

Julkaistu teoksessa Kari Enqvist, Ilari Hetemäki & Teija Tiilikainen (toim.) *Kaikki vapaudesta* (2017). Helsinki: Gaudeamus, 247–259.

Elämä ja mahdollinen elämä – filosofisia näkökulmia

RAMI KOSKINEN & TARJA KNUUTILA

Biologia on elämää tutkiva tiede. Vuosimiljoonia kestäneen prosessin aikana evoluutio on muovannut liki käsittämättömän määrän erilaisia eläviä olioita. Saadakseen otetta elämän koko kirjosta tutkijat ovat kehittäneet yhä hienostuneempia tapoja jaotella ja analysoida organismeja ja niiden monimutkaisia solunsisäisiä toimintoja. He ovat luokitelleet eläviä olentoja lajeihin ja sukuihin, selittäneet niiden toimintaa, rakenteita ja käytöstä, ja tutkineet niiden keskinäistä polveutumista. Viime vuosisadalla nousseet uudet biologian haarat, kuten genetiikka ja molekyylibiologia, ovat antaneet tutkijoille aivan uudenlaisia tieteellisiä työkaluja elämän tutkimiseen. Näiden tutkimusalojen suurimpien saavutusten, kuten DNA:n rakenteen selvittämisen ja geneettisen koodin avaamisen, on ajateltu kertovan jotakin elämän perustasta.

Tämän kaiken valossa saattaakin olla yllättävää, ettei tutkijoilla – edes biologien keskuudessa – ole yksiselitteistä kuvaa siitä, mitä elämä oikeastaan on. Arkikäsitteemme elämästä lähtee liikkeelle meille selviltä tuntuvista tapauksista kuten keskikokoisista nisäkkäistä ja viherkasveista. Historian saatossa käsitystä elämän monimuotoisuudesta on rikastettu erikoisemmilla lisäyksillä kuten bakteereilla ja muilla paljaalle silmälle näkymättömillä pieneliöillä.

Kun Helsingin yliopiston ”Ihme elämä” -tiedeteemaa varten järjestetyssä haastattelukokonaisuudessa maaliskuussa 2016 toimittaja kysyi lääkäri ja kehitysbiologi Hannu Sariolalta ”mitä elämä on”, hänen vastauksena oli rehellisen ytimekäs: ”En minä tiedä.” Tätä lausuntoa ei tule tulkita niin, etteikö biologeilla olisi vaikuttavaa määrää tietoa ja ymmärrystä omista tutkimuskohteistaan. Päinvastoin, sitä on enemmän kuin koskaan ennen. Tämä ei ole kuitenkaan tehnyt elämän määrittelemisestä yhtään helpompaa. Mitä enemmän tietoa esimerkiksi erilaisista mikro-organismeista on saatu, sitä hankalammaksi on käynyt yhden kaiken kattavan elämän määritelmän löytäminen. Virukset muodostavat tässä suhteessa mielenkiintoisen rajatapauksen, sillä osa tutkijoista ei pidä niitä elävinä, mutta niillä on useita elämälle tyypillisiä ominaisuuksia.

Toisaalta elämän määrittelemisen vaikeuteen liittyy myös kokonaan toinen, monessa mielessä vielä tärkeämpi näkökulma. Voidaan nimittäin ajatella, että ongelmana ei niinkään ole puutteellinen ymmärrystä siitä, mitä tunnettu elämä on. Sariola toteaaakin, että esimerkiksi kysymys ongelmalliseksi koettujen virusten statuksesta on pikemmin filosofinen kuin suoran tieteellinen. Määrittelyongelma saattaa johtua siitä, että meillä ei ole hyvää käsitystä siitä, *mitä elämä voisi olla*. Sariolan sanoin: ”Me tunnemme elämän vain sellaisena kuin se esiintyy omalla planeetallamme.” Tilannetta voidaan nimittää elämän *yhden otoskoon ongelmaksi*.

Monista muista luonnontieteistä poiketen biologia on keskittynyt tutkimaan ja selittämään ilmiöitä, jotka ovat kosmisessa ja ajallisessa mittakaavassa hyvin paikallisia. Näin ei kuitenkaan tarvitse olla. Uudet biotieteiden alat kuten synteettinen biologia ja astrobiologia laajentavat käsitystämme elämästä kohti mahdollista elämää. Kohteena on elämä sellaisena kuin se voisi olla, joko ihmisen rakentamana maan päällä, tai jossain muualla maailmankaikkeudessa.

ELÄMÄN MÄÄRITELMÄT JA YHDEN OTOSKOON ONGELMA

Filosofit ja luonnontieteilijät ovat määritelleet elämää vähintään antiikin ajoista lähtien. Tuloksena on ollut häkellyttävä kirjo erilaisia määritelmiä, jotka parhaimmillaankin leikkaavat vain osittain toisiaan. Määritelmien sekavuuteen on jatkuvasti tarkentuvan biologisen tiedon lisäksi ainakin kaksi muuta filosofisesti merkittävää syytä.

Ensiksikin, elämä tulee käsitteenä lähelle arkikielen käsitteitä, jotka määräytyvät käytännön tarpeestamme toimia siinä luonnollisessa ja sosiaalisessa todellisuudessa, johon *Homo sapiens* -lajin edustajina kuulumme. Meitä ympäröivää elävää kokonaisuutta, joka tarjoaa ravintomme ja erilaisia materiaaleja tarpeidemme tyydyttämiseen nimitetään arkipuheessa luonnoksi. Vaikka luonnolla on korostunut merkitys käytännön elämässä ja kulttuurissa, se ei tieteelliseltä katsantokannalta muodosta mitään selkeää teoreettista kokonaisuutta.

Arkikäyttönsä lisäksi elämän käsitteellä on myös teoreettiset ulottuvuutensa. Tieteellisestä näkökulmasta elämän teoreettista ja empiiristä määrittelyä rajoittaa edellä mainittu yhden otoskoon ongelma: meillä ei yksinkertaisesti ole esimerkkejä Maan ulkopuolisesta elämästä. Yhden otoskoon ongelmalla on kauaskantoisia käytännöllisiä ja teoreettisia seurauksia sille, miten elämää voidaan tutkia universaalina biologisena ilmiönä. Biologian pitäisi tarkastella elämää myös muualla kuin maapallolla, jotta se voisi olla elämää yleisemmin tutkiva tiede. Sen olisi myös pyrittävä vastaamaan siihen, mikä on elämälle mahdollista tai mahdotonta. Vaikka useat biologit ovat

esittäneet, että biologinen tutkimus ei välttämättä edes tarvitse elämän käsitettä, on siitä keskusteltu ahkerasti astrobiologiasta. Astrobiologia (tai *eksobiologia*) tutkii elämän alkuperää ja evoluutiota universumissa ja sen tutkimuskysymyksiä ovat muun muassa, onko maapallon ulkopuolista elämää olemassa ja kuinka sitä voitaisiin havaita ja tutkia.

Vuosina 1975 ja 1976 laukaistut Viking-alukset lähettivät dataa Marsista Maahan muutaman vuoden ajan, ja vuonna 2007 Stardust-luotaimen avulla Maahan saatiin analysoitavaksi materiaaleja 67P/Churyumov–Gerasimenko komeetasta. Komeettaa tutkimaan lähetetyn Rosetta-avaruusluotaimen ja komeetan pinnalle 2014 ankkuroituneen Philae-laskeutujan toivottiin antavan tietoa aikaisesta aurinkokunnasta ennen planeettojen muotoutumista. Ennen lopullista sammumistaan laskeutuja ehti tutkia komeetan pintaa ja antaa viitteitä yhdisteistä, jotka ovat tunnettuja elämälle.

Kyseiset massiivisen mittakaavan taloudellis-teknologiset hankkeet elämän ja sen vähimmäisvaatimusten tutkimiseksi Maan ulkopuolella edellyttävät, että tutkijoilla on jonkinlainen näkemys siitä, mitä ollaan etsimässä. Tämä aiheuttaa huomattavan käsitteellisen ja metodologisen noidankehän. Yhtäältä astrobiologeilla täytyy olla jonkinlainen käsitys siitä, mitä elämä on, kun he arvioivat esimerkiksi jostakin kaukaisesta planeetasta saatuja havaintoja. Toisaalta meillä ei voi olla *yleistä* elämän teoriaa ilman ymmärrystä siitä, millaista elämää voi olla maapallon ulkopuolella. Kärjistäen voisi siis sanoa, että tutkijoilta puuttuu samanaikaisesti sekä yleinen elämän määritelmä että kattava käsitys siitä, mitä tällä oikein oltaisiin määrittelemässä!

Jotkut filosofit ovatkin kritisoineet yrityksiä määritellä elämää. Tämä kritiikki nojaa usein klassiseen näkemykseen määritelmästä, jonka mukaan määriteltävästä asiasta tulisi kyetä tarjoamaan riittävät ja välttämättömät ehdot. Tällöin käy helposti niin, että määritelmä sulkee pois joitakin olioita, joita tutkijat perinteisesti ovat pitäneet elävinä. Tai vaihtoehtoisesti se kattaa liian monia tapauksia, joista osasta kenties haluaisimme sanoa, että ne korkeintaan muistuttavat eläviä olentoja. Esimerkiksi lisääntyminen ei ole elämälle välttämätöntä. Aasin ja hevosen risteymänä syntyneet muulit ovat lisääntymiskyvyttömiä, mutta selvästi eläviä! Toisaalta taas usein elämän tunnusmerkiksi esitetty kyky itsensä ylläpitoon (*self-sustainability*) ei ole riittävä ehto elämälle, koska myös jotkin elottomat kristallit täyttävät tämän tunnusmerkin.

Käytännön syistä esimerkiksi astrobiologiassa on kuitenkin oltava jokin lähtökohta elämälle, jotta sitä voidaan etsiä muualta maailmankaikkeudesta. Tällaisen projektin kritisoiminen klassisen filosofisen määritelmäkäsityksen pohjalta olisi virheellistä. Voidaan nimittäin ajatella, että elämää voidaan lähestyä tiukan loogisen määritelmän sijaan kokonaisvaltaisemman *elämän teorian*

pohjalta. Osana tällaista teoriaa voidaan tarjota työmääritelmiä tai hypoteeseja, joiden ei ole tarkoituskaan toimia lopullisina totuuksina. Esimerkiksi Yhdysvaltain avaruusjärjestö NASA on vuodesta 1992 asti operoinut yksinkertaisella määritelmällä, jonka mukaan elämäksi lasketaan sellaiset itsensä ylläpitävät kemialliset systeemit, jotka kykenevät darwinilaiseen evoluutioon. Tällaisilla määritelmillä on myös hyvin tärkeä kommunikatiivinen tehtävä sellaisilla monitieteisillä tutkimusaloilla, kuten astrobiologia, joilla työskentelee muun muassa molekyylibiologeja, fyysikkoja, kemistejä, astronomeja, ekologeja, geologeja ja matemaatikkoja.

Toisaalta elämän määritelmää voidaan myös lähestyä kartoittamalla elämää ylläpitäviä ympäristöjä. Eksoplaneetoiksi kutsutaan tähtien ympärillä kiertäviä planeettoja. Satelliittien ja luotaimien avulla eksoplaneettoja on löydetty jo yli 3000 kappaletta. Avaruusteleskooppi Kepler on mullistanut aikaisemmat käsitykset eksoplaneettojen määrästä.

Astrobiologien kiinnostus on kohdistunut erityisesti niin kutsutulla elämänvyöhykkeellä sijaitseviin planeettoihin, joiden pinnalla voi esiintyä vettä nestemäisessä muodossa. Eksoplaneetoilta mahdollisesti löytyvää elämää voidaan tutkia vain epäsuoraan. Viitteitä elämästä saadaan lähinnä etsimällä ja mittaamalla niin kutsuttuja bioleiman (*biosignature*) omaavia kaasuja eksoplaneettojen ilmakehästä. Bioleimallisia kaasuja tuottavat erilaiset aineenvaihdunnalliset prosessit. Tällainen tutkimus olettaa, että mikä tahansa elämä edellyttää aina aineenvaihduntaa.

Yleisemmän elämän määritelmän kannalta tässä lähestymistavassa on kuitenkin ongelmana se, että vaikka tutkijoilla olisi hyvin karkean tason tietoa siitä, minkälaiset fysikaaliset minimiolosuhteet elämälle vaaditaan tai mitä sen havaitsemiseksi tarvitaan, tarkempi kuva esimerkiksi elämän mahdollisista kemiallisista perustoista vaatisi edelleen omaa itsenäistä selvitystään. Hyvänä lähtökohtana voidaan pitää sitä, että Maan biokemiaa muistuttavat löydöt ovat hyvä osoitus mahdollisesta elämästä. Mutta voisiko elämä pohjautua esimerkiksi jollekin muulle kemialliselle ratkaisulle kuin hiilelle ja vedelle? Onko elämän perusrakennusaineena pidetty DNA-molekyyli elämälle välttämätön? Synteettinen biologia tarjoaa tälle selvitystyölle monta lupaavaa tutkimushaaraa.

SYNTEETTINEN BIOLOGIA JA KSENOBIOLOGIA

Synteettinen biologia on 2000-luvun aikana esiin noussut uusi poikkitieteellinen bioteknologian haara. Sen tavoitteena on suunnitella ja rakentaa uudenlaisia biologisia organismeja ihmiselle hyödyllisiin tarkoituksiin. Synteettisen biologian avulla voidaan esimerkiksi syntetisoida

lääkeaineita, luoda kokonaan uusia materiaaleja tai tuottaa ympäristöystävällisempiä polttoaineita. Kehitystyössä otetaan mallia etenkin insinööritieteistä ja eläviä organismeja lähestytään suunniteltavina ja standardoitavina teknisinä artefakteina. Jos erityisesti mikrobit kyetään valjastamaan tuotannollisiin tarkoituksiin, voitaisiin saada aikaan kokonainen biotaloudellinen vallankumous.

Synteettisen biologian myötä biologit eivät ole pelkkiä elävän luonnon tutkijoita ja luokittelijoita vaan sen aktiivisia muokkaajia ja luoja. Vaikka organismeja on ollut mahdollista muokata perinteisemmän geeniteknologian keinoin jo pidemmän aikaa, pyrkii synteettinen biologia tekemään tästä muokkausprosessista entistä suunnitelmallisempaa ja järjestelmällisempää. Suunnittelu aloitetaan näyttöpäätteen ääressä, ja digitaalisesti valmiiksi standardoiduista osista tai ”moduuleista” rakennetaan laboratorioissa biologisia systeemejä tai niiden osia, esimerkiksi muokattuja hiivasoluja ja bakteeritehtaita. Tämänkaltainen suunnittelu- ja rakennusvaiheiden erottaminen on tyypillistä juuri insinööritieteille ja se myös mahdollistaa tulevaisuudessa halutulla tavalla toimivien tuotteiden kaupallisen massatuotannon.

Drew Endy, yksi synteettisen biologian pioneereista ja popularisoijista on todennut, että ”insinöörin näkökulmasta biologiset systeemit ovat replikoivia koneita, jotka tekevät virheitä replikaatioprosessissa”. Vaikka tämä virheellinen replikoituminen onkin viime kädessä vastuussa Maan eliöiden evoluutiosta, se on insinöörinäkökulmasta usein ei-toivottu ominaisuus. Synteettiset biologit voivat kuitenkin keinotekoisesti muuttaa organismeja ja niiden toimintaympäristöä luonnollisesta poikkeaviksi ja tällä tavoin pyrkiä tekemään muutoksista ennustettavampia.

Insinööritieteellisten tarkoitusperiensä ohella synteettiset biologit tulevat myös samalla venyttäneeksi koko tämän hetkisen biologisen tiedon rajoja. Monet synteettisen biologian sovellukset voidaankin nähdä paitsi hyödyllisinä ja mahdollisesti kaupallistettavina tuotteina myös biologisten systeemien yleisiä toiminnallisia, geneettisiä tai jopa kemiallisia mahdollisuuksia kartoittavina tutkimuskohteina. Kun perinteinen biologinen tutkimus on edennyt tieteellisen analyysin mukaisesti hypoteesien testauksesta kohti yhä tarkempaa ja rajoitetumpaa tutkimuksen kohteena olevasta asiasta, tuntuu synteettinen biologia kääntävän tämän kuvan pääläelleen: Tutkimuskohteena ei enää ole pelkkä olemassa oleva luonto, vaan se, mitä se mahdollisesti voisi olla.

Synteettistä biologiaa voidaankin kuvata eräänlaisena potentiaalisen biologian kartoituksena. Synteettisen biologian lähtökohtana on, että evoluution tuottama elämä maapallolla on vain

jäävuoren huippu kaikista niistä mahdollisista suunnitteluratkaisuista ja rakenteellisista vaihtoehdoista, joille elämä voi ylipäätään perustua.

Maan organismien geneettinen materiaali rakentuu DNA:n emäksistä adeniini (A), tymiini (T), sytosiini (C) ja guaniini (G). Soluissa monia tärkeitä tehtäviä hoitavassa ja joissain viruksissa DNA:n korvaavassa RNA:ssa urasiili (U) korvaa tymiinin (T). Nämä emäkset muodostavat parit A-T/U sekä C-G, joille perimän informaatio sisältö perustuu. Tästä kemiallisesta rakenteesta käytetään joskus metaforista ilmausta elämän aakkoset.

Pitkään ajateltiin, että tämä rakenne on elämälle välttämätön, sillä tietyssä mielessä kaikki muu biologisesti merkittävä näyttäisi rakentuvan sen varaan. Tutkimustulokset synteettisen biologian ja kemian piirissä ovat kuitenkin osoittaneet, että geneettisen materiaalin molekulaarista perustaa on mahdollista muokata. Tällaista tutkimusta tunnetulle elämälle vieraiden keinotekoisien biomolekyylien ja systeemien parissa voidaan nimittää myös *ksenobiologiaksi*. Vaikka tutkimukset ovat vielä varhaisessa vaiheessa, vaikuttaisi siltä, että edellä mainitut emässidokset A-T/U ja C-G eivät ole ainoat kemialliset yhdisteet, jotka mahdollistavat perimän informaation luotettavan säilytyksen ja siirtämisen.

Keinotekoisia geneettisiä systeemeitä paljon tutkinut synteettinen biologi ja kemisti Steven Benner kertoi tiedelehti *Nature*n haastattelussa marraskuussa 2012, että hänen mielestään DNA ei ole molekyylinä erityisen älykäs ratkaisu perinnöllisen informaation tallentamiseen. Jos häneltä kysyttäisiin, kemisti lähtisi suunnittelemaan DNA:n sijasta aivan toisenlaista molekyyliä. Tällaista puhetta voidaan toki pitää osittain tutkimuksen urauurtavuutta korostavana mainontana. On syytä korostaa, että tutkijoilla on ollut suuria vaikeuksia toteuttaa DNA:n syrjäyttävää tai sen kanssa vaihdettavissa olevaa molekyyliä. Jotain näyttöä on kuitenkin jo saatu.

Esimerkiksi synteettisen biologi Philippe Marlièren ryhmään onnistui muutama vuosi sitten korvaamaan laboratorio-olosuhteissa kasvatetun bakteerikannan DNA:ssa tymiinin (T) synteettisellä komponentilla (5-chlorouracil). Vastaavia, vielä pidemmälle meneviä tuloksia on saatu viime aikoina myös muissa laboratorioissa. Esimerkiksi Bennerin ryhmä on saanut ensimmäisiä kokeellisia tuloksia kuuden aakkosen systeemien toimivuudesta. Benner kollegoineen onnistui lisäämään luonnolliseen DNA:han kaksi uutta emästä, Z:n ja P:n. Kenties vielä radikaalimpana voidaan pitää tutkimusta niin sanottujen XNA-molekyylien parissa, joissa luonnollisen DNA:n sokerirunko on korvattu toisenmuotoisella kemiallisella rakenteella. Vielä ei ole kuitenkaan selvää, kykenevätkö tällaiset rakenteet ylläpitämään elämää.

Uuden kiehtovan kohteen tarjoaa myös elämän kemiallisen kätisyyden (tai *kiraalisuuden*) tutkimus. Monet molekyylit voivat esiintyä kahdessa toisiaan peilaavassa muodossa, joilla on kemiallisesti samat ominaisuudet. Elämä maapallolla tapaa kuitenkin perustua juuri tiettyyn suuntaan kiertyviin molekyyleihin. Aikaisempi tutkimus on etsinyt kätisyyden ongelman ratkaisua fysiikan ja kemian välinein, mutta nyt kysymykseen on saatu uutta valaistusta synteettisen biologian keinoin. Esimerkiksi synteettiset biologit George Church ja Michael Kay ryhmineen pyrkivät rakentamaan solujen osia, joilla on luonnosta poikkeavat kätisyydet. Kokonaan tällaisiin osiin perustuvia organismeja voitaisiin kutsua peilielämäksi.

KOHTI UNIVERSAALIA ELÄMÄN TEORIAA

Astrobiologian ja synteettisen biologian kaltaiset uudet mahdollista elämää tarkastelevat alat tarjoavat välineitä tutkia biologisen mahdollisuuden rajoja ja elämän välttämättömiä ehtoja. Ne voivat auttaa biologiaa astumaan ulos maapallon rajallisesta elämän otoskoosta ja siten auttaa luomaan jonkinlaista yleisempää elämän teoriaa.

Kirjassaan *What Is Life?* kemisti Addy Pross on esittänyt, että kysymykset elämän määritelmästä, alkuperästä ja muokkaamisesta ovat tiukasti yhteen punoutuneita. Elämää ei voida luoda tai muokata, ellei tiedä mitä se voi olla, eikä elämää voi ymmärtää, ellei sen syntymisen periaatteita tunneta. Samalla tavalla kysymystä elämän mahdollisista muodoista on hedelmällisintä valottaa perinteisen biologisen tutkimuksen, astrobiologian ja synteettisen biologian tarjoamien erilaisten perspektiivien avulla.

Perinteinen biologinen tutkimus tarjoaa rikkaan ja tarkoin kartoitetun pohjan, jolle perustavat oletuksemme elämästä ovat muotoutuneet. Universaalien elämän teorian tueksi on välttämätöntä saada jotakin muuta aineistoa myös tuntemamme elämän ulkopuolelta. Tähän on kaksi tietä. Yhtäältä voimme etsiä jonkinlaisia positiivisia esimerkkejä vieraasta elämästä astrobiologian avulla muualta maailmankaikkeudessa tai etsiä sitä Maan päältä äärimmäisistä olosuhteista. Toisaalta voimme samanaikaisesti koettaa synteettisesti luoda poikkeavaa elämää laboratorio-olosuhteissa maan päällä, ohjenuoranamme jonkinlainen käsitys siitä, mihin suuntaan tuntemamme elämää voisi yrittää muokata. Nämä kaksi projektia myös tukevat toisiaan.

Jos esimerkiksi Maan organismien DNA tai biomolekyylien kätisyyteen liittyvät piirteet osoittautuvat vaihdettaviksi, se puoltaa näkemystä, jonka mukaan tunnettu elämä olisi tietynlaisten ”jäätynneiden sattumien” varaan rakentunutta. Tämä myös tarkoittaisi sitä, että jossakin muualla

maailmankaikkeudessa mahdollinen elämä on saattanut kehittyä aivan erilaisen ratkaisun varaan. Esimerkiksi vaihtoehtoisen kiraalisuuden tutkijat yrittävät rakentaa työkaluja peilielämän havaitsemiseksi, millä voi olla merkitystä Maan ulkopuolisen elämän löytymisen kannalta. Toisaalta jos vaikkapa tiettyyn kemiaan pohjautuvat elomuodot kyetään synteettisen biologian keinoin osoittamaan mahdottomiksi tai hyvin epätodennäköisiksi, niitä voi olla turhaa etsiä.

On myös mielenkiintoista leikitellä ajatuksella, jossa astrobiologit jonain päivänä saisivat positiivisen näytteen vieraasta elämästä ja tätä elämää päästäisiin tieteellisesti analysoimaan. Perustuisiko tämä elämä esimerkiksi DNA:lle? Paras tapaus olisi, jos löytäisimme vieraaseen kemiaan perustuvaa elämää, sillä tämä toisi eniten uutta teoreettista tietoa ja haastaisi nykyistä käsitystämme elämästä. Tämä voisi myös tarjota aivan uudenlaisia mahdollisuuksia sille, miten ajattellemme voivamme muokata ja rakentaa elämää. Toisaalta, jos löydetty elämä muistuttaisi hyvin paljon jo Maasta tapaamaamme elämää, olisi tämäkin tärkeä löydös. Se antaisi tutkijoille lisää syytä uskoa, että esimerkiksi tietyt biokemialliset tekijät ovat kaikelle elämälle välttämättömiä. Edes tätä johtopäätöstä ei voitaisi kuitenkaan hyväksyä varauksettomasti. Kaksi yhtenevää otosta eivät vielä riittäisi empiirisesti, saati loogisesti, takaamaan, että elämä toimii samalla tavalla kaikkialla maailmankaikkeudessa. Tässäkin tapauksessa voisimme onneksi edelleen jatkaa keinotekoisien elämänmuotojen tutkimista synteettisen biologian keinoin.

LISÄLUKEMISTO

The Chronicle of Higher Education (2013). Synthetic biology comes down to Earth. 4.3.2013.
www.chronicle.com/article/Synthetic-Biology-Comes-Down/137587/.

Church, George & Ed Regis (2012) *Regenesis: How synthetic biology will reinvent nature and ourselves*. New York: Basic Books

Helsingin yliopisto (2016). Suurin piirtein tätä elämä on. Helsingin yliopiston verkkouutinen
10.3.2016. www.helsinki.fi/fi/uutiset/suurin-piirtein-tata-elama-on.

Pross, Addy (2012) *What is life? How chemistry becomes biology*. Oxford: Oxford University Press.

Sagan, Carl (1970) Definitions of life. Teoksessa *Encyclopedia Britannica*. Chicago: Encyclopædia Britannica Incorporated, 1083.