



# 60 Karbonlu Fullerenlerin Astrokimyasal İncelemesi

Şengül Yalgın<sup>1</sup>  

<sup>1</sup> Ankara University, Astronomy and Space science Department, Ankara 06100, Turkey

Accepted: January 9, 2023. Revised: December 19, 2022. Received: November 14, 2022.

## Özet

Nanokafes yapıda karbon allotropu olan fullerene henüz dünyada sentezlenmemiş iken, 1985 yılında yıldızlararası ortamda IR bölge bandında tespit edildi. 1996 yılında Kroto, Curl ve Smalley'e nobel ödülü getiren fullerene sentezi hem nanoteknoloji alanındaki gelişmelere katkılar sağlamış hem de astrokimya literatürüne en büyük molekül olarak girdiğinden beri yıldızlararası ortamdaki keşifleri ivmelenmiştir. 2010 yılından itibaren uzay teleskoplarından alınan veriler sayesinde C60'ın gezegenimsi bulutsu bölgelerinde daha fazla bulunduğu tespit edildi. Kozmik ortamda, C60'ın He ve daha ağır elementler ile kafeslenebilme yeteneğine sahip olması, tayflarında geniş bant aralığına sahip çok halkalı aromatik hidrokarbonlardan (PAH) ayırt edilebilmelerine olanak tanır. Gözlemsel, teorik ve laboratuvar verileri birleştirilerek He@C60+ (He ile kafeslenmiş fullerene) için sentetik tayflar oluşturulabilmekte ve yıldızlararası ortamda C60 bölgeleri tespit edilebilmektedir.

## Abstract

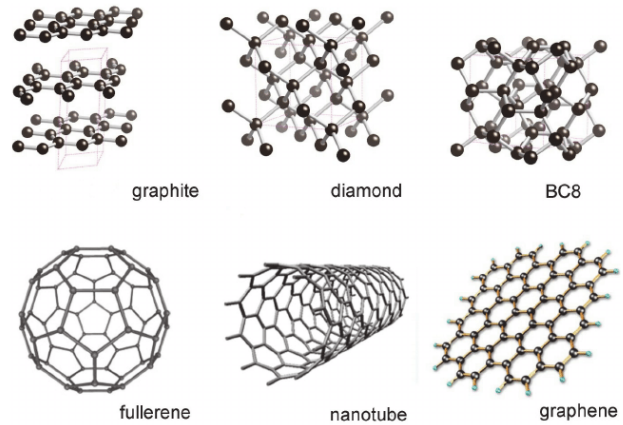
Fullerene, which is a carbon allotrope in nanolattice structure, was detected in the IR (infrared) band of ISM (interstellar medium) in 1985 before it was synthesized on earth. Fullerene synthesis, which brought the Nobel Prize to Kroto, Curl and Smalley in 1996, both contributed to the developments in the field of nanotechnology and the molecule's ISM discoveries were accelerated since it entered the astrochemistry literature as the largest molecule. Data from space telescopes since 2010 found that C60 is more present in planetary nebula regions. In the cosmic environment, C60's ability to be caged with He and other heavier elements allows it to be distinguished from PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons), which have a wide bandgap in their spectra. By combining observational, theoretical and laboratory data, synthetic spectra for He@C60+ (fullerene caged with He) can be generated and C60 regions can be detected in the interstellar medium.

**Anahtar Kelimeler:** astrochemistry, planetary nebulae, infrared spectroscopy

## 1 Giriş

Karbon, kütlece evrende en bol bulunan dördüncü elementtir. Eşsiz elektronik yapısı nedeniyle üç tip kimyasal bağ;  $sp^1$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  hibritleşmesi oluşturulabilmektedir. Böyle bir özellik, C'nin çok atomlu çeşitli yapılar oluşturmasını kolaylaştırır. Karbonun farklı moleküler konfigürasyonlara sahip yapılar ile BC8 (lonsdaleite), elmas, grafit, grafen, fullerenler, karbon nanotüpler gibi çok çeşitli allotropu vardır (Şekil 1). Polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) molekülleri ise grafende olduğu gibi düzlemsel bir yapıya sahiptir. Fullerenler farklı sayıda karbon allotropu olan nano kafeslerdir. En küçük fulleren yapısı 20 karbonludur. Bilinen en büyük fulleren ise  $C_{540}$ 'dir. Endohedral fulleren, kafes yapısının içinde atom ya da molekül taşıyan fullerenlerdir, ekzohedral fulleren ise kafes yapısı kafesin dışından bağlanır (Şekil 2). Heterofullerenler ise kafese hem içeriden hem de dışarıdan bağlanmış atom ya da moleküller taşır.

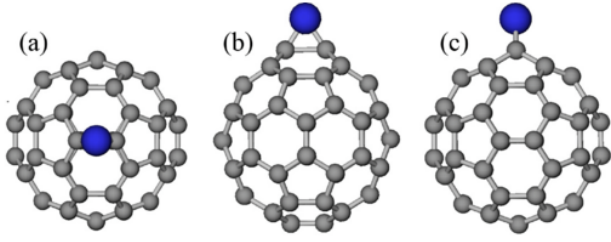
Fulleren gibi yapısal olarak dev ve simetrik olan moleküllerin kalıcı elektrik dipol momentleri olmadığı için, radyo teknikleriyle analiz edilebilmeleri olanaksızdır. Ancak UV (ultraviyole) ışınım ile aydınlatılmış bölgelerde, gaz ve toz oluşumlarındaki dev organik moleküller 3-25  $\mu m$  arasındaki IR (kızılöte) bantlarında tespit edilebilmektedir. Gözlemsel IR dalgaboylarında en fazla ortaya çıkan çizgiler 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.2, 12.7, ve 16.4  $\mu m$ 'dir. Bu çizgiler C-C ve C-H'nin titreşimsel



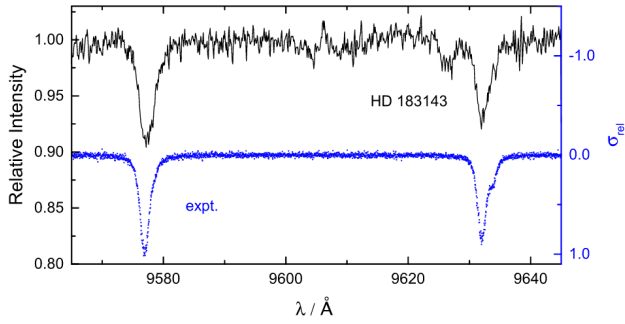
Şekil 1. Bazı karbon allotropu yapıları (Oganov ve diğ. 2013).

modları (Gillett ve diğ. 1973) ile uyumlu olduğundan dolayı bu seviyelerin PAH'ların (polisiklik aromatik hidrokarbonlar) parmak izleri olduğu anlaşılmıştır. 7, 8.5, 17.4 ve 18.9  $\mu m$  çizgilerinin ise en kararlı fulleren olan C60'a ait olduğu 2010 yılı Spitzer Uzay Teleskobu IRS (kızılötesi tayf) verilerinden beri bilinmektedir (Cami ve diğ. 2010). Gezegenimsi bulutsu bölgelerinde elde edilmiş IR bandındaki gözlemsel veriler ile hesaplanan C60 tayflarının yoğunluğa bağlı bolluk değerleri,  $(C_{60}^+)$ 'nın genel olarak He, Li, Na, K, Mg, Ca, Al, V ve Fe

\* sengulyalgin@gmail.com



Şekil 2. (a) endohedral fullerene. (b) ve (c) ekzohedral fulleren (Bibikov ve diğ. 2022).



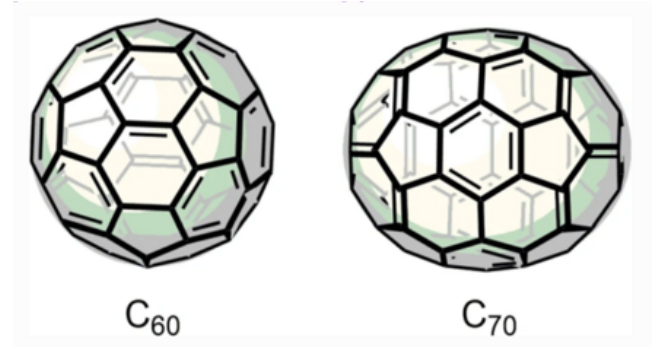
Şekil 3. Siyah tayf; Ehrenfreund & Foing (1997)'ün HD 183141 yakınlarındaki yaygın kızılöte bant (DIBs)'daki fullerene bulguları. Mavi tayf; Campbell ve diğ. (2016)'in laboratuvar deneyleri ile elde ettiği He ile bileşik yapmış ( $C_{60}^+$ ) tayfı (Campbell 2020).

gibi metallerle kompleks oluşturabildiklerini de doğrulamıştır (Hou ve diğ. 2022). Fullerenin metaller ile bileşik yapması moleküle bazı titreşimsel modlar kazandırdığından dolayı  $C_{60}$  IR-aktif hale gelir. Bu durum tanımlanamayan dağıntık kızılötesi bantlardaki (DIBs) bazı keskin çizgileri açıklanabilir hale getirmiştir. Campbell ve diğ. (2016) laboratuvar deneyleri ile Ehrenfreund & Foing (1997)'in DIBs verilerindeki ( $C_{60}^+$ ) çizgilerinin, fullerene He ile bileşik yapmış olduğunda ortaya çıkan çizgiler olduğunu doğrulamıştır (Şekil 3).

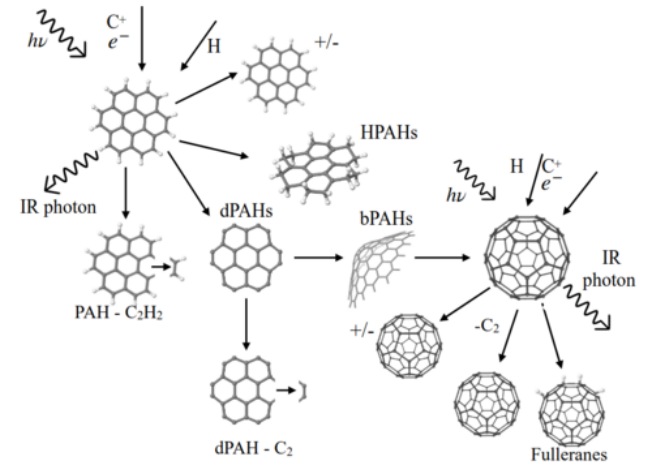
$C_{60}$ 'ın iyonlaşma enerjisi 7,58 eV'dur ve dağıntık bulutsu gibi ortamlarda kolayca elektronunu kaybederek katyonuna ( $C_{60}^+$ ) dönüşür. Kafesin dışından ortamda bulunan bir metale bağlanabilir (ekzohedral), ya da kozmik ortamda yüksek He bolluğu olmasından dolayı sentezlenme sürecinde içine He, nadiren de diğer metalleri kafesleyebilir (endohedral). Yıldız çevresi zarflarında, (Şekil 4) küresel bir kafes olan  $C_{60}$ 'a kıyasla geoit bir yapıya sahip olan  $C_{70}$  fullerenlerine de rastlanmaktadır (Cami ve diğ. 2010). Yıldızlararası ortamda sentezlenme koşulları (Şekil 5) oldukça karmaşık olan fullerenlerin astrokimya veri tabanında en büyük molekül olması, aynı zamanda gözlemlenen bazı yaygın bulutsularda ve şu ana kadar 40'dan fazla gezegenimsi bulutsuda tespit edilmiş olması, astrokimyasal açıdan cevaplanması gereken çok fazla sorular sorulmasına neden olmuştur.

## 2 Fullerenin Astrokimyasal Kronolojisi

Fulleren molekülüne ait ilk keşif 1985 yılında DIBs verilerinde elde edilmiştir (Kroto ve diğ. 1985). 2 yıl sonra Kroto ve diğ. (1987) bu bantın astrokimyasal açıdan önemli olabileceğini



Şekil 4. Yıldızlararası ortamda en çok rastlanan fullerene izomerleri (Bille ve diğ. 2019).



Şekil 5. ISM'de PAH'lardan  $C_{60}$  sentezi için mümkün olan tepkimeler (Murga ve diğ. 2022).

yayınlanmıştır. 1991 yılında D'Hendecourt ve diğ. (1991) 60 karbonlu kafes yapıda bir karbon allotropunun sahip olabileceği soğurma bantları dahil, fullerenleri oluşturabilecek ara mekanizmaları içeren PAH'lara dair detaylı veriler yayınladı. Bu veriler daha sonra Foing & Ehrenfreund (1994)'a ilham vererek, kızılötesi bazı yıldızların etrafında elde ettikleri 9577 ve 9632 Å çizgilerinin fullerene iyonuna ( $C_{60}^+$ ) ait olduğunu düşüncelerini sağladı.

Fizik, kimya ve astronomi alanında çalışan Kroto ve ekibine 1996 yılında nobel ödülü getiren  $C_{60}$ 'ın astronomik keşfinden hemen sonra sentezlenebilmesi, elde edilmiş DIBs tayfındaki oldukça keskin çizgilerin, molekülün yapısına dair ilham vermiş olması ile mümkün oldu. 12 tane beşgen ve 20 tane altıgen oluşmuş küresel bir karbon yapısının oluşturulabileceğine dair 1970'li yıllardan beri spekülasyonlar vardı. Kroto ve diğ. (1985), grafit ile hidrojen yoksun atmosferde lazer buharlaştırma yaparak, molekülü astronomik keşfinden hemen sonra sentezlemeyi başardılar. Fullerenler hem astrokimya hem de nanoteknoloji için dünyada yeni bir dönem başlatan moleküller olmuştur.

Fullerenin dünyada sentezlenme koşulları minimum 3500 K ve hidrojen yoksun atmosfer gerektirdiği için, yıldızlararası ortamdaki oluşum bölgelerinin de bu sıcaklıklarda ve hidrojen

**Çizelge 1.** Yıldız oluşum bölgeleri, dağınık ISM ve evrimleşmiş yıldız bölgelerindeki salma ve soğurma ölçümlerinden elde edilmiş fulleren bollukları. Çizelgede görülen değerler, ortamda bulunan gaz fazındaki karbon miktarının, fulleren moleküllerindeki karbon miktarına oranıdır (Hou ve diğ. 2022).

|            | Erken Yıldız |         | ISM      |          | Evrilmiş yıldız |         |
|------------|--------------|---------|----------|----------|-----------------|---------|
|            | salma        | soğurma | salma    | soğurma  | salma           | soğurma |
| $C_{60}$   | 0.01         | -       | 0.2      | 0.06-0.1 | -               | 1.2     |
| $C_{60}^+$ | 0.04-0.06    | -       | 0.03-0.4 | -        | 0.1-3.0         | -       |

**Çizelge 2.** Laboratuvar modelleri için kullanılan fullerenler (Campbell ve diğ. 2020).

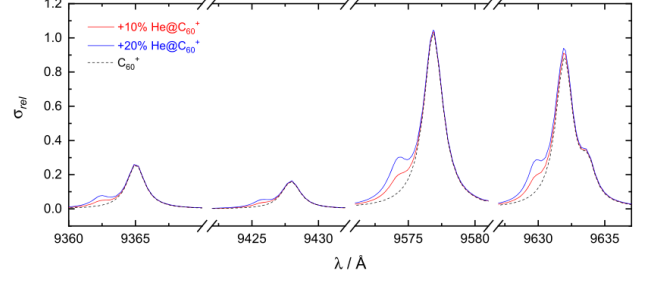
| Fulleren yapıları   | $C_{60}^+$ 'nin He izomerleri |
|---------------------|-------------------------------|
| Endohedral fulleren | $He@C_{60}^+$                 |
| Ekzohedral fulleren | $C_{60}^+ - He_n, n=1-4$      |
| Hetero fulleren     | $He@C_{60}^+ - He_n, n=1-4$   |

yoksun olduğu öne sürüldü (Jager ve diğ. 1998);(Cherchneff ve diğ. 2000). Öne sürülen hipotezlere rağmen Wolf Rayet (WR) ya da R Coronae Borealis yıldızlarının çevresindeki zarflar gibi karbonca zengin fakat hidrojenca fakir bölgelerde (2011 yılından sonra elde edilen uzay teleskopları verilerine kadar) fulleren bulgularına rastlanmadı. 2009 yılına kadar geçen sürede  $C_{60}$ 'ın gözlemlendiği bölgeler dağınık kızılöte bantları (DIBs) ve yıldız çevresi zarfları oldu. 2010 yılında,  $C_{60}$ 'nın moleküler imzası NASA'nın Spitzer kızılötesi teleskopu tarafından gezegenimsi bulutsu bölgelerinde tespit edildi (García-Hernández ve diğ. 2010);(Cami ve diğ. 2010). Kozmik ortamda fullerenlerin, hidrojen yoksun olmayan bölgelerde de oluşabileceği doğrulanmış oldu. Campbell ve diğ. (2016) gaz fazındaki  $C_{60}^+$  iyonunun IR bölgesinde salma ve soğurma bantlarını astronomik gözlemlerle kıyaslayabilmek için detaylı bir tayfsal veri tablosu yayınladı. Foing & Ehrenfreund (1994) tarafından DIB'lerde elde edilen 9577 ve 9632 Å bantlarındaki tayfsal verinin ancak  $C_{60}^+$  nın He ile kafeslendiğinde elde edilebileceğini doğruladı (Şekil 3). Walker ve diğ. (2016) HD 183143 etrafında 9345 Å bandı kullanılarak  $N(C_{60}^+) = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  değerinde kolon yoğunluğu olarak bolluk tespit etti. Campbell ve diğ. (2020), He ile bileşik yapmış endohedral ve ekzohedral fullerenlerin kozmik ortamdaki tanısı için model tayflar üretti.

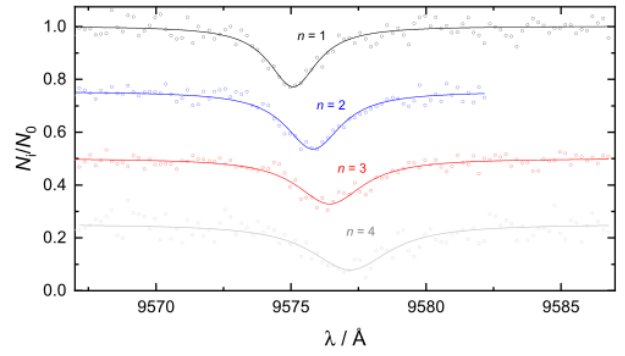
Uzay teleskopları/IRS verilerinin ardından fulleren keşfine dair çok daha fazla bulgu rapor edildi. Çizelge 1'de fulleren keşfedilen bölgeler ve bolluk oranları gösterilmektedir.

### 3 Helyum ile Kafeslenmiş Fullerenin Astrokimyasal İncelemesi

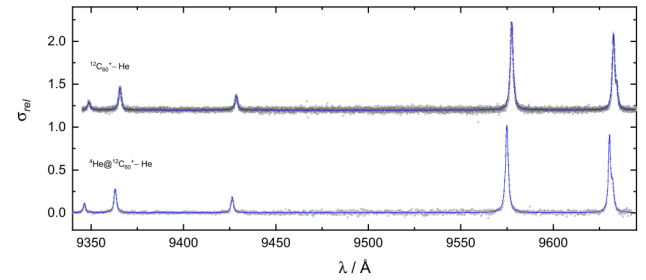
Campbell ve diğ. (2020), helyum ile kafeslenmiş (endohedral) fulleren ve kafesin dışından 4 farklı sayıda helyumun bağlandığı (ekzohedral)  $C_{60}^+$  fullerenlerin elektronik spektroskopisini analiz ederek, kozmik ortamda  $C_{60}^+$ 'in He ile farklı izomer tanıları için model tayflar üretti.  $H_2$  ve He, kozmik bolluk oranlarının yüksekliğinden dolayı nonokafesin içine diğer elementlerden daha sık hapsolür. Campbell ve diğ. (2020) laboratuvar çalışmalarında, 3,9-10 K sıcaklık ve vakum ortamını spektrometri cihazlarına entegre ederek endo, ekzo ve hetero fullerenin tayfsal değerlerini elde etti. Böylece kozmik ortamda



**Şekil 6.** Endohedral fullerenin  $C_{60}^+$  bandına kıyasla, 2-3 Å değerinde maviye kaymış kanatları (Campbell ve diğ. 2020).

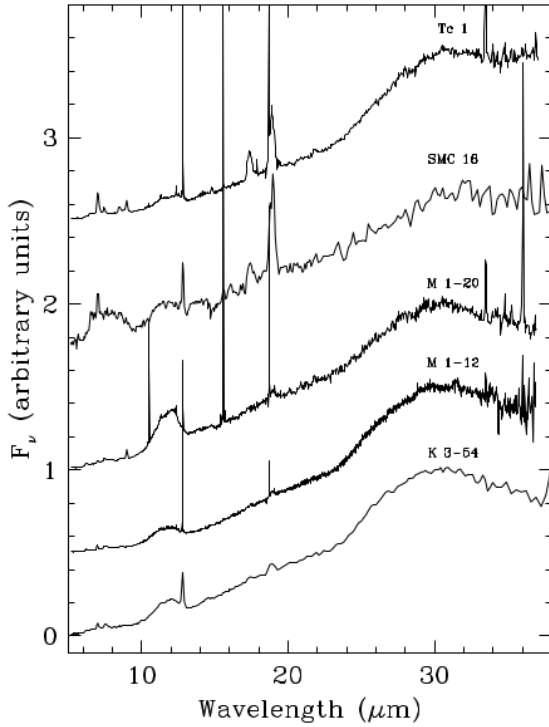


**Şekil 7.** Ekzohedral fullerenlere  $n=1-4$  olarak eklenen He için elektronik soğurma bantları. Eklenen her bir He atomu için, tayfın lineer bir şekilde kırmızıya kaydığı görülmektedir. Bu lineer kaymanın, eklenen her bir helyuma yönelik ortalama değerini bulmak için eksplorasyon sıfıra alınıp, kırmızıya kayma değeri 0,7 Å bulunmuştur. Artan "n" değeri için FWHM ortaya çıkan genişleme, (Campbell & Maier 2018) molekülün izomerik yapı değişikliğine uğramasından kaynaklıdır (Campbell ve diğ. 2020).



**Şekil 8.** Ekzohedral (yukarıdaki tayf) ve hetero  $C_{60}^+$  (aşağıdaki tayf) için elektronik salma spektrometresinde elde edilen 5 farklı fulleren çizgisi (Campbell ve diğ. 2020).

fulleren tanısı için bir model tayf geliştirmiş oldu (Şekil 6). Elde edilen tayflarda kafesin dışından bağlanan her bir He atomu için ortalama 0,7 Å değerinde lineer kayma gözlenmiştir (Şekil 7 ve Şekil 8). Endohedral fullerenlerde ise normal fulleren iyonuna ( $C_{60}^+$ ) kıyasla 2-3 Å değerinde maviye kaymış kanatlar gözlenmiştir. Salma bantlarında 2-3 Å değerindeki kısa dalgaboyu bölgesinde yer alan bu kanatlar DIBs araştırmaları



**Şekil 9.** PN bölgeleri olan K 3-54, M 1-12, M 1-20, SMP SMC 16 ve Tc 1'de gözlenen  $C_{60}$  ve  $C_{70}$  fullerenerinin 5-38  $\mu\text{m}$  aralığındaki IR tayfları (García-Hernández ve diğ. 2010).

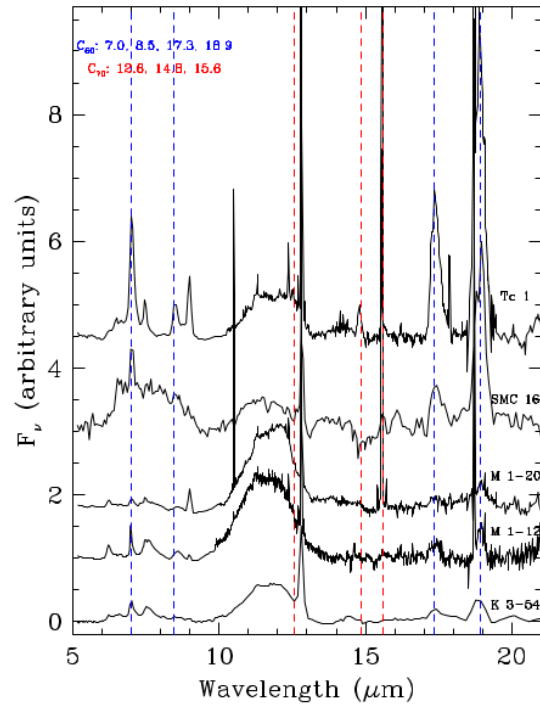
yapılmasına imkan verir.  $C_{60}$ 'in He ile yaptığı farklı izomerleri ile oluşturulan bu model tayf, kozmik ortamda fullerenerin teşhis edilebilmesine katkı sağlamaktadır.

#### 4 Fullerenerin Gezegenimsi Bulutsu (PN) Tayfları

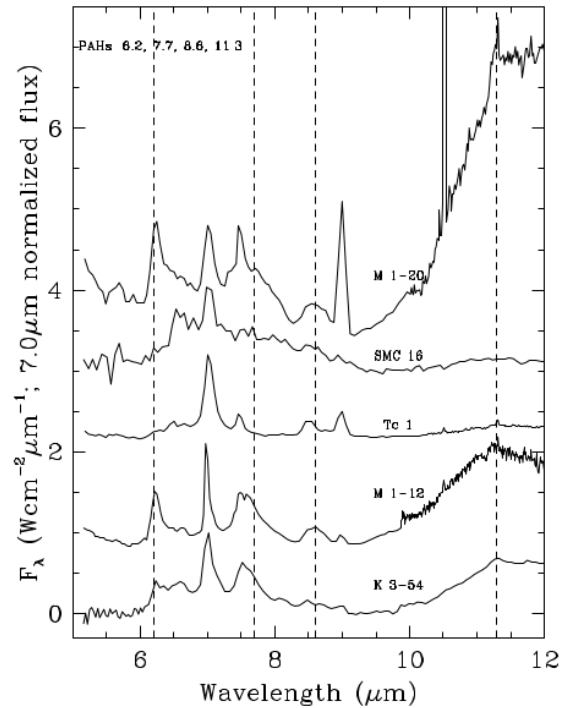
2010 yılında,  $C_{60}$ 'in PN bölgelerindeki spektral imzası ilk defa yıldız çevresi zarflarındaki kozmik toz bulutu içinde, NASA'nın Spitzer kızılötesi teleskopu tarafından gözlemlendi. García-Hernández ve diğ. (2010) 4 farklı PN bölgesinde elde ettiği fullerene bulgularını, Cami ve diğ. (2010)'nin Tc 1 bölgesinde elde ettiği fullerene bulguları ile birleştirip (Şekil 9) detaylı bir tayfsal analiz yapmıştır.

Tayflarda,  $C_{60}$  ve  $C_{70}$ 'in uyarılmış salma çizgileriyle birlikte (Şekil 10), fullereneri oluşturan ara ürün olan PAH'ların çizgileri (Şekil 11) ve geniş bantlara sahip metal toz salma çizgileri de görülmektedir. 11,5  $\mu\text{m}$  SiC ve 30  $\mu\text{m}$  MgS'e aittir. 17,3 ve 18,9  $\mu\text{m}$ 'deki  $C_{60}$  çizgileri metal tozlarının termal salınım sürekliliği ile çakışmış durumdadır. 5 farklı PN bölgesinin bir aradaki tayfı 30  $\mu\text{m}$ 'de normalize edilmiştir. Çizgilerin pozisyon, profil ve genişlikleri fullerenerin nötr durumda olduğunu ve toz parçaları içinde sıkışmış olabileceğini söylemektedir (Cami ve diğ. 2010). 7  $\mu\text{m}$   $C_{60}$  çizgisi Ar II çizgisi ile örtüşmüş durumdadır.

Moleküllerin tespit edildiği bölge sıcaklığı  $C_{60}$ 'in titreşimsel seviyelerindeki uyarılma sıcaklığından elde edilmiştir (Hernández vd. 2010). Gözlenen molekül, merkezdeki yıldız ne kadar yakınsa sıcaklık da o derece artmaktadır (Çizelge 3). Hidrojen zengin olan Küçük Macellan Bulutunun (SMC) yıldız zarfı bölgesinde (SMP SMC 16) karbonun diğer moleküllere göre kısmi oranı  $1,72 \times 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. Karbonların %0.32 lik kısmı ise fullerene formundadır (García-



**Şekil 10.** Gezegenimsi bulutsu Tc 1, SMP SMC 16, M 1-20, M 1-12 ve K 3-54 için, 5–20  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında, 30  $\mu\text{m}$ 'de normalize edildikten sonra arda kalan tayf. Nötr (katı) halde olan  $C_{60}$ 'ün dalga boyu konumları, mavi kesikli dikey çizgilerle işaretlenmiştir. Ayrıca, en güçlü  $C_{70}$  dalga boyu konumları, kırmızı kesikli dikey çizgilerle işaretlenmiştir (García-Hernández ve diğ. 2010).



**Şekil 11.** 5-16 dalgaboyu seviyesinden arda kalan K 3-54, M 1-12, M 1-20, SMP SMC 16 ve Tc 1 bölgelerinde gözlenen tayf. PAH moleküllerinin dalgaboyu pozisyonları 6.2, 7.7, 8.6 ve 11.3 olup siyah kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. (García-Hernández ve diğ. 2010).



**Çizelge 3.** Fulleren tespit edilen PN bölgelerinin molekül sıcaklığı (García-Hernández ve diğ. 2010).

| PN bölgeleri | $C_{60}^{+}$ 'nin ortam sıcaklığı (K) |
|--------------|---------------------------------------|
| K 3-54       | 681                                   |
| M 1-12       | 546                                   |
| M 1-20       | 425                                   |
| SMP SMC 16   | 346                                   |
| Tc 1         | 322                                   |

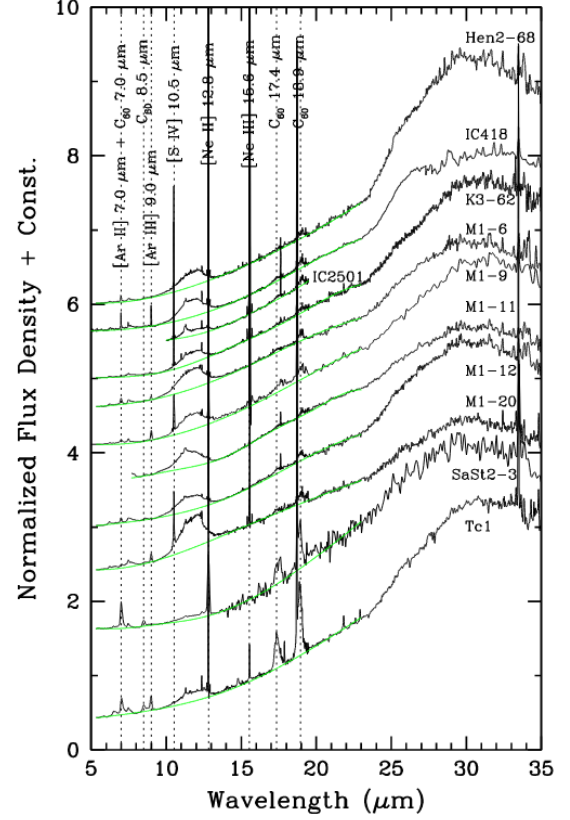
Hernández ve diğ. 2010). Tc 1 bölgesinde fullerenler karbonların %1.5'lük kısmından oluşmuştur ki (Cami ve diğ. 2010) SMP SMC 16'daki değerin neredeyse 5 katıdır.

### 5 Yıldızlararası ortamda Fulleren Kaynakları

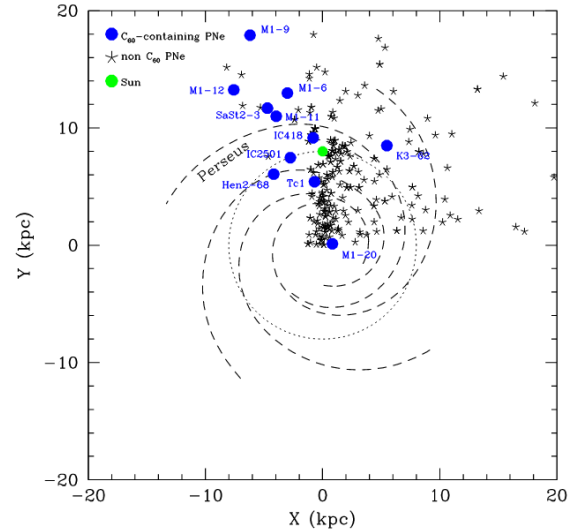
Kozmik ortamdaki sentezlenme mekanizması hala tam olarak anlaşılabilen fullerenleri, laboratuvar koşullarında sentezleyebilmek için grafitlere lazer buharlaştırma yaparak, hidrojen yoksun atmosfer kullanılır. Hidrojen, kozmik ortamda en bol element olduğundan ve karbona kolayca bağlanabildiğinden dolayı, sadece karbondan oluşan bu molekülün sentezlenme sürecini zorlaştırır. Bu nedenden dolayı astronomi çevresinde 90'lı yıllardan beri fullereni sentezleyebilecek bölgelerin karbonca zengin ancak hidrojen fakir yıldızların zarfları olması gerektiği iddia edildi (Cherchneff ve diğ. 2000). 2010 Spitzer uzay teleskobunun IRS (kızılötesi tayf) verilerini kullanan García-Hernández ve diğ. (2010) ve Cami ve diğ. (2010), fullereni oluşturan kozmik ortamın hiç de hidrojen fakir olmayan gezegenimsi bulutsu (PN) bölgeleri de olduğunu doğruladı. PN Tc 1 bölgesinde elde edilen veriler, salma çizgilerinin kaynağının gaz fazındaki moleküller olmadığını göstermiştir. Cami ve diğ. (2010), Tc 1'a dair yaptığı araştırmalarda fullereni oluşturan mekanizmanın yıllarca bilinen aksine, yüzey kimyası olduğunu, fullerenin karbon bazlı toz yüzeylerinde sentezlendiğini iddia etti. Bu iddiayı doğrulayan sebeplerden biri, ortamda gaz fazında hiçbir fullerene rastlanmamış olması, diğeri de tayflardaki fulleren çizgilerinin molekülün nötr formda olduğunu doğrulamasıdır. Nötr formdaki  $C_{60}$  nanokafesleri sentezlendikten sonra yüzeyde tutunmaya devam edip buharlaşmamış haldedir. Parçacık yüzeyine tutunma olgusu beklenenden daha düşük seviyede hesaplanan sıcaklık değerlerini de açıklayabilmektedir.

Gezegenimsi bulutsu Tc 1'in merkezindeki beyaz cüceye dönüşmekte olan yıldızın etkin sıcaklığı 34000 K değerindedir (Otsuka ve diğ. 2014). Katı malzemeler yıldızların ışınımsal alanı ile ışınımsal dengededir, bu sayede moleküllerin yıldızdan uzaklığı belirlenebilmektedir. Fullerenler tutundukları toz parçaları ile aynı sıcaklığa sahip olduğundan dolayı, uyarılmış titreşimsel seviyeleri termal popülasyon dağılımını meydana getirir.

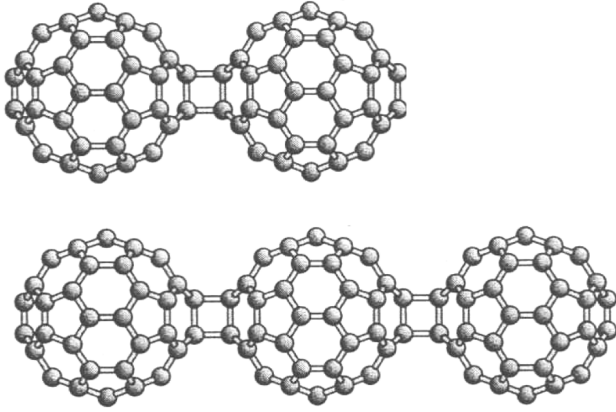
Otsuka ve diğ. (2014), Spitzer Uzay Teleskobu veri arşivinden elde edilmiş 338 galaktik gezegenimsi bulutsudan indirgenmiş olduğu IR tayflarında, 11 tane PN bölgesinin  $C_{60}$  içerdiğini (7, 8.5, 17.4 ve 18.9  $\mu\text{m}$  çizgileri) tespit etmiştir (Şekil 12). Mesafeleri ölçülen 265 PN'nin bakış doğrultusundaki samanyolu galaksisi haritası Şekil 13'de görülmektedir. Fulleren barındıran çoğu PN bölgesi Perseus Spiral Kolu etrafında bulunmaktadır. İncelenen 338 PN bölgesinde sadece 1/30 PN'de fullerene rastlanmıştır, bu moleküllerin nadir olduğunu söylemektedir.



**Şekil 12.** 5.3-35  $\mu\text{m}$  Spitzer/IRS ve ISO tayfları 20  $\mu\text{m}$  akı yoğunluğuna normalize edilmiştir. Yeşil çizgiler 2.5-23  $\mu\text{m}$  aralığında normalize edilmiş sürekliliği göstermektedir. Salma çizgileri kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Tayflarda 7, 8.5, 17.4 ve 18.9  $\mu\text{m}$   $C_{60}$  bantlarıyla birlikte, 6-9  $\mu\text{m}$  PAH bantları da görülmektedir (Otsuka ve diğ. 2014).



**Şekil 13.** 254 tane  $C_{60}$  gözlenmemiş PN (asteriks) ve 11 tane  $C_{60}$  bulgularına rastlanmış PN'lerin (mavi noktalar) konumlarını içeren Samanyolu'nun bakış doğrultusundaki haritası. Güneş, yeşil daire ile gösterilmiştir, güneş yörüngesi ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Fulleren barındıran çoğu PN bölgesi Perseus Spiral Kolu etrafında bulunmaktadır (Otsuka ve diğ. 2014).



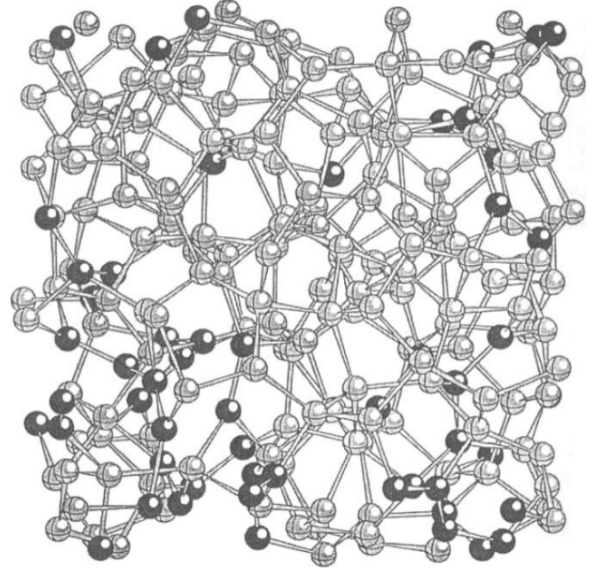
**Şekil 14.** C<sub>60</sub> fullerene oligomer yapıları; dimer (üst) ve trimer (alt). Oligomerizasyon, yapılar arasında oluşan bağlarla meydana gelir, örneğin; fullerene kafesleri arasında zincir benzeri bir yapı ile fullerene kafeslerini birbirine bağlar (Cataldo ve diğ. 2009).

## 6 Fullerenin Kozmik Ortamdaki Kararlılığı

En kararlı fullerene olan C<sub>60</sub> bir kere sentezlendikten sonra kozmik ortamda milyarlarca yıl yaşayabilmektedir. Cataldo ve diğ. (2009), yıldızlararası ortamda toz yüzeyinde biriken ya da asteroid ve kuyruklu yıldızlar içinde gömülü olan C<sub>60</sub> ve C<sub>70</sub> fullerene lerinin kararlılığını ölçmek için, gama ışınımı, alfa ve proton bombardımanı kullanarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. 2,6 Mgy (1 Gy = kilogram başına soğurulan 1 joule enerji) gama radyasyon dozu uygulanmış moleküller kısmi olarak oligomerleşmiştir (Şekil 14). Oligomerleşmiş fullerene ler, ortamda ısı artışı meydana geldiğinde eski hallerine geri dönebilmektedir. Radyasyonun kimyasal yıkım etkisi açısından 2,6 Mgy gamma radyasyonu, aynı dozdaki alfa parçacıklarının ürettiği miktara eşdeğerdir (Charlesby 1996). Asteroid ve kuyruklu yıldız gibi nesnelere, 20 m'den büyük derinliklerde kozmik ışınların etkileri önemsiz hale gelir ve maruz kalan radyasyon sadece atomların doğal çekirdek bozunmasından kaynaklanır, bu durumda ortama iletilen doz, 1 Gyr (1 milyar yıl) için 3 Mgy olarak sınırlıdır ve bu miktar fullerene nin oldukça kararlı yapısı için fazla küçüktür. Bununla birlikte, yüksek enerji ışınlarına doğrudan maruz kalan toz yüzeylerindeki fullerene lerin ömrü, tanecikler tarafından soğurulan daha yüksek radyasyon dozu nedeniyle nispeten kısadır ve bu değer her bir milyar yıl için 30-65 Mgy'ye denk gelmektedir. Cataldo ve diğ. (2009)'in, C<sub>60</sub> ve C<sub>70</sub> fullerene leri için, kozmik ışın bombardımanı ile elde edilen laboratuvar bulguları göstermiştir ki, fullerene lerin tam amorfizasyonu (Şekil 15) 250 Mgy kozmik radyasyon dozunda meydana gelir ki bu miktar yaklaşık 4 Gyr ( $4 \times 10^4$ ) kozmik radyasyona doğrudan maruz kalmaya eşdeğerdir. C<sub>60</sub> ve C<sub>70</sub> fullerene leri, büyük cisimlerin içinde >20 m gömülü olduğu durumlarda ise en az 5 Gyr yaşayabilmektedir.

## 7 Tartışma

Cami ve diğ. (2010), PN tayfı Tc 1'den elde edilen bilgiler doğrultusunda, fullerene ni oluşturabilecek ara mekanizma ürünleri olan büyük karbonlu PAH'ların yeterli miktarda olmadığını söylemiştir. Otsuka ve diğ. (2014)'nin Spitzer/IRS verilerini kullanarak tespit ettiği 11 tane fullerene barındıran PN tayflarında C<sub>60</sub> sentezinde olması gereken ürün olan



**Şekil 15.** Yıkılmış (amorf) fullerene kafesleri. Koyu renkli bölgeler sp<sup>1</sup> olarak hibritleşmiş karbon atomlarını temsil eder, açık renkli bölgeler sp<sup>2</sup> olarak hibritleşmiş karbon atomlarını temsil eder (Cataldo ve diğ. 2009).

PAH'lardan 80 karbonludan (Şekil 5'de gösterilen şemada, "bPAHs" olarak temsil edilmiş fincan şeklindeki koranülen PAH'ları) büyük olanların miktarının az olması, fullerene lerin kozmik ortamdaki sentezlenme mekanizmasına dair olan soru işaretlerini arttırmıştır. Fullerene sentezini başlatan mekanizma için karbon buharının gerçek öncüler olduğu astronomi çevresinde çok uzun yıllar kabul görmüştür. Sıcaklık ve basınç koşullarının değişkenliği içinde UV ışınım ve şok dalgaları süreçlerinde <1700 K yoğunlaşma sıcaklığında oluşan PAH'ların (Jäger ve diğ. 2009) fullerene dönüşebilmesi için, bu sıcaklığın iki katından daha fazla değerlerde yoğunlaşma sıcaklığı (>3500 K (Jäger ve diğ. 2008)) gereklidir. Ya da kütlesi 8 güneş kütlesinden küçük yıldız çevresi zarfları ortamında şoklarla oluşan basınç değerlerinden daha yüksek basınç ortamına ihtiyaç duyar. Ancak farklı bir senaryoda, örneğin Bernal ve diğ. (2019)'ın yaptığı laboratuvar çalışmalarında, taneciklerin şok veya yüksek enerjili iyonlarla SiC yüzeylerinde sentezlenerek fullerene ni oluşturması durumunda ihtiyaç duyulan ekstrem koşullar yerini, fullerene nin halihazırda gözlenmiş olduğu koşullara bırakabilmektedir. Fullerene gözlemlerinin elde edildiği yoğunlaşma sıcaklığı koşullarının yetersizliği, bu konularda çalışan bilim insanlarını fullerene nin kozmik ortamdaki sentez mekanizmasını anlamak için çeşitli senaryolar üretmeye yönlendirmektedir. Evrimleşmiş yıldız ortamdaki gaz fazı kimyasını taklit etmek için laboratuvarla özel Stardust (yıldız tozu) makinesini kullanarak deneyler yapılmıştır (Santoro ve diğ. 2020). Ancak, bu geliştirilmiş yöntemlerle bile, bir karbon buharının (C/C<sub>2</sub>) H<sub>2</sub> ve C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> ile reaktivitesinden, yeterli yoğunlaşma sıcaklığı/basınç koşulları oluşturulmadıkça, hiç bir fullerene oluşumu gözlenmemiştir. Laboratuvarla fullerene oluşumu, gaz fazı yoğunlaşma deneylerinde 3500 K'nin üzerinde sıcaklıklar gerektirir (Jager ve diğ. 1998). 1-5 GPa arasında bir değer için, uygulanan basınç değeri arttıkça ihtiyaç duyulan sıcaklık azalmaktadır. Yıldız

çevresi zarfları, geç tip yıldızların ve ön gezegen disklerinin kabuklarında, karbon tozlarından PAH oluşumu, çok düşük basınçlarda gerçekleşebilmektedir. Oksijen ve karbonca zengin yıldızların rüzgarları için bu değer  $10^{-6}$  mbar olurken, birikim diskleri için 0,01 ile 10 mbar arasındadır, diğer yandan AGB (asimtotik dev kolu) yıldızlarında 0,8 mbar'a kadar olan değerlerde, yoğunlaşma meydana gelebilmektedir (Nowotny ve diğ. 2005). Ancak PAH'ları fullere dönüştürebilecek yetersiz basınç koşullarından dolayı, fulleren oluşum bölgeleri, WR gibi karbonca zengin büyük kütleli yıldızların 3500 K'dan daha sıcak olan şok dalgaları bölgeleri olarak modellenmiştir (Cherchneff ve diğ. (2000);(Jager ve diğ. 1998).

Keszler ve diğ. (2022) normal ve hetero fullerenlerin laboratuvar sentezi süreçlerinde uygulanan basıncı 50-92 kPa değerlerine düşürülebilmiş olsa da bu miktar fullerenleri oluşturacak astrofiziksel ortamlardaki değerlerle kıyaslanamayacak kadar büyüktür. Yine de yıldızlararası ortamının moleküllere sağladığı özgürlük alanı, dinamik koşulların çeşitliliği ve çok uzun zaman ölçekleri hesaba katıldığında sentez için gereken sıcaklık/basınç koşulları arasında lineer bir ilişki kurmak doğru olmaz. 1997 yılından itibaren (Becker ve diğ. 2000) günümüze kadar (Sabbah ve diğ. 2022) yapılan bazı meteor ve meteoritlerin analizinde ve aynı zamanda bazı karbonlu kayaç ve denizlerin altındaki bazı tabakalarda (Becker ve diğ. 2000) fulleren tespit edilmiştir. Güneş sistemi dışındaki mikrometeorların keşfinden sonra gezegen sistemleri arasında malzeme taşınması konusu daha iyi anlaşılmasına başlandı. Tabii ki mesafeler büyük olduğundan dolayı zaman ölçekleri de uzun olmaktadır. Asteroid ve kuyruklu yıldızlar, yıldızlararası uzayda teorik olarak bir milyar yıl ya da daha uzun süreler içinde, birkaç on ışık yılına kadar mesafelere yolculuk yapabilirler (Meisel ve diğ. 2003). Ancak matematiksel simülasyonlar göstermektedir ki bir meteor ya da asteroidin bir yıldız sisteminden atılma olasılığı, göz ardı edilebilecek kadar küçüktür (Dones ve diğ. 1999). Diğer yandan Lopez ve diğ. (2005)'in yapmış olduğu hesaplamalar göstermektedir ki iki farklı gezegen arasında meteorik materyalin yıldızlararası transferinin olasılığı tek yıldızlar için son derece küçüktür. Heymann (1997), bazı meteorlarda (Allende Meteoru) rastlanan fullerenlerin, cisim atmosferde düşerken ısınan yüzeyinin üzerindeki karbon tabakalarından oluşmuş olabileceğini iddia etmiştir. Taskaev ve diğ. (2022) ise Sibirya bölgesine düşen Chelyabinsk meteorunun dünya atmosferinde süzülürken etrafa saçılmış toz parçalarının analizinde rastlanan fullerenlerin kaynağını, süzülme ve düşme sırasında ortaya çıkan yüksek basınç ve sıcaklık etkisiyle sentezlenmiş moleküller olarak belirtmiştir. Tüm bu bulgular fullerenlerin hidrojenle oksun, helyum gibi, gezegenimizdeki nitrojen gibi kolayca reaksiyona girmeyen atmosfer taşıyan karasal gezegenlerde de sentezlenebildiğini söyleyebilmektedir. Bir karasal gezegen, karbonca zengin ortam taşıyan büyük bir çarpışma deneyimlediğinde, yüksek miktarlarda fulleren sentezi meydana gelebilir.

Bu moleküllerin yıldızlararası ortamdaki milyarlarca yıl sürebilen ömürleri hesaba katıldığında, güneş sisteminde gözlenen fullerenler başka sistemlerden gelmiş olabilir, ya da erken güneş döneminden kalmış olabilir. Ancak dünyada ve güneş sisteminde bulunmuş ve dağılmış farklı bir ortamda sentezlenmiş olabileceği de bir araştırma konusu olmalıdır. PN bölgelerinde gözlenen fullerenlerin bir kısmı, yıldız anakol evresindeyken karasal bir gezegeninde sentezlendikten sonra, yıldız anakoldan çıktıktan sonra parçalanmış ve yüksek

hızlarla uzaklara dağılan parçalarının tozları da olabilir. Bu senaryonun geçerli olabilmesi için, fullerenlerin ömürleri gözönüne alındığında, PN'nin merkezindeki yıldızın anakol evresi kütesinin, güneş kütesinden çok daha büyük olması gerekir. Burada bahsedilen senaryolar uzun ve ayrıntılı çalışmalar gerektirmektedir.

## 8 Sonuç

Astronomik kaynaklarda  $C_{60}$ 'ün tespiti, yıldızlararası ortamın (ISM) kimyasal karmaşıklığı ve gaz fazındaki karbon depoları ile ilgili fikirleri değiştirmiştir. ISM'de 40'dan fazla bölgede gözlenmiş olmasına rağmen,  $C_{60}$ 'ün oluşum mekanizması spekülasyon konusu olmaya devam etmektedir. En başta PAHlar olmak üzere, karbon buharları, SiC yüzeyleri gibi ara mekanizma ürünleri önerilmiştir. Fulleren gözlemleri yapmak için herhangi bir astronomik kaynak belirlemek zordur çünkü sentez mekanizması tam olarak anlaşılmış değildir. Gözlemsel, teorik, bilişimsel ve deneysel teknikler günümüzde fulleren sentez hipotezini yeniden gözden geçirmek için en önemli araçlardır. Yüksek kızılöte hassasiyeti ile birlikte, yüksek açısız çözünürlüğe sahip James Webb Uzay Teleskobundan elde edilecek veriler sayesinde astronomik fullerenler daha iyi anlaşılmasına başlanacak ve sentez mekanizmasına dair daha iyi ipuçları elde edilebilecektir.

## Kaynaklar

- Becker L., Poreda R. J., Bunch T. E., 2000, in Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference. p. 1832
- Bernal J. J., Haenecour P., Howe J., Zega T. J., Amari S., Ziurys L. M., 2019, *ApJ*, 883, L43
- Bibikov A. V., Nikolaev A. V., Bodrenko I. V., Borisyuk P. V., Tkalya E. V., 2022, *Phys. Rev. A*, 105, 022813
- Bille A., Buchstaber V., Spodarev E., 2019, preprint, ([arXiv:1910.00846](https://arxiv.org/abs/1910.00846)), ADS
- Cami J., Bernard-Salas J., Peeters E., Malek S. E., 2010, *Science*, 329, 1180
- Campbell E. K., 2020, *Molecular Physics*, 118, e1797918
- Campbell E. K., Maier J. P., 2018, *ApJ*, 858, 36
- Campbell E. K., Holz M., Maier J. P., Gerlich D., Walker G. A. H., Bohlender D., 2016, *ApJ*, 822, 17
- Campbell E. K., Reedy E. S., Rademacher J., Whitby R. J., Hoffman G., 2020, *ApJ*, 897, 88
- Cataldo F., Strazzulla G., Iglesias-Groth S., 2009, *MNRAS*, 394, 615
- Charlesby A., 1996, *Radiation Physics and Chemistry*, 47, 664
- Cherchneff I., Le Teuff Y. H., Williams P. M., Tielens A. G. G. M., 2000, *A&A*, 357, 572, ADS
- D'Hendecourt L. B., Léger A., Verstraete L., Ehren-Ferund P., 1991, in Bussolletti E., Strazzulla G., Papali P., eds, *Solid-State Astrophysics*. p. 91
- Dones L., Gladman B., Melosh H. J., Tonks W. B., Levison H. F., Duncan M., 1999, *Icarus*, 142, 509
- Ehrenfreund P., Foing B. H., 1997, *Advances in Space Research*, 19, 1033
- Foing B. H., Ehrenfreund P., 1994, *Nature*, 369, 296
- García-Hernández D. A., Manchado A., García-Lario P., Stanghellini L., Villaver E., Shaw R. A., Szczerba R., Perea-Calderón J. V., 2010, *ApJ*, 724, L39
- Gillet F. C., Forrest W. J., Merrill K. M., 1973, *ApJ*, 183, 87
- Heymann D., 1997, *ApJ*, 489, L111
- Hou G.-L., Lushchikova O. V., Bakker J. M., Lievens P., Decin L., Janssens E., 2022, preprint, ([arXiv:2207.10311](https://arxiv.org/abs/2207.10311)), ADS
- Jager C., Mutschke H., Henning T., 1998, *A&A*, 332, 291, ADS
- Jäger C., Mutschke H., Henning T., Huisken F., 2008, *ApJ*, 689, 249

- Jäger C., Mutschke H., Henning T., Huisken F., 2009, in Henning T., Grün E., Steinacker J., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 414, Cosmic Dust - Near and Far*. p. 319
- Keszler A. M., Kovács É., Bódis E., Károly Z., Szépvölgyi J., 2022, *Condensed Matter*, 7, 44
- Kroto H. W., Heath J. R., O'Brien S. C., Curl R. F., Smalley R. E., 1985, *Nature*, 318, 162
- Kroto H. W., Heath J. R., O'Brien S. C., Curl R. F., Smalley R. E., 1987, *ApJ*, 314, 352
- Lopez B., Schneider J., Danchi W. C., 2005, *ApJ*, 627, 974
- Meisel D. D., Janches D., Mathews J. D., 2003, in Witt A. N., ed., *Astrophysics of Dust*. p. 96
- Murga M. S., Akimkin V. V., Wiebe D. S., 2022, *MNRAS*, 517, 3732
- Nowotny W., Aringer B., Höfner S., Gautschi-Loidl R., Windsteig W., 2005, *A&A*, 437, 273
- Oganov A. R., Hemley R. J., Hazen R. M., Jones A. P., 2013, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75, 47
- Otsuka M., Kemper F., Cami J., Peeters E., Bernard-Salas J., 2014, *MNRAS*, 437, 2577
- Sabbah H., Carlos M., Jenniskens P., Shaddad M. H., Duprat J., Goodrich C. A., Joblin C., 2022, *ApJ*, 931, 91
- Santoro G., ve diğ., 2020, *Review of Scientific Instruments*, 91, 124101
- Taskaev S., ve diğ., 2022, *European Physical Journal Plus*, 137, 562
- Walker G. A. H., Campbell E. K., Maier J. P., Bohlender D., Malo L., 2016, *ApJ*, 831, 130

**Access:**

M23-0393: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.