



Astrokemialla avaa tähtitarhojen

NASA/ESA

Kuva Orionin sumusta on koottu
Hubble-avaruusteleskoopin
ottamista kuvista.



saloja

Astrokemia tutkii alkua-
aineiden kosmista run-
sautta sekä tähtien,
planeettojen ja elämän
syntymistä. Maailmoja
syleilevän tieteenalan
avulla avaruudesta on
löydetty jo yli 170
molekyyliä.

Jarmo Wallenius



Tiedemaailmaa kohautti viime vuonna hapen molekulaarisen muodon löytyminen avaruudesta.

Tähtienvälinen aine pilvineen, komeetat, meteorit ja oma aurinkokuntamme planeettoineen ja kuineen ovat astrokemian ja samalla myös astrobiologian keskeisiä tutkimuskohteita.

Astrokemian tutkii eri alkuaineiden kosmista runsautta ja keskinäisiä reaktioita, yhdisteiden syntyä ja pysyvyyttä avaruudessa sekä niiden vuorovaikutusta säteilyn ja kosmisten hiukkasten kanssa. Pelkistään voidaan sanoa, että astrokemian tutkii tähtien, planeettojen ja elämän syntymekanismeja ja -ehtoja.

Kosmisen kemian keskeisiä kysymyksiä on se, missä määrin molekyylit ja kemialliset reaktiot ovat vaikuttaneet tähtienvälisessä avaruudessa universumin kehityskulkuun ensimmäisten neutraalien vetypilvien muodostumisesta ja tähtien synnystä alkaen.

Spektroskopia tärkein työkalu

Avaruudesta on löydetty 75 vuoden aikana yli 170 molekyyliä, radikaalia ja ioniä. Ensimmäinen tähtienvälisestä avaruudesta tunnistettu molekyyli oli kaksiatominen metylydiyniradikaali CH, joka löydettiin vuonna 1937.

Tähän mennessä kosmoksista on analysoitu 15 sellaista yhdistettä, joissa atomien lukumäärä on yli kymmenen. Planetaarisissa sumuissa on havaittu myös C60- ja C70-fullereeneja sekä 24:stä hiiliatomista koostuvaa grafeenia. Näitä löydöksiä ei kuitenkaan ole vielä vahvistettu.

Viime vuonna tiedemaailmaa kohautti universumin kolmanneksi yleisimmän alkuaineen eli hapen molekulaarisen muodon löytyminen avaruudesta. Löytö tehtiin Auringosta 1 500 valovuoden päässä olevasta Orionin kaasusumusta meille suomalaisillekin tutun Herschel-avaruusteleskoopin avulla.

Toukokuussa 2009 taivaalle laukaistun ja vielä ainakin vuoden ajan havaintoja tekevän Herschel-infrapunakaukoputken pääpeili on tarkkuushioitu oikeisiin mittoihinsa Piikkiössä Tuorlan observatoriossa. Monoliittinen peili on jopa Hubble-avaruusteleskoopin pääpeiliä kookkaampi, 3,5 metriä halkaisijaltaan.

Suurin osa astrokemian tuottamasta tiedosta saadaan spektroskopian avulla. Avaruudessa ja maassa toimivat infrapuna- ja radioteleskoopit keräävät taivaalta ”sormenjälkiä” eli spektriviivoja tähtienvälisen aineen molekyylien pyörimis- ja



Apoc2400

Herschel-satelliitti rakennettiin Euroopan avaruusjärjestön ESan tutkimuskeskuksessa Estecissä puhdistilaloissa.

Monta nimeä

Kemian alaa, joka tutkii avaruudessa esiintyviä atomeja, molekyyliä ja yhdisteitä, kutsutaan yleisimmin astrokemiaksi. Myös atomi- ja molekyyliastrofysiikka, avaruuskemia ja kosmologia kertovat, mistä on kyse. Niissä kaikissa kemia tieteenalana yhdistyy astronomiaan.

värähtelymuutoksien yhteydessä syntyvän säteilyn rotaatio- ja vibraatio-spektreistä radio-, mikroaalto- ja infrapuna-alueilla. Havaintoja verrataan laboratorio-koekokeiden tuloksiin.

Nesteheliumin avulla 4,2 kelvinasteeseen jäädytetyn Herschelin mittalait-

teistot on valjastettu tutkimaan tähtienvälisessä avaruudessa, omassa Linnunradassamme ja lähigalakseissa olevien molekyylien, ionien, atomien ja myös kiinteän pölyn lähettämää säteilyä.

Tähtienväliset tapahtumat vaativat aikaa

Tuore osoitus astrokemian ja atomi- ja molekyyliastronomian tärkeydestä oman aikamme tieteelle ja tutkimukselle saatiin tämänvuotisilla Amerikan tieteiden edistämissäätiön AAAS:n järjestämällä Tieteen päivillä, jotka pidettiin helmikuussa Kanadan Vancouverissa. Yksi ohjelman seminaareista käsittelee aineen kiertokulkua tähtijärjestelmissä.

Alan johtavat tutkijat **Paul Goldsmith**

ja **Margaret Meixner** käsittelivät esityksissään tähtienvälisiä aineita ja etenkin tähtien syntysijoina ja lastenkamareina toimivia tiheitä molekyylipilviä.

Tähtienvälinen avaruus ei ole staattinen näyttämö vaan galaksien dynaaminen osa, jossa materiaa liikkuu ja tiivistyy eri vaiheiden ja faasien kautta tähdiksi ja purkautuu taas takaisin avaruuteen.

Tähtienvälisen aineen arvioidaan uudistuvan linnunradoissa muutaman vuosimiljardin kuluessa. Joissain tapauksissa kierto diffuuseista, harvoista ainepilvistä ensin tiiviiksi molekyylipilviksi ja edelleen painovoiman ajamana prototähtien kertymäkiekkojen kautta yksittäisiksi tähdiksi tai tähti joukoiksi ja taas takaisin uudeksi tähtienvälisen pilvien raaka-aineeksi saattaa olla varsin nopeaakin, ”vain” muutama sata miljoonaa vuotta.

Tähtienvälisestä kaasusta 95 prosenttia on neutraalissa muodossa ja loput viisi prosenttia ioneina. Kolme neljäsosaa neutraalista kaasusta on atomeina, lähinnä vetynä ja heliumina ja loput 25 prosenttia molekyyleinä. Muun muassa pysyviä hiilimonoksidi- eli CO-molekyylejä on löydetty jo hyvin nuoresta, alle miljardin vuoden ikäisestä univerrumista.

Hiilimonoksidi on stabiili molekyylit jopa yli 3 000 kelvinasteen lämpötiloissa eli olosuhteissa, jotka olivat vallitsevia jo silloin, kun vety- ja heliumytimistä alkoi muodostua jäähtyvissä univerrumissa pysyviä atomeja 400 000 vuotta alkuräjähdyksen jälkeen.

Hiilimonoksidilla on ratkaiseva merkitys itse pölyn ja sen pinnalle tiivistyvien aineiden kemiassa. Pölyhiukkasten koko on tavallisesti alle yhden mikrometrin, ja keskikoko on tavallisesti vain 0,1 mikronin luokkaa. Pölyn pintaan muodostuu helposti hyvin ohut, kymmenen nanometrin paksuinen jääkerros eräänlaiseksi liimaksi.

Hiilimonoksidin rooli tähtienvälisessä avaruudessa riippuu usein siitä, millainen on hapen ja hiilen keskinäinen suhde kuolleiden, fuusiopalonsa lopettaneiden tähtien jäljiltä. Jos happea on ylijäämää, se sitoutuu muun muassa veteen, hiilidioksideihin ja typen oksideihin. Jos taas hiiltä on happea runsaammin, kaikki happi on kulunut hiilimonoksidin muodostumiseen. Tällöin Auringon kaltaisen kuolleen tähden jäljiltä on löydettävissä muun muassa typen oksideja, asetyleneitä, metaania, ammoniakkia ja vetycyanidia.

Tähtienvälisessä avaruudessa aineita esiintyy tiivistyneenä hyvinkin vaihtelevissa, Maasta paljon poikkeavissa olosuhteissa. Vetyä esiintyy kaasumaisena kaikissa eri muodoissaan: ionisoituneena, neutraalina ja molekyyleinä lämpö-

tilasta, tiheydestä ja magneettikentistä riippuen. Omassa Linnunradassamme on laajoja harvaa ionisoitunutta vetyä sisältäviä tähtienvälisiä alueita. Tällaisten alueiden lämpötila on 8 000 astetta ja ionisoituneen vedyn tiheys vain 0,2–0,5 atomia kuutiokeskimetriä kohden. Alueiden koko voi kuitenkin olla jopa tuhat parsekia (paralleksisekuntia) eli yli 3 000 valovuotta.

Neutraalia atomaarista vetyä sisältävien lämpimien alueiden eli lämpimän neutraalin väliaineen tiheys on myös pieni, lämpötila 6 000–10 000 astetta ja koko 300–400 parsekia eli 900–1 000 valovuotta.

Sen sijaan kylmän väliaineen vetytiheys on jo 20–50 atomia kuutiokeskimetriä kohden ja lämpötila vain 50–100 kelvinaastetta (alle –170 celsiusastetta). Tällaisten ”pakkaspilvien” koko on 300–900 valovuotta.

Molekyylipilvissä syntyy uusia yhdisteitä

Kemian näkökulmasta tärkeimpiä ja mielenkiintoisimpia tähtienvälisiä alueita ovat molekyylipilvet, joissa vetykaasun tiheys voi olla jopa 10 000 molekyylia kuutiokeskimetrissä. Tällainenkin tiheys vastaa hyvää maanpäällistä tyhjiötä. Lämpötila pilvissä on vain 10–30 astetta absoluuttisen nolapisteen yläpuolella. Suurimpien molekyylipilvien läpimitta voi olla jopa 250 valovuotta, mutta tavallisimmin ne ovat 30 valovuoden kouruisia.

Tällaisissa olosuhteissa vetymolekyylejä, neutraalia vetyä ja hiilimonoksidia voi tiivistyä hiiltä ja silikaatteja sisältävien pölyhiukkasten päälle. Vety voi usein vaellella ja tunneloitua pölyhiukkasen päälle muodostuneen ohuen jääkerroksen sisälle ja läpi.

Pölyhiukkasen pinnalla voi tapahtua kemiallisia reaktioita. On todennäköistä, että yksinkertaisimpia molekyylejä, kuten hiilidioksidia, ammoniakkia ja

metanolia, syntyy vesijään pinnalla. Ulkopuolelta tuleva ultraviolettisäteily ja kosmiset hiukkaset voivat toimia sekä reaktioiden käynnistäjinä että myös jään lämmittäjinä. Jään lämmitessä reaktiotuotteita vapautuu avaruuteen.

Molekyylipilvissä voi pienistä tiheyksistä huolimatta tapahtua harvakseltaan kahden kappaleen välisiä törmäyksiä ja reaktioita. Reaktioiden todennäköisyys ja tehokkuus kasvaa, kun toinen hiukkasista on varattu eli ionisoitunut ja toinen taas esiintyy molekyylimuodossa. Tällaisten reaktioiden on todettu tuottavan tehokkaasti uusia molekyylejä ja neutraaleja atomeja.

Tutkijoita on viime kuukausina hämmästyttänyt myös se, että supernovat eli räjähtävät tähdet pystyvät itsekin tuottamaan hyvin monimutkaisia orgaanisia, kivihiiltä ja petrolia muistuttavia fossiilisia yhdisteitä, joissa on mukana sekä



Linnunradan koostumus

Kotigalaksissamme Linnunradassa on lähes 200 miljardia tähteä. Vuosittain syntyy vain kaksi tai kolme uutta Auringon kokoista tähteä.

Galaksimme massasta 90 prosenttia on keskittynyt tähtiin, ja tähtienvälisiä aineita on 10 prosenttia. Siitä taas 99 prosenttia on kaasua, etupäässä vetyä. Prosentin verran on tasaisesti kaasun joukkoon sekoittunutta pölyä. Pöly, joka on kuolleiden tähtien tuhkaa, koostuu enimmäkseen piistä, sen oksideista, karbideista, silikaateista ja hiilen erilaisista muodoista (kuten noesta, grafiitista ja timantista) mutta myös raskaammista, supernovien räjähtäessään ulos syöksemistä alkuaineista ja yhdisteistä.



Kuvapari Orionin sumun Trapetsi-tähtiryhmästä. Vasemmalla optinen ja oikealla infrapunakuva.



Supernovat eli räjähtävät tähdet pystyvät tuottamaan hyvin monimutkaisia orgaanisia yhdisteitä.



hiilen aromaattisia eli rengasmaisia että alifaattisia eli ketjumaisia rakenteita.

Toisaalla taas on Orionin kaasusumusta tehtyjen mittausten yhteydessä hämmästelty tuoreeltaan sitä, miten helposti ja runsaasti metanolia on muodostunut sikäläisessä tähtien lastentarhassa. Metanolia pidetään varteenotettavana ja tärkeänä molekyylinä juuri elämälle tärkeiden orgaanisten molekyyliden syntetisoinnissa. Oman aurinkokuntamme synnyn aikoihin viitisen miljardia vuotta sitten metanolipitoisuus näyttäisi kuitenkin komeetatutkimusten perusteella olleen ylättävän alhainen.

Koska molekyylejä koossa pitävät sidokset ovat hyvin herkkiä säteilylle ja korkeille lämpötiloille, niitä havaitaan tähtienvälisestä kylmästä avaruudesta juuri pimeiden molekyylipilvien sisuksista, kuolevien, punaisten jättiläistähtien ulkokerroksista, komeetoista ja planeettojen kaasukehistä.

Erittäin tehokkaita uusien molekyyliden syntysijojä ovat molekyylipilvien kuumiksi ytimiksi kutsutut taskut, missä kaasun tiheys voi olla jopa satamiljoonaa hiukkasta kuutiokesanmetrissä ja lämpötila 100–300 kelvinastetta eli lämpimimmillään lähes ihmisen ruumiinlämmön luokkaa.

Tällaisia alueita näyttäisi löytyvän muun muassa Jousimiehen tähdistössä noin 400 valovuoden päässä Linnunradan keskustasta sijaisevassa Sagittarius B2 -sumussa, josta on löytynyt liki puolet tähän mennessä tunnistetuista astrokemiallisista molekyyleistä. Myös meistä 450 valovuoden päässä oleva Härkä-sumu ja 1 500 valovuoden päässä oleva Orionin kaasusumu ovat monimutkaisten orgaanisten molekyyliden syntysijojä.

Sagittarius B2:sta on löytynyt muun muassa biokemiallisesti mielenkiintoista 8-atomista glykoaldehydiä, yksinkertaista sokeria. Reagoimalla muiden molekyyliden kanssa se voi muodostaa monimutkaisempia sokereita, kuten glukoosia ja riboosia, joka on rna:n ja dna:n rakennusmateriaalia.

Sagittarius B2:sta on saatu vahvoja viitteitä myös yksinkertaisimman aminohapon, glysiinin, läsnäolosta. Kyseisen molekyylipilven keskilämpötila kuumien taskujen ulkopuolella on kuitenkin vain 30 kelvinastetta. □

Kirjoittaja on fyysikko ja tiedetoimittaja. jarmowallenius@hotmail.com

Infrapunakuva Kotkasumusta paljastaa emissiosumusta uusia rakenteita.



Hubble-avaruusteleskoopin kuvaama yksityiskohta Kotkasumun keskeltä.

Jeff Heester ja Paul Scowen / Arizonan yliopisto ja NASA