

Organska kemija na svemirskim tijelima

Jakovčević, Andrija

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:577135>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Andrija Jakovčević

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Andrija Jakovčević

ORGANSKA KEMIJA NA SVEMIRSKIM TIJELIMA
ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

prof.dr.sc. Veljko Filipan

prof.dr.sc. Igor Sutlović

doc.dr.sc. Iva Movre Šapić, zamjena

Zagreb, rujan 2022.

Zahvaljujem se svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću na vrlo zanimljivoj temi, savjetima i susretljivosti prilikom izrade završnog rada. Posebno želim zahvaliti svojoj obitelji na velikoj podršci i strpljenju.

SAŽETAK

Organski spojevi su spojevi koji sadrže ugljik. Iznimku čine spojevi koji se svrstavaju u anorganske ili pak kompleksne spojeve, poput, primjerice, grafita ili dijamanta. U prošlosti su, prema vitalističkoj teoriji, samo spojevi koji se mogu pojaviti u živim organizmima bili klasificirani kao organski spojevi. Poznato je da je takva klasifikacija i dalje prisutna u glavama većine ljudi, odnosno, gotovo svih onih kojima profesija ili područje zanimanja ne nalaže bliži doticaj s kemijom. Stoga je za pretpostaviti da bi takvima i sam spomen organskih molekula na nebeskim tijelima nužno bio asocijacija na ostvarenje znanstvene fantastike ili pak na nemoguć događaj, ovisno o tome vjeruje li osoba u postojanje života na drugim planetama ili ne. No, iznenađujuća je činjenica da u svemiru ipak prevladavaju organske molekule. U ovome radu dan je sažetak organskih spojeva na nebeskim tijelima i u međuzvjezdanom prostoru u svrhu upoznavanja čitatelja s čitavom paletom složenih organskih spojeva koji postoje u Svemiru i koji, kao takvi golicaju maštu za buduća istraživanja koja bi trebala odgovoriti na izuzetno zanimljiva pitanja, kao što su: *Kako zvijezde i galaksije uspijevaju sintetizirati toliko veliku količinu organskih tvari?* Ili pitanje svih pitanja: *Je li možda ispravna pretpostavka da je život ipak došao iz svemira u obliku mikroskopskih organizama prisutnih na meteoritima ili česticama prašine koji su nekako preživjeli svoj udar na Zemlju?* Jer kako se čini, dijelovi potrebni za izgradnju aminokiselina i nukleobaza rasprostranjeni su diljem svemira te vrlo lako opstaju u jako teškim uvjetima okoline. Kako svemirska tehnologija sve više napreduje, logično je nadati se da će neka buduća istraživanja dati odgovore i na ta velika pitanja.

Ključne riječi: organski spojevi, nebeska tijela, međuzvjezdani prostor, život, svemirska tehnologija, teleskopi, spektrometrijska analiza

ABSTRACT

Organic compounds are compounds that contain carbon. The exception is compounds that are classified as inorganic or complex compounds, such as, for example, graphite or diamond. In the past, according to the vitalist theory, only compounds that can occur in living organisms were classified as organic compounds. It is known that such a classification is still present in the minds of most people, that is, almost all those whose profession or field of occupation does not require close contact with chemistry. Therefore, it can be assumed that for such people, the mere mention of organic molecules on celestial bodies would necessarily be an association with the realization of science fiction or an impossible event, depending on whether a person believes in the existence of life on other planets or not. But the surprising fact is that organic molecules still predominate in the Universe. In this paper, a summary of organic compounds on celestial bodies and in interstellar space is given in order to introduce the reader to the whole range of complex organic compounds that exist in the Universe and which, as such, tickle the imagination for future research that should answer extremely interesting questions, such as: *How do stars and galaxies manage to synthesize such a large amount of organic matter?* Or the question of all questions: *Is it perhaps correct to assume that life did come from Space in the form of microscopic organisms present on meteorites or dust particles that somehow survived their impact on Earth?* Because as it seems, the parts necessary for the construction of amino acids and nucleobases are spread throughout the Universe and survive very easily in very harsh environmental conditions. As space technology continues to advance, it is logical to hope that some future research will provide answers to these big questions as well.

Keywords: *organic compounds, celestial bodies, interstellar space, life, space technology, telescopes, spectrometric analysis*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ORGANSKI SPOJEVI.....	2
3. ORGANSKI SPOJEVI U SUNČEVOM SUSTAVU.....	3
3.1. Sunce	4
3.2. Zemlja	5
3.3. Planeti i planetarni sateliti	6
3.3.1. Jupiter, Saturn, Uran, Neptun i njihovi sateliti	6
3.3.2. Titan	7
3.4. Meteoriti	8
3.5. Meteoroidi i međuplanetarne čestice prašine	11
3.6. Kometi	12
3.7. Asteroidi	15
3.8. Transneptunski objekti	16
3.9. Ekstrasolarni planeti	17
4. ORGANSKI SPOJEVI U OSTALIM GALAKSIJAMA.....	18
5. ORGANSKI SPOJEVI U MEĐUZVJEZDANOM MEDIJU	21
5.1. Crni oblaci	22
5.2. Orionova maglica	23
5.3. Refleksijske maglice.....	24
5.4. Difuzni međuzvjezdani oblaci	24
6. SVEMIRSKA TEHNOLOGIJA	26
6.1. Detektori i teleskopi na milimetarskim i submilimetarskim valnim duljinama	26
6.2. Spektrometrijska analiza.....	29
7. ZAKLJUČAK	33
8. LITERATURA.....	36

1. UVOD

Organski spojevi su spojevi koji sadrže ugljik. Iznimku čine spojevi koji se svrstavaju u anorganske spojeve, na primjer ugljikov dioksid, kompleksne spojeve kao što su metalni karbonili, ili pak alotropske modifikacije ugljika, poput, primjerice, grafita ili dijamanta. U prošlosti su, prema vitalističkoj teoriji, samo spojevi koji se mogu pojaviti u živim organizmima bili klasificirani kao organski spojevi. Poznato je da je takva klasifikacija i dalje prisutna u glavama većine ljudi, odnosno, gotovo svih onih kojima profesija ili područje zanimanja ne nalaže bliži doticaj s kemijom. Stoga je za pretpostaviti da bi takvima i sam spomen organskih molekula na nebeskim tijelima nužno bio asocijacija na ostvarenje znanstvene fantastike ili pak na nemoguć događaj, ovisno o tome vjeruje li osoba u postojanje života na drugim planetama ili ne. No, otkad je njemački kemičar Friedrich Weller, 1828. godine, isparavanjem vodene otopine amonijevog cijanata slučajno dobio ureu, koja je, kako je općepoznato, krajnji produkt metabolizma sisavaca, poimanje organskih spojeva se promijenilo.

Danas su poznati mnogi organski spojevi koji nemaju puno veze sa spojevima koji se nalaze u živim organizmima i jednostavna prisutnost organskih spojeva nužno ne znači postojanje složenih bioloških molekula, ili čak nadalje, života.

Modernizacija svemirske tehnologije omogućila je otkrivanje velikog broja različitih organskih molekula u beskrajnim prostranstvima svemira. Kako su te tvari nastale i kakav je njihov utjecaj na razvoj našeg Sunčevog sustava ili čak života na Zemlji je fenomen apsolutno vrijedan istraživanja.

U ovome radu bit će sustavno prikazana čitava paleta organskih spojeva koji lutaju svemirom. U prvome dijelu dat će se teorijski uvod u organske spojeve, u drugome dijelu govorit će se o organskim molekulama prisutnima u Sunčevom sustavu, dok će u trećem dijelu biti govora o organskim molekulama koje se nalaze na nebeskim tijelima u svemirskim prostranstvima, van Sunčevog sustava. U četvrtom dijelu bit će riječi o molekulama koje putuju međuzvjezdanim prostranstvima. Taj je dio izuzetno zanimljiv i za Zemlju, jer asteroidi i meteoriti, koji se iz drugih svjetova ruše na Zemlju, nisu samo pocrnjele stijene kakvih izvorno ima u ogromnim količinama na Zemlji, već su to dragocjena nalazišta u kojima znanstvenici pronalaze ostatke organskih spojeva. U posljednjem poglavlju raspravljat će se o raznim tehnikama koje se koriste za pretraživanje svemira. Cilj ovoga rada je sekundarnim istraživanjem, odnosno, proučavanjem

dostupne literature, dati sažet pregled organskih spojeva u svemirskim prostranstvima te tako pokazati, da unatoč uvriježenom vjerovanju, u svemiru ipak prevladavaju organski spojevi, kako u Sunčevom sustavu, tako i na dalekim galaksijama koje su formirane prije nekoliko milijardi godina. Kako je to moguće i kako zvijezde i galaksije uspijevaju sintetizirati tako veliku količinu složenih organskih tvari, pitanja su, na koje će, nadajmo se, znanost dati odgovor u bliskoj budućnosti, uz, naravno, očekivani ubrzani daljni napredak svemirske tehnologije.

2. ORGANSKI SPOJEVI

Ugljik je izrazito rasprostranjen element, kako na Zemlji i u Zemljinoj atmosferi, tako i u svemiru. Ugljikovi atomi tvore vrlo stabilne jednostruke, dvostruke i trostruke veze, povezujući se međusobno i s drugim elementima. Takva sposobnost vezivanja razlog je postojanja enormnog broja ugljikovih spojeva i na Zemlji i u svemiru. Ugljik, poslije vodika, tvori više spojeva nego svi ostali kemijski elementi zajedno. Toliko je svestran element da može i sam formirati spojeve različitih geometrija u obliku grafita, fulerena i dijamanta, koji se nazivaju alotropske modifikacije ugljika . Kemiju ugljikovih spojeva, osim karbida, karbonata, cijanida, metalnih karbonila i alotropskih modifikacija ugljika, proučava organska kemija.

Spajanjem ugljika i vodika nastaju različiti oblici ugljikovodika, koje dijelimo na alifatske ili acikličke ugljikovodike (alkane, alkene i alkine), prstenaste ili cikličke ugljikovodike i arene, odnosno aromatske ugljikovodike.

Pomoću funkcionalnih skupina, kao što su, primjerice, hidroksilna skupina, karbolna skupina, karboksilna skupina i druge, stvaraju se različite klase organskih molekula, kao što su alkoholi, fenoli, karboksilne kiseline i drugi. Veće organske molekule u živim sustavima, poput ugljikohidrata, lipida, proteina i nukleinskih kiselina imaju svoje biološke funkcije. Te biološke molekule izgrađene su na strukturnim jedinicama, poput aminokiselina za proteine, ili purina i pirimidina za nukleinske kiseline.

Isto tako, ugljik može biti dio i amorfnih spojeva bez određene strukture, kao primjerice, ugljen, koji nastaje prirodnim putem ili pak čađa koja nastaje umjetno.

Potraga i otkrivanje svih ovih različitih oblika organske tvari u raznim dijelovima svemira predmet su istraživanja moderne astronomije.

3. ORGANSKI SPOJEVI U SUNČEVOM SUSTAVU

Sunčev sustav sastoji se od zvijezde Sunca i nebeskih tijela različitih veličina, a na okupu ih drži zajednička gravitacijska sila. Sustav se sastoji od osam planeta, pet patuljastih planeta, mnoštvo njihovih prirodnih satelita (185), bezbroj sitnih tijela poput planetoida, kometa, tijela koja pripadaju Kuiperovom pojasu, meteoroida i međuplanetarne prašine. [1] Sunce je zvijezda, poput stotine milijardi drugih u galaksiji Mliječni put. Ono je plinovito samosvjetleće tijelo koje zrači energijom koja se oslobađa nuklearnom fuzijom. Fizičko stanje tijela određuje upravo Sunčeva energija zračenja u Sunčevom sustavu. Četiri planeta iz unutrašnjosti (Venera, Merkur, Mars i Zemlja) su stjenoviti i nazivaju se još terestrički planeti, a četiri vanjska (Saturn, Jupiter, Neptun i Uran) su plinoviti ili ledeni i nazivaju se još jovijanski planeti. Većina planeta ima satelite koji kruže oko njih; Zemlja ima jedan (Mjesec), a Mars ima dva (Fobos i Deimos), dok Merkur i Venera nemaju nijednog. Jovijanski planeti imaju desetke satelita, a neki su toliko veliki da bi se mogli kvalificirati kao planeti kad bi kružili oko Sunca. Što se tiče Jupiterovih satelita, glavni su Europa, Kalisto, Ganimed i Io. Najveći satelit Saturna je Titan, a najveći satelit Neptuna je Triton. Iza Neptuna nalaze se deseci tisuća manjih tijela, od kojih je najpoznatije i najveće tijelo Pluton.

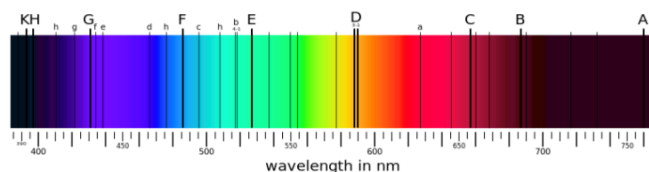
Jovijanski planeti imaju puno veću masu od terestričkih planeta pa je stoga i njihovo gravitacijsko privlačenje puno jače. Iz tog razloga jovijanski planeti mogu zadržati sve plinove u svojoj atmosferi, dok terestrički planeti to ne mogu pa su tako izgubili većinu svog izvornog sadržaja vodika. Dominantni plinovi na terestričkim planetima su CO_2 (ugljikov (IV) oksid), N_2 (dušik) i O_2 (kisik), dok molekularni vodik čini većinu atmosfere jovijanskih planeta. No, nemaju samo planeti svoje atmosfere. I Saturnov satelit Titan ima, primjerice, atmosferu koja se prvenstveno sastoji od dušika N_2 i metana CH_4 .

Opća percepcija kemijskog sastava zemaljskih planeta, kometa i asteroida je da se sastoje od metala, minerala i leda. Međutim, novija istraživanja dokazuju da su i organske tvari u tim tijelima zastupljene u jako velikom udjelu. Među tim tijelima, Zemlja je najbolje proučena, ali organske tvari na Zemlji su jedinstvene u Sunčevom sustavu jer su uglavnom biološkog porijekla, odnosno, povezane sa životom na Zemlji. Asteroidi i kometi mogu se fizički i kemijski proučavati preko meteorita i mikrometeorita koji padnu na Zemlju. Razvojem tehnologije u

posljednjih nekoliko desetljeća omogućeno je ne samo spektroskopsko promatranje uz pomoć teleskopa, već i izravno prikupljanje uzoraka slanjem svemirskih sonde na planete, satelite i komete. Time su se, očekivano, naša saznanja o organskim spojevima u Sunčevom sustavu izrazito obogatila.

3.1. Sunce

Kako se površinska temperatura Sunca kreće oko 5800 K, postojanje molekula na Suncu nije bilo očekivano, zato što molekule obično disociraju na višim temperaturama. Stoga fotosferskim spektrom Sunca dominiraju atomske apsorpcijske linije, a to prikazuje slika 1.



Slika 1: Sunčev spketar sa Fraunhoferovim linijama. Preuzeto s [1a].

No, otkriveno je nekoliko dvoatomnih molekula preko njihovih elektronskih prijelaza u solarnoj fotosferi, a to su magnezijev hidrid MgH , dvoatomni ugljik - dikarbon C_2 , metilidin CH te CN , dok se u infracrvenom zračenju mogu otkriti vibracijsko-rotacijske linije CO , CH , NH i OH . U Sunčevim pjegama, temperatura je mnogo niža te se kreće oko 3300 K. U velikim Sunčevim pjegama detektirani su i SiO , HF , HCl i H_2O . [2]

3.2. Zemlja

Organska tvar na Zemlji prvenstveno je biološkog porijekla, no, kako je vidljivo iz tablice 1., najčešći oblik organske tvari nije biomasa u biljkama i životinjama, već je kerogen, ostatak žive tvari (uključujući bakterije) iz prošlosti [2]. Pod utjecajem visokog tlaka i temperature, kerogen se postupno pretvara u druge stabilnije oblike ugljika, na primjer, grafit i dijamant. Iako kerogen i njegovi nusproizvodi, ugljen i nafta, sadrže biopotpise u svojim strukturama, ti su potpisi potpuno izgubljeni u krajnjim proizvodima grafita i dijamanta [2].

Atmosfera Zemlje razlikuje se od atmosfere drugih planeta u smislu da je kemijski sastav Zemljine atmosfere biološkim procesima značajno izmijenjen u odnosu na prvobitni sastav. Visoka zastupljenost O_2 i CH_4 u sadašnjoj atmosferi potječe iz bioloških izvora (fotosinteza, bakterije, itd.). Isto tako, dušikov (I) oksid (N_2O) proizvode bakterije i alge.[3] Atmosfera Zemlje, dakle, sadrži spektroskopske potpise koji pokazuju prisutnost života na Zemlji, te stoga, potencijalni promatrač iz svemira može spektroskopskom analizom Zemljine atmosfere vrlo lako zaključiti da tu postoji živi svijet.

Tablica 1: Zalihe organske tvari na Zemlji. Preuzeto iz [2]

Pools	Fractional quantity (Gt)
Atmosphere	720
Oceans	38 400
Total inorganic	37 400
Surface layer	670
Deep layer	36 730
Total organic	1000
Lithosphere	
Sedimentary carbonates	>60 000 000
Kerogens	15 000 000
Terrestrial biosphere (total)	2000
Living biomass	600–1000
Dead biomass	1200
Aquatic biosphere	1–2
Fossil fuels	4130
Coal	3510
Oil	230
Gas	140
Other (peat)	250

3.3. Planeti i planetarni sateliti

3.3.1. Jupiter, Saturn, Uran, Neptun i njihovi sateliti

Organske molekule u plinovitoj fazi obično se nalaze u atmosferama planeta Jupitera, Saturna, Urana, Neptuna, kao i satelita poput Titana i Tritona. Ti se planeti i sateliti proučavaju uz pomoć zemaljskih i orbitalnih teleskopa. Razvojem infracrvene spektroskopije, sedamdesetih godina prošlog stoljeća, u spektru Jupitera otkrivene su molekule poput CH_3D , CO , H_2O , C_2H_2 , C_2H_6 i sličnih [4]. Tada je NASA poslala u Svemir osam međuplanetarnih vozila. Primjerice, vozilom Galileo Orbiter detaljno je proučen kemijski sastav Jupitera i mehanizam nekih kemijskih reakcija u atmosferi Jupitera pa je tako zaključeno da metan nastaje ravnotežnom reakcijom vodika H_2 i ugljikovog (II) oksida CO , dok fotodisocijacijom metana nastaju etan, acetilen i poliacetileni.

Neptun, plavi ledeni div, ima atmosferu koja se sastoji od dva dijela, gornjeg i donjeg sloja. U gornjem sloju prevladavaju kistali metanovog leda, dok najveći dio donjeg sloja otpada na amonijak i vodikov sulfid koji onemogućuju promatranje površine Neptuna.

Zbog velike udaljenosti od Sunca, temperature na površini vanjskih tijela Sunčevog sustava su niske, a molekule plinovite faze često se kondenziraju u svoje odgovarajuće oblike čvrste faze. Osim vodenog leda, vjeruje se da su smrznuti ugljikovodici, na primjer, CH_4 , CH_3OH , C_2H_6 , također prisutni na ledenim površinama mnogih planetarnih satelita, uključujući Triton, Ganimed i Kalisto. Ti se ledeni ugljikovodici identificiraju spektroskopskim metodama. Tehnikom infracrvene spektroskopije led je detektiran na satelitima Jupitera, Saturna i Urana, kao i na Tritonu (satelit Neptuna) i Charonu (satelit Plutona) [5, 6]. Na Tritonu i Plutonu otkriven je ledeni CO , dok je ledeni CO_2 otkriven na Tritonu, Arielu, Umbrielu i Titaniji. Drugi ledeni molekularni oblici uključuju N_2 , HCN , metan, acetilen, etilen, etan i O_3 . Pretpostavlja se da su u malim količinama prisutne i organske vrste poput nitrila, ketona i estera. [2]. Ovdje valja napomenuti da led ne mora nužno biti kristalne strukture, već može biti i amorfan poput amorfnih silikata.

Spektroskopskim opažanjima spektrometrom za vidljivo infracrveno mapiranje (VIMS) na svemirskoj letjelici Cassini Saturnovih satelita Iapetus, Phoebe i Hyperion pronađeni su dokazi postojanja aromatskih i alifatskih ugljikovodika [7], s time da se u daljnjim istraživanjima očekuje detekcija složenijih organskih tvari. [8].

3.3.2. Titan

Veliki Saturnov mjesec Titan privlači pažnju znanstvenika od samog svog otkrića 1655. godine. U ovome radu Titan je zaslužio zaseban dio iz razloga što je danas poznato da Titan obiluje organskim tvarima, kako na svojoj površini tako i u atmosferi. Infracrvena promatranja atmosfere Titana započela su s misijama Voyagera 1980. Promatranja pomoću infracrvenog radiometra interferometra i spektrometra (IRIS) na svemirskim letjelicama Voyager i ISO otkrila su veliku paletu organskih molekula u Titanu, uključujući C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_3C_2H , C_4H_2 , HCN , HC_3N , CH_3CN , i tako dalje [9, 10]. Promatranja sa Zemlje nude veću prostornu rezoluciju i mogu mapirati distribuciju molekula kao što su HCN , CO i HC_3N . Letjelica Cassini stigla je u Saturnov sustav 2004. godine nakon gotovo 7 godina putovanja. Dio letjelice Cassini koji se spustio na Titan zvao se Hygens. To istraživanje iz neposredne blizine s kompozitnim infracrvenim spektrometrom (CIRS) omogućilo je otkrivanje raznih ugljikovodika na srednjim geografskim širinama Titana. Na taj su način otkriveni i mapirani C_2H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 , C_4H_2 , C_3H_4 , a isto tako i benzen C_6H_6 [2].

Ionski neutralni maseni spektrometar (INMS) na letjelici Cassini promatrao je oblake i otkrio da se sastoje od N_2 , CO_2 i metana [11]. Takvo otkriće dalo je nadu u mogućnost postojanja podzemnog rezervoara tekućine sastavljenog od vode i ugljikovodika.

Atmosfera Titana sadrži krute čestice slične izmaglici koje su rezultat kondenzacije organskih tvari. Navedena promatranja navode na zaključak da se metan pretvara u složene spojeve ugljikovodika i nitrila u atmosferi Titana [11]. Točan kemijski sastav čestica maglice nije poznat, iako se pretpostavlja da se radi o složenim organskim tvarima sličnim tolinima [12]. Ove složene čvrste tvari nastaju izlaganjem plinovitih smjesa N_2 i CH_4 električnim pražnjenjima u uvjetima hladne plazme. Hygens je otkrio da su dušik i metan glavni sastojci atmosfere Titana te da polarne regije satelita pokazuju brojna jezera tekućeg metana i etana, vjerojatno s mnogim drugim organskim tvarima otopljenima u njima. Na primjer, tekući etan identificiran je u Titanovom sjevernom jezeru Ontario Lacus pomoću Cassinijevog instrumenta VIMS [13]. Ukupna količina metana u atmosferi Titana sadrži 360 000 gigatona (Gt) ugljika. Količina ugljika u etanu i metanu u nekoliko stotina jezera ili mora procjenjuje se na 16 000–160 000 Gt. Valja napomenuti da su ti, takozvani, tekući ugljikovodici, do danas jedina stabilna tekuća tijela otkrivena na površini drugih nebeskih tijela. Kako se površinska temperatura na Titanu kreće oko

90 K, postojanje spojeva metana i etana u tekućem stanju bila je očekivana, što je i znanstveno potvrđeno 2007. godine. Pješčane dine pokrivaju 20% površine Titana i sadrže 160 000–640 000 Gt ugljika [14]. Ukupna količina ugljikovodika na Titanu stoga je veća od rezervi nafte i plina na Zemlji, koje su vidljive u tablici 1. Činjenica da ima više pijeska nego tekućine sugerira da su organske tvari na Titanu prvenstveno u krutom obliku [13].

3.4. Meteoriti

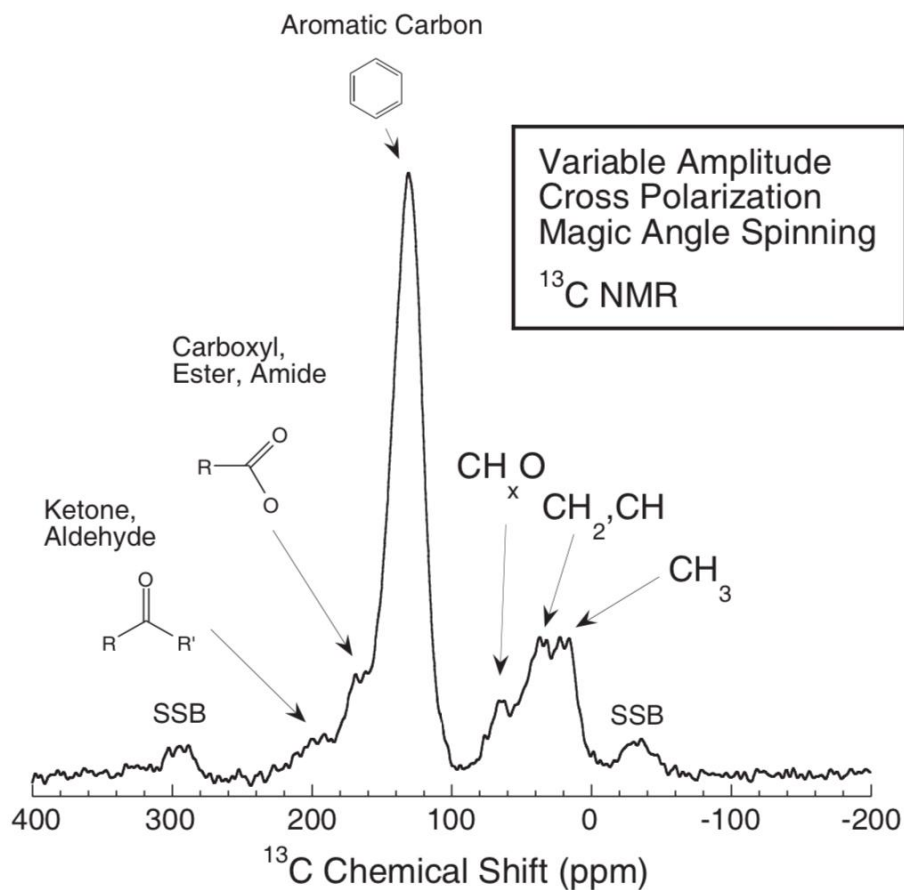
Meteorit se može definirati kao komadić stijene ili željeza, kometa, meteoroida ili pak planetoida (asteroida), a pao je iz svemira na površinu Zemlje [2]. Oko 10 tona meteorita svake godine padne na Zemlju, dok je u prošlosti ta količina bila mnogo veća. Meteoriti su obično napravljeni od željeza, nikla i silikata. Neki meteoriti, zvani hondriti, sadrže okrugle inkluzije veličine milimetra, zvane hondrule, koje su izvorni rastaljeni materijal kristaliziran tijekom formiranja meteorita. Vjeruje se da su hondrule prve čvrste tvari koje su se kondenzirale iz međuzvjezdanog plina koji je formirao solarnu maglicu. Posebno su zanimljivi mali udjeli hondrita koji sadrže visok sadržaj ugljika; klasificiraju se kao ugljični hondriti. Smatraju se najprimitivnijim meteoritima. Najpoznatiji u ovoj klasi su meteoriti Murchison, Murray i Orgueil. Još je od sedamdesetih godina prošlog stoljeća poznato da je prebiotička organska tvar prisutna u primitivnim ugljičnim hondritnim meteoritima [15, 16]. Upotrebom različitih otapala mogu se ekstrahirati i analizirati različite komponente topljive frakcije. Među organskim tvarima koje se mogu ekstrahirati su karboksilne kiseline [17], aminokiseline [18], aromatski ugljikovodici [19], heterociklički spojevi (adenin, gvanin, hipoksantin, ksantin, uracil, timin, citozin itd.) [20], alifatski ugljikovodici [21], amini, amidi [22], alkoholi, aldehidi, ketoni i šećeri [23]. Iz masenog spektra ekstrakata Murchisona pronađeni su šećeri, šećerni alkoholi, šećerne kiseline i dikarboksilne šećerne kiseline (Slika 3.5.).

	Sugars	Sugar Alcohols	Sugar Acids	Dicarboxylic Sugar Acids	Deoxy Sugar Acids			
3C	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Dihydroxyacetone	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Glycerol 160 nmol/g (100%)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Glyceric acid 80 nmol/g	—				
4C	—	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Erythritol & Threitol (1%)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Erythronic & Threonic acid (4nmol/g)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{CO}_2\text{H} \end{array}$ Tartaric & Mesotartaric acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2-Methyl glyceric acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2, 4 Dihydroxy butyric acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ 2, 3 Dihydroxy butyric acid (& diastereomer)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 3, 4 Dihydroxy butyric acid
5C	—	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Ribitol & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Ribonic acid & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CO}_2\text{H} \end{array}$ 2, 3, 4-Trihydroxy Pentanedioic acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2-Deoxypentonic acids			
6C	*	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Glucitol & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Gluconic acid & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CO}_2\text{H} \end{array}$ Glucaric acid & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2-Deoxyhexonic acids	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 3-Deoxyhexonic acid		

Slika 3.5.:Primjeri organskih tvari iz Murchinsonovog meteorita. Slika je preuzeta iz [23].

Molekularna analiza visoke rezolucije topive komponente meteorita Murchison identificirala je 14000 molekularnih spojeva i vjerojatno milijune različitih struktura [24]. Ova opažena molekularna raznolikost sugerira da je međuzvezdana kemija iznimno aktivna i bogata. Može se konstatirati da su svi biološki relevantni organski spojevi prisutni u meteoritima koji sadrže ugljik, iako je hipoteza da su svi oni nebiološkog podrijetla. Što se tiče zastupljenosti, aromatski ugljikovodici čine najveći udio topivih organskih spojeva u meteoritima, a slijede ih karboksilne kiseline [25]. Isto tako, više od 90 pojedinačnih aminokiselina identificirano u meteoritima. Ovaj broj je daleko veći od 20 aminokiselina koje se nalaze u oblicima života na Zemlji.

Preostala (i većina, >70%) organske tvari je u obliku netopljivih makromolekularnih krutina, koje se sada obično nazivaju netopiva organska tvar (skraćeno, IOM – insoluble organic matter) [16]. Moderna pirolizna plinska kromatografija karakterizira IOM kao pretežno aromatski, dok spektroskopija nuklearne magnetske rezonancije čvrstog stanja pronalazi različite funkcionalne skupine (Slika 3.6).



Slika 3.6.: Funkcionalne skupine identificirane u Murchinsonovoj netopivoj organskoj tvari (IOM). Slika je preuzeta iz [2].

Oslobađanje molekula koje sadrže kisik kao što su fenoli, propanon i heterociklički dušikovi spojevi kao rezultat pirolize sugerira da IOM sadrži nečistoće. Struktura IOM-a stoga se može sažeti kao složena organska krutina sastavljena od aromatskih i alifatskih funkcionalnih skupina, kao i funkcionalnih skupina koje sadrže kisik. [2]

Usporedba IOM-a u meteoritima Murchison, Tagish Lake, Orgueil i EET 92042 pokazuje nevjerojatnu sličnost [26]. Grubo govoreći, kemijska struktura IOM-a nalikuje kerogenu na Zemlji [27].

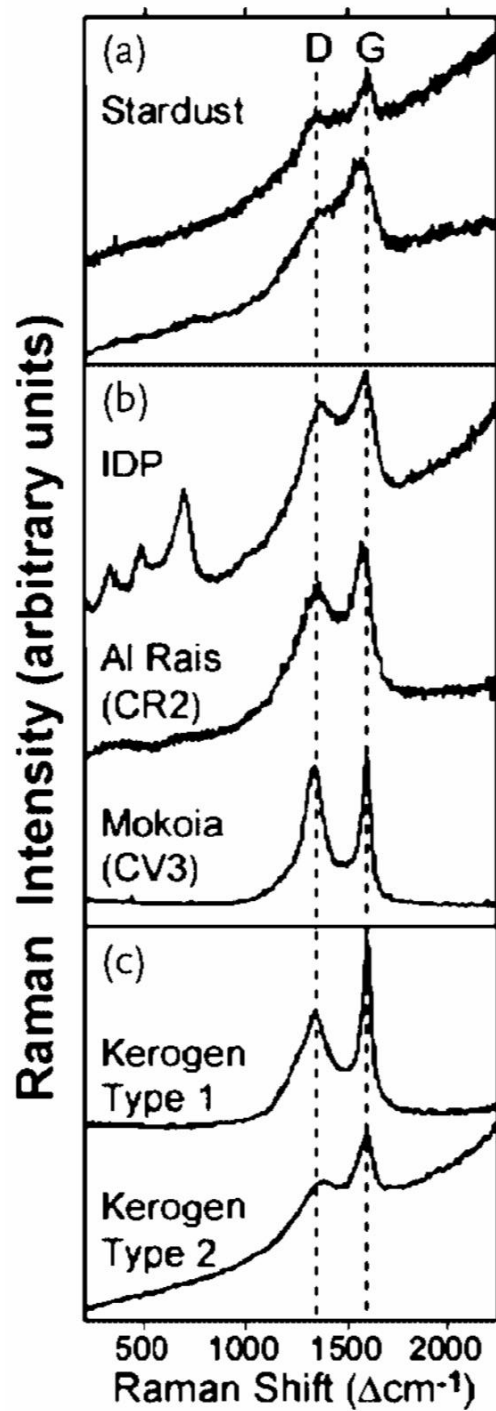
3.5. Meteoroidi i međuplanetarne čestice prašine

Međuplanetarni prostor ispunjen je čvrstim česticama. Malo nebesko tijelo veličine od jednog do nekih desetak centimetara naziva se meteoroid. Po građi može biti i kompaktan i šupljikav, poput kamenja na Zemlji.

Interplanetarne čestice prašine (skraćeno, IDP – interplanetary dust particles) čestice su mikronske veličine s asteroida ili kometa koje ulaze u Zemljinu atmosferu. Iz tragova udara na satelitu Long Duration Exposure Facility Satellite, procjenjuje se da 20 000 do 60 000 tona IDP-a u rasponu mase od 10^{-9} do 10^{-4} g stigne do Zemlje svake godine [28]. Vjeruje se da IDP potječu od repova kometa i međusobnih sudara asteroida. Te čestice su nepravilnog oblika i sadrže led, silikate, ugljične materijale, uključujući amorfni ugljik, nanodijamante, grafit i makromolekularne organske tvari [29, 30]. Unatoč svojoj maloj veličini, IDP-ovi daju vrijedne uzorke materijala primordijalnog Sunčevog sustava za proučavanje u laboratoriju. Laboratorijska analiza IDP-a prikupljenih iz stratosfere visokoletećim zrakoplovima s kolektorima aerogela pokazala je da su bogati organskim sadržajem. Spektroskopskim metodama otkrivene su alifatske CH_2 i CH_3 , karbonilne (CDO) i ugljikove prstenaste strukture u IDP [31].

3.6. Kometi

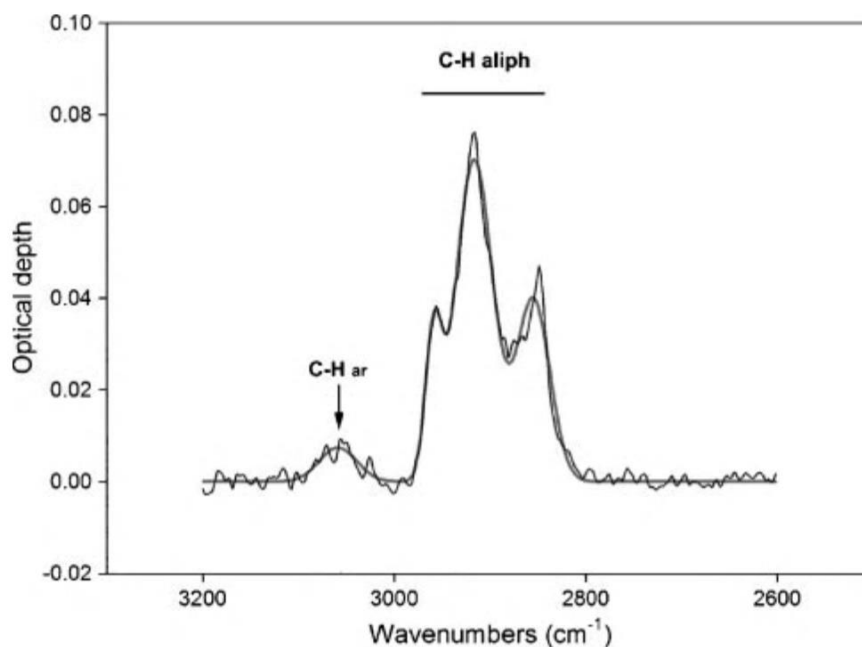
Budući da kometi nastaju u najhladnijim područjima Sunčeve maglice, nisu bili podvrgnuti značajnoj toplinskoj i kemijskoj obradi sve dok nisu krenuli put unutrašnjosti Sunčevog sustava. Iz tog razloga, oni čuvaju zapis o kemijskom sastavu primitivne Sunčeve maglice. Studije kemijskog sadržaja kometa su stoga vrlo važne za istraživanje kemijske veze između Sunčevog sustava i njegovog matičnog molekularnog oblaka. Spektroskopska promatranja u ultraljubičastim, vidljivim, infracrvenim i milimetarskim valovima otkrila su mnoge molekularne vrste u kometima, pokazujući da je njihov kemijski sastav mnogo složeniji od "prljavih snježnih lopti" [2]. Spektroskopija milimetarskih valova materijala koje ispušta plin iz kometa dovela je do otkrića mnogih organskih molekula. Molekule su prvi put otkrivene u kometima 1985. godine, kada su H_2O i HCN identificirani u kometu Halley [32, 33]. Iskoristivši blizinu kometa Hyakutake 1996. godine, znanstvenici su otkrili HNC , CH_3CN , HNCO i OCS spektroskopijom milimetarskih valova i detektirali C_2H_2 , CH_4 , C_2H_6 infracrvenom spektroskopijom. Promatranja kometa Hale-Bopp 1997. godine rezultirala su detekcijom CO , CS , SO , SO_2 , HCN , HNC , OCS , H_2S , CH_3OH , H_2CO , H_2S , HNCO , HC_3N , CH_3CN , NH_2CHO , HCOOH , NH_2CHO i tako dalje [34, 35]. Najveće molekule otkrivene u kometu su acetaldehid (CH_3CHO), metil metanoat (CH_3OCHO) i etilen glikol ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) [36]. Molekule detektirane u infracrvenom zračenju uključuju metan CH_4 , etan C_2H_6 , acetilen C_2H_2 , H_2O , CO , HCN i CH_3OH [37]. Također su identificirani vodeni led, alkoholi i kiseline. Prisutnost hlapljivih ledova kao što su CO i CH_4 pokazuje da su ti ledovi netaknuti i da su vrlo vjerojatno ostali sačuvani tijekom cijele povijesti Sunčevog sustava [37, 38]. Maseni spektrometri na svemirskim letjelicama koje su 1986. godine poslane kako bi presrele Halleyjev komet prikupili su 5000 čestica i pronašli dokaze o anorganskim mineralima kao i organskim vatrostalnim materijalima koji se sastoje od H, C, N i O [39, 40]. Čestice izbačene s kometa 81P/Wild 2 prikupila je svemirska letjelica Stardust. Nakon što su uzorci vraćeni na Zemlju, analizirani su različitim tehnikama, uključujući spektrometriju mase, kromatografiju, X-zrake, IR i Raman spektroskopiju. Otkriven je širok raspon aromatskih i drugih organskih spojeva, sličan onima u meteoritima, ali s višim sadržajem O i N (Slika 3.7.).



Slika 3.7.: Ramanov spekter čestice sa Stardusta (a) u usporedbi s interplanetarnim česticama prašine (b), te sa zemaljskim kerogenom (c). Slika je preuzeta iz [2].

Infracrveni spektar uzorka sa Stardusta pokazao je prisutnost velike količine alifatskih ugljikovodika, te manju količinu aromatskih ugljikovodika. Iako je udio aromatskih spojeva u ukupnoj organskoj tvari uzorka bio malen, istodobno je obilovao dušikom. Detekcija aromatskih nitrila od posebnog je značaja jer oni pridonose stvaranju prebiotičkih molekula potrebnih za nastanak života na ranoj Zemlji [41].

Slika 3.8. prikazuje Fourierovu transformaciju infracrvenog spektra materijala s kometa 81P/Wild 2 koje je vratila misija Stardust. Slika je preuzeta iz [2].



Slika 3.8.: Fourierova transformacija infracrvenog spektra materijala s kometa 81P/Wild 2 koje je vratila misija Stardust. Slika je preuzeta iz [2].

3.7. Asteroidi

Asteroidi (planetoidi) predstavljaju kamena ili metalna tijela koja imaju promjer veći od metra te oni samostalno ili u grupi sličnih tijela kruže oko Sunca. Razlikuju se od kometa po tome što asteroidi nemaju vidljivo istjecanje plina ili prašine, dok se po fizikalnim i kemijskim svojstvima ne razlikuju značajno.

Prvi nagovještaj prisutnosti organske tvari u asteroidima došao je iz njihove crvene boje. Ekstremno crvena boja i niski albedo (0,01–0,15) nekih asteroida može se objasniti prisutstvom organskih spojeva polimernog tipa, koji su strukturno slični kerogenu [42]. Albedo je omjer reflektirane svjetlosti i svjetlosti koja je pala na tijelo. Za crno tijelo taj omjer iznosi nula, dok za potpuno bijelo tijelo iznosi 1. Zemaljski ugljikovodici, primjerice ugljen, katranski pijesak, asfaltit, antraksolit i kerit, koji imaju složenu kombinaciju alifatskih i aromatskih struktura, često pokazuju nizak albedo i crvene boje slične onima asteroida [43].

U potrazi za odgovorima o postanku svemira i nastanku života na Zemlji, u sklopu japanske svemirske misije 2014. godine sletjela je sonda Hayabus-2 na asteroid Ryugu. Materijal s tog asteroida (točnije, 5.6 grama materijala) je nakon šest godina donešen na Zemlju. U kolovozu 2022. objavljen je rad u časopisu Nature Astronomy s rezultatima istraživanja te svemirske misije. Važno je napomenuti da je to samo jedan u nizu radova vezanih za tu svemirsku misiju i da se ostali radovi očekuju u skoroj budućnosti.

U navedenom radu japanski znanstvenici postavljaju hipotezu da je voda na Zemlju mogla doći jedino vanjskim rubom Sunčeva sustava te da su asteroidi tipa C možda jedini glavni izvor vode na planeti Zemlji. U lipnju 2022. je ista skupina znanstvenika objavila da je u uzorku s asteroida pronašla organski materijal, točnije aminokiseline, koje predstavljaju prapočelo života, te su u skladu s tim iznijeli pretpostavku da je osim vode, i život možda najprije nastao u svemiru.

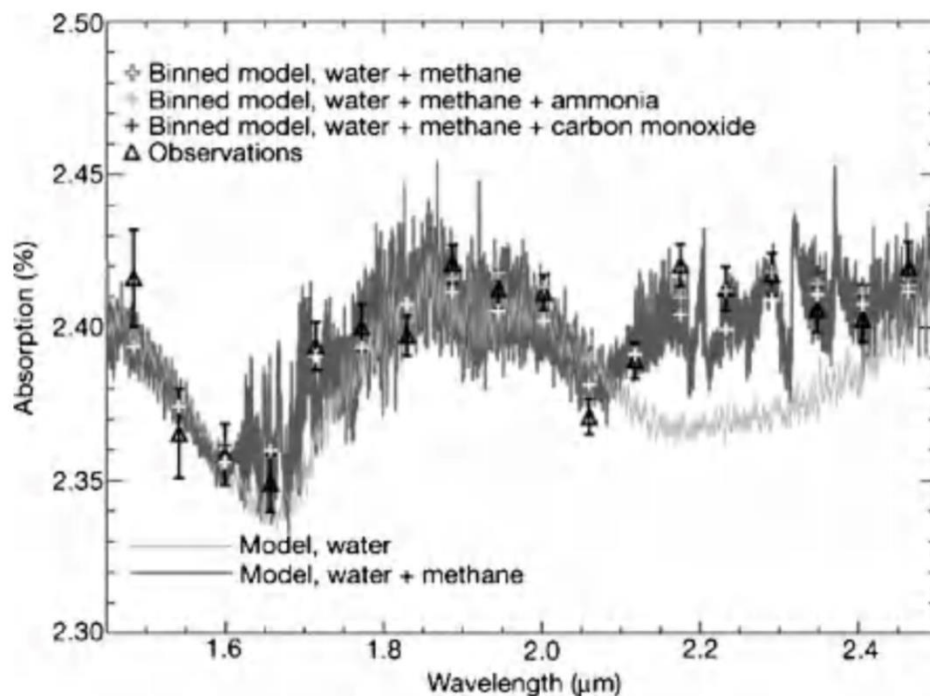
No to su trenutačno samo hipoteze, ali ujedno i bitan pokazatelj da se važne analize i važna istraživanja rade upravo sada te da je realno očekivati odgovore na mnoga pitanja već u bliskoj budućnosti. "Čestice Ryugua bez sumnje jedan su od najčišćih materijala iz Sunčeva sustava koje imamo za laboratorijska istraživanja te će ispitivanje tih vrijednih uzoraka sigurno proširiti naše razumijevanje procesa razvoja Sunčeva sustava", kako se navodi u istraživanjima.

3.8. Transneptunski objekti

Transneptunski objekti (TNO) su skupina manjih tijela koja kruže oko Sunca u vanjskom dijelu Sunčevog sustava. Općenito su ograničeni na Kuiperov pojas pa se TNO također nazivaju objekti Kuiperovog pojasa (KBO). Prvi TNO (1992 QB1) otkriven je 1992. [44], a Pluton je naknadno prepoznat kao član TNO klase objekata. Procjenjuje se da postoji 105 TNO objekata promjera većeg od 100 km. Povezana klasa objekata su Kentauri. Iz fotometrijskih promatranja u vidljivom dijelu, općenito je utvrđeno da su boje TNO neutralne do vrlo crvene [45]. Takve crvene boje su pokazatelj prisutnosti organskog materijala na površini. U nekim TNO utvrđena je prisutnost vodenog leda, metanskog leda, CH₃OH leda te leda amonijaka [46]. Uz različite vrste leda identificirane spektroskopijom, boje i niski albedi TNO-a upućuju na prisutnost vatrostalnih karbonskih materijala na površini [47]. U vidljivom infracrvenom spektru dva najsajjnija TNO-a, Plutona i Makemakea, dominira metan. Spektralni potpisi etana su također vidljivi kod nekih TNO-a. [48].

3.9. Ekstrasolarni planeti

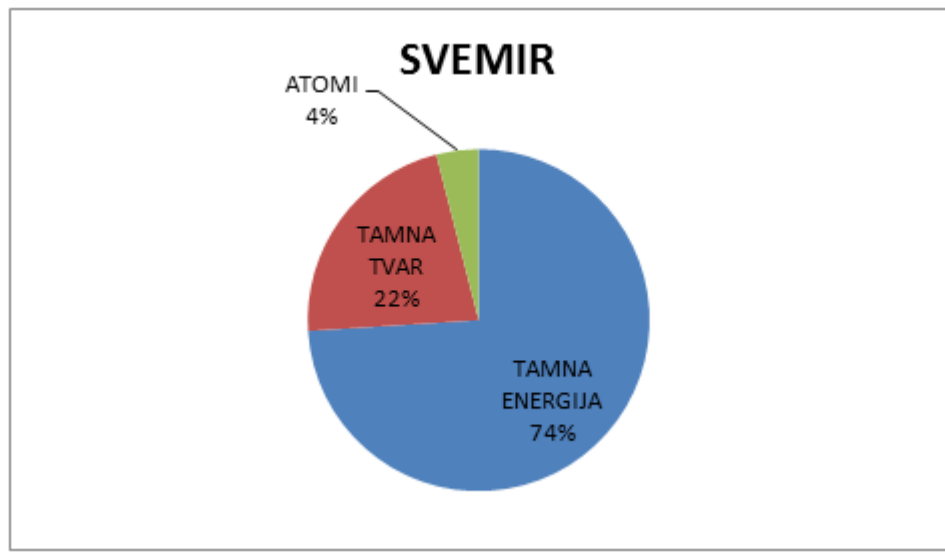
Do 2010. godine otkriveno je više od 400 ekstrasolarnih planeta (ili egzoplaneta). Takav planet može povremeno proći točno ispred zvijezde, uzrokujući prigušivanje svjetla zvijezde za iznos koji odgovara omjeru površine lica planeta i zvijezde. Ako planet posjeduje atmosferu, tada će "veličina" planeta ovisiti o valnoj duljini. Preciznim mjerenjem količine pada zvjezdanog toka tijekom tranzita kao funkcije valne duljine, može se dobiti spektar planetarne atmosfere. Druga tehnika je usporedba spektra sustava zvjezdanih planeta snimljenog neposredno prije i nakon što se planet pojavi iza zvijezde. Spektar razlike predstavlja spektar planeta. Otkrivene molekule uključuju H_2O , CO , CO_2 i CH_4 . [2] Primjer spektra ekstrasolarnih planeta dobivenog prvom tehnikom prikazan je na slici 3.9., tu se dva simulirana spektra planetarne atmosfere uspoređuju s promatranim podacima, pokazujući da su uz molekulu vodika prisutni još voda i metan, s time da bi mogla biti prisutna i manja količina amonijaka.



Slika 3.9.: Spektar ekstrasolarnog planeta dobiven usporednom tehnikom. [49].

4. ORGANSKI SPOJEVI U OSTALIM GALAKSIJAMA

Prema modernim fizikalnim kozmologijama tamna energija predstavlja nevidljiv sastojak u svemiru koji ispunjava gotovo sav prostor te je uzrok njegovog ubrzanog širenja [50]. Tamna tvar je hipotetski oblik materije za koji se smatra da čini 22% svemira, odnosno približno 86% materije u svemiru. Dio koji je obuhvaćen ovim radom je ljudima poznata materija, a ona čini tek oko 4% svemira. Dakle, ovim radom analizira se 4% svemira. Iako se aktivno poduzimaju razni eksperimenti da bi se izravno otkrile i proučavale čestice tamne tvari, nijedan do sada nije uspio [51].



Slika 4.1.: Rasprostranjenost materije i energije u svemiru. Poznata materija čini samo 4% svemira. Izvor: autor.

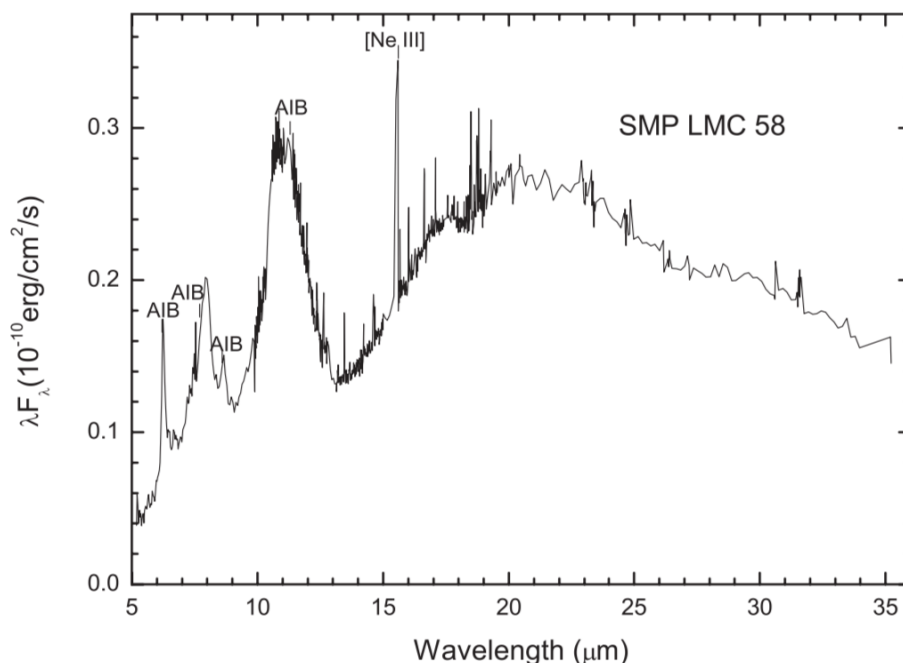
Galaksija se definira kao glomazna nakupina zvijezda među kojima ima i ostataka zvijezda, sadrži i međuzvezdane tvari kao i tamne tvari koju na okupu održava sila gravitacije. Patuljaste galaksije čine više desetaka milijuna zvijezda, a divovske čak do 10^{14} zvijezda koje se nalaze u orbiti oko zajedničkog centra mase. [52].

Razvojem infracrvene i astronomije milimetarskih valova došlo se do saznanja da molekularni plin čini značajan udio mase galaksija, dok kod nekih vrsta galaksija većinu energije emitira komponenta čvrstog stanja.

Ukupni molekularni sadržaj galaksije može se dobiti spektroskopskim promatranjem. Iz svjetline molekularnih linija i traka izvodi se relativna brojnost specifičnih molekularnih vrsta. Promatrajući udaljene galaksije, također proučavamo galaksije u ranoj fazi evolucije svemira. Rotacijski prijelazi CO viđeni su u kvazarima (jako udaljenim galaksijama), što je vrlo važno, jer upućuje na to da su se zvjezdana nukleosinteza i molekularna formacija dogodili u vrijeme stvaranja galaksija. [2].

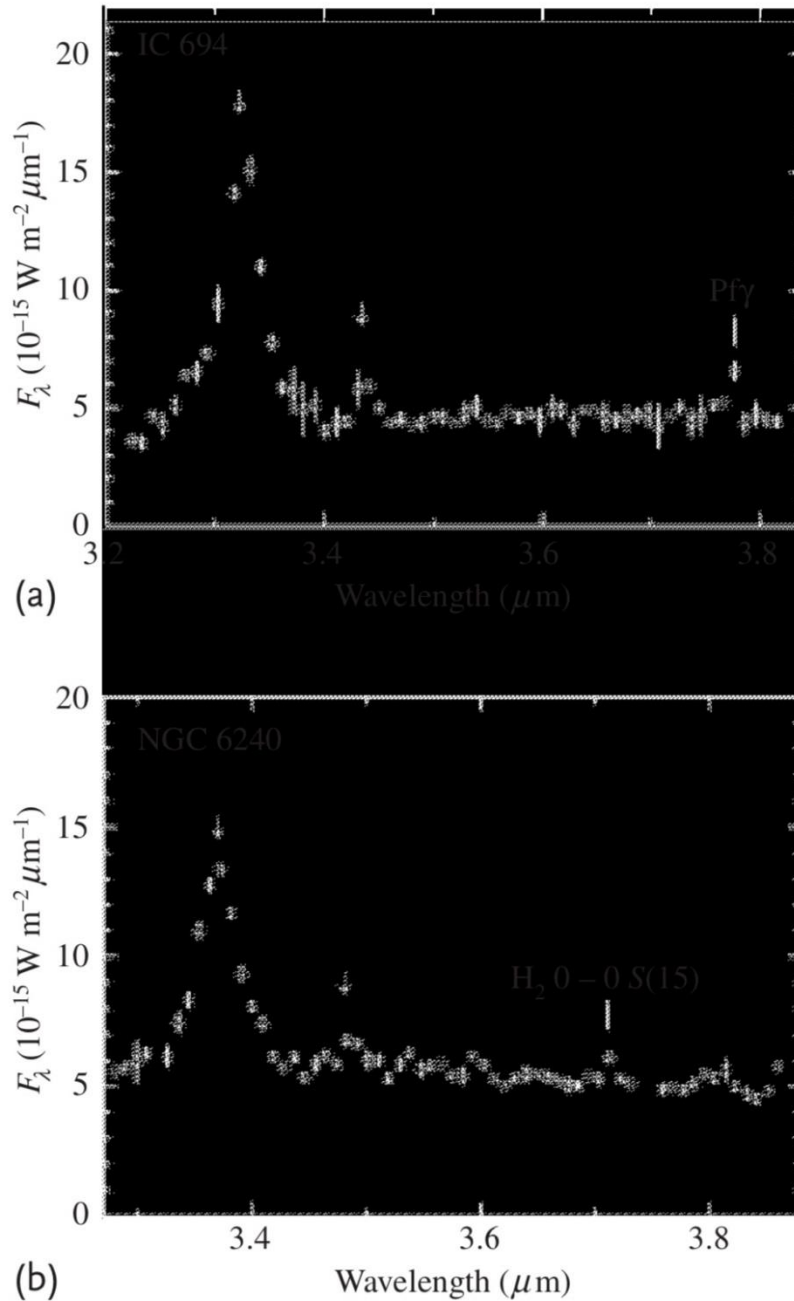
Dok galaksije sigurno sadrže anorganske komponente čvrstog stanja kao što su silikati, prisutne su i organske čvrste tvari. Spektralnom analizom utvrđena je velika prisutnost aromatskih spojeva u galaksijama, slično kao i u međuzvjezdanom mediju te u našoj Galaksiji. Valne duljine i profili su vrlo slični pa se daje zaključiti da potiču od istog kemijskog izvora. [2].

U našem najbližem galaktičkom susjedu, Magellanovim oblacima, spektroskopskom analizom utvrđeno je postojanje aromatskih spojeva. Slika 4.2. prikazuje infracrveni spektar planetarne maglice SMP LMC 58 u Velikim Magellanovim oblacima. Unatoč okolišu siromašnom metalima, čini se da planetarne maglice u Magellanovim oblacima mogu sintetizirati aromatične spojeve jednako lako kao one u Mliječnoj stazi [53].



Slika 4.2. Infracrveni spektar planetarne maglice Velikog Magellanovog oblaka (aromatski spojevi vidljivi su pod oznakom AIB (aromatic infrared bonds), slika preuzeta iz [2])

Infracrvenim teleskopom Ujedinjenog kraljevstva (UKIRT) utvrđeno je postojanje alifatskih ugljikovodika u vanjskim galaksijama NGC 1068, IRAS 08572 3915, NGC 5506, NGC 3094, 7172 i 7479 [54, 55]. Slika 4.3. prikazuje spektre infracrvenih blistavih galaksija IC 694 i NGC 6240 gdje se jasno detektiraju alifatske karakteristike od 3,3 i 3,4 μm [2].



Slika 4.3.: Spektre infracrvenih blistavih galaksija IC 694 i NGC 6240 (a i b) gdje se jasno detektiraju alifatske karakteristike od 3,3 i 3,4 μm . Slika preuzeta iz [2].

Karakteristika od 6,9 μm , zbog mješavine CH_2 savijanja i CH_3 antisimetričnih načina savijanja [56], također je otkrivena u vanjskim galaksijama. Ova značajka je posebno jaka u udaljenoj (z D 0,0583) infracrvenoj galaksiji IRAS 08572 3915. Teleskopima UKIRT i Spitzer Space Telescope Infrared Spectrograph (IRS) otkrivene su karakteristike od 3,4 i 6,9 μm , koje ukazuju na prisutnost alifatskog materijala [57]. Procjenjuje se da 15% atoma ugljika ima sp^3 hibridizaciju s omjerom CH_2 prema CH_3 od 2 naspram 1. Nepostojanje aromatskih karakteristika u ovoj galaksiji sugerira da su alifatski materijali dominantni u difuznom međuzvjezdanom mediju ove galaksije. [2].

Infracrvena fotometrija i fotometrija submilimetarskih valova te spektroskopska promatranja galaksija pokazala su da su molekularne vrste i spojevi u čvrstom stanju sintetizirani vrlo rano u povijesti svemira. Detekcija aromatskih značajki u bližim galaksijama upućuje na zaključak da su složeni aromatski spojevi već bili prisutni u svemiru prije 10 milijardi godina. Budući da je životu kakav poznajemo trebalo više od milijardu godina da se razvije na Zemlji, ovi izvangalaktički složeni organski spojevi morali su biti sintetizirani abiološki, izravno iz jednostavnih molekula. Za razliku od popularnog uvjerenja da su organske tvari povezane sa životom, astronomska promatranja pokazuju da je postojanje složenih organskih tvari ipak prethodilo nastanku života. [2].

5. ORGANSKI SPOJEVI U MEĐUZVJEZDANOM MEDIJU

Međuzvjezdani medij (skraćeno, ISM - interstellar medium) je šarolika okolina. Najlakše vidljivi dijelovi su emisijske maglice koje se sastoje od plinovitih materijala fotoioniziranih vrućim zvijezdama. Emisija rekombinacijskih linija iz H i He i sudarom pobuđenih linija iz teških elemenata čini ove maglice svijetlima u vidljivim valnim duljinama. [2] Ove diskretne emisijske maglice često su povezane s područjima nedavnog stvaranja zvijezda. Postoje i hladniji oblaci koji se uglavnom sastoje od neutralnog, molekularnog plina. Ovi oblaci mogu izgledati "tamni" u vidljivom svjetlu, ali se mogu detektirati putem rotacijskih i vibracijskih spektara molekula u

infracrvenim i milimetarskim valnim duljinama i iz infracrvenog kontinuiranog zračenja iz čestica u čvrstom stanju u oblacima [2].

5.1. Crni oblaci

Postojanje crnih oblaka očituje se u nedostatku vidljive svjetlosti u regijama gusto naseljenim zvijezdama i može se kvantitativno identificirati putem brojanja zvijezda. Kada područje neba ima daleko manju gustoću zvijezda od susjednih područja, pretpostavlja se da se tu nalazi crni oblak prašine. U manjoj mjeri, postoje kompaktni, gusti oblaci poznati kao Bokove kugle. Često su sferičnog oblika i veće gustoće od tamnih oblaka. Primjer tamnog oblaka je Taurus Molecular Cloud (TMC-1). TMC-1 ima oblik grebena izduženog u smjeru sjeverozapad-jugoistok (Slika 5.1). [2]



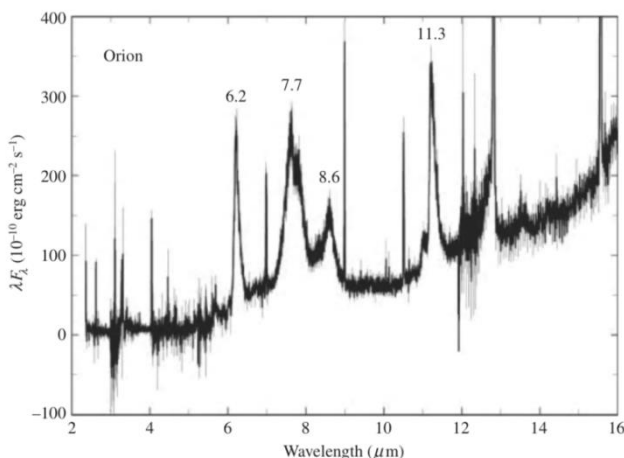
Slika 5.1. TMC-1, Taurus Molecular Cloud – primjer crnog oblaka. Preuzeto iz [2]

Pokazalo se da su hladni tamni oblaci nevjerojatno bogati kemijski laboratoriji, u kojima se može sintetizirati veliki broj molekula. Većina identificiranih vrsta neutralne su molekule, iako je nekoliko kationa, u biti, protoniranih oblika brojnih vrsta zatvorene ljuske [58], ali također je primijećeno nekoliko aniona ugljikovodika i nitrila [59]. Molekularni ioni imaju nisku zastupljenost zbog svoje visoke reaktivnosti. TMC-1 je hladna predzvezdana jezgra smještena unutar Heilesovog oblaka 2 u zvijezdu Bika [60] i rano je prepoznata kao bogat molekularni izvor. Unutar kompleksa oblaka Taurus, nekoliko tamnih jezgri ima slične fizičke karakteristike [61], ali TMC-1 se ističe kao onaj gdje je otkrivena najveća količina molekularnih vrsta koje sadrže ugljik. TMC-1 predstavlja zanimljiv „laboratorij“ bogat ugljikom u kojem se stvaraju dugi ugljikovi lanci, radikali, ioni i neutralne molekule zatvorene ljuske kao što su cijanopolini [59]. Ova hladna tamna jezgra također sadrži brojne gotovo zasićene vrste, kao što je CH_3CHCH_2 , tipičnije za vruće jezgre koje stvaraju zvijezde [61]. Prvi polarni benzenski prsten, benzonitril

$\text{C}_6\text{H}_5\text{CN}$, otkriven je u ovom objektu [62]. Uz molekule kojima dominira ugljik, u TMC-1 otkriven je niz ugljikovih lanaca koji sadrže kisik: CCO [63], C_3O [64], HC_3O i C_5O [58], HC_5O i HC_7O [65]. Put koji vodi do stvaranja HC_5O i HC_7O ostaje misterij, tim više što srodni lanci C_4O , HC_4O i HC_6O nisu pronađeni (HC_2O se ipak opaža u drugim hladnim gustim oblacima) [66]. Druge vrste koje sadrže kisik, tipičnije za vruće jezgre, kao što su CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_3\text{CHO}$, $\text{C}_2\text{H}_3\text{OH}$, HCOOCH_3 i CH_3OCH_3 , također su identificirane u spektrima milimetarskih valova TMC-1 [66].

5.2. Orionova maglica

Orionova maglica je emisijska maglica koju fotoionizira grupa sjajnih, mladih, masivnih zvijezda (trapezijske zvijezde). Optičku maglicu okružuje mnogo proširenije područje neutralnog plina koje se naziva Orionov molekularni oblak. Orionov molekularni oblak je najbliže područje stvaranja masivnih zvijezda. U njemu se nalaze dva vrlo svijetla infracrvena objekta, Kleinmann–Low (KL) i Becklin–Neugebauer (BN) područja. Kada se snimaju u višoj prostornoj rezoluciji, objekti Orion BN–KL dijele se na brojne svijetle infracrvene izvore. Kinematičke studije identificirale su nekoliko područja, uključujući vruću jezgru, greben mirnog plina i kompaktni greben [67]. Poznato je da je Orion KL jedan od najbogatijih izvora molekularnih linija u svemiru i do sada je na njemu učinjeno više od 20 istraživanja spektralnih linija. Neke aromatske značajke su prvi puta otkrivene u Orionu [68]. Istaknute su u srednjem infracrvenom spektru Oriona, kao što se vidi na slici 5.2.



Slika 5.2.: Infracrveni spektar Oriona pokazuje jaku aromatsku karakteristiku na 6.2, 7.7., 8.6., 11.3. Neoznačene uske linije su atomske emisijske linije. Preuzeto iz [2].

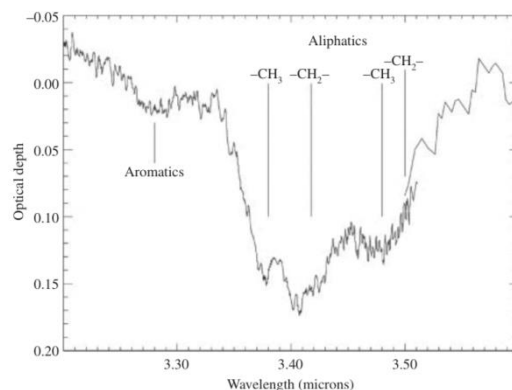
5.3. Refleksijske maglice

Refleksijske maglice su plinovite maglice čiji je vidljivi sjaj posljedica raspršene svjetlosti zvijezda. Zračenje fotosferskog kontinuuma od ugrađenih zvijezda raspršeno je na čvrstim česticama u maglicama. Budući da je koeficijent raspršenja veći na kraćim valnim duljinama, refleksijske maglice često imaju plavkasti izgled. Kako se čvrste čestice u refleksijskim maglicama zagrijavaju svjetlošću zvijezda, one također same zrače u infracrvenom zračenju [69, 70]. Infracrvena spektroskopska promatranja otkrivaju da refleksijske maglice također posjeduju snažnu aromatsku karakteristiku. Usporedba promatranih spektara pokazuje da aromatske značajke imaju nevjerojatno slične profile u različitim refleksijskim maglicama, iako ih griju središnje zvijezde vrlo različitih temperatura.

5.4. Difuzni međuzvjezdani oblaci

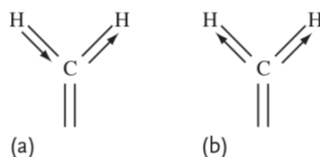
Difuzni međuzvjezdani oblaci su regije niske gustoće u međuzvjezdanom mediju čija struktura nema određenu morfologiju i poluprozirni su u vidljivom dijelu. U vanjskom području oblaka čestice su u atomskom obliku. U unutarnjim područjima gdje je plin zaštićen od svjetla zvijezda, mogu se formirati jednostavne molekule. Prve molekule otkrivene u difuznim oblacima su H_2 , HD, OH i CO. Otkrivene su preko njihovih apsorpcijskih linija u UV zračenju, primjerice, pomoću satelita Copernicus. Ponekad se izraz "prozirni oblaci" koristi za označavanje klase međuzvjezdanih oblaka između difuznih i molekularnih oblaka. Molekule u prozirnim oblacima, osim što se mogu promatrati kroz njihov apsorpcijski linijski spektar, također se mogu proučavati u emisiji tehnikama milimetarskih valova. Na visokim galaktičkim širinama, difuzni oblaci izloženi su manje UV zračenju jer je većina vrućih zvijezda (ranog tipa) koncentrirana na galaktičkoj ravnini. Kao rezultat toga, ti oblaci visoke geografske širine imaju drugačiji kemijski sastav od difuznih ili prozirnih oblaka. U difuznom međuzvjezdanom mediju, međuzvjezdana tvar (plin i krutina) može se nalaziti daleko od izvora energije (tj. zvijezda). Bez unosa energije i nesposobnosti za samozračenje, molekule i krute tvari još uvijek se mogu otkriti kroz njihovu sposobnost apsorpiranja pozadinskog zračenja. Spektroskopska promatranja udaljenih zvijezda i galaksija otkrivaju spektralne značajke amorfnih silikata i krutina koje sadrže ugljik. Pokazatelj da su alifatski ugljikovodici široko rasprostranjeni u difuznom međuzvjezdanom mediju je značajka apsorpcije od $3,4\ \mu m$ koja je detektirana u nekoliko vidnih linija [71-72] i za koju se

smatra da proizlazi iz C–H načina rastezanja metilnih (CH₃) i metilenskih (CH₂) skupina u alifatskom ugljikovodiku [73].



Slika 5.3. Spektar na kojem se vide alifatske karakteristike u difuznom međuzvjezdanom oblaku. Preuzeto s [74].

Primjer spektra na kojem se vide alifatske karakteristike prikazan je na slici 5.3. Na temelju značajke od 3,4 μm procijenjeno je da je 5-30% atoma ugljika u nositelju ove trake [75, 76]. Ta se značajka sastoji od simetričnog i asimetričnog načina istezanja. Za metilnu (CH₃) skupinu, simetrični način odgovara vibraciji u kojoj se sva tri vodikova atoma rastežu u fazi, dok asimetrični načini odgovaraju kontrakciji jedne veze dok se druge dvije produžuju ili obrnuto, kako je prikazano na slici 5.4. Općenito, asimetrični načini su jači od simetričnog načina.



Slika 5.4. Asimetrični (a) i simetrični (b) načini istezanja metilne skupine. Preuzeto s [2].

Uz značajku od 3,4 μm, također su uočene značajke na 6,8 i 7,2 μm i one se općenito tumače kao posljedica asimetričnih i simetričnih načina deformacije CH₃ i CH₂ skupina alifatskih materijala [77]. Iako su karakteristike od 3,4, 6,8 i 7,2 μm naširoko vidljive u difuznom međuzvjezdanom mediju, one nikada nisu otkrivene u gustim molekularnim oblacima. Nije jasno je li ta razlika posljedica proizvodnje ili uništenja [78].

Sumnja se da je višak emisije u pojasu od 12 μm infracrvenog spektra u difuznom međuzvjezdanom mediju uzrokovan emisijom alifatskih karakteristika [79]

6. SVEMIRSKA TEHNOLOGIJA

U posljednjih desetak godina polje astrokemije doživjelo je veliki procvat prvenstveno zahvaljujući dovršetku novih moćnih radioteleskopa, kao što su Atacama Large Sub-Millimetre Array (ALMA), prikazan na slici 6.1., i Northern Extended Millimeter Array (NOEMA), prikazan na slici 6.2., te zahvaljujući daljnjem napredovanju elektronike čime se poboljšala osjetljivost prijemnika i propusnost. [80]



Slika 6.1. Teleskop ALMA. Preuzeto s [81]

U ovome poglavlju ukratko će biti predstavljena nova tehnologija koja je omogućila skokovit napredak u potrazi i identifikaciji molekula na nebeskim tijelima i u međuzvjezdanom prostoru te će se pojasniti spektrometerske metode korištene za identifikaciju molekula u svemiru.

6.1. Detektori i teleskopi na milimetarskim i submilimetarskim valnim duljinama

Poboljšanja osjetljivosti detektora i širine pojasa povezani su s razvojem niskošumnih/širokopojasnih kriogenih pojačala te razvojem mješača (miksera). Najsuvremeniji heterodinski prijamnici (koji transponiraju ulazne frekvencije u niže) opremljeni takvim uređajima sada postižu nepreciznost mjerenja samo nekoliko puta veću od kvantne granice (prema Heisenbergovoj relaciji neodređenosti). Heterodina tehnika temelji se na pretvorbi

dolaznog radiofrekvencijskog (RF) signala (astronomskog ili laboratorijskog) koji se miješa sa signalom lokalnog oscilatora. [80]

Niža frekvencija omogućuje korištenje pojačala s nižom nepreciznošću i pruža spektralnu rezoluciju jednaku širini linije lokalnog oscilatora. Visoka osjetljivost potrebna je za otkrivanje nestajajuće slabe emisije rotacijskih linija iz rijetkih molekularnih vrsta ili iz vrlo udaljenih izvora, dok je visoka spektralna razlučivost ključna za sigurno identificiranje nositelja detektiranih astronomskih linija. Slično, visoka spektralna razlučivost potrebna je u spektroskopskom laboratoriju za točno mjerenje uzorka rotacijske linije, a time i za izvođenje spektroskopskih konstanti. Spojni prijemnici EMIR SIS na teleskopu IRAM - NOEMA promjera 30 m, smještenog na nadmorskoj visini od 2900 m na Pico Veleti, u blizini Granade, Španjolska (slika 6.2.), omogućuju istovremeno promatranje pojasa širine 32 GHz sa spektralnom rezolucijom od 200 kHz unutar 73–375 GHz ($\lambda = 4$ do 0,8 mm) atmosferskog prozora. Atmosferski prozor je dio spektra elektromagnetskog zračenja čije su valne duljine takve da zračenje tih valnih duljina dolazi do Zemljine površine bez upijanja u atmosferi. [80]

Osjetljivost teleskopa također ovisi o veličini antene, točnosti njezinih reflektirajućih površina i prozirnosti atmosfere. Uslijed apsorpcije signala od strane atmosferske vodene pare, osjetljivost je smanjena na kraćim radijskim valnim duljinama. Zbog toga se teleskopi koji rade ispod 2 mm (tj. iznad 150 GHz) grade na mjestima na velikim nadmorskim visinama. Visokofrekventni teleskopi moraju imati preciznije površine kako bi zadržali visoku učinkovitost otvora blende. Antene velike veličine, visoke površinske točnosti smještene na visokim planinama mnogo je teže izgraditi i potrebno ih je zaštititi od loših vremenskih uvjeta. U praksi, to ograničava njihov promjer na oko 30 m za učinkovit rad na valnoj duljini od 1 mm ili nižoj. Kako bi se povećala efektivna površina teleskopa koji je namijenjen za rad na valnim duljinama kraćim od 2 mm, odabire se, umjesto povećanja veličine jedne antene, izgradnja niza od nekoliko manjih antena spojenih zajedno, tj. izgradnja interferometra. Osim cijene, odlučujuća prednost faznog niza mobilnih antena je ta što njihova kutna rezolucija može biti puno bolja. Prednost interferometara u odnosu na teleskope s jednom antenom je ta što daju spektre s mnogo ravnijim osnovnim linijama, budući da filtriraju fluktuacije intenziteta uzrokovane nestabilnošću pojačala i Zemljinom atmosferom. Ovo je osobito korisno za otkrivanje širokih i vrlo slabih linija, poput onih opaženih u udaljenim galaksijama. [80]

Na spektru koji se promatra s jednom antenom, trebalo bi ukloniti osnovnu liniju polinoma visokog stupnja, što je operacija koja može utjecati na detektabilnost širokih linija. Interferometri koji se koriste za linijska istraživanja su ATCA, ALMA i NOEMA. ATCA je niz antena promjera 6×22 m koje rade do 7 mm valne duljine (50 GHz) i nalaze se na 240 m nadmorske visine, -30° zemljopisne širine, u Novom Južnom Walesu, Australija. ALMA-u čini niz od 50 paraboličnih antena visoke točnosti, promjera 12 m, smještenih na 5000 m nadmorske visine, -23° geografske širine, u pustinji Atacama u Čileu. Radi do valne duljine od 0,3 mm (950 GHz) zahvaljujući niskom sadržaju vodene pare u atmosferi iznad lokacije. Ovaj 12-metarski niz prati manji niz od dvanaest 7-metarskih antena plus četiri 12-metarske antene. NOEMA je nadograđena krajem 2021. na antenski niz promjera 12×15 m; nalazi se na 2550 m nadmorske visine u južnim Alpama u Francuskoj i radi do 1 mm valne duljine s 12 antena (i trenutno 0,8 mm, ili 375 GHz, sa šest antena), kao što prikazuje slika 5.2. NOEMA je najveći milimetarski valni niz na sjevernoj hemisferi. Njegovi prijemnici spoja SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor, to jest, supravodič-izolator-supravodič) i njegov širokopojasni korelator XF Fast Fourier Transform čine ga posebno pogodnim za ekstragalaktička spektralna istraživanja, budući da može trenutačno pokriti širinu pojasa od 32 GHz sa spektralnim kanalima širine 2 MHz ($2,6 \text{ kms}^{-1}$ na 230 GHz). [80]



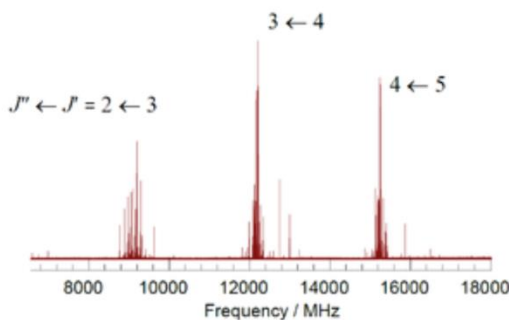
Slika 6.2. Teleskop NOEMA. Preuzeto s [82]

6.2. Spektrometrijska analiza

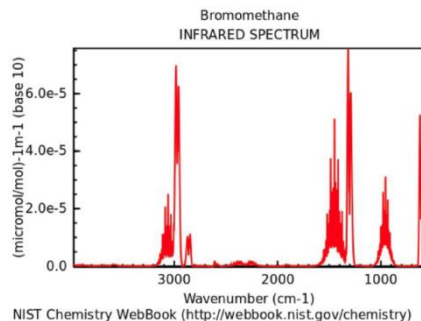
Spektroskopija kao znanstvena disciplina bavi se spektrima koji karakteriziraju energijske odnosno strukturne promjene u pojedinim atomima ili molekulama nakon međudjelovanja s elektromagnetskim zračenjem ili drugim česticama.[83] Najčešće se mjeri jakost apsorbiranog, emitiranog ili pak raspršenog zračenja koje ovisi o njegovoj valnoj duljini tj. frekvenciji. Atomi i molekule posjeduju više energetske razine, a energija apsorbiranog ili emitiranog zračenja će odgovarati razlici između tih razina. Prelaskom s više na nižu energetska razinu zračenje se emitira, a apsorbira se prelaskom s niže na višu energetska razinu. Budući da određene energetske razine predstavljaju svojstvo molekula i atoma pripadajuće kemijske tvari, pretraživanjem i objašnjenjem spektara zračenja lako se dobiju podaci o kemijskoj strukturi tvari i sastavu (spektrometrijska analiza), ali i znanja o pobuđenom stanju, vibracijskoj, elektronskoj, ali i rotacijskoj energiji, molekulskim i atomskim energetskim prijelazima, kemijskim vezama i ostalo. [83]

Primjena spektroskopije je raznolika među granama prirodnih znanosti budući da daje podatke o strukturi i sastavu tvari te njezinom tlaku i temperaturi. [83]

Spektroskopija se koristi u analitičke svrhe te se najčešće definira po spektralnim područjima, a rezultat takvog istraživanja je spektar. Prema pojavi koje može izazvati sprezanje elektromagnetskog zračenja spektroskopija se dijeli na rotacijsku spektroskopiju (slika 6.3.), vibracijsku spektroskopiju (slika 6.4.) i elektronsku spektroskopiju. [83]



Slika 6.3. Dio rotacijskog spektra CF₃I. Preuzeto s [84]



Slika 6.4. Vibracijski spektar brommetana. Preuzeto s [85]

Uzrok pobude elektrona u atomu, molekuli, kristalnoj tvari ili pak amorfnoj tvari uzrokuje vidljivo zračenje. Efekti koji su prouzrokovani promjenom elektronske strukture molekula ili atoma proučavaju se spektroskopijom vidljivog zračenja. Da bi došlo do emitiranja vidljivog zračenja, objekti moraju imati toplinsku energiju atoma ili molekula jednaku ili čak veću od energije pobude njihovih elektrona. Takvi objekti najčešće moraju biti na temperaturama iznad 1000 °C. [83]

Spektroskopija često obuhvaća blisko ultraljubičasto zračenje, a za to optičko područje koriste se gotovo iste tehnike te isti materijali. Kratica za tu vrstu spektroskopije je UV-VIS (eng. *UltraViolet-Visible*). [83]

Kao medij proučavanja za spektroskopiju infracrvenih zračenja (IR spektroskopija) može se primijeniti infracrveno zračenje. [83]

Molekule emitiraju infracrveno zračenje zahvaljujući svojim vibracijama. Nakon apsorpiranja infracrvenog zračenja pobuđuju se molekulske vibracije, a molekule počinju jače vibrirati. Zato se često infracrvena spektroskopija, kao i Ramanova spektroskopija često naziva i vibracijska. Slobodni atomi neće emitirati infracrvena zračenja. Ovisno o čvrstoći veza kao i masama dijelova pojedinih molekula koje pokazuju vibriranje svaka će molekula imati svoju karakterističnu vibraciju. Shodno toj činjenici, infracrvena spektroskopija daje veliku analitičku mogućnost da se odredi od kakvih se funkcionalnih skupina svaka molekula sastoji. Budući da svaka molekula ima posve različit infracrveni spektar, ta vrsta spektroskopije primjenjuje se pri identificiranju tvari. Uzimajući u obzir činjenicu da je energija vibriranja manja od toplinske energije molekula,

infracrveno zračenje će emitirati objekti na temelju svoje toplinske energije. Prema zakonu crnog tijela valna duljina emitiranog zračenja ovisit će o temperaturi. [83]

Za razliku od infracrvene spektroskopije, Ramanova spektroskopija uzima u obzir neelastično raspršenu svjetlost. Elektromagnetsko zračenje koje je raspršeno na molekulama sastoji se od komponenti koje dolaze od rotacija ili vibracija molekula. Za primjenu Ramanove spektroskopije koriste se Ramanovi spektrofotometri koji koriste monokromatsko zračenje koje će se usmjeriti na uzorak. Raspršeno zračenje obično pod kutem (pod 90°) uvodi se u monokromator, a iz njega će se propustiti samo jedna određena valna duljina. Spektar se dobiva skeniranjem iz područja valnih duljina koje se nalaze oko valnih duljina izvora zračenja . Spektar se sastoji od jedne linije i to velike jakosti, a ona odgovara valnim duljinama upadnih zračenja, Rayleighovog raspršenja te grupe vrpce ili linija većih valnih duljina, antistokesovog raspršenja i grupe vrpce ili linija manjih valnih duljina, Stokesovog raspršenja dosta manje jakosti. Takve grupe linija pripadaju vibracijskom i/ili rotacijskom spektru molekule. Da bi se odredile energije spektroskopskih prijelaza potrebno je odrediti razliku energija iz antistokesove ili Stokesove vrpce te valne duljine upadnih, monokromatskih zračenja. Budući da je Stokesova kao i antistokesova vrpca dosta slabija od Rayleighovog raspršenog zračenja, primjenjuje se za izvor zračenja onaj velike jakosti. Kako Stokesova i antistokesova raspršenja zavise o promjenama polarizabilnosti određenih molekula u promatranom vremenu, tako Ramanov spektar mogu pokazati samo određene rotacije i vibracije koje mijenjaju polarizabilitet molekule. Zbog toga u Ramanovom i infracrvenom spektru potpuno iste vrpce najčešće imaju različitu jakost, a znaju biti i nevidljive u jednom od spektara. To je razlog zašto se Ramanova i infracrvena spektroskopija nadopunjuju. Prednost Ramanove spektroskopije nad infracrvenom je ta da se Ramanovi spektri lako snimaju u vodenim otopinama. [83]

Mikrovalno zračenje je medij proučavanja mikrovalne spektroskopije. [83]

Mikrovalno zračenje će emitirati i apsorbirati samo one rotacije molekula koje sadrže dipolni moment. Samo će atomi koji imaju nespareni broj elektrona u magnetskom polju moći emitirati mikrovalno zračenje, ali to spada u domenu elektronskih spinskih rezonancija. Mikrovalno zračenje će emitirati objekti sa temperaturama koje su iznad apsolutne nule nekoliko stupnjeva. Mikrovalno zračenje je pogodno u astronomiji gdje se promatra pozadinsko zračenje. Rotacije molekula ovisit će o momentima tromosti molekule, koje nadalje ovisi o njezinoj geometriji.

Mikrovalna spektroskopija služi za određivanje geometrijskih parametara. Oni geometrijski parametri molekula koji su određeni mikrovalnom spektroskopijom najpouzdaniji su jer postižu najviši stupanj preciznosti. Mikrovalna spektroskopija omogućuje izračunavanje točnih vrijednosti dipolnih momenata molekula, ali i određivanje električnih svojstava molekula. Mikrovalna spektroskopija također služi i pri identificiranju uzoraka, premda nije toliko precizna poput infracrvene spektroskopije jer uzorak zahtjeva biti u plinovitoj fazi. [83]

Spektroskopija u dalekom ultraljubičastom zračenju primjenjuje ultraljubičasto zračenje koje karakteriziraju kratke valne duljine, a naziva se još i vakuumsko ultraljubičasto i označava se s VUV (*Vacuum UltraViolet*). Ovo zračenje karakterizira pobudu elektrona u više energijske razine koje se nazivaju Rydbergove orbitale. Objekti za emitiranje ultraljubičastog zračenja često trebaju biti zagrijani na izrazito visoke temperature, a takvi se upotrebljavaju u astronomiji za promatranje vrućih zvijezda, vrućih maglica i zvjezdanih korona. [83]

7. ZAKLJUČAK

Prema modernoj fizikalnoj kozmologiji svemir se sastoji od tamne energije koja čini 74% svemira, tamne materije koja čini 22% svemira, dok tvari kakve su nama poznate zauzimaju tek nekih 4 do 5% svemira. Tamna energija je ljudima nevidljiv sastojak svemira koji ispunjava gotovo sav prostor te uzrokuje njegovo ubrzano širenje. Tamna tvar je hipotetski oblik materije za koji se smatra da čini 22% svemira, odnosno približno 86% materije u svemiru. Dio koji je obuhvaćen ovim radom je ljudima poznata materija, a ona čini tek oko 4-5% svemira. Dakle, ovim radom analizirano je samo nekih 4% svemira, iako ljudskom umu taj pojmljivi dio svemira djeluje beskrajan.

Promatrajući taj manji dio svemira prosječni promatrač bi vrlo lako mogao steći dojam da u njemu puno više prevladavaju anorganski spojevi. Takav jedan promatrač bi organskim spojevima vrlo vjerojatno pripisao zemaljsku ekskluzivu. No, to baš i nije tako.

Nepobitna je činjenica da se atmosfera Zemlje razlikuje od atmosfere drugih planeta u smislu da je kemijski sastav Zemljine atmosfere biološkim procesima značajno izmijenjen u odnosu na prvobitni sastav. Visoka zastupljenost O_2 i CH_4 u današnjoj atmosferi potječe iz bioloških izvora (fotosinteza, bakterije, itd.). Isto tako, dušikov (I) oksid (N_2O) proizvode bakterije i alge. Očito je da atmosfera Zemlje sadrži spektroskopske potpise koji pokazuju prisutnost života na Zemlji. To je svakako olakotna okolnost za potencijalnog istraživača iz svemira. On jednostavnom spektroskopskom analizom Zemljine atmosfere izrazito lako može shvatiti da je na Zemlji život. Uz pomoć daljinskih spektroskopskih promatranja i laboratorijskih analiza stvarno prikupljenih uzoraka moglo se zaključiti da je i čitav Sunčev sustav bogat organskim tvarima. Spektroskopska promatranja zemaljskim teleskopima, svemirskim teleskopima koji kruže oko Zemlje i instrumenata montiranih na svemirskim letjelicama tijekom letećih misija identificirala su veliki izbor organskih tvari na drugim planetama, na planetarnim satelitima, kometima, meteoritima, međuplanetarnim česticama prašine, asteroidima, transneptunskim objektima i egzoplanetima. Meteoriti i međuplanetarne čestice prašine dijelovi su kometa i asteroida čije fizičke uzorke je lako moguće analizirati na Zemlji.

Može se reći da su gotovo svi biološki relevantni organski spojevi prisutni u meteoritima koji sadrže ugljik, iako je pretpostavka da su svi oni nebiološkog podrijetla. Što se tiče zastupljenosti, aromatski ugljikovodici čine najveći udio topivih organskih spojeva u meteoritima, a slijede ih

karboksilne kiseline. Isto tako, više od 90 pojedinačnih aminokiselina identificirano je u meteoritima. Ovaj broj je daleko veći od 20 aminokiselina koje se nalaze u oblicima života na Zemlji.

Infracrvena fotometrija i fotometrija submilimetarskih valova te spektroskopska promatranja galaksija pokazala su da su molekularne vrste i spojevi u čvrstom stanju sintetizirani vrlo rano u povijesti svemira. Detekcija aromatskih značajki u bližim galaksijama upućuje na zaključak da su složeni aromatski spojevi već bili prisutni u svemiru prije 10 milijardi godina. Budući da je životu kakav poznajemo trebalo više od milijardu godina da se razvije na Zemlji, ovi izvangalaktički složeni organski spojevi morali su biti sintetizirani abiološki, izravno iz jednostavnih molekula. Za razliku od popularnog uvjerenja da su organske tvari povezane sa životom, astronomska promatranja pokazuju da je postojanje složenih organskih tvari ipak prethodilo nastanku života.

Infracrvena promatranja su pokazala da se organski materijali ne nalaze samo u gustim međuzvjezdanim oblacima, oni su također prisutni u hladnim, crnim oblacima, refleksijskim maglicama, Orionovoj maglici, i tako dalje. Najzanimljivije je da su organski materijali široko rasprostranjeni u difuznom međuzvjezdanom mediju u kojem je gustoća vrlo niska, a isto tako je slabije i pozadinsko zračenje.

Alifatske značajke se vide na galaktičkoj ravni. Organske tvari ne nalaze se samo u blizini zvijezda već su naširoko rasprostranjene duž čitavih galaksija.

No, istraživanja u astrokemiji su sve opsežnija i značajnija te uznapredovalom tehnologijom rezultiraju sve boljim i točnijim zaključcima.

Primjerice, u potrazi za odgovorima o postanku svemira i nastanku života na Zemlji, u sklopu japanske svemirske misije, 2014. godine sletjela je sonda Hajabus-2 na asteroid Ryugu. Materijal s tog asteroida (točnije, 5.6 grama materijala) je nakon šest godina donešen na Zemlju. U kolovozu 2022., znači, prije desetak dana, objavljen je rad u časopisu Nature Astronomy s rezultatima istraživanja te svemirske misije. Važno je napomenuti da je to samo jedan u nizu radova vezanih za tu svemirsku misiju i da se ostali radovi očekuju u skoroj budućnosti.

U navedenom radu japanski znanstvenici postavljaju hipotezu da je voda na Zemlju došla s vanjskog ruba Sunčevog sustava te da su asteroidi tipa C možda jedan od glavnih izvora vode na Zemlji. U lipnju 2022. je ista skupina znanstvenika objavila da je u uzorku s asteroida pronašla

organski materijal, točnije aminokiseline, koje predstavljaju prapočelo života, te su u skladu s tim iznijeli pretpostavku da je osim vode, i život možda najprije nastao u svemiru.

No to su trenutačno samo hipoteze, ali ujedno i bitan pokazatelj da se važne analize i važna istraživanja rade upravo sada te da je realno očekivati odgovore na mnoga pitanja već u bliskoj budućnosti.

Bit će zanimljivo spoznati točnu raspodjelu organske tvari, ne samo u našoj galaksiji, nego i u čitavom poznatom svemiru. Isto tako, i shvatiti na koji način zvijezde i galaksije uspijevaju sintetizirati tolike količine organske materije. Također se aktivno primjenjuju razne metode i eksperimenti koji bi mogli omogućiti izravno otkrivanje te proučavanje čestica koje čine tamnu tvar, jer ta materija svakako čini 86% materije u svemiru. Do sada nijedan eksperiment na tom polju nije polučio rezultate, ali pokušaji se nastavljaju. Na kraju, bit će zanimljivo jednoga dana sa sigurnošću ustvrditi treba li prihvatiti hipotezu panspermije, odnosno da je život došao iz svemira, ili se pak i dalje držati hipoteze biokemijske evolucije, po kojoj je život rezultat biokemijskih procesa na Zemlji.

8. LITERATURA

- [1] Sunčev sustav, Hrvatska enciklopedija, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=58787> pristupljeno 25.08.2022.
- [1a] Sunčev spektar s Fraunhoferovim linijama, https://www.phy.uniri.hr/files/nastava/stranice_kolegija/fizicki_praktikum_IV_ECTS_6/8%20Spektroskopija.pdf pristupljeno 25.08.2022.
- [2] Kwok S., (2011) Organic Matter in the Universe, Germany, Wiley – VCH Verlag GmbH&Co.KgaA
- [3] Sagan, C., Thompson, W.R., Carlson, R., Gurnett, D., and Hord, C. (1993) A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature*, 365, 715–721.
- [4] Ridgway, S.T., Larson, H.P., and Fink, U. (1976) The Infrared Spectrum of Jupiter. Proceedings of the Colloquium, Tucson, Arizona, May 19–21, 1975, “Jupiter: Studies of the interior, atmosphere, magnetosphere, and satellites”, pp. 384–417.
- [5] Grundy, W.M., Buie, M.W., Stansberry, J.A., Spencer, J.R., and Schmitt, B. (1999) Near-infrared spectra of icy outer Solar System surfaces: remote determination of H₂O ice temperatures. *Icarus*, 142 (2), 536–549.
- [6] de Bergh, C., Schmitt, B., Moroz, L.V., Quirico, E., and Cruikshank, D.P. (2008) Laboratory data on ices, refractory carbonaceous materials, and minerals relevant to transneptunian objects and Centaurs, in *The Solar System Beyond Neptune*, The University of Arizona Press, eds M. Antonietta Barucci et al., pp. 19–35.
- [7] Cruikshank, D.P., Wegryn, E., Dalle Ore, C.M., Brown, R.H., Bibring, J.-P., Buratti, B.J., Clark, R.N., McCord, T.B., Nicholson, P.D., Pendleton, Y.J., Owen, T.C., Filacchione, G., Coradini, A., Cerroni, P., Capaccioni, F., Jaumann, R., Nelson, R.M., Baines, K.H., Sotin, C., Bellucci, G., Combes, M., Langevin, Y., Sicardy, B., Matson, D.L., Formisano, V., Drossart, P., and Mennella, V. (2008) Hydrocarbons on Saturn’s satellites Iapetus and Phoebe. *Icarus*, 193, 334–343.
- [8] Buratti, B.J., Cruikshank, D.P., Brown, R.H., Clark, R.N., Bauer, J.M., Jaumann, R., McCord, T.B., Simonelli, D.P., Hibbitts, C.A., Hansen, G.B., Owen, T.C., Baines, K.H., Bellucci, G., Bibring, J.-P., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, A., Drossart, P., Formisano, V., Langevin, Y., Matson, D.L., Mennella, V., Nelson, R.M., Nicholson, P.D., Sicardy, B., Sotin, C., Roush, T.L., Soderlund, K., and Muradyan, A. (2005) Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer observations of Iapetus: detection of CO₂. *The Astrophysical Journal*, 622, L149–L152.
- [9] Coustenis, A. and Taylor, F. (1999) *Titan: The Earth-Like Moon*, World Scientific.
- [10] Coustenis, A., Salama, A., Schulz, B., Ott, S., Lellouch, E., Encrenaz, T.H., Gautier, D., and Feuchtgruber, H. (2003) Titan’s atmosphere from ISO mid infrared spectroscopy. *Icarus*, 161, 383–403.
- [11] Waite Jr., J.H. (2007) The process of tholin formation in Titan’s upper atmosphere. *Science*, 316, 870–875.
- [12] Nguyen, M.J., Raulin, F., Coll, P., Derenne, S., Szopa, C., Cernogora, G., Israël, G., and Bernard, J.M. (2007) Carbon isotopic enrichment in Titan’s tholins implications for Titan’s aerosols. *Planetary and Space Science*, 55, 2010–2014.

- [13] Brown, R.H., Soderblom, L.A., Soderblom, J.M., Clark, R.N., Jaumann, R., Barnes, J.W., Sotin, C., Buratti, B., Baines, K.H., and Nicholson, P.D. (2008) The identification of liquid ethane in Titan's Ontario Lacus. *Nature*, 454, 607– 610.
- [14] Lorenz, R.D., Mitchell, K.L., Kirk, R.L., Hayes, A.G., Aharonson, O., Zebker, H.A., Paillou, P., Radebaugh, J., Lunine, J.I., Janssen, M.A., Wall, S.D., Lopes, R.M., Stiles, B., Ostro, S., Mitri, G., and Stofan, E.R. (2008) Titan's inventory of organic surface materials. *Geophysical Research Letters*, 35, L02201– L02206.
- [15] Kvenvolden, K., Lawless, J., Pering, K., Peterson, E., Flores, J., and Ponnamperna, C. (1970) Evidence for extraterrestrial aminoacids and hydrocarbons in the Murchison meteorite. *Nature*, 228, 923–926.
- [16] Cronin, J.R., Pizzarello, S., and Frye, J.S. (1987) ¹³C NMR spectroscopy of the insoluble carbon of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 299–303.
- [17] Shimoyama, A., Naraoka, H., Komiya, M., and Harada, K. (1989) Analyses of carboxylic acids and hydrocarbons in Antarctic carbonaceous chondrites, Yamato-74662 and Yamato- 793321. *Geochemical Journal*, 23, 181– 193.
- [18] Cronin, J.R., Cooper, G.W., and Pizzarello, S. (1995) Characteristics and formation of aminoacids and hydroxy acids of the Murchison meteorite. *Advances in Space Research*, 15(3), 91–97.
- [19] Gilmour, I. and Pillinger, C.T. (1994) Isotopic compositions of individual polycyclic aromatic hydrocarbons from the Murchison meteorite. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 269, 235–240.
- [20] Stoks, P.G. and Schwartz, A.W. (1981) Nitrogen-heterocyclic compounds in meteorites: significance and mechanisms of formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 563–569.
- [21] Cronin, J.R. and Pizzarello, S. (1990) Aliphatic hydrocarbons of the Murchison meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2859–2868.
- [22] Pizzarello, S., Feng, X., Epstein, S., and Cronin, J.R. (1994) Isotopic analyses of nitrogenous compounds from the Murchison meteorite: ammonia, amines, amino acids, and polar hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 5579–5587.
- [23] Cooper, G., Kimmich, N., Belisle, W., Sarinana, J., Brabham, K., and Garrel, L. (2001) Carbonaceous meteorites as a source of sugar related organic compounds for the early Earth. *Nature*, 414, 879–883.
- [24] Schmitt-Kopplin, P., Gabelica, Z., Gougeon, R.D., Fekete, A., Kanawati, B., Harir, M., Gebefuegi, I., Eckel, G., and Hertkorn, N. (2010) High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall. *Proceedings of the National Academy of Science*, 107, 2763– 2768.
- [25] Botta, O. and Bada, J.L. (2002) Extraterrestrial organic compounds in meteorites. *Surveys in Geophysics*, 23, 411– 467.
- [26] Cody, G.D. and Alexander, C.M.O'D. (2005) NMR studies of chemical structural variation of insoluble organic matter from different carbonaceous chondrite groups. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 1085–1097.
- [27] Kerridge, J.F. (1999) Formation and processing of organics in the early Solar System. *Space Science Reviews*, 90, 275– 288.

- [28] Love, S.G. and Brownlee, D.E. (1993) A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*, 262, 550–553.
- [29] Sandford, S.A. and Walker, R.M. (1985) Laboratory infrared transmission spectra of individual interplanetary dust particles from 2.5 to 25 microns. *The Astrophysical Journal*, 291, 838–851.
- [30] Schramm, L.S., Brownlee, D.E., and Wheelock, M.M. (1989) Major element composition of stratospheric micrometeorites. *Meteoritics*, 24, 99–112.
- [31] Flynn, G.J., Keller, L.P., Feser, M., Wirick, S., and Jacobsen, C. (2003) The origin of organic matter in the Solar System: evidence from the interplanetary dust particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 4791–4806.
- [32] Mumma, M.J., Weaver, H.A., Larson, H.P., Davis, D.S., and Williams, M. (1986) Detection of water vapor in Halley’s comet. *Science*, 232, 1523–1528.
- [33] Schloerb, F.P., Kinzel, W.M., Swade, D.A., and Irvine, W.M. (1986) HCN production from comet Halley. *The Astrophysical Journal*, 310, L55–L60.
- [34] Bockelée-Morvan, D., Lis, D.C., Wink, J.E., Despois, D., Crovisier, J., Bachiller, R., Benford, D.J., Biver, N., Colom, P., Davies, J.K., Gérard, E., Germain, B., Houde, M., Mehringer, D., Moreno, R., Paubert, G., Phillips, T.G., and Rauer, H. (2000) New molecules found in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). Investigating the link between cometary and interstellar material. *Astronomy and Astrophysics*, 353, 1101–1114.
- [35] Crovisier, J., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Biver, N., Despois, D., Lis, D.C., and the Team for target-of-opportunity radio observations of comets (2004) The composition of ices in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) from radio spectroscopy. Further results and upper limits on undetected species. *Astronomy and Astrophysics*, 418, 1141–1157.
- [36] Crovisier, J., Bockelée-Morvan, D., Biver, N., Colom, P., Despois, D., and Lis, D.C. (2004) Ethylene glycol in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Astronomy and Astrophysics*, 418, L35–L38.
- [37] Mumma, M.J., DiSanti, M.A., DelloRusso, N., Magee-Sauer, K., Gibb, E., and Novak, R. (2003) Remote infrared observations of parent volatiles in comets: a window on the early Solar System. *Advances in Space Research*, 31, 2563–2575.
- [38] Mumma, M.J., McLean, I.S., DiSanti, M.A., Larkin, J.E., DelloRusso, N., Magee-Sauer, K., Becklin, E.E., Bida, T., Chaffee, F., Conrad, A.R., Figer, D.F., Gilbert, A.M., Graham, J.R., Levenson, N.A., Novak, R.E., Reuter, D.C., Teplitz, H.I., Wilcox, M.K., and Xu, L.H. (2001) A survey of organic volatile species in comet C/1999 H1 (Lee) using NIRSPEC at the Keck Observatory. *The Astrophysical Journal*, 546, 1183–1193.
- [39] Kissel, J., Sagdeev, R.Z., Bertaux, J.L., Angarov, V.N., Audouze, J., Blamont, J.E., Büchler, K., Evlanov, E.N., Fechtig, H., Fomenkova, M.N., von Hoerner, H., Inogamov, N.A., Khromov, V.N., Knabe, W., Krueger, F.R., Langevin, Y., Leonas, V.B., Levasseur-Regourd, A.C., Managadze, G.G., Podkolzin, S.N., Shapiro, V.D., Tabaldyev, S.R., and Zubkov, B.V. (1986) Composition of comet Halley dust particles from Vega observations. *Nature*, 321, 280–282.
- [40] Kissel, J., Brownlee, D.E., Büchler, K., Clark, B.C., Fechtig, H., Grün, E., Hornung, K., Igenbergs, E.B., Jessberger, E.K., Krueger, F.R., Kucsera, H., McDonnell, J.A.M., Morfill, G.M., Rahe, J., Schwehm, G.H., Sekanina, Z., Utterback, N.G., Völk, H.J., and Zook, H.A. (1986) Composition of comet Halley dust particles from Giotto observations. *Nature*, 321, 336–337.

- [41] Clemett, S.J., Sandford, S.A., Nakamura-Messenger, K., Hörz, F., and McKay, D.S. (2010) Complex aromatic hydrocarbons in Stardust samples collected from comet 81P/Wild 2. *Meteoritics and Planetary Science*, 45, 701–722.
- [42] Gradie, J. and Veverka, J. (1980) The composition of the Trojan asteroids. *Nature*, 283, 840–842.
- [43] Roush, T.L. and Cruikshank, D.P. (2004) Observations and laboratory data of planetary organics, in *Astrobiology: Future Perspectives*, Vol. 305, p. 149.
- [44] Jewitt, D. and Luu, J. (1993) Discovery of the candidate Kuiper Belt object 1992 QB1. *Nature*, 362, 730–732.
- [45] Jewitt, D.C. and Luu, J.X. (2001) Colors and spectra of Kuiper Belt objects. *The Astronomical Journal*, 122, 2099–2114.
- [46] Merlin, F., Alvarez-Candal, A., Delsanti, A., Fornasier, S., Barucci, M.A., DeMeo, F.E., de Bergh, C., Doressoundiram, A., Quirico, E., and Schmitt, B. (2009) Stratification of methane ice on Eris’ surface. *The Astronomical Journal*, 137, 315–328.
- [47] de Bergh, C., Schmitt, B., Moroz, L.V., Quirico, E., and Cruikshank, D.P. (2008) Laboratory data on ices, refractory carbonaceous materials, and minerals relevant to transneptunian objects and Centaurs, in *The Solar System Beyond Neptune*, The University of Arizona Press, eds M. Antonietta Barucci et al., pp. 19–35.
- [48] Brown, M.E., Barkume, K.M., Blake, G.A., Schaller, E.L., Rabinowitz, D.L., Roe, H.G., and Trujillo, C.A. (2007) Methane and ethane on the bright Kuiper Belt object 2005 FY9. *The Astronomical Journal*, 133, 284–289.
- [49] Swain, M.R., Vasisht, G., and Tinetti, G. (2008) The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature*, 452, 329–331.
- [50] Tamna energija, Wikipedia, https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Tamna_energija pristupljeno 25.08.2022.
- [51] Tamna materija, Wikipedia, https://hr.tr2tr.wiki/wiki/Dark_matter pristupljeno 25.08.2022.
- [52] Galaksija, Wikipedia, <https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Galaktika>, pristupljeno 25.08.2022.
- [53] Bernard-Salas, J., Peeters, E., Sloan, G.C., Gutenkunst, S., Matsura, M., Tielens, A.G.G.M., Zijlstra, A.A., and Houck, J.R. (2009) Unusual dust emission from planetary nebulae in the Magellanic Clouds. *The Astrophysical Journal*, 699, 1541–1552.
- [54] Wright, G.S., Bridger, A., Geballe, T.R., and Pendleton, Y. (1996) Studies of NIR Dust Absorption Features in the Nuclei of Active and IRAS Galaxies. *Proceedings of the International Conference on Cold Dust and Galaxy Morphology*, January 22–26, 1996, “New Extragalactic Perspectives in the New South Africa”, pp. 143–150.
- [55] Imanishi, M. (2000) The 3.4- μ m absorption feature towards three obscured active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 319, 331–336.
- [56] Bellamy, L.J. (1975) *The Infrared Spectra of Complex Molecules*, Chapman and Hall.
- [57] Dartois, E., Geballe, T.R., Pino, T., Cao, A.-T., Jones, A., Deboffle, D., Guerin, V., Bréchignac, P., and d’Hendecourt, L. (2007) IRAS 08572+3915: constraining the aromatic versus aliphatic content of interstellar HACs. *Astronomy and Astrophysics*, 463, 635–640.
- [58] Agúndez, M., Cernicharo, J., and Guélin, M. (2015a). Discovery of Interstellar Ketenyl (HCCO), a Surprisingly Abundant Radical. *Astron. Astrophys.* 577, L5. doi:10.1051/0004-6361/201526317

- [59] Cernicharo, J., Marcelino, N., Pardo, J. R., Agúndez, M., Tercero, B., de Vicente, P., et al. (2020b). Interstellar Nitrile Anions: Detection of C₃N⁻ and C₅N⁻ in TMC-1. *Astron. Astrophys.* 641, L9. doi:10.1051/0004-6361/202039231
- [60] Cernicharo, J., and Guélin, M. (1987). The Physical and Chemical State of HCL2. *Astron. Astrophys.* 176, 299.
- [61] Cernicharo, J., Guélin, M., and Askne, J. (1984). TMC 1-like Cloudlets in HCL 2. *Astron. Astrophys.* 138, 371.
- [62] McGuire, B. A., Burkhardt, A. M., Kalenskii, S., Shingledecker, C. N., Remijan, A. J., Herbst, E., et al. (2018). Detection of the Aromatic Molecule Benzonitrile (C₆H₅CN) in the Interstellar Medium. *Science* 359, 202–205. doi:10.1126/science.aao4890
- [63] Ohishi, M., Ishikawa, S.-I., Yamada, C., Kanamori, H., Irvine, W. M., Brown, R. D., et al. (1991). Detection of a New Carbon-Chain Molecule, CCO. *ApJ* 380, L39. doi:10.1086/186168
- [64] Matthews, H. E., Irvine, W. M., Friberg, P., Brown, R. D., and Godfrey, P. D. (1984). A New Interstellar Molecule: Triarbon Monoxide. *Nature* 310, 125–126. doi:10.1038/310125a0
- [65] Cordiner, M. A., Charnley, S. B., Kisiel, Z., McGuire, B. A., and Kuan, Y.-J. (2017). Deep K-Band Observations of TMC-1 with the Green Bank Telescope: Detection of HC₇O, Nondetection of HC₁₁N, and a Search for New Organic Molecules. *ApJ* 850, 187. doi:10.3847/1538-4357/aa970c
- [66] Agúndez, M., Cernicharo, J., de Vicente, P., Marcelino, N., Roueff, E., Fuente, A., et al. (2015b). Probing Non-polar Interstellar Molecules through Their Protonated Form: Detection of Protonated Cyanogen (NCCNH⁺). *Astron. Astrophys.* 579, L10. doi:10.1051/0004-6361/201526650
- [66a] Agúndez, M., Marcelino, N., Tercero, B., Cabezas, C., de Vicente, P., and Cernicharo, J. (2021a). O-bearing Complex Organic Molecules at the Cyanopolyne Peak of TMC-1: Detection of C₂H₃CHO, C₂H₃OH, HCOOCH₃, and CH₃OCH₃. *Astron. Astrophys.* 649, L4. doi:10.1051/0004-6361/202140978
- [67] Genzel, R. and Stutzki, J. (1989) The Orion Molecular Cloud and starforming region. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 27, 41–85.
- [68] Aitken, D.K., Roche, P.F., Spenser, P.M., and Jones, B. (1979) Infrared spatial and spectral studies of an ionization front region in the Orion Nebula. *Astronomy and Astrophysics*, 76, 60–64.
- [69] Sellgren, K., Werner, M.W., and Dinerstein, H.L. (1983) Extended near-infrared emission from visual reflection nebulae. *The Astrophysical Journal*, 271, L13–L17.
- [70] Sellgren, K., Allamandola, L.J., Bregman, J.D., Werner, M.W., and Wooden, D.H. (1985) Emission features in the 4–13 micron spectra of the reflection nebulae NGC 7023 and NGC 2023. *The Astrophysical Journal*, 299, 416–423.
- [71] Adamson, A.J., Whittet, D.C.B., and Duley, W.W. (1990) The 3.4- μ m interstellar absorption feature in Cyg OB2 no. 12. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 243, 400–404.

- [72] Whittet, D.C.B., Boogert, A.C.A., Gerakines, P.A., Schutte, W., Tielens, A.G.G.M., de Graauw, T., Prusti, T., van Dishoeck, E.F., Wesselius, P.R., and Wright, C.M. (1997) Infrared spectroscopy of dust in the diffuse interstellar medium toward Cygnus OB2 no. 12. *The Astrophysical Journal*, 490, 729–734.
- [73] Duley, W.W. and Williams, D.A. (1983) A 3.4 μm absorption band in amorphous carbon: implications for interstellar dust. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 205, 67P–70P.
- [74] Chiar, J.E., Tielens, A.G.G.M., Whittet, D.C.B., Schutte, W.A., Boogert, A.C.A., Lutz, D., van Dishoeck, E.F., and Bernstein, M.P. (2000) The composition and distribution of dust along the line of sight toward the galactic center. *The Astrophysical Journal*, 537, 749–762.
- [75] Sandford, S.A., Allamandola, L.J., Tielens, A.G.G.M., Sellgren, K., Tapia, M., and Pendleton, Y. (1991) The interstellar C–H stretching band near 3.4 microns: constraints on the composition of organic material in the diffuse interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 371, 607–620.
- [76] Duley, W.W., Scott, A.D., Seahra, S., and Dadswell, G. (1998) Integrated absorbances in the 3.4 μm CHn band in hydrogenated amorphous carbon. *The Astrophysical Journal*, 503, L183–L185.
- [77] Chiar, J.E., Tielens, A.G.G.M., Whittet, D.C.B., Schutte, W.A., Boogert, A.C.A., Lutz, D., van Dishoeck, E.F., and Bernstein, M.P. (2000) The composition and distribution of dust along the line of sight toward the galactic center. *The Astrophysical Journal*, 537, 749–762.
- [78] Mennella, V. (2006) Activation energy of C–H bond formation in carbon grains irradiated with hydrogen atoms. *The Astrophysical Journal*, 647, L49–L52.
- [79] Boulanger, F., Baud, B., and van Albada, G.D. (1985) Warm dust in the neutral interstellar medium. *Astronomy and Astrophysics*, 144, L9–L12.
- [80] Detektori i teleskopi na milimetarskim i submilimetarskim valnim duljinama, *Frontiers*, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2022.787567/full> pristupljeno 25.08.2022.
- [81] *Teleskop ALMA*. Preuzeto s <https://www.almaobservatory.org/> pristupljeno 25.08.2022.
- [82] *Teleskop NOEMA*. Preuzeto s https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:The_NOEMA_observatory_operated_by_IRAM.jpg pristupljeno 25.08.2022.
- [83] Spektroskopija, Wikipedia, <https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Spektroskopija> pristupljeno 25.08.2022.
- [84] Slika 6.3. Dio rotacijskog spektra CF₃I. Preuzeto s https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Rotacijska_spektroskopija
- [85] Slika 6.4. Vibracijski spektar brommetana. Preuzeto s <https://slideplayer.com/amp/12663784/>