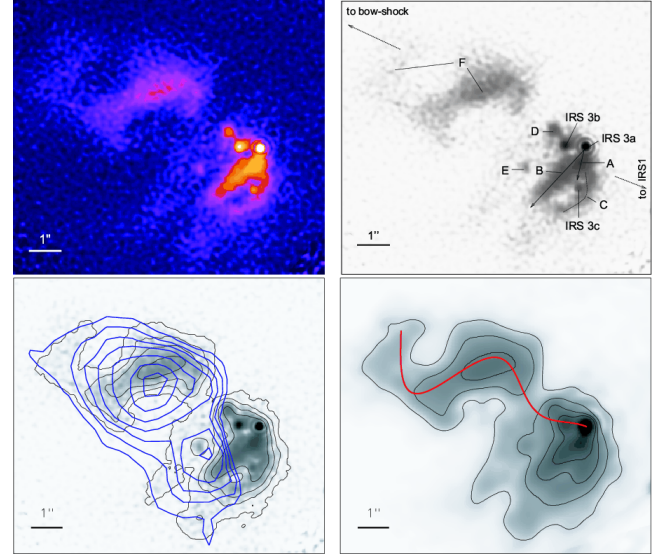
Yaygın bulutsular UV fotonlarına ve optik bölgeye geçirendir. Ortalama molekül yoğunluğunun en düşük olduğu bulutsu tipidir (Çizelge 2). Görünür bölge bandına nazaran uyarılmaların daha geniş bantta gözlemlendiği uzak UV fotonlarına geçirendir. Yaygın bulutsular genel olarak hidrojenin iyonlaşma potansiyelinden (13,6 eV) daha yüksek enerjili fotonlar taşımaz. Bu enerjideki fotonlar sıcak yıldızlar tarafından üretilir ve hemen yakındaki bir bölgede tekrar absorbe edilir, etraftaki bir gazı iyonlaştırır ve Strömgren küresi oluşturur (Millar 2015).

Atomların iyonlaşmasından gelen ve aynı zamanda toz parçacıklarının fotoelektrik etki ile ortaya çıkardıkları elektronlar ortamdaki gazı ısıtır ve kinetik sıcaklık 50-100 K değerlerine çıkar. Sadece karbondan gelen elektronların kısmi oranı  $10^{-4}$  olup, bu oran bir bulutsu için yüksek bir değerdir. CH, CN, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, NH, CO, H<sub>2</sub>CO gibi moleküllerden gelen elektronların kısmi oranı ise  $f(e) = n(e)/n = 10^{-6} - 10^{-9} \text{ cm}^{-3}$  değerleri arasında değişmektedir (Millar 2015).

<sup>36</sup>ArH<sup>+</sup> ve <sup>38</sup>ArH<sup>+</sup> moleküllerinin bakış doğrultusundaki bazı soğurma çizgileri, diğer çok düşük yoğunluklardaki bazı izleyici moleküllerle kıyaslandığında bu bileşiğin çok iyi bir atomik hidrojen tanı molekülü olduğu ortaya çıkmıştır (Schilke et al. 2014). Argon düşük enerji fotonlarıyla iyonlaşamaz, ancak daha yüksek enerjili kozmik ışın parçacıkları olduğunda bir elektron kaybederek ArH<sup>+</sup> bileşiğini oluşturur.

##### 4.2 Karanlık Bulutsular (DMCs)

Astrokimyasal veritabanında birçok molekül karanlık bulutsulardan teşhis edilmiştir. Karanlık bulutsuların homojen olmayan yapılarında farklı fiziksel ve kimyasal süreçler meydana gelir. Farklı ortamlar kendine has ortalama basınç dengesine sahiptir. Bulutsunun kenar bölgeleri hariç, fotokimyasal ayrışma ve fotokimyasal iyonlaşma reaksiyonları gözardı edilebilir orandadır. Karanlık bulutsulardaki yoğun ve sıcak çekirdekler UV ve görünür bölgede tespit edilemez,



Şekil 1. S140 IRS3 bulutsusunda izlenen yıldız oluşum bölgesi (Preibisch et al. 2001). Mavi konturlu bölgeler (K bandında, 2 µm bölgesinde), H<sub>2</sub> molekülünün salma çizgilerinden sürekliliğin çıkarılmasıyla elde edilmiştir.

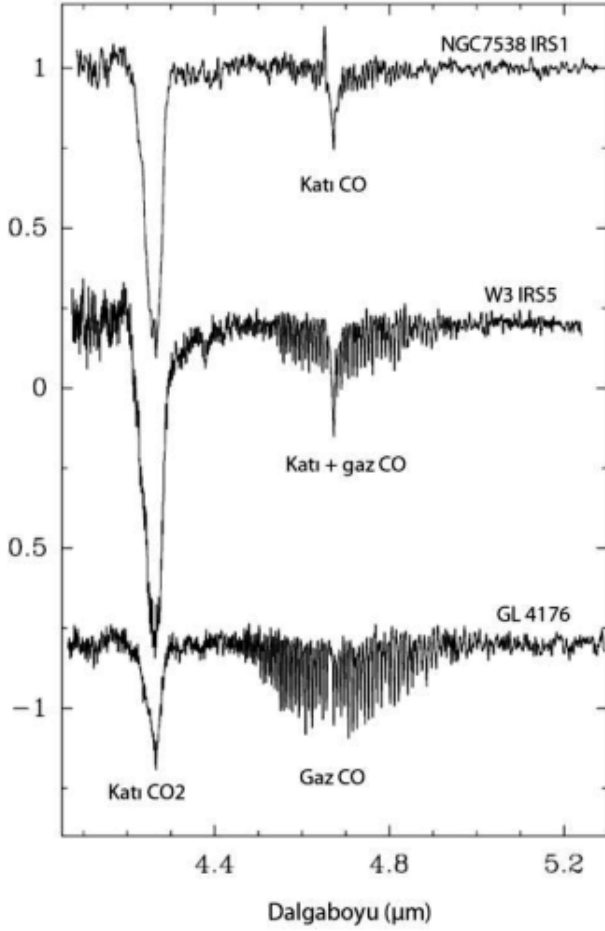
ancak moleküllerin dönme geçişlerindeki bantları mm-altı teleskoplarla izlenebilmektedir. Titreşim enerji düzeyleri arasındaki geçişleri gerçekleştiren fotonlar ise elektromanyetik ışımının infrared bölgesinde yer alırlar. Yüksek çözünürlüklü bazı gözlemsel veriler, bu bölgelerdeki maddelerin tayfındaki çizgi genişliklerinin termal hareketler ve atomaltı türbülans dereceleriyle uyumlu olduğunu gösterdiği için, karanlık bulutsuların yıldız oluşum bölgeleri olduğu anlaşılmıştır (Şekil 1).

Karanlık bulutsu ortamlarında döteryum bolluğu, döteryumun hidrojene göre istatistiksel kozmik oranından  $((D/H)^3 = 10^{-14})$  daha yüksek değerlerde gözlenmektedir. Lis et al. (2002), (HDCO/H<sub>2</sub>CO) değerinin yaklaşık olarak 0,3 olduğu bölgeler tespit etmişlerdir. Maret et al. (2004) ve Roberts & Millar (2007), (D<sub>2</sub>CO/H<sub>2</sub>CO) ve (ND<sub>3</sub>/NH<sub>3</sub>) değerlerini  $10^{-3}$  olarak hesaplamışlardır. Karanlık bulutsularda hesaplanan yüksek döteryum bolluğu, sıfır noktası enerji farklarının oluşturduğu kinetik etkilerle ilgilidir (Millar 2015). Bu durum döteryumu düşük sıcaklık fiziği ve kimyası için çok iyi bir tanı elementi yapar.

Moleküllerin titreşim seviyeleri arasındaki geçişleri bağların titreşim değişiminden kaynaklanır. İki atomlu bir molekül doğrusal olduğu için bağları uzayıp kısalarak titreşir, geçiş enerjisi 1 eV'nin altında olur ve yakın IR bölgesinde salma ya da soğurma olarak gözlemlenir. Şekil 2'de üç genç yıldız ışığında saptanmış, toz tanecikleri üzerinde birikmiş CO ve CO<sub>2</sub> buzlarına ait çizgiler görülmektedir.

##### 4.3 Dev Moleküler Bulutlar (GMCs)

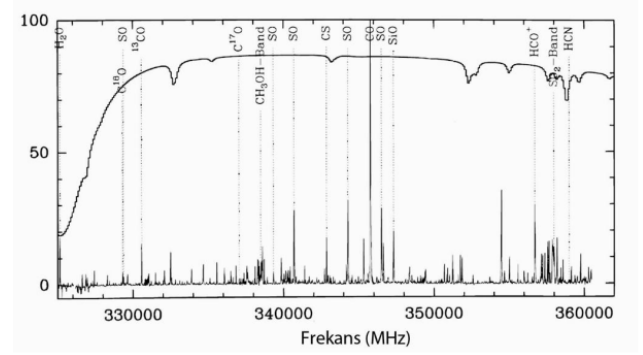
Dev moleküler bulutlar  $10^5$ - $10^6$  güneş kütlelerinde olabilmektedir ve yıldız oluşum bölgeleri olarak zengin ve aktiftirler. Büyüklükleri yüzlerce parsek (pc) olabilmektedir. Manyetik alanın rolü yıldız oluşum bölgelerinde çok önemlidir. Manyetik alanla birlikte hareket eden yüklü parçacıkların, gazların kütle çekimsel çökme özelliklerini kontrol etme yeteneği vardır. Manyetik alan gözlemlerinde kullanılan Zeeman yarılması



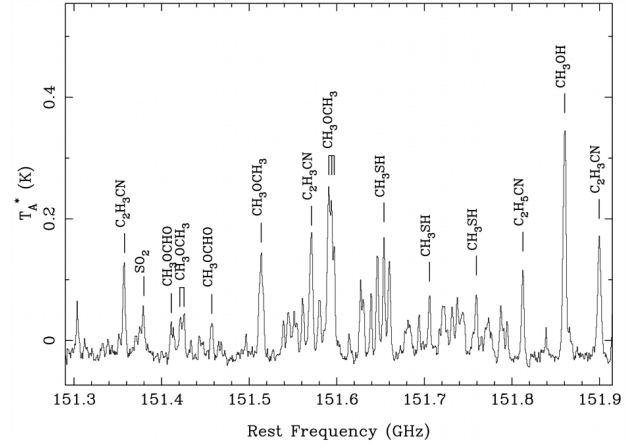
Şekil 2. 3 genç yıldız ışığında saptanmış titreşimsel soğurma bantları (Smith 2004)

yıldız oluşum teorileri için kullanılan önemli bir araçtır. İzleyici moleküller olarak en çok CN (siyanit) ve OH'in (hidroksit) manyetik yarıлма çizgileri kullanılmaktadır. Bu moleküller manyetik alandaki lineer polarizasyon ölçümlerini ( $B_Z$ ) bakış doğrultusunda vermektedir. GMCs'larda iyonlaşma oranı doğrudan ölçülememektedir, ancak döteryum iyonlaşma oranları ( $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ ) kullanılabilir (Millar 2015). Moleküler çizgi gözlemleri sadece bölgesel yoğunluk gösteren yerlerde etkilidir, çünkü uyarılmalar ancak moleküler çarpışmalarla meydana gelebilmektedir.

Crutcher et al. (2009) 4 farklı moleküler bulut bölgesinin çekirdek ve zarflarında OH molekülünün Zeeman yarıłmasını kullanarak ambipolar difüzyon modeline göre ters davranan bir model öne sürmüşlerdir. Bu öneri yıldız oluşum teorisine alternatif bir model getirmiştir. Moleküllerin dipol momenti ışığın elektrik alanıyla etkileşir ve molekülün dönme hareketi artıran ya da azaltan bir tork oluşur. Kuantlanmış bu dönme seviyeleri arasındaki geçişler mili-eV düzeyindedir. Düşük enerji seviyeli bu fotonlar molekülün tayfında mm altından cm'ye kadar değişebilen dalgalı boylarında olur (Smith 2004) ve mm-altı (sub-mm) gözlemleriyle elde edilir. Şekil 3'de Orion moleküler bulutunun mm-altı tayfı gösterilmiştir.



Şekil 3. Orion moleküler bulutunun mm-altı tayfı. Atmosferik geçirgenlik tayfın üstünde gösterilmiştir (Loiuard et al. 2003).



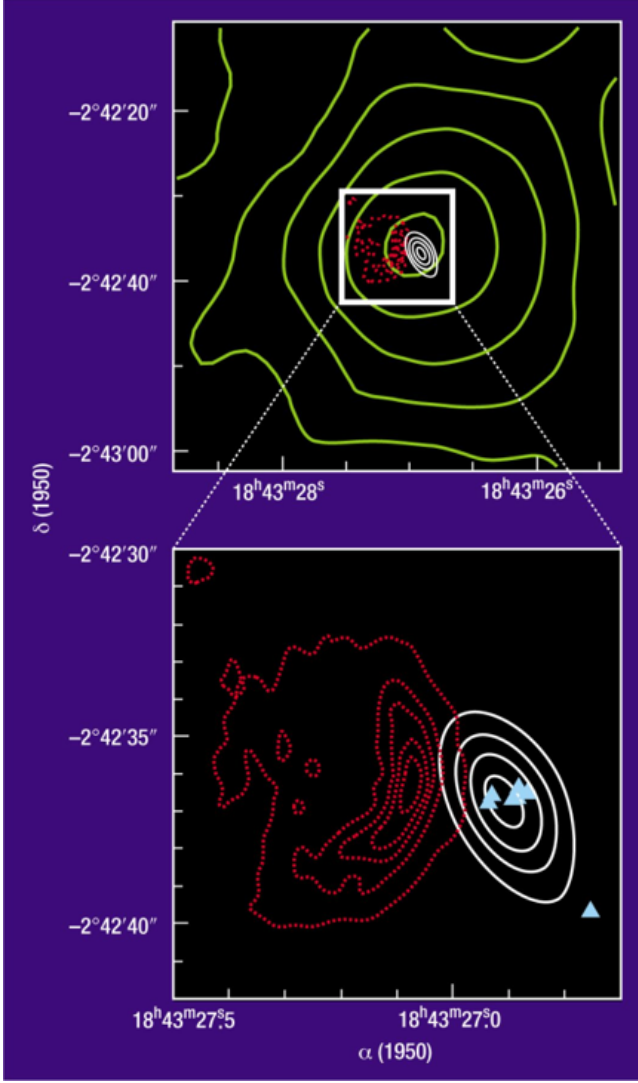
Şekil 4. G327 moleküler bulutunun sıcak çekirdekindeki moleküller (Ehrenfreund 2002)

#### 4.4 Sıcak Moleküler Bulutlar (HMCs)

Sıcak moleküler bulutlar fiziksel ölçü olarak küçük olmalarına rağmen yüksek yoğunluk, sıcaklık, kütle ve büyük moleküllere dair yüksek bolluk oranı gibi değerler taşımaları, mm-altı tayfsal çalışmalarda büyük ve keskin bir çizgi zenginliğinin ortaya çıkmasını sağlar (Şekil 4). O kadar ki moleküllerin çizgi geçişlerinde çok fazla örtüşmeler gözlenmesi bir miktar zorluk yaratır.

$\text{NH}_3$  (amonyak),  $\text{CH}_4$  (metan),  $\text{H}_2\text{S}$  (hidrojen sülfür),  $\text{CH}_3\text{OH}$  (metanol),  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (etanol) gibi nötr formda organik molekülleri HMCs bölgelerinde yakalayabilmek mümkündür (Millar & Hatchell 1998). Moleküler ortam sıcaklığı 20-50 K ile büyük kütleli bir yıldız oluşum bölgesiyse 100-300 K olabilmektedir. Bu yüksek sıcaklık her ne kadar gaz fazındaki reaksiyonlara izin verse de yüksek moleküler bolluğu açıklamaz. Rotasyonel çizgi salmaları ile gözlenen sıcak gazın yüksek bolluğunun sebebinin, oluşmakta olan yıldızdan çıkan ışınların soğuk toz tanecik yüzeylerini eritmesinden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.  $\text{CH}_4$  (metan) ve  $\text{H}_2\text{O}$  (su) gibi buharlaşan gazlar, alkoller ve  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OCH}_3$  (etil-metil eter) gibi daha karmaşık moleküllerin sentezinde yer alır (Millar & Hatchell 1998). Reaksiyona giren, ara ürün olan ve sentezlenmiş moleküllerin bolluk oranları zamanın fonksiyonu olarak çözülerek, büyük

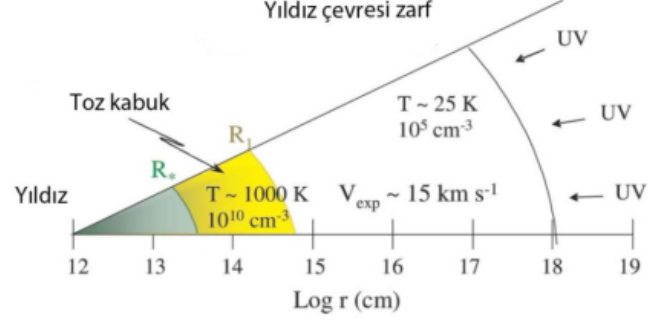




**Şekil 5.** Yüksek kütleli bir sıcak çekirdek bölgesi (Kurtz et al. 2000). Yeşil konturlar CS (karbon monosülfid) salmalarını, beyaz konturlar CH<sub>3</sub>CN (metil siyanür) salmalarını, kırmızı noktali konturlar çok yoğun HII bölgelerini göstermektedir. Yeni oluşmuş yıldızın etrafını saran HII bölgesindeki emisyon konturları, önyıldız döneminde ortamda donmuş kimya vasıtasıyla yıldızın sürecine dair bilgiler taşır.

kütleli bir yıldızın oluşma sürecindeki zaman çizelgesine dair fikir verirken aynı zamanda soğuk buz taneçikleri kimyası için de izleyici moleküller olmaktadır. Sıcak moleküler bulutlarda döteryumlu bileşik oranı kozmik D/H oranından 10-100 kat daha fazladır. Yine de bu değer karanlık bulutlardaki orandan binlerce kat daha azdır. Elektron bolluğunun  $N(e^-) = 10^{-11} - 10^{-12} \text{ cm}^{-3}$  gibi çok az bir değerde olması, nötr bileşiklerin yüksek bolluğu ile uyumludur (Millar 2015).

Büyük kütleli bir yıldız yeni doğduğu süreçte doğum alanını moleküllerden hızla temizleme yeteneğine sahiptir. Bu durum moleküler incelemeyi her ne kadar olanaksızmış gibi gösterse de temizleme süreci, ardında yıldızın radyasyonu ile ısıtılmış bir miktar yoğun gaz ve toz düğümlerinden oluşan geçici bir enkaz bırakır. Sıcak çekirdekler, astrokimyacıların büyük kütleli yıldızların oluşum mekanizmasındaki saklı bilgileri keşfetmesine olanak tanır. Şekil 5'de ısıtılmış buzlardan yayılan CH<sub>3</sub>CN



**Şekil 6.** Yıldız çevresi zarfı kesiti (Ziurys 2006).

**Çizelge 3.** IRC+10216 için tanımlanmış moleküller (Ziurys 2006).

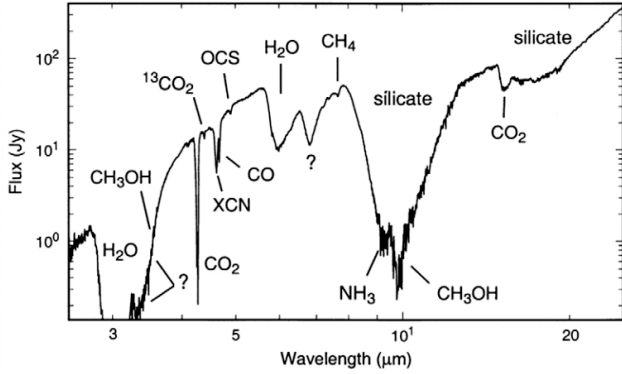
CO	CCH	HC <sub>3</sub> N	CCS	SiO	NaCl
CS	C <sub>3</sub> H	HC <sub>5</sub> N	C <sub>2</sub> S	SiS	AlCl
CN	C <sub>3</sub> O	HC <sub>7</sub> N	C <sub>3</sub> N	SiC	KCl
HCN	C <sub>4</sub> H	HC <sub>9</sub> N	C <sub>5</sub> N	SiN	AlF
HCCH	C <sub>5</sub> H	H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	HC <sub>4</sub> N	SiC <sub>2</sub>	MgNC
HNC	C <sub>6</sub> H	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	SiC <sub>3</sub>	MgCN
H <sub>2</sub> CCH <sub>2</sub>	C <sub>7</sub> H	HC <sub>2</sub> N	CH <sub>3</sub> CN	SiCN	AiNC
CH <sup>+</sup>	C <sub>8</sub> H	C <sub>3</sub>	CP	SiC <sub>4</sub>	KCN
NH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>5</sub>	PN	SiH <sub>4</sub>	NaCN
H <sub>2</sub> S					

(metil siyanür) molekülünün salma özellikleri kullanılarak sıcak bir çekirdek bölgesi haritalandırılmıştır (Kurtz et al. 2000).

#### 4.5 Yıldız Çevresi Zarfları (CSEs)

Kütlesi 1-8 güneş kütlesi arasında değişen yıldızların yaşamlarının sonlarına doğru fotosferik yarıçapları güneşe nazaran 200-300 kat artmaktadır. Yüzey sıcaklıkları ise 2000-3000 K civarına düştüğü için etrafındaki bölgeler moleküller olarak oldukça yoğundur. Yıldızın kütle kaybettiği rüzgarlar  $10^{25} \text{ km s}^{-1}$  hızla ilerler ve yolculukları onbinlerce yıl sürer. Yıldız çevresi zarfları (Şekil 6) atom ve moleküllerin çarpışmak için gerekli enerjiyi bulabildikleri, kararlı molekülleri üretebilen yerlerdir. Yıldız karbonca zengin ise ortamdaki karbon neredeyse bütün oksijenleri kapıp daha kararlı bir formu olan karbonmonoksit (CO) dönüşür. Geriye kalan karbonlar ise hidrojenlerle birleşip HCN, CS ya da C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> ve C<sub>2</sub>H<sup>+</sup> gibi basit formlardaki hidrokarbonları meydana getirir. Bu moleküllerin gözlemsel verileri fotosfere yakın bölgelerden elde edilir. Oksijence zengin yıldızlarda oksijen, ortamdaki tüm karbonları kapıp yine CO oluşturur. Kalan oksijenler ise TiO, FeO, AlO ve en çok SiO gibi metal oksitlerini oluşturur (Millar & Hatchell 1998). SiO 'nun yoğunlaşma sıcaklığının 600 K civarında olduğunu düşünürsek, 1000 K sıcaklık ortamında hala yoğun toz formunda kalabilmesini açıklayan koşul, diğer metal oksitlerle birlikte toz parçasının üstünde tutunuyor olmasıdır (Sharp & Huebner 1990). Evrende metaloksit bölgelerini belirlemek teorik olarak daha basittir, çünkü modelleme zamandan bağımsızdır ve moleküllerin bilinen termodinamik özellikleri kullanılarak üretilir. Bu moleküllerin zengin tayfları UV ve görünür pencerede elde edilir. Metaloksitlerin dönme ve titreşimsel bantlarındaki çizgiler de çok zengindir. Bu çok soğuk yıldızların atmosferleri yıldızın yaydığı radyasyona opaktır.

Moleküler olarak oldukça zengin bir CSEs arketipleri olan

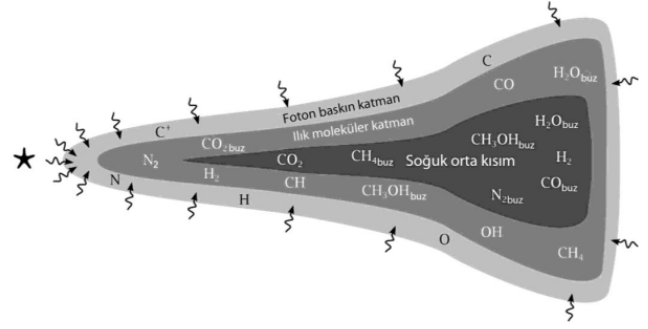


Şekil 7. W33a'nın etrafındaki yıldızlararası buz parçalarından elde edilen moleküler tayfı (Gibb et al. 2000)

IRC+10216 ve CW Leo yıldızları güneşin kütlesinden  $2 \times 10^5$  kat büyük bir kütle kaybı ile  $14,5 \text{ km s}^{-1}$  hızla genişlerken etrafındaki karanlık buluta 80 çeşit molekül salmaktadır (Çizelge 3). Bu moleküller içinde karbon zincirleri dahil olmak üzere NaCl, KCl ve AlCl gibi tuzların çok modelleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Cherchneff 2012). Milimetrealtı uyu gözlemlerinden önce herhangi bir su molekülü bir CSE'de teşhis edilememiştir, ta ki IRC+10216 'da gözlemlenene kadar (Bergin et al. 2001). Cherchneff (2011), Herchel Space Observatory'den elde edilen verilerdeki suyun uyarılma geçiş çizgilerini kullanarak, gözlemlenen suyun sıcaklığının birkaç yüz K olduğunu ve suyun zarfın iç kısımlarında bulunduğunu doğruladı ve bu bilginin çok modelleriyle uyduğunu yayınladı.

Yaşamlarının sonlarına doğru artık yıldızın kütleçekimi bile bu soğuk yıldızın oluşturduğu devasa zarftan uzaya madde kaçışına engel olamaz. Yıldızın atmosferinde ivmelenecek ayrılan bu maddelerin özkütle ve sıcaklıkları ortama göre yüksek olduğundan, reaksiyonlar için zaman çizelgesi yüzbinlerce yıl değil, bu sefer dakikalar mertebesindedir. Bu hızlı meydana gelen kimya, moleküler toz parçalarında oluşmasını sağlamaktadır. Çoğu molekül ve tozlar yoğunluğun  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  den fazla olduğu ancak sıcaklığın 2500 K'den az olduğu lokal termodinamik dengenin (LTE) bulunduğu durumlarda oluşur (Millar 2015). CSE yıldızının zarfından ardakalan moleküller ya yıldızın merkezinden gelen radyasyona ya da ayrılmış zarfın oluşturduğu hızlı rüzgarlara maruz kalır. Bu süreç yıldız beyaz cüceye dönüşene kadar devam eder. Soğuk yıldızların moleküler zarfları bir süre sonra kısa ömürlü gezegenimsi bulutsu adı verilen yapılarla evrilir. Yıldızından ayrılan bu soğuk zarf büzülerek ısındığında ise ortama şok dalgaları yayar. Cherchneff (2011) şok dalgaları kimyasını çok iyi tarif etmektedir.

Yıldızlararası tozun yüzde 80 oranında kaynağının asimptotik dev kolu yıldızları olduğu düşünülmektedir. Kızılötedeki gözlemlerden elde edilen bilgilere göre, yıldızın zarfı karbonca zengin ise ortamındaki tozlar grafit tozları şeklinde olur. Oksijence zengin bir zarf ise kum tozları oluşur. Boyutları ancak mikron mertebesinde olan bu tozlar, üstündeki ışınımsal basınç sayesinde yıldızın zarfından çok uzaklara fırlayabilirler (Millar 2015). Akış ve yayılma ilerledikçe gaz ve tozun özkütlesi de düşer. Bu nedenle yıldızlararası ortamdaki radyasyon artık gaz ortamının içine ulaşabildiği için molekülleri iyonlaştırmaya başlar. Tüm bu süreç boyunca moleküllerin bazıları parçalanır, bazıları yeniden başka



Şekil 8. Önyıldız diskinin içindeki kimyasal bölgeler (Visser 2009)

molekülleri oluşturmak üzere birleşir. Yıldız çevresi zarflarında meydana gelen bu kimyasal reaksiyonların gözlemlenmesi, astrokimyasal modelleri oluşturan birçok laboratuvar testlerinin yapılmasına olanak tanır. Gözlemsel ve teorik bilgilerin etkileşimi ile astrokimya açısından oldukça önemli belgeler oluşturulmuştur (van Dishoeck 2014).

#### 4.6 Öngezegen Diskleri (PPDs)

Gezegen oluşum sistemleri toz ve gaz depolarıdır. Gezegenler, meteoritler ve kuyruklu yıldızlar, yıldızlararası tozun istiflendiği yerler olmuştur. Gezegen atmosferleri gezegen oluşum bölgelerindeki gazlardan meydana gelir. Kuyruklu yıldız ve asteroit çarpışmalarının erken gezegen dönemlerine etkisi çok büyüktür. Önyıldızın oluşmasına yakın bölgelerde sıcaklık yüksek olduğu için buzlar buharlaşıp tekrar gaz fazına döner ve yeni oluşmakta olan yıldızdan gelen yoğun radyasyon ile önceki yıldızlararası ortamın kimyasındaki moleküler imza büyük ölçüde kaybolur. UV ışınımı foto iyonlaşma ve ayrışma reaksiyonları için çok önemlidir. İyonlaşma; uzak-UV ışınması, başka yıldızın x-ışını fotonları, kozmik ışın parçacıkları ve bazı elementlerin radyoaktif yarılanma sürecinde, örneğin  $^{26}\text{Al}$ 'nin  $^{26}\text{Mg}$ 'ye dönüşümünde meydana gelir. Allende meteoritinde gözlenen artık  $^{26}\text{Mg}$  izotopu güneş sistemimizin önyıldız döneminde ortamda  $^{26}\text{Al}$  bulunduğunu göstermektedir (Papanastassiou et al. 1977)

Yıldızlararası buzun kompozisyonunu bulmak için, kızılöte bölgede çok kısa dalgaboyu aralığında çalışan tayfçekerlerle elde edilen veriler, laboratuvar verileriyle kıyaslanır. Teorik ve laboratuvar verileri oluşturulurken, gaz ile toz parçaları arasındaki termal dengeleri de dikkate almak gerekir.

Moleküllerin titreşimsel geçişleri soğuk buzların içindeyken ölçülebilmektedir, fakat moleküllerin dönme modları buzların içindeyken engellenir. Moleküler tozların arka planında bir ışınım kaynağı olduğunda titreşimsel geçişlerindeki soğurmaları yakalayabilmek mümkündür. Bu geçişlerin serbest halde gezen gaz moleküllerinin dönme-titreşimsel tayfindan farkı kolayca ayırılabilir. Şekil 7'de, genç bir yıldız olan W33a'nın etrafındaki yıldızlararası buz parçalarından elde edilen moleküler tayf görülmektedir. Bu kompozisyon güneş sistemindeki bazı kuyruklu yıldızlarla benzerlik göstermektedir (Gibb et al. 2000).

Gazların toz parçaları ile reaksiyonu ile buz mantoları oluşturmaları yaklaşık olarak  $10^4$  yıl sürer. Dolayısı ile öngezegen disklerinin orta bölgesinde gaz fazında bulunan maddelerin bolluğu zamanla azalır. Bu durum dış bölgeden merkeze doğru radyal olarak toz parçalarının akımını başlatır ve iç kısımlar buz parçaları ile domine olmaya başlar (Şekil 8).

Buzların uzak UV ve kozmik parçacıklara maruz kaldığı yerlerde radikaller, yeni elektron ve iyonlar oluşur. Radikaller ve iyonlar kararlı olmadığı için yine dönüşür ve etan, alkol gibi daha kompleks moleküllerin oluşmasına neden olur. Moleküler buzlar diskten ayrılmadan önce  $10^5$  yıl yaşayabilmektedir (Blum et al. 2002). Bir buz mantosunu ayrıştıracak reaksiyonun yüzey kimyası mı yoksa hacim kimyası mı olduğunu belirleyebilmek mekanizmayı anlamak için önemlidir. Gezegen disklerinin çok yoğun bölgeleri UV fotonlarına geçirgen olmadığı için, ortamdaki buzlar çarpışmaya bağlı termal ısıtma ya da kozmik parçacıklar vasıtasıyla ısınır. Özellikle son 20 yıldır laboratuvarlarda uygulanan ultra-vakum teknikleri karmaşık yüzey reaksiyonlarını anlamaya yol göstermiştir.

## 5 Sonuç

Son 20 yıldır laboratuvarlarda uygulanan ultra vakum teknikleri, mutlak sıcaklığa yakın koşulların elde edilebilmesi, uyarlanmış optik teknolojilerinin gelişmesi, çok düşük dalgaboyu aralıklarında yüksek çözünürlük elde edilebilmesi kozmik ortamdaki karmaşık moleküllerin gaz ve yüzey reaksiyonlarını anlamaya yol göstermiştir. Moleküler tayflar ve reaksiyon kinetik mekanizmaları, ortaya çıkan kompleks kimyayı anlamaya yardımcı olur. Laboratuvar astrofiziği özellikle son 20 yıldır astrokimya ile paralel olarak büyümektedir. Teorik modelleme komitelerinin gün geçtikçe artması, yeni nesil uzay teleskopları, uydular ve keşif görevleri sayesinde önümüzdeki dönemlerde moleküler evreni anlamak için elimizde çok daha fazla ipucu olabilecektir.

## Kaynaklar

- Bergin E. A., Neufeld D. A., Kleiner S. C., Wang Z., Melnick G. J., 2001, IAU Circ., 7596, 3, [ADS](#)
- Blum J., et al., 2002, in 34th COSPAR Scientific Assembly. p. 2433
- Cherchneff I., 2011, [A&A](#), 526, L11
- Cherchneff I., 2012, [A&A](#), 545, A12
- Crutcher R. M., Hakobian N., Troland T. H., 2009, [ApJ](#), 692, 844
- Ehrenfreund P., 2002, in 34th COSPAR Scientific Assembly. p. 2863
- Fraser H. J., McCoustra M. R. S., Williams D. A., 2002, [Astronomy and Geophysics](#), 43, 2.10
- Geballe T. R., Oka T., 1996, [Nature](#), 384, 334
- Gibb E. L., et al., 2000, [ApJ](#), 536, 347
- Kurtz S., Cesaroni R., Churchwell E., Hofner P., Walmsley C. M., 2000, in Mannings V., Boss A. P., Russell S. S., eds, Protostars and Planets IV. pp 299–326
- Lis D. C., Gerin M., Phillips T. G., Motte F., 2002, [ApJ](#), 569, 322
- Loinard L., Lequeux J., Tilanus R. P. T., Lagage P. O., 2003, in Arthur J., Henney W. J., eds, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series Vol. 15, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series. pp 267–269
- Maret S., et al., 2004, [A&A](#), 416, 577
- Millar T. J., 2015, [Plasma Sources Science Technology](#), 24, 043001
- Millar T. J., Hatchell J., 1998, [Faraday Discussions](#), 109, 15
- Papanastassiou D. A., Lee T., Wasserburg G. J., 1977, in Delsemme A. H., ed., IAU Colloq. 39: Comets, Asteroids, Meteorites: Interrelations, Evolution and Origins. pp 343–349
- Preibisch T., Balega Y. Y., Schertl D., Smith M. D., Weigelt G., 2001, [A&A](#), 378, 539
- Roberts H., Millar T. J., 2007, [A&A](#), 471, 849
- Schilke P., et al., 2014, in 69th International Symposium on Molecular Spectroscopy. p. TF02, [doi:10.15278/isms.2014.TF02](#)
- Sharp C. M., Huebner W. F., 1990, [ApJS](#), 72, 417
- Smith D., 2004, [Angewandte Chemie](#), 116, 5229
- Visser R., 2009, PhD thesis, -
- Ziurys L. M., 2006, [Proceedings of the National Academy of Science](#), 103, 12274

van Dishoeck E. F., 2014, [Faraday Discussions](#), 168, 9

Access:

M22-0307: [Turkish J.A&A](#) — Vol.3, Issue 3.