

Astrobiologija

A. B. Kovačević

Januar 2016.

Sadržaj

	Strana
1 Uvod. Osnovni pojmovi astrobiologije. Šta je astrobiologija?	2
1.1 Tri kanonska pitanja astrobiologije	5
1.2 Astronomska naspram biološke metodologije	7
1.2.1 Pet naučnih revolucija	8
1.3 Značenje evolucije u astronomskim i biološkim naukama	12
1.3.1 Informacija i entropija	12
1.3.2 kosmos kao informacioni sistem	13
1.3.3 Holografski princip	15
1.4 Poređenje astronomskih i bioloških skala	18
Literatura	20
2 Ekstrasolarne planete	24
2.1 Cenzus ekstrasolarnih planeta	25
2.2 Metode detekcije ekstrasolarnih planeta	27
2.2.1 Metod merenja radijalnih brzina	29
2.2.1.1 Masa planete	30
2.2.2 Pogodni oblici formula metode merenja radijalnih brzina	32
2.2.3 Merenje radijalnih brzina zvezda	33
2.2.3.1 Izračunavanje perioda i putanje ekstrasolarne planete	36
2.2.4 Astrometrijska metoda detekcije ekstrasolarnih planeta	40
2.2.4.1 Potencijalni doprinosi astrometrijskog metoda	41
2.2.5 Metod tranzita ekstrasolarnih planeta	41
2.2.5.1 Još neki detalji tranzita ekstrasolarnih planeta	44
2.2.6 Posmatrački podaci za tranzitne planete	47
2.2.7 Detektovanje ekstrasolarnih planeta metodom mikrosočiva	48
2.2.8 Vremenska zavisnost kretanja izvora	51
2.2.9 Optička dubina mikrosočiva	52
2.2.10 Stopa događaja mikrosočiva	53
2.2.11 Događaji planetarnih mikrosočiva	54
2.2.12 Metod mikrosočiva i populacija ekstrasolarnih planeta	57
2.2.13 Inovativne mogućnosti metoda mikrosočiva	58
2.2.14 Metod direktnog slikanja ekstrasolarnih planeta	59
2.2.14.1 Kontrast fluksa za reflektujuće ekstrasolarne planete	61
2.2.14.2 Instrumentacija visokog kontrasta	65
Literatura	65

3	Ćelija	70
3.1	Ćelijska optimizacija i robustnost	70
3.2	Prokariotske ćelije	71
3.3	Eukariotske ćelije	72
3.4	Teorije o nastanku organela u eukariotskim ćelijama	73
3.5	Moderan sistem klasifikacije organizama	74
3.6	Genetski informacioni sistemi	74
3.7	Informacija kao centralni koncept živih organizama	78
3.8	Genetski kod i njegova relacija sa drugim kodovima	82
3.8.1	Šta je kod?	82
3.9	Komunikacija među organizmima	83
	Literatura	84
4	Epizode masovnih izumiranja	87
4.1	Masovna izumiranje na kraju ordovicija	90
4.2	Masovno izumiranje u kasnom devoniju	91
4.3	Masovno izumiranje na kraju perma	91
4.4	Masovno izumiranje na kraju trijasa	92
4.5	Masovno izumiranje na kraju perioda krede	92
4.6	Zemaljski naspram vanzemaljskih mehanizama izumiranja	93
	Literatura	101
5	Inteligentan život u kosmosu	107
5.1	Fermijev paradoks	109
5.2	Fermijev paradoks – eksplicitna formulacija	109
5.3	Drejkova jednačina	110
5.4	Tipovi civilizacija po Kardaševu	111
5.5	Istorijat SETI i današnji status	112
	Literatura	114
6	Antropički princip i kosmološki preduslovi za postojanje života	116
6.1	Karterov argument i argument biološke kontingencije	120
6.2	Astrobiologija i buduća evolucija astrofizičkih objekata	122
	Literatura	123
7	Sinteza elemenata i nastanak zvezda	125
7.1	Sinopsis nukleosinteze Velikog praska	127
7.2	Posmatranja	128
7.3	Četiri faze nastanka zvezda	129
7.4	Akrecija u protozvezdanim diskovima	135
7.5	Teorija akrecionog diska	135
7.6	Magnetnosferna akrecija	136
7.7	Termodinamika diska	137
7.8	Transport ugaonog momenta. Gravitaciona nestabilnost	138
7.9	Termodinamika i fragmentacija	139
7.10	Formiranje planeta	140
	Literatura	147

8	Organski molekuli u međuzvezdanoj sredini	149
8.0.1	Poreklo prašine	150
8.0.2	Funkcija raspodele gustine u oblaku	152
8.1	Efikasnost rasta prašine	152
8.2	Karakteristično vreme rasta prašine	153
8.3	Nastanak prašine u cirkumstelarnoj sredini	155
8.4	Nukleacija	156
8.5	Kandidati za sastav prašine	157
8.6	Nastanak složenih molekula	159
8.7	Jon-molekul reakcije	164
	Literatura	166
9	Geološka svojstva naše planete	170
9.1	Geološka i atmosferska svojstva naše planete	170
9.1.1	Radioaktivni raspad	176
9.1.2	Određivanje starosti stena na osnovu sistema raspada <i>Rb-Sr</i>	177
9.1.3	Određivanje starosti stena na osnovu sistema raspada <i>U-Pb</i>	178
9.1.4	Starost Zemlje	179
9.1.5	Radioaktivnost kao toplotni izvor	179
9.1.6	Meteoriti i hemijski sastav Zemlje	180
	Literatura	182
10	Šta je život? Definicije života	184
10.1	Holistička i mehanicistička definicija života	185
10.2	Uopštavajuće naspram minimalističkih definicija	186
10.3	Kibernetička definicija života	187
10.4	Čelijske naspram genetičkih definicija života	187
10.5	Parametarske definicije života	187
10.6	Definicije života koje se tiču materijala	188
10.7	Šta je potrebno da se objasni život?	188
10.8	Definicija života	189
	Literatura	189
11	Nastanjivost	191
11.1	Nastanjiva zona (NZ) i Cirkumstelarna nastanjiva zona (CNZ)	192
11.1.1	Unutrašnja i spoljašnja granica NZ u Kastingovom modelu	192
11.1.2	Standardni model Zemlje	193
11.2	Galaktička nastanjiva zona (GNZ)	196
11.2.1	Rana evolucija života na Zemlji	202
11.2.2	Abiotska sinteza organskih molekula	204
11.2.3	Panspermija	212
11.2.4	Ekstremofili	215
	11.2.4.1 Šta su ekstremofili?	216
	11.2.4.2 Kategorije ekstremofila	217
	11.2.4.3 Temperatura	219
11.2.5	pH ograničenja za život	221
	11.2.5.1 Život pod visokim salinitetom	222
11.2.6	Desikacija – sušenje	222
11.2.7	Pritisak	223
11.2.8	Radijacija	223
11.2.9	Kiseonik	224

11.3	Život i Sunčev sistem	225
11.3.1	Neki primeri zemaljskih ekstremnih ekosistema	225
11.3.2	Astrobiološki pogled na neka tela u Sunčevom sistemu	228
11.3.3	Mars	229
11.3.3.1	Potruga misije Viking za životom	230
11.3.3.2	Mogućnost posebnog nastanka života na Marsu	232
11.3.4	Jupiterov okeanski satelit Evropa	238
11.3.5	Površina Evrope	239
11.3.5.1	Tektonika – grebeni i pukotine	241
11.3.5.2	Tektonska pomeranja	242
11.3.6	Haotični tereni	242
11.3.7	Plima	243
11.3.8	Život na Evropi?	244
11.4	Titan u svetlu misije Kasini–Hajgens	247
11.4.0.1	Analogija između Titana i Zemlje	247
11.4.1	Složena prebiotska hemija u atmosferi Titana	250
11.4.2	Mogućnost života na Titanu	253
	Literatura	254
12	Gradivni blokovi života	270
12.1	Jedinstvenost ugljenika	270
12.2	Alternative za ugljenik kao univerzalni gradivni blok života	273
12.3	Mogućnost života zasnovanog na silicijumu	274
12.3.1	Fizičke osobine silicijuma	274
12.4	Uloga silicijuma kod nekih zemaljskih formi života	275
12.5	Polimerna hemija silicijuma	277
12.5.1	Uslovi za život zasnovan na silicijumu	279
12.5.2	Život zasnovan na silanu?	279
12.5.3	Život zasnovan na silikonu?	280
12.5.4	Život zasnovan na silikatima?	281
12.6	Još neke alternative univerzalnih gradivnih blokova života	282
	Literatura	283

Slike

1.1	Herkulovo jato galaksija: arhipelag svetova udaljenih oko 500 miliona svetlosnih godina od nas	3
1.2	Umetničko viđenje planetarnog sistema Gliese 581	3
1.3	Drugi zakon termodinamike i živi organizmi	14
1.4	Entropija crne rupe	16
1.5	Relativan broj kvazara po pokretnom elementu zapremine	17
1.6	Funkcija mase i distribucija entropija supermasivnih crnih rupa . . .	18
1.7	Skala dimenzija nekih bioloških sistema	21
2.1	Hronologija detektovanih masa ekstrasolarnih planeta	26
2.2	Raspodela planeta u funkciji od metaličnosti matične zvezde	26
2.3	Raspodela po starosti zvezda koje imaju planete	27
2.4	<i>A posteriori</i> verovatnoća $P(m < X mo)$	33
2.5	Deformacija spektralne linije zvezde zbog prisustva pege	35
2.6	Procenjene amplitude poremećaja radijalnih brzina zvezda	36
2.7	Amplitude spektra Sunčevih oscilacija i primer neradijalnog moda oscilacija zvezde	37
2.8	Sintetička keplerovska putanje egzoplanete	38
2.9	Sintetičke putanje triju egzoplaneta	39
2.10	Lomb-Skargl periodogram krive radijalnih brzina zvezde	39
2.11	Geometrijski uslov za nagib putanje planete da bi tranzit bio vidljiv	42
2.12	Shema tranzita ekstrasolarne planete preko diska matične zvezde . .	44
2.13	Tačkasto gravitaciono sočivo	49
2.14	Vremenska zavisnost kretanja izvora	51
2.15	Varijacija uvećanja slike, koja se dobija gravitacionim mikrosočivom za četiri vrednosti sudarnog parametra u_0	52
2.16	Model krive sjaja za događaj mikrosočiva OGLE-2005-BLG-390 . . .	54
2.17	Geometrija dvojnog gravitacionog sočiva	55
2.18	Mase detektovanih planeta metodom mikrosočiva	59
2.19	Empirijske fazne krive za Merkur, Veneru i Mars	64
3.1	Građa prokariotske i eukariotske ćelije	71
3.2	Tri domena života	75
3.3	Hipotetična prstenolika genetska podela organizama	76
3.4	Struktura purina i piramidina	79
3.5	Struktura DNK	80
3.6	Konzervativni model reprodukcije DNK molekula	80
3.7	Disperzivni model reprodukcije molekula DNK.	81
4.1	Osnovne jedinice geološkog vremena	88
5.1	Mikrotalasni prozor za zemaljske radio-teleskope	113

7.1	Orionova maglina: jedan od nama najbližih (1500 svetlosnih godina) regiona u kome se formiraju zvezde.	130
7.2	Četiri faze formiranja zvezda	131
7.3	Karakteristične SED za mlade zvezdane objekte	132
7.4	Evolucija molekularnog oblaka	134
7.5	Gravitaciono fokusiranje pri bliskom prilazu dvaju tela	145
8.1	Međuplanetarna čestica prašine snimljena elektronskim mikroskopom	150
8.2	Fraktalni adhezioni model za čestice prašine	151
8.3	Koagulacija monomera u fraktalna zrnca prašine	151
8.4	Ugljenične strukture u međuzvezdanoj sredini	158
8.5	Međuzvezdani i cirkumstelarni molekuli	160
9.1	Planeta Fomalhaut b	172
9.2	Zvezdani vetrovi odnose materijal sa masivne Volf-Raje zvezde . . .	180
11.1	Granice nastanjive zone za zvezde različitih efektivnih temperatura .	196
11.2	Planete terestrijalnog tipa $(0.3 - 10)M_{\oplus}$	197
11.3	Verovatnoće formiranja zemljolikih planeta	199
11.4	Verovatnoće postojanja zemljolikih planeta u pet različitih epoha evolucije naše galaksije	200
11.5	Verovatnoća formiranja planeta poluprečnika manjeg od 10 Zemljinih	201
11.6	Stenli Miler sa aparaturom svog eksperimenta. Autor: A. Sugar, 1999.	205
11.7	Rana prebiotska sinteza biomonomera	205
11.8	2D struktura formamida: molekularna formula je CH_3NO	207
11.9	Galaktocentrični položaji molekularnih oblaka gde je nađen formamid	208
11.10	Uloga DNK, RNK i proteina	209
11.11	Struktura molekula DNK	210
11.12	Struktura RNK	211
11.13	'Slani most' između retinolske kiseline i Arg 131	219
11.14	Ružičati sneg	221
11.15	Paralana izuzetno radioaktivan prirodni izvor vode	226
11.16	Ostatak leda vode u bezimenom krateru na Marsu	229
11.17	Naslage soli na južnim visoravnima Marsa	237
11.18	Mesec Evropa	240
11.19	Slika meseca Evropa u boljoj rezoluciji	241
11.20	Shema tektonske aktivnosti na Evropi	243
11.21	Noćna strana meseca Titan	248
11.22	Tolini u Titanovoj atmosferi	252
12.1	Odabrani važni ugljenikovi molekuli	271
12.2	Skenirani elektronski mikrograf dijatomeje	276
12.3	Strukturna analogija između disilana i etana.	277
12.4	Struktura silana, disilana i silikona	281
12.5	Struktura borazola i benzena	282

Tabele

1.1	Aktivna galaktička jezgra Arp 102B i 3C 390.3	19
2.1	Očekivane vrednosti efekta u kretanju matične zvezde zbog prisustva planeta	29
2.2	Parametri ekstrasolarnih planeta, koji se izračunavaju iz refleksnog kretanja zvezde: m je masa planete, a je velika poluosa, e je ekscentricitet, a i je nagib njene putanje, T_0 je vreme prolaza kroz periastron, P je orbitalni period planete, Ω je longituda uzlaznog čvora, ω je longituda periastrona.	29
2.3	Astrometrijske signature (α) za različite sisteme zvezda–planeta.	40
2.4	Svojstva tranzita za planete u našem sistemu	46
2.5	Različiti režimi gravitacionih sočiva.	49
2.6	Ugaoni radijus Ajnštajnovog prstena	50
2.7	Kontrasti za planete i Mesec u Sunčevom sistemu	64
2.8	Primer parametara instrumenata i kontrasta	65
3.1	Razlike u građi prokariotskih i eukariotskih ćelija	72
3.2	Istorijski razvoj taksonomije organizama	74
9.1	Povećanje temperature zbog nastanka jezgra.	173
11.1	Primena i astrobiološka značajnost izučavanja ekstremofila.	216
11.2	Ekstremni uslovi prirodnih staništa.	217
11.3	Upoređenje površinskih uslova na Marsu i Zemlji.	230
11.4	Osunčavanje na Severnom polu Marsa	232
11.5	Glavne karakteristike površine i atmosfere Titana	248
12.1	Energije veza ugljenika i silicijuma sa nekim drugim elementima	272
12.2	Fizička svojstva potpuno redukovanih i oksidiranih formi ugljenika i silicijuma.	273
12.3	Složena ugljenična jedinjenja nađena u Murčisonovom meteoritu	273
12.4	Fizička svojstva ugljenika i silicijuma.	275

Zahvalnica

This work results within the collaboration of the COST Action TD 1308.

Predgovor

„*The most complicated machines are made only with words.*“

Jacues Lacan, Séminaire. Livre II. Le moi dans la théorie de Freud et dans la technique de la psychanalyse [Paris. Seuil. 1978].

Astrobiologija je veoma dinamično polje istraživanja, koje ima za cilj da odgovori na pitanja, koja su gotovo oduvek bila intrigantna za čoveka: kako je život nastao? Da li smo sami u kosmosu? Kakva je budućnost života na Zemlji i u kosmosu? Ova pitanja su ujedno konvergentne tačke veoma različitih polja naučnih istraživanja: od astrofizike do molekularne biologije i od planetologije pa sve do ekologije (među mnogim). U poslednjim dekadama 20. veka informacione tehnologije i istraživanja kao i satelitske misije postaju veoma važan domen u astrobiologiji.

Dok su klasična biološka istraživanja koncentrisana samo na primer života kakav znamo na Zemlji – astrobiologija proširuje ove granice izvan nje, uključujući planete oko drugih zvezda, komete, meteorite i svemir uopšte. Fokusne tačke su različiti koraci u evolucionoj putanji kroz kosmičku istoriju, koji bi mogli da budu povezani sa nastankom, evolucijom i distribucijom života.

U međuzvezdanoj sredini, kao i u kometama i meteoritima, kompleksna organska jedinjenja su detektovana u dovoljnim količinama da mogu da obezbede neophodne hemijske preteče (prekursore) života. Naravno, sve veće baze podataka o ekstrasolar-nim planetskim sistemima u našoj galaksiji¹ podržavaju činjenicu da su nastanjive zone česte, ali, osim toga, da bi i van njih život mogao postojati. Sa druge strane, postoje teorijski radovi, koji otvaraju mogućnost da je kosmos na pomacima između 100 i 137² mogao biti nastanjiv u smislu da je temperatura u njemu bila između 0 i 100°C, tako da ako su postojale planete u tom periodu, one bi mogle biti nastanjive, bez obzira na svoj položaj u odnosu na matičnu zvezdu. Na osnovu izvanredne sposobnosti života da se adaptira na ekstremne uslove, možemo istraživati granične uslove nastanjivosti ne samo tela u Sunčevom sistemu, već kao što smo videli, i dalje. Krajnji cilj astrobiologije je da otkrije poreklo, evoluciju i raspodelu života na Zemlji, kao i u kosmosu u sklopu kosmičke evolucije. Time bismo mogli da izgradimo osnove za konstruisanje i testiranje aksioma, koje bi podržale teoriju o životu. Ovaj tekst bi se mogao shvatiti kao jedna putanja u faznom prostoru svih mogućih događaja, koji vode ka nastanku života, a koja je određena parametrima Drejkove (Drake) jednačine. Naravno, ovim smo ujedno iskazali da mogu postojati i drugačije putanje, koje se mogu pratiti. Nijedna putanja nije privilegovana; međutim, videćemo da i unutar putanje, koju smo odabrali postoji mnogo neodređenosti i nedoumica.

Knjiga počinje opštim uvodom u astrobiologiju, gde se takođe porede metodologije astrobiologije i biologije, kao i skala dimenzija, koje ove dve nauke izučavaju.

¹Reč *Galaksija* koristićemo kada mislimo na Mlečni put.

²Crveni pomaci $1 + z = 100 - 137$, koji odgovaraju ranom kosmosu, čija je starost bila 10 – 17 miliona godina (posle Velikog praska).

Osim toga, interakcija revolucija u osnovnim prirodnim naukama u prošlosti se odigravala u različito vreme, dok se danas gotovo sve nauke transformišu u skladu sa ogromnom lavinom podataka, koji su im postali dostupni. S obzirom na to da je informacija veoma važna za biološke ali robotske sisteme, u uvodu smo dali i osvrt na holografski princip, kojim je pokazano da informacija može biti veoma važan konstituent i samog kosmosa. Ovde ćemo napraviti digresiju i napomenuti da se ubrzo po uspostavljanju holografskog principa pokazalo da holografaska granica izvedena iz teorije crnih rupa nije održiva u uniformno širećem kosmosu. Zato je Rafael Buso (Rapahel Bousso) 1999. godine predložio njenu modifikaciju, koja može biti održiva i u situacijama gde ne funkcioniše originalna holografaska granica. U Busoovoj teoriji polazi se od 2D površi, koje mogu biti zatvorene kao sfere ili otvorene kao list papira. Uslov, koji se postavlja je da zamišljeni zraci svetlosti, koji osvetljavaju površ sa jedne strane i pritom su normalni na nju, moraju da konvergiraju ka tački od koje su pošli. Ako se razmatra entropija materije i zračenja, kroz koje svetlosni zraci prolaze do tačaka gde se presecaju, Buso je pokazao da ta entropija ne može biti veća od entropije predstavljene sa inicijalnom površi – jedna četvrtina površine, merena u Plankovim površinama.

Prvi i drugi parametar Drejkove (Drake) jednačine odnose se na formiranje zvezda i sistema planeta. U sedmoj i delimično osmoj glavi dali smo veoma grub okvir ovih mehanizama za one čitaoce, koji na osnovnim studijama nisu imali kurseve, koji pokrivaju tu materiju. U jedanaestoj glavi posmatraćemo treći parametar Drejkove jednačine, koji se tiče nastanjivosti planeta. U sklopu ove glave obratićemo pažnju i na egzoplanete, baze podataka o egzoplanetama i metodama njihove detekcije. Nadalje, daćemo istorijski osvrt na koncept nastanjivosti i istaći neke osnovne probleme u tom konceptu na koje danas nailazimo. Posvetićemo posebnu pažnju konceptu panspermije, koji je predviđen kao jedan od osnovnih ciljeva istraživanja Evropskog astrobiološkog instituta, koji je u osnivanju. Razmatranje parametra nastanka života, koji figuriše u pomenutoj jednačini biće pokriveno u nekoliko glava. S obzirom na to da imamo samo primer života na Zemlji, razmatranje gradivnih blokova života kakvog mi poznajemo, ali i nekih hipotetičnih alternativnih biohemija dat je u glavama 12 i 8. Zatim geološke karakteristike naše planete, koje su usko skopčane sa pojavom života, opisane su u devetoj glavi. Naravno da smo na osnovu ovih razmatranja u prilici da u desetoj glavi pregledamo različite definicije života, koje su se pojavljivale u literaturi, kao i da usvojimo radnu definiciju života, koju ćemo koristiti, a koja, naravno, nije niti konačna niti potpuna. Parametar Drejkove jednačine, koji se odnosi na nastanak kompleksnog života, posmatraćemo u trećoj glavi gde je dat opis ćelije, različitih vrsta ćelija, kao i nosioce informacija u njima, i dati osvrt na evoluciju života kroz geološku istoriju, a potom ćemo u glavi 4 razmotriti pet najvećih masovnih izumiranja u istoriji života na Zemlji.

Poslednja dva parametra u Drejkovoj jednačini odnose se na mogućnost nastanka inteligentnog života i dužinu trajanja inteligentne civilizacije. Mi ćemo se osvrnuti na ova pitanja u poglavlju Inteligentan život, pominjući najpre rad Busoa (ali sad sa početka 21. veka), u kome je formulisao entropijski princip, kojim je postulirao da količina entropije, koja nastaje unutar kauzalnog dijamanta (nama posmatrački dostupnog kosmosa) određuje verovatnoću za evoluciju kompleksnosti, struktura i posmatrača i čime je mogao da objasni zašto kosmološka konstanta ima posmatranu vrednost za 120 magnituda manju od teorijske. Na ovaj način je prevazišao probleme, koji nastaju uvođenjem antropičkog principa (koga smo opisali u glavi 6), bez arbitrarne pretpostavke o posmatračima i, koji samim tim ne moraju biti ljudi. Osim toga, iako nemamo tačnu definiciju života navešćemo i kontroverzan rad, koji

koristi Busoov princip kauzalne entropije da bi definisao inteligenciju, kao kauzalnu entropičku silu. Refleksija Drejkovog parametra, koji se odnosi na dužinu trajanja civilizacije biće izražena u odeljku o tipovima civilizacija po Kardaševu.

Smatraćemo da su čitaoci teksta multilingvalne i multikulturalne inteligencije, zbog čega su neki citati dati i na engleskom jeziku, a imena autora su data u obliku kakav se može naći u bazama naučnih radova. S druge strane, tekst je napisan na latiničnom pismu kako bi mogao biti dostupan i studentima drugih regija na teritoriji Balkana. Ovaj tekst sadrži bibliografsku kolekciju, koja treba da pomogne čitaocima u razjašnjavanju činjenica, koje nisu pomenute u njemu.

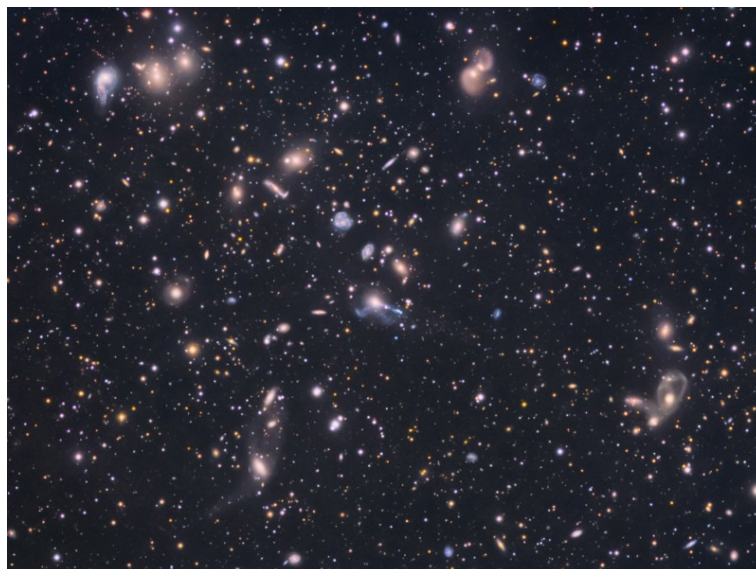
Kako naša saznanja napreduju, sve više uviđamo da je unutrašnja kompleksnost života na Zemlji izuzetna i da prevazilazi našu moć da razrešimo njegovu enigm u ovom trenutku. Pošto će buduće generacije moći bolje da razumeju život i njegove korene i pritom će imati mnogo veće poštovanje veličanstvenosti njegove pojave, svrha naših istraživanja, kao i ovog teksta, nije da reši ovaj problem, već naglasi pitanja, koja će najbolje poentirati verovatne odgovore. Odnosno, da pokušamo da nađemo najverovatniju putanju kroz fazni prostor, koji je određen najčešće konfrontirajućih eksperimenata i posmatranja, sa jedne strane, i alternativnih hipoteza s druge. Zato na ovaj tekst ne možemo staviti tačku ni zaključak, jer polje astrobioloških istraživanja je veoma dinamično i bukvalno se menja iz dana u dan, što smo mogli osetiti prilikom njegovog pisanja.

1

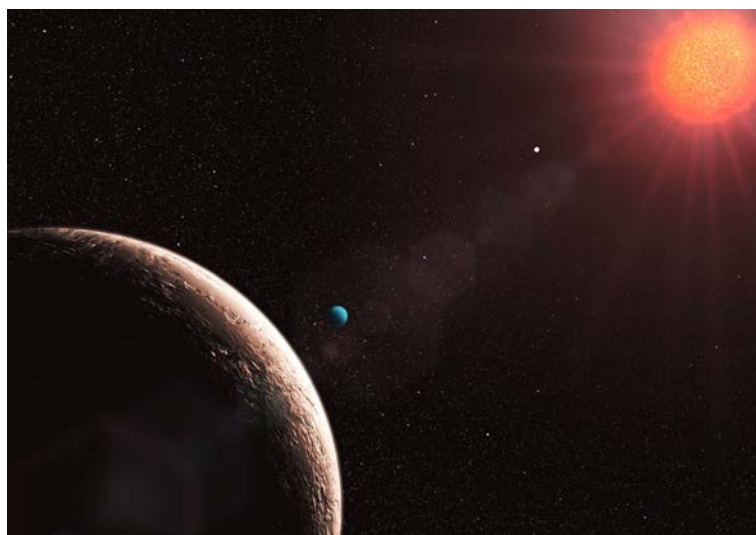
Uvod. Osnovni pojmovi astrobiologije. Šta je astrobiologija?

Tokom vekova, većina osnovnih pitanja, koja su postavile stare ljudske civilizacije još uvek su otvorena. Još su filozofi stare Grčke intenzivno diskutovali o jedinstvenosti Zemlje kao planete i mogućnosti postojanja života negde drugde. Međutim, bilo je potrebno da prođe 2400 godina do mogućnosti da se odgovori na ovo pitanje. Tokom zadnjih 5-6 vekova mišljenja o mogućnosti vanzemaljskog života ekstremno su varirala: od stava da je Zemlja jedina nastanjiva planeta, pa sve do onih, koji su intuitivno osećali da postoje i drugi svetovi (npr. Đordano Bruno). Krajem 17. veka, holandski naučnik Kristijan Hajgens (Christian Huygens), poznat po svojim dostignućima u optici, napisao je prvu knjigu posvećenu životu na drugim svetovima. Smatrao je da osobine stanovnika drugih planeta zavise od ekstremnih uslova njihove gravitacije i atmosferskog sastava, koji je mogao zamisliti. Tokom naredna dva veka, verovanje u mogućnost života van Zemlje alternativno se menjalo kako su tekla otkrića u biologiji, geologiji, fizici i drugim naukama.

Međutim, druga polovina 20. i početak 21. veka otvorili su nove perspektive. Astronomi su otkrili da Zemlja orbitira oko 'obične' zvezde, jedne od stotina milijardi zvezda u džinovskom skupu zvezda, gasa, prašine i misteriozne tamne materije, koji zovemo Mlečni put. Otkriveno je da je naša Galaksija tek jedna među trilionima (a možda i više) sličnih galaksija, koje se nalaze unutar vidljivog kosmosa (slika 1). Oskora smo detektovali da mnoge obližnje zvezde imaju svoje planete. S jedne strane, ogroman broj zvezda u Mlečnom putu, kao i u drugim galaksijama, izazivaju nas da razmišljamo o ogromnom rasponu mogućnosti života. Istovremeno smo svesni da su rastojanja među zvezdama takva da impliciraju mogućnost da Zemlja može ostati izolovana od drugih oblika života u našoj Galaksiji, ukoliko oni postoje. Mogući odgovori na pitanje o postojanju drugih oblika života van Zemlje dolaze nam iz dva pravca: prvi se odnosi na napredak u razumevanju fizičkih preduslova za razvoj života, a drugi se odnosi na razumevanje prvih nastanjivih svetova. Za sada astronomi smatraju da su osnovne jednačine teorija gravitacije, elektromagnetizma i kvantne fizike (neke od ovih se moraju još podrobno razmatrati) validne u celom prostor-vremenu kosmosa. Takođe, atomi i molekuli od, kojih je život izgrađen na Zemlji isti su u celom kosmosu. Spektroskopskom analizom svetlosti otkrili smo 92



Slika 1.1: Herkulovo jato galaksija: arhipelag svetova udaljenih oko 500 miliona svetlosnih godina od nas. Poznat je i pod imenom Abell 2151, krcat je gasom i prašinom, spiralnim galaksijama u kojima se formiraju zvezde, i ima svega nekoliko eliptičnih galaksija. Ovo je duboko kompozitna slika, gde su plavom bojom predstavljene galaksije u kojima se formiraju zvezde, dok su one sa starijim zvezdanim populacijama sa žućkastim odsjajem. Ovaj skup se može smatrati kao rezultat spajanja manjih skupova galaksija, zbog čega se veruje da je sličan mladim jatima galaksija na velikim rastojanjima a odgovaraju ranom kosmosu.



Slika 1.2: Umetničko viđenje planetarnog sistema Gliese 581. Posle više od 4 godine posmatranja na najuspešnijem instrumentu za 'hvatanje' egzoplaneta malih masa u svetu, HARPS spektrografom priključenim na 3.6 m teleskopu Evropske južne opservatorije u Čileu, astronomi su detektovali egzoplanetu sa najmanjom masom do tad poznatom: Gliese 581e (koja je u krupnom planu), čija masa je oko 2 puta veća od mase naše Zemlje, a, koja obiđe oko matične zvezde za 3.15 dana. Za sada je poznato da sistem Gliese 581 ima 4 planete. Preostale tri planete imaju mase: 16 (najbliža zvezdi), 5 (u sredini) i 7 Zemljinih masa (na slici je prikazana plavom bojom i obiđe svoju putanju oko matične zvezde za 66.8 dana).

atoma u zvezdama i galaksijama, koji popunjavaju periodičnu tablicu elementa za gotovo svih 13.7 milijardi godina postojanja kosmosa (videti tabelu poznatih elemenata na http://stark-b.obspm.fr/index.php/stark_b/default/table). Ovi atomi se kombinuju u kompleksne organske molekule, kao što su alkohol i amino-kiseline, koje su nađene u kometama, na prirodnim satelitima planeta kao i u međuzvezdanim oblacima. Možemo reći da se LEGO kockice života kakvog poznamo na Zemlji nalaze svuda. Osim toga, voda, izuzetni hemijski rastvarač, nalazi se i na drugim planetama, njihovim prirodnim satelitima, kao i kometama. Voda je ta, koja pokreće, uništava ili rekombinuje organske molekule, kako bi se stvorile neprebrojive molekularne permutacije velikih dužina i složenosti. Energija neophodna za život može se pojaviti u mnogim formama – naravno, uključujući svetlost sa zvezda, geotermalne izvore, plimske i radioaktivne, koji nude mnoštvo mogućnosti za organsku materiju da stupa u dalje hemijske reakcije. Hemijska replikacija, kakvu mi poznajemo, nastala je sa pojavom molekularnih preteča RNK i DNK, inicirajući trku za vredne molekularne gradivne strukture i dostupnu energiju. Uspešni prekursori su se umnožavali i nadvladali druge forme, naseljavajući okruženje.

Za sada zamagljen mehanizam prelaska od 'prebiotskog' do 'živog' skupa organskih molekula ukazuje nam da je život prirodni fenomen, iskovan u pećima zvezda. U međuvremenu, astronomi su razvili tehnike otkrivanja potencijalnih staništa u kosmosu. Voda ispod površine Marsa, okeani ispod kore Evrope i Ganimeda, gejziri na Enceladu – predstavljaju bogate hemijske laboratorije, koje rade već milijardu godina. Istraživanja ovih novih svetova mnogi porede sa najodvažnijim prekokeanskim putovanjima u ljudskoj istoriji

Osim što poznajemo planete Sunčevog sistema, dok pišemo ovu knjigu znamo da otkriveno je blizu 2000 ekstrasolarnih planeta (<http://exoplanet.eu/catalog.php>), koje se kreću oko drugih zvezda. U početku su otkrivane samo one veličine Jupitera, Saturna ili Neptuna. Međutim, dana 21.4.2009 zvanično je objavljeno otkriće egzoplanete čija je masa 1.9 Zemljinih masa. Njeno ime je Gliese 581 e (slika 2), locirana je na 20.5 svetlosnih godina od nas u sazvežđu Vage.

Prema tome, nove tehnike, koje su nam nadohvat ruke omogućile nam da otkrijemo brojne egzoplanete Zemljine veličine. Misije poput Keplera tražiće zvezde, koje se pomračuju periodično zbog zemljolikih planeta, koje prelaze preko njihovog diska (blokirajući svetlost matične zvezde u iznosu od svega 1/10000). Astronomi će izvršiti precizna merenja Doplerovog efekta u kretanju zvezda, kako bi detektovali njihova poremećajna kretanja zbog gravitacionog privlačenja zemljolikih planeta. NASA i JPL (Jet Propulsion Laboratory) razvijaju Svemirsku interferometrijsku misiju (<http://planetquest.jpl.nasa.gov/missions/simMission.cfm>), koja će koristiti interferenciju svetlosti, koju sakupe dva svemirska teleskopa kako bi otkrili zemljolike planete i izmerili njihove mase. Takođe su u planu svemirski teleskopi, koji će nam omogućiti dobijanje prvih slika zemljolikih planeta i određivanja njihovih hemijskih sastava iz reflektujućeg spektra.

Pitanja, koja se pojavljuju na ovom putu razumevanja prirode života u kosmosu jesu raznolika, kao i život sam po sebi. Da li je život na Zemlji jedinstven ili ga ima još negde, kako u Sunčevom sistemu tako i u kosmosu?

Bez obzira na mnoštvo otkrivenih potencijalno nastanjivih svetova u okolini drugih zvezda, naš Sunčev sistem je još uvek najpodgodnije mesto za pronalazak nezemaljskih organizama. Mars je izuzetan primer, zbog mešavine istorijskih i praktičnih razloga zbog čega je još uvek predmet astrobioloških istraživanja. Dokazi o prošlim i sadašnjim vodenim entitetima na Marsu, kao i atmosferska hemijska previranja, koja su korelisana sa određenim geofizičkim lokacijama, postavljaju Mars kao kri-

tičnu astrobiološku tačku. Potpitanje, koje su otvorila istraživanja na Marsu, zbog njegove raznolike klimatske historije jeste: da li tražimo fosilne ostatke ili žive organizme? Samim tim postavlja se isto pitanje za ceo Sunčev sistem. Kometaska jezgra su mnogo više raznolika nego što smo očekivali, što su nam potvrdila njihova skorašnja istraživanja. Naime, pošto već znamo da su ova tela bogata organskom hemijom i ukoliko pronađemo tragove života na njima, to bi moglo preusmeriti sva istraživanja na 'potragu za vodom i hemijom'. Kako se sve više udaljavamo od centra Sunčevog sistema, tipični konstituenti (voda i hidrogenizovan ugljenik) na telima imaju tendenciju povećanja zastupljenosti – karakteristika, koja je ostala još od temperaturne strukture protoplanetarnog diska pre 4 milijarde godina. Veliki sateliti Jupitera i Saturna nude izvanredne raspone mogućih životnih okruženja, od potencijalnih potpovršinskih okeana tečne vode Evrope i Ganimeda, do mogućih 'mikrookruženja' na Enceladu, pa sve do potpuno nove i malo testirane krio-hemije na Titanovoj površini. Veoma udaljeni od Sunca, ovi potencijalno nastanjivi svetovi mogu imati glavne izvore energije u pojavama kao što je plimsko zagrevanje, koje se stvara samo na osnovu ugaonog momenta ovog tela. Gornja atmosfera Venere takođe nas može iznenaditi jer može imati pogodnu temperaturu na pravoj visini, a kao što znamo, ovde na Zemlji sve je jasnije da mikropski oblici života u oblacima mogu biti značajni i od bitne važnosti. Zato Veneru ne bi trebalo zanemariti. Međutim, ova istraživanja i dalje imaju određena ograničenja i rizike, kao što su: problem pogona letelica, kojim bismo mogli da stignemo do tih svetova, i rizik kontaminacije tog okruženja.

1.1 Tri kanonska pitanja astrobiologije

Ako posmatramo ljudsku istoriju, imamo veliki privilegiju da živimo u doba razvoja astrobiologije kao nauke, koja pokušava da odgovori na tzv. tri kanonska pitanja.

Prvo od njih je: *Kako je počeo život na Zemlji?* Ne smemo izgubiti iz vida da je ovo pitanje modifikovana verzija pitanja kako život uopšte nastaje, jer život na Zemlji (ne)može predstavljati isti tip nastanka života drugde u kosmosu. Najveća naučna motivacija za astrobiologiju jeste da razume naše poreklo, ali u mnogo širem kontekstu. Jedna planeta sa životnim oblicima, čak i ako su značajno složeni i sa 3 do 4 milijarde dugom istorijom, je i dalje samo jedan primerak pojave. Ako uspemo da posmatramo ovu pojavu negde drugde u kosmosu, to će nam pomoći da odgovorimo na pitanja, koja postavljaju verovatnoća, biohemijska jedinstvenost, konvergentna evolucija itd. Svi znakovi – uglavnom otisci prastarih stromatolitskih struktura u stenama, koje su produkt bakterijskih i arhajske kolonije – ukazuju na postojanje mikropskog oblika života na Zemlji (negde pre 3.5 do 3.8 milijardi godina). Zapravo, mi ne znamo koliko daleko sežu u prošlost ovi oblici života jer ne posedujemo uzorke površine Zemljine kore iz tog perioda. Posebno mi ne znamo šta se dešavalo tokom i pre Kasnog teškog bombardovanja (period u kome je 'izručen' masivni asteroidski i kometarni materijal na Zemlju pre 3.8 do 4.1 milijardu godina). Tako da je veoma teško pronaći jedinstveni trenutak kada je život nastao. Kao fenomen samoorganizacije, prenosa informacija, reprodukcije, hranjenja, život može predstavljati mnoge isprepletane mreže i sisteme.

U ovom trenutku mi nemamo jedinstveni odgovor na postavljeno pitanje, postoje samo mnoge hipoteze. Ove ideje se kreću od nastanka života putem prenosa praformi sa drugih planeta i zvezdanih sistema (panspermija), pa sve do čitavog niza tzv. ideja o 'prebiotskim' hemijskim scenarijima, koji su doveli do osnovnih biotskih molekula, koje danas poznajemo, ili do nekih njihovih varijanti. Ove teorije uključuju nastanak

života u atmosferskim hemijskim reakcijama, u otvorima Zemljine kore, koji se nalaze na velikim morskim dubinama, u glini, kao i u međuzvezdanim oblacima gde postoje policiklični aromatični ugljovodonici.

Zatim, tu su ideje, koje pokušavaju da reše problem prelaska od molekula do prepoznatljivih biostruktura, kao što je ćelijska membrana i molekuli katalize. Osim toga, izučava se potencijalna praforma moderne DNK. Pošto molekuli RNK mogu služiti i kao skladište informacija i kao enzimi (uloga, koju pretežno imaju proteini u modernoj biohemiji), možemo pretpostaviti da je postojao RNK svet pre DNK sveta, koji je bio jednostavniji, sa više fluida i gubljenja bio-informacija nego što je robustno, čvrsto skladište podataka koje nudi molekularna struktura DNK. Ovo je veoma teško pitanje i moguće je da nije u pitanju jedinstveni mehanizam, već paralelne serije kritičnih koraka, kojima je potrebno na desetine miliona godina. Jedno od intrigantnih istraživačkih područja može biti uvođenje veštačkih bioloških organizama – ovaj tip inverznog inženjerstva može dovesti do nekih neočekivanih odgovora. Slično, ako bolje razumemo mikropsku i virusnu ekologiju, to nam može ukazati na neka fundamentalna pravila, koja nam još uvek nisu u žiži.

Već smo pomenuli da je još od vremena stare Grčke bilo aktuelno pitanje: *Da li ima sistema kao što je Sunčev i da li ima planeta kao što je Zemlja?* Ovo pitanje je pojednostavljeno mnogo kompleksnijeg pitanja – da li uopšte postoji život negde u kosmosu? Kako programi otkrivanja egzoplaneta imaju sve bolju osetljivost, samim tim i veći posmatrački uzorak, sve je jasnije da su mali stenoviti svetovi esencijalno prisutni u kosmosu. Sa statističkom procenom da najmanje 1 od 4 zvezde poput Sunca ima planete Zemljine veličine unutar nastanjive zone (ova procena je dobijena na osnovu ekstrapolacije broja objekata sa kratkim periodima), postoji dobar razlog da verujemo da se planete Zemljine mase nalaze na putanjama uporedivim sa putanjom naše planete. Misija Kepler će nam omogućiti da konačno odredimo statistiku. Za ovaj problem, masa i putanja su samo mali deo slagalice, koji se mora rešiti. Naime, važno je otkriti koliko od ovih svetova ima uporedivu hemiju, geofiziku i klimu sa našom planetom. Da li na njima postoji život? Tokom ovog našeg puta moramo biti svesni da je zasada Zemlja jedini model, koji poznajemo dok tragamo za vanzemaljskim životom. Takođe, najveći deo našeg znanja o Zemlji odnosi se na zadnjih nekoliko hiljada godina, što je veoma mali deo vremena koliko Zemlja postoji i život na njoj. Znači moramo biti oprezni da ne budemo zaslepljeni geocentrizmom u našim istraživanjima.

Možda je najintrigantnije pitanje za ljudsku psihu: *Kakva je budućnost života na Zemlji i u svemiru?* Ono je veoma kompleksno i, možemo slobodno reći, kruna astrobiologije kao nauke, ali i drugih disciplina. Da bi se dao odgovor na ovo pitanje, neophodno je utvrditi kako ekosistemi reaguju na promene okoline na vremenskim skalama, koje su važne za opstanak ljudske vrste na Zemlji. Naravno, što je još više zahtevno, razumeti kako životni oblici razvijeni na Zemlji reaguju na uslove u letelicama i na drugim planetama.

NASA Astrobiology Institute (NAI) definiše astrobiologiju kao izučavanje živog kosmosa (NAI 2004). Implicitno u ovoj definiciji je sadržano da astrobiologija uključuje istraživanje terestrijalne (zemaljske) biologije. Sasvim je prihvatljivo da naš pristup istraživanja vanzemaljskog života bude pod uticajem znanja o životu na Zemlji, kao i obrnuto, da razumevanje nastanka i razvoja života na Zemlji bude unapređeno izučavanjima uslova na drugim svetovima: planetama, planetarnim sistemima i celim galaktičkim okruženjem.

Na ovaj način, astrobiologija sada podrazumeva mnogo širi intersdisciplinarni sistem istraživanja (koji povezuje astronomiju, fiziku, hemiju, klasičnu i molekularnu

biologiju, planetarne i geo nauke, kao i informacionu nauku) nego što je prvi put iskovana u radu Lorenza Laflera (Laurenca Lafleur) iz 1941. godine, koji je definisao kao razmatranje života u kosmosu van Zemlje. Astronom Oto Struve (Otto Struve) 1955. godine je prvi put upotrebio zvanično reč *astrobiologija*, da bi je NASA prihvatila 1995 (NAI 2004). Pre ovog vremena, reč *egzobiologija* se najčešće upotrebljavala u SAD svemirskim istraživanjima. Izraz *egzobiologija* se pojavljuje prvi put u radu biologa Džoše Lederberga (Joshua Lederberg) 1960. godine i ova reč se sporadično koristi u NASA, ali češće u Evropskoj svemirskoj agenciji (European Space Agency – ESA).

U reči *astrobiologija* izbegnuta je kombinacija grčkog i latinskog jezika, za razliku od *egzobiologije*, ali reč *astrobiologija* kao da implicira da ova nauka istražuje biologiju zvezda (*astron* je grčka reč za zvezdu), i izgleda manje prikladno kao kombinacija nego njene sestre kovanice *astrofizika* i *astrohemija*.

Reč *kosmobiologija* ('biologija kosmosa'), koju su uveli fizičari Bernal (1952) i Dick (Dick) (1996), može u principu biti najbolji izbor, ali se sada veoma retko koristi. Napokon, pojavio se izraz *bioastronomija*, koji je uvela Međunarodna astronomska unija (International Astronomical Union, IAU 2004), ali se veoma retko čuo izvan sastanaka i zbornika radova ovog tela, tako da je na zvaničnom zasedanju IAU 2015 izbačena iz upotrebe ova reč.

Mi ćemo tretirati pomenute reči kao sinonime uporedivog intelektualnog porekla, ali ćemo zadržati sadašnju praksu i usvojiti reč *astrobiologija*. Astrobiološku nauku je posebno kritikovao biolog Džordž Gejlord Simpson (George Gaylord Simpson) napisavši 1964. godine da je to:

„nauka, koja treba da demonstrira da njen subjekt istraživanja postoji!“

Pre njega, Struve (1955) je zaključio da vreme „još nije zrelo“ da bi se prepoznala nova astronomska disciplina pod ovim imenom.

Ako bi astrobiologija podrazumevala SAMO istraživanje vanzemaljskog života – što ona nije – Simpsonov kritizicam ostao bi tačan ali bi bio čudan većini astronomima i fizičarima. Astrofizičari su proveli decenije tražeći crne rupe pre nego što su nagomilali sadašnje dokaze da one postoje [Melija (Melia) i Falk (Falcke) (2001)]. Slično se može reći za istraživanja superprovodnika na sobnoj temperaturi, protonskog raspada, narušavanja specijalne relativnosti ili Higsovih (Higgs) bozona. Zaista, većina od najvažnijih i najinteresantnijih istraživanja u astronomiji i fizici tiče se studije objekata ili fenomena čije postojanje još uvek nije dokazano. U smislu prethodno rečenog, astrobiologija suprotstavlja ono što je familijarno ili čak zajedničko u mnogim naukama, koje smo pomenuli da učestvuju u definiciji njene interdisciplinarnosti.

1.2 Astronomska naspram biološke metodologije

Možemo reći da astrobiologija daje multidisciplinarnu perspektivu biološkim istraživanjima, upoređujući našu planetu sa ostalim potencijalnim nastanjenim svetovima. Osim toga, astrobiologija omogućava istraživanje nastanjivih sredina na dva načina: nastanjivost sa stanovišta da je život zasnovan na hemiji ugljovodonika i, naravno, drugo stanovište, koje podrazumeva drugačiju hemijsku organizaciju života. Kao takva, astrobiologija koristi fiziku, hemiju, astronomiju, biologiju, molekularnu biologiju, ekologiju, planetaristiku, geografiju i geologiju kako bi mogla istraživati mogućnost života na drugim svetovima i omogućiti detektovanje i prepoznavanje biosfere, koje se mogu razlikovati od Zemljine [Word (Ward) i Braunli (Brownlee) (2004)]. Astrobiologija je posvećena interpretaciji postojećih naučnih podataka iz različitih

oblasti kosmosa. Na ovaj način, sami koreni astrobiologije, koji su u fizici, hemiji i biologiji, mogu biti takođe podložni promenama kao rezultat astrobioloških otkrića. Astrobiologija se oslanja na hipoteze, koje se čvrsto uklapaju u postojeće opšteprihvaćene naučne teorije. Da bi se smanjio obim poduhvata traženja oblika života na drugim planetama, astrobiolozi polaze od pretpostavke da je većina životnih oblika u našoj Galaksiji zasnovana na ugljovodonicama, kao i sam život na Zemlji. Ugljenik je poznat po neobično širokim mogućnostima formiranja različitih molekula. Ugljenik je četvrti najzastupljeniji element u kosmosu i energija, koja je neophodna za stvaranje ili raskidanje veza jeste na odgovarajućem nivou, koji je potreban da bi se izgradili molekuli, koji nisu stabilni, ali su reaktivni. Takođe, atomi ugljenika se veoma lako vezuju sa drugim ugljeničnim atomima formirajući proizvoljno dugačke i kompleksne molekule.

Sledeća pretpostavka je postojanje vode u tečnom stanju, koja omogućava odlično okruženje za nastanak složenih ugljeničnih molekula, koji mogu dovesti do spontanog nastanka života. Međutim, neki naučnici predlažu kao moguće rastvarače i amonijak ili smeše vode i amonijaka.

I treća pretpostavka je da se treba fokusirati na zvezde koje su tipa našeg Sunca, što je proisteklo iz ideje o nastanjivosti planeta. Veoma velike zvezde imaju kratko trajanje da bi se mogao razviti život na planetama, koje se kreću oko njih. S druge strane, veoma male zvezde bi davale malu količinu toplote, tako da samo planete na vrlo bliskim orbitama ne bi bile zamrznute; međutim, na takvim putanjama ove planete bi najverovantije bile 'plimski zaključane' u odnosu na zvezdu, tako da bi (pošto nemaju atmosferu) jedna strana uvek bila pregrejana, a druga zamrznuta. S druge strane, crveni patuljci, zvezde, koje imaju dug život, mogle bi omogućiti nekakvu biologiju na planetama, koje bi imale tanak sloj atmosfere. Imajući u vidu da zasad znamo da život jedino postoji na Zemlji, nema načina da se proverí ispravnost ovih pretpostavki.

Moderna biološka istraživanja su takođe multidisciplinarna, uglavnom uključujući metode fizike, hemije i informatike, pri čemu su fokusirana na izučavanje života na Zemlji. Međutim, bez obzira na proširenja ove grane nauke, ona ima sledeće opšte i unificirajuće koncepte. Biologija prepoznaje da je ćelija osnovna jedinica života, geni da su osnovna jedinica naslednosti, a evolucija 'pokretačka mašina' sinteze i kreacije novih vrsta. Takođe smatra da svi organizmi žive konzumirajući i transformišući energiju, da imaju sposobnost da regulišu svoju unutrašnjost kako bi održali stabilnim i vitalnim uslove svog postojanja. Važno je pomenuti ksenobiologiju, granu biologije koja pokušava da dizajnira oblike života koji bi imali drugačiju biohemiju ili drugačiji genetski kod, ali ovde na Zemlji – bez razmatranja uslova na nekim drugim svetovima.

1.2.1 Pet revolucija: kopernikanska, hemijska, geološka, biološka i kosmološka

Ovde ćemo razmotriti neke od istorijskih proboja u naukama, koje su glavni konstituenti astrobiologije. Knjiga *Struktura naučnih revolucija*, koju je objavio Tomas Kun (Thomas Khun) 1962. godine o istoriji nauke, bila je ne samo važan momenat za istoriju, filozofiju i sociologiju naučnog znanja već je izazvala reakcije u svetskoj naučnoj javnosti. U stvari, ovim radom je bilo izazvano dotadašnje mišljenje o tome šta je progres u „normalnoj“.

Kun opisuje istoriju nauke kao cikličan proces. Postoje periodi „normalne nauke“, koji su okarakterisani kao „paradigma“ ili „zajednička disciplinarna matrica“.

Paradigma opisuje konsenzusni pogled: naime, u periodu normalne nauke, naučnici imaju tendenciju slaganja oko pojava, koje su relevantne i šta su objašnjenja ovih fenomena, koje probleme treba rešavati i šta se prihvata kao njihovo rešenje. Na kraju perioda normalne nauke nastaje kriza – kada eksperimenti daju rezultate, koji se ne uklapaju u postojeće teorije ili su otkrivene unutrašnje protivrečnosti u njima. Tada nastaje uzbuna i konfuzija. Čudne ideje ispunjavaju naučnu literaturu i eventualno dolazi do revolucije. Naučnici počinju da gledaju na prirodu na nov način, rezultirajući eventualno u nov period normalne nauke. Na taj način paradigma je promenjena.

Posebna pažnja u ovoj knjizi je posvećena, posle širokog prihvatanja Njutnove fizičke teorije, njutnovskoj paradigmi u 18. veku, kada je počeo period normalne nauke o kretanju i gravitaciji. Koristeći ovu teoriju, naučnicima uspeli da naprave veoma tačne proračune planetarnih putanja, što je dovelo do spektakularnog uspeha, kao što je predviđanje 1821. godine postojanja i putanje planete, koju je Johan Gale (Johann Galle) posmatrao 1846. godine i nazvao Neptun. Međutim, krajem 19. veka nastala je velika kriza zbog neuspeha u razumevanju prirode kretanja svetlosti. Ovaj problem je rešen preko nove paradigme, revolucionarne revizije razumevanja prostora i vremena, koju je izneo Ajnštajn između 1905. i 1915. godine. U njoj kretanje utiče na protok vremena; data je analitička relacija između materije i energije, i gravitacija je objašnjena kao zakrivljenje prostor-vremena. Tako je Ajnštajnova teorija relativnosti postala nova paradigma, čime je izučavanje kretanja i gravitacije ušlo u nov period normalne nauke.

Po nekim autorima, Kunova namera korišćenja reči paradigma bila je ili korisna ili nepoželjna. *Paradigma* kao reč znači neko dostignuće, koje služi kao model za budući rad. Kun je na ovaj način koristio reč *paradigma* kada je govorio o kopernikanskoj revoluciji. Po Kunu, isto kao što nema ničeg neizbežnog u pojavi sisara u periodu krede, koji su nadživeli dinosauruse kada je bio sudar sa bolidom (videti odeljak o zemaljskim naspram vanzemaljskih mehanizama ekstinkcije), tako isto nema ničeg ugrađenog u prirodi što može učiniti da naša nauka evoluiru u pravcu Maksvelovih jednačina ili opšte relativnosti. Kun prepoznaje da su Maksvelova i Ajnštajnova teorija bolje od onih, koje su im prethodile, na isti način kao što su sisari bili bolji od dinosaurusa u preživljavanju efekata ekstinkcije. Međutim kad novi problemi nastanu, i ove teorije će biti zamenjene novim, koje su bolje u rešavanju tih problema itd. Na ovaj način Kun je napravio paralelu između biološke revolucije i naučne revolucije.

Kun je pokazao da u periodu normalne nauke nema stagnacije, već je to takođe esencijalna faza naučnog progressa. Po nekim autorima, ovaj stav o periodu „normalne nauke“ veoma je dobro odslikao šta se dešavalo od ranih 1970-ih u razvoju kosmologije i fizike elementarnih čestica. Sve do kasnih 1960-ih godina kosmologija je bila u stanju konfuzije. Većina astronoma je bila podeljena oko omiljenih kosmologija, i bilo čija tuđa kosmološka ideja se smatrala dogmom. Na primer, neki naučnici kao Hanes Alfvén (Hannes Alfvén) nisu želeli da razmišljaju o tada kontroverznoj teoriji Velikog praska. Ovakvo složeno stanje kosmologije se počelo popravljati tek posle 1965. godine sa pronalaskom kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja. Otkriće ovog zračenja usmerilo je gotovo celu naučnu javnost da počne ozbiljno da razmišlja o ranom kosmosu. Veoma brzo, posle manje od jedne decenije, teorija Velikog praska je dostigla svoj moderan oblik i bila opšteprihvaćena. Vajnberg (Winberg) je uveo izraz *Standardan model* za modernu kosmologiju Velikog praska, da bi podvukao da to nije dogma, kojoj treba svi da se poklone, već zajednička osnova na, kojoj svi naučnici mogu da se sretnu i diskutuju svoje kosmološke proračune i

posmatranja. Međutim, ostali su veoma cenjeni fizičari tog vremena kao Alfvén i Fred Hojl (Fred Hoyle), koji nisu prihvatili ovaj konsenzus o kosmologiji. Neki su napali ovu ideju saglasnosti (konsenzusa), zadržavajući ideal nauke kao kontinualne revolucije u, kojoj svako treba da ide za svojom idejom. Ipak, po Vajnbjergu samo kada naučnici imaju konsenzus, mogu se fokusirati na eksperimente i proračune, koji im mogu pokazati da li su njihove ideje tačne ili pogrešne. Naime, Francis Bacon (Francis Bacon) je to najbolje opisao kada je rekao:

„Istina se pre pojavljuje iz grešaka nego iz konfuzije (pometnje).“

Kopernikanska revolucija je radikalno promenila filozofski pogled na ulogu čoveka u kosmosu. Možemo je sumirati u iskazu da nema 'specijalnih' posmatrača. Na taj način smo se našli u manje važnoj poziciji, više marginalizovani, i bez zauzimanja centra bilo čega. Ne samo da je Zemlja viđena kao telo, koje orbitira oko Sunca, već je i Sunce postalo jedno od mnogobrojnih sebi sličnih objekata, koji se kreću u džinovskoj konglomeraciji, koju danas poznajemo kao Mlečni put. U prethodnom veku je pokazano da je naša Galaksija među stotinama milijardi drugih galaksija u do sada posmatranom kosmosu. Ova ideja kopernikanskog principa se počela upotrebljavati i van astronomskog konteksta, pošto su je neki filozofi nauke asociirali sa Darvinovom teorijom evolucije, opisujući kao onu, koja je stvorena u kopernikanskom duhu. Kopernikanski princip se ne može dokazati matematički niti ima koren u nekom fizičkom modelu ili teoriji. Kao i Okamovo sečivo¹, kopernikanski princip je potvrđen na osnovu empirije.

U bilo kojoj studiji o istoriji hemije period između 1770. i 1790. godine je označen kao „revolucija u hemiji“ delom ova revolucija je bila rezultat Lavoazijeovog (Lavoisier) rada: napuštanje flogistonske teorije o sagorevanju, razvijanje koncepta elementa i razvoj nove hemijske nomenklature. Flogiston je bila supstanca za, koju se verovalo da se emituje tokom sagorevanja, ali i tokom pojave rđanja metala (za, koju danas znamo da je oksidacija). Pre Lavoazijeovog rada, verovalo se da se materija sastoji od kreča i flogistona i da se tokom sagorevanja gubi flogiston. Činjenica da metali zapravo dobijaju na težini tokom sagorevanja objašnjavala se pojavom da flogiston ima negativnu težinu. Lavoazije je smatrao da to nije moguće. Koristeći precizna merenja, pokazao je da je u svim slučajevima sagorevanja, kada je dolazilo do povećanja težine, vazduh bio apsorbiran, a onda, kada je kreč sagorevao sa ugljenom, 'vazduh' se oslobađao. Ovim eksperimentima Lavoazije je pokazao da flogiston ne postoji. Njegovi nalazi su pokazali da ukupna težina supstanci u hemijskoj reakciji ostaje ista – prva formulacija čuvenog zakona o očuvanju masa. Međutim, moderna revolucija u hemiji je, po nekim autorima, označena sa rođenjem kvantne hemije u 20. veku, kada je Šredingerova (Shroedinger) jednačina primenjena na vodonikov atom 1926. godine.

Do sredine 20. veka integracija fizike i hemije je bila ekstenzivna, gde su se hemijske osobine objašnjavale kao rezultat elektronske strukture atoma. Iako neki principi, koji su bili izvedeni iz kvantne mehanike, a, koji su mogli da predvide kva-

¹Okamovo sečivo, koje se često zove i zakon ekonomičnosti jeste princip, koji je formulisao sholastički filozof Vilijam od Okama (William of Ockham) u 14. veku, da *pluralitas non est ponenda sine necessitate*, tj. da se mnoštvo ne treba uvoditi bez potrebe. Naime, ovaj princip daje prednost jednostavnosti, tj. da od dveju teorija treba uzeti onu, koja jednostavnije objašnjava fenomen. Takođe, ovaj princip se može formulisati i kao da entiteti ne treba da se umnožavaju bez potrebe. Naglasićemo da ovaj princip nije nikako zamena za uvid, logiku i naučni metod. Sa njim nije moguće braniti ili praviti zaključke. Kao arbitri za korektnost isključivo se mogu koristiti logička konzistencija i empirijski dokazi. Na kraju ćemo pomenuti izjavu, koja se pripisuje Ajnštajnu, ali za, koju niko ne zna da li je on stvarno to izrekao, da sve treba držati jednostavno, ali nikako jednostavnije.

litativne hemijske karakteristike bioloških relevantnih molekula, ipak su gotovo do kraja 20. veka bili samo skup pravila, posmatranja i postupaka pre nego *ab initio* kvantitativnog metoda. Heuristički pristup u hemiji je trijumfovao 1953. godine kada su Džejms Votson (James Watson) i Frensis Krik (Francis Crick) izveli dvostruku helikoidalnu strukturu DNK na osnovu znanja hemije konstituenata ovog molekula i X-difrakcione rešetke, koju je snimala Rozalind Frenklin (Rosalind Franklin). Iste godine je trijumfovao i Miler-Jurijev eksperiment u kome je pokazano da osnovni delovi proteina, jednostavne amino-kiseline, mogu da se izgrade od prostijih prilikom simulacije primordijalnih procesa na Zemlji. Ovo je bio prvi pokušaj hemičara da izuče hipotetične procese u laboratoriji. Harold Kroto i njegovi saradnici su 1985. godine otkrili fullerene, klasu velikih uljgenikovih atoma, koji formiraju geodezijsku sferu, za, koje se smatra da su zastupljeni u velikoj količini u kosmosu. Takođe, ovi molekuli su pronađeni i u obliku nanotuba, , koje su postale veoma važne u nanotehnologiji. Godine 1995. Erik Kornel (Eric Cornell) i Karl Vejman (Carl Wieman) su sintetisali prvi Boze (Bose)-Ajnštajnov kondenzat, supstancu, koja ispoljava kvantno mehanička svojstva na makroskopskoj skali.

Geologija ima svoj epistemološki identitet i njeno rođenje u modernom smislu je vezano za drugu polovinu 17. veka i radove Stenoa. Njegova posmatranja zaravni oko Firence sadržala su fundamentalno otkriće da Zemlja ima istoriju, koja može da se dekodira novim načinom posmatranja slojeva. Međutim, moderan začetak geologije se povezuje sa industrijskom revolucijom i razvojem rudarske industrije. Ekonomska motivacija korišćenja geoloških podataka podstakla je vlade zemalja da podrže finansijski ovakva istraživanja. Tokom 19. veka zemlje kao što su Kanada, Australija, Velika Britanija i SAD osnovale su fondove za geološke posmatračke programe, kojima su mapirale velike površine svojih teritorija. U 19. veku, na osnovu pomenutih istraživanja, zaključeno je da je Zemlja stara nekoliko miliona godina. Do ranog 20. veka Zemljina starost je bila procenjena na 2 milijarde godina. Sa ovom procenom starosti bila je otvorena mogućnost razvoja teorija kontinentalnog kretanja tokom ogromnih perioda vremena. Alfred Vegener (Alfred Wegener) je 1912. godine predstavio svoju teoriju kontinentalnog razdvajanja. Po ovoj teoriji, kontinenti su bili spojeni u jednu celinu u određenom vremenu u prošlosti, formirajući na taj način jedinstvenu kopnenu masu, koja je bila poznata pod nazivom Pangea. Potom, njeni delovi su se razili jedni od drugih poput splavova do današnjih položaja. Pošto Vegener nije imao dovoljno ubedljiv mehanizam, koji bi objasnio ovo razdvajanje, ova ideja nije bila prihvaćena za vreme njegovog života. Sa primenom stratigrafskih principa² na distribuciju kratera na Mesecu, može se slobodno reći da je Džin Šumejker (Gene Shoemaker) preneo studiju Meseca iz okrilja astronomije u okviru lunarne geologije. Ono što je promenjeno u poslednjim godinama 20. veka jeste perspektiva geoloških studija. Geologija sada koristi integrativan pristup, razmatrajući planetu Zemlju u širem kontekstu, obuhvatajući atmosferu, biosferu i hidrosferu. Veštački sateliti su omogućili dobijanje slika, koje se mogu geološki analizirati. Kako su fizičke nauke osnova za sva druga istraživanja, ovaj odeljak ćemo završiti sagledavanjem smeru evolucije ovih nauka. Kao što smo napomenuli, Kun je koristio metaforu Darwinove evolucije neusmerenog poboljšanja. Po nekima, evolucija fizičkih nauka se odvija unazad. Naime, slično kao što u biologiji možemo da ispratimo genetske korene do zajedničkog pretka, na isti način nauke o optici, elektricitetu i magnetizmu spojile su se u Maksvelovo vreme u ono što sada prepoznajemo

²Stratigrafski principi su osnovni zakoni, koje koriste geolozi u izučavanju slojeva stena. Ima ih ukupno šest: horizontalnost, lateralna neprekidnost, superpozicija, odnosi poprečnih rasedanja, inkluzija i faunska sukcesija.

kao elektrodinamiku. Kasnije, teorije elektromagnetne, slabe i jake nuklearne sile udružile su se u Standardni model čestične fizike. Očekujemo da naredni korak bude teorija, koja će objediniti gravitaciju i sve grane fizike elementarnih čestica u jednu unificiranu teoriju, kojom bismo mogli da opišemo uslove na početku Velikog praska.

1.3 Značenje evolucije u astronomskim i biološkim naukama

Kao što je dobro poznato, u biologiji se pod evolucijom smatra promena u naslednim karakteristikama neke biološke populacije kroz sukcesivne generacije. Evolucionni procesi omogućavaju raznolikost na svakom nivou bioloških sistema, uključujući vrste, organizme i molekule, kao što su DNK i proteini. Iako još od vremena Darvina, koji je prvi formulisao naučni argument za teoriju evolucije koristeći princip prirodne selekcije, danas reč *evolucija* više nije ekskluzivno sadržana u biologiji. Na primer, pojam *hemijska evolucija* se koristi da bi opisala abiogenu produkciju jedinjenja (prethodnica života) od neorganskih supstanci pod određenim uslovima.

Astrobiološka istraživanja uključuju poređenja hemijske evolucije potencijalnih prekursora života u međuzvezdanoj sredini, kao i na planetama i malim telima našeg Sunčevog sistema. Takođe, astrobiologija razmatra i geološku evoluciju drugih planeta i njihovih satelita u odnosu na njihovu nastanjivost. Potom, razmatra evoluciju planetarnih sistema u našoj Galaksiji, i testira uticaj kosmičkog okruženja na preživljavanje otpornih životnih formi. Na taj način, astrobiologija posmatra fenomen života u kontekstu kosmičke evolucije [Hornek (Horneck), (1995)].

1.3.1 Informacija i entropija

Imajući u vidu da informacija i entropija imaju veoma važnu ulogu u postojanju organizama ali i samog kosmosa, na ovom mestu ćemo dati neka osnovna razmatranja ovih koncepata. Na samom kraju ćemo objasniti zašto život kao i drugi disipativni procesi mogu da se odvijaju u kosmosu. Informacionu teoriju, kakvu danas poznajemo, razvio je Klod Šenon (Claude Shannon) u svom radu iz 1948. godine. On je uveo kao meru za količinu informacije – entropiju. Pre toga entropija je bila dugo koncept termodinamike. Nju je otkrio nemački fizičar Klasius (Clasius) 1865. godine u obliku:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (1.1)$$

gde je δQ infinitezimalni element toplotne energije, koju je apsorbirao sistem na temperaturi T . Za reverzibilne procese entropija ostaje konstantna; međutim, kod ireverzibilnih procesa (kao što je život) entropija se stalno povećava. Popularno, termodinamička entropija se opisivala kao mera neuređenosti fizičkog sistema. Međutim, 1877. godine, austrijski fizičar Ludvig Bolcman (Ludwing Boltzmann) okarakterisao je termodinamičku entropiju mnogo preciznije, tj. kao broj različitih mikroskopskih stanja u sistemu (Ω), koji su konzistentni sa makroskopskim stanjem celog sistema ($S = k_B \ln \Omega$, gde je k_B Bolcmanova konstanta). Organizmi (kao i planeta Zemlja) su otvoreni fizički sistemi, koji razmenjuju materiju i energiju sa okolinom. Prilikom transfera ili transformacije energije, jedan deo energije se gubi u vidu toplote, toplota je izuzetno neuređen vid energije. Evolucija kompleksnih organizama nije u suprotnosti sa drugim zakonom termodinamike. Naime, entropija (ili neuređenost) se može lokalno smanjiti (u organizmu), ali ukupna entropija unverzuma se povećava, jer energija, koja napušta ekosistem (u kombinaciji sa kompleksnošću u organizmima), više je neuređena nego energija, koja je ušla u ekosistem [videti sliku 1.3]. Klod Šenon, koga smo pomenuli na početku izvodi entropiju informacije kao:

$$I = -K \sum_1^M P_j \ln P_j, \quad (1.2)$$

gde je $K > 0$. Može se pokazati sledeća lema da je

$$I_{max} = K \ln \Omega \quad (1.3)$$

ako i samo ako je

$$P_j = \frac{1}{\Omega} \quad (1.4)$$

Zapazimo da je svako mikrostanje podjednako verovatno pa je

$$\sum_{j=1}^{\Omega} P_j = 1 \quad (1.5)$$

Da bismo našli ekstremum jednačine 1.2, najpre napišimo njoj odgovarajući Lagranžijan:

$$\tilde{I} \equiv I - \lambda \left(\sum_{j=1}^{\Omega} P_j - 1 \right) \quad (1.6)$$

Ekstremume Lagranžijana nalazimo kao

$$\frac{\partial \tilde{I}}{\partial P_j} = 0 \Rightarrow P_j = e^{-(1+\frac{\lambda}{K})} \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \tilde{I}}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^{\Omega} P_j = 1 \rightarrow P_j = \frac{1}{\Omega} \quad (1.8)$$

Da li smo našli maksimum ili minimum, videćemo ako potražimo drugi parcijalni izvod Lagranžijana:

$$\left. \frac{\partial^2 \tilde{I}}{\partial P_j \partial P_k} \right|_{P_j = \frac{1}{\Omega}} = -K \Omega \delta_{jk} \quad (1.9)$$

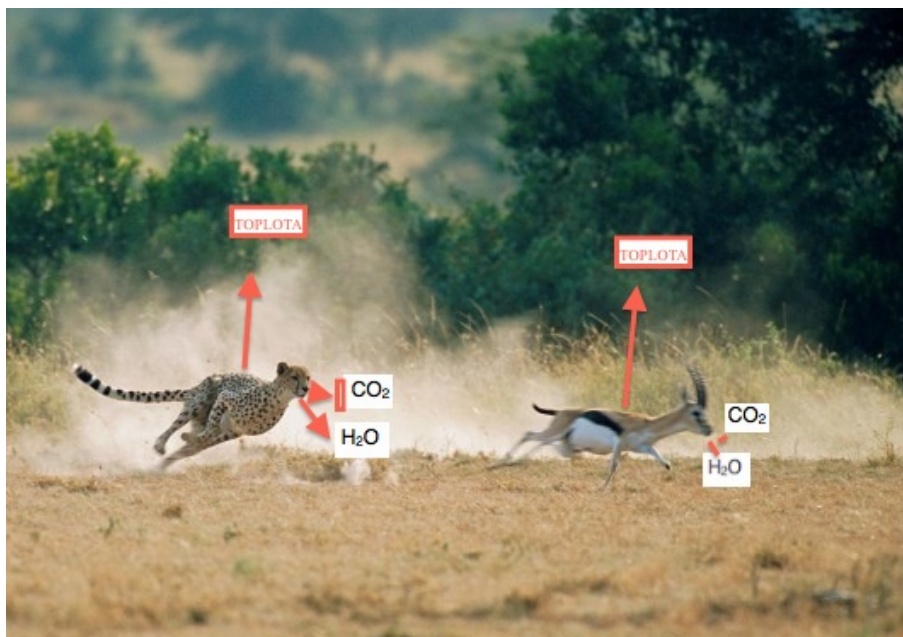
Pošto je negativan, to znači da smo našli maksimum, tj. našli smo kada je I_{max} . Pa, prema tome, ako preuredimo jednačinu 1.3 tako što ćemo je pomnožiti sa $\frac{k_B}{K}$:

$$S \equiv \frac{k_B}{K} I_{max} = k_B \ln \Omega \quad (1.10)$$

dobijamo vezu između maksimalne vrednosti Šenonove entropije i Bolcmanove entropije.

1.3.2 kosmos kao informacioni sistem

Realni brojevi (koji se mogu razmatrati kao geometrijski, vektorski, metrički, ili prostor merenja ili linearni kontinuum), njihovo proširenje na kompleksne brojeve, zajedno sa osobinama diferencijabilnosti, imaju glavnu ulogu u današnjoj fizici. Naime, svi poznati fundamentalni zakoni fizike izraženi su u obliku diferencijabilnih funkcija definisanih na skupu realnih ili kompleksnih brojeva. Međutim, potpuno



Slika 1.3: Drugi zakon termodinamike (odnosi se pre svega na zatvorene sisteme). Organizmi, i u kontekstu rasta, reprodukcije, funkcionisanja i evolucije, definitivno nisu zatvoreni sistemi. Održavanje visoke uređenosti organizama zapravo je nauštrb povećanja nereda negde drugde. Na slici, obe životinje da bi izvršile fizičku aktivnost i pritom održale svoju uređenost, oslobađaju toplotu, vodenu paru i ugljen-dioksid, što povećava neuređenost okoline. Upravo interakcija sa atmosferom, okolinom, uzimanje hrane, čine organizme otvorenim sistemima.

drugačiji pogled na odnos između matematike i fizike pojavio se sa radovima Gregori Čejtina (Gregory Chaitin) u kojima je razvijana algoritamska informaciona teorija [Čejtin (2004)]. Naime, Čejtin (2007) zaključuje: *A scientific theory is like a computer program that predicts our observations*. Postoje dva razloga za takav pogled: Okamovo sečivo (jednostavnija teorija, koja objašnjava podatke uzima se kao radna), što po Čejtinu najmanji program, koji opisuje podatke jeste najbolja teorija. Drugi razlog potiče od Lajbnica (Leibnitz) i može izraziti modernim jezikom: ako je teorija iste veličine u bitima kao i podaci, koje objašnjava, tada je ta teorija bezvredna. Naime, čak i najslučajni podaci imaju teoriju iste veličine iza sebe.

Zapravo, korisna teorija je kompresija podataka (*comprehension is compression*). Na primer, u klasičnoj mehanici početni položaji i momenti sistema čestica mogu se smatrati „ulaznim podacima“, zakoni mehanike su „program“, konačno stanje čestica posle izvesnog vremena, koje nas interesuje jeste „izlaz, rezultat“. Prema tome, kosmos procesira informacije automatski sa svojim razvojem. Prema Setu Lojdu (Seth Lloyd) (2002, 2006), postoji definicija kvantne Tjuringove (Turing) mašine [Turing mašina sa kvantnim bitima (kjubit) i dodatnim instrukcijama da se kjubiti postave u superpoziciju]. Univerzalni kvantni kompjuter je fizički sistem, koji se može programirati (tj. čije se stanje može pripremiti) da simulira bilo koju kvantnu Turing mašinu. Tako da po Lojdu fizički zakoni podržavaju kvantno računanje, zbog čega kosmos nije moćniji u smislu kvantnog računanja nego kvantni kompjuter. Logički lanac, koji koristi Lojd u svom radu je da:

- (1) kosmos je potpuno opisiv sa kvantnom mehanikom;
- (2) standardno kvantno računanje potpuno opisuje kvantnu mehaniku;
- (3) zato je kosmos kvantni kompjuter.

Lojd tvrdi da je dokazao vezu između 1 i 2. On zapravo dodaje još jedno jako tvrđen-

je, a to je da kosmos ne samo da je izračunljiv u Tjuringovom smislu, već je, pošto se sastoji od kvantnih čestica, koje se pokoravaju kvantnoj mehanici, kosmos kvantni kompjuter, koji zapravo izračunava svoje buduće stanje na osnovu sadašnjeg. Autori kao što su Hektor Zenil i Rudi Raker (Rudy Rucker) smatraju da zbog svog kvantno-mehaničkog pristupa Lojd ne daje dovoljno mesta razmatranju determinističkog računanja. Ovi autori smatraju da iako kosmos nije ćelijski automat (jer ćelijski automati ne mogu da reprodukuju kvantno ponašanje na osnovu empirijskih podataka) nema potrebe toliko davati značaj kvantnoj mehanici. Naime, ako pogledamo današnje kompjuterske simulacije fizičkih sistema, oni ne koriste kvantnu mehaniku da bi generisali slučajnost u sistemu, a izgleda da su dovoljno efikasni da proizvedu varijacije. Po Zenilu i Stivenu Volframu (Stephen Wolfram) ne-deterministička slučajnost nije neophodna, pseudoslučajnost ili nepredvidiva izračunljivost su gotovo dovoljni.

1.3.3 Holografski princip

Holografski princip se razvio iz radova Bekenštejna (Beckenstein, 1973) i Hokinga (Hawking, 1975) i ovde ćemo dati jedan kratak pregled ovog koncepta, s obzirom na to da će nam pomoći da objasnimo zašto život, kao disipativni proces, može da se odvija u kosmosu. Nerotirajuća neutralna crna rupa [Švarcšildova (Schwarzschild) crna rupa], okarakterisana je masom M , radijusom horizonta događaja ($r_H = 2GM$), površinom horizonta događaja ($A = 16\pi G^2 M^2$) i površinskom gravitacijom ($\kappa = \frac{1}{4GM}$). Za nju važi da je:

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA \quad (1.11)$$

Ajnštajnovе jednačine predviđaju da se u bilo kom klasičnom gravitacionom procesu horizont događaja povećava ($dA > 0$). Za stacionarnu crnu rupu površinska gravitacija κ je konstanta na horizontu događaja. Pomenuta relacija između M i A liči na prvi zakon termodinamike ($dE = TdS$, pri čemu $dA > 0$ je analog drugom zakonu termodinamike $dS > 0$). Hoking je ovu analogiju učvrstio kada je pokazao, koristeći semiklasičnu gravitacionu tehniku, da crne rupe emituju toplotno zračenje na temperaturi:

$$T = \frac{\hbar\kappa}{2\pi} = \frac{\hbar}{8\pi GM} \quad (1.12)$$

gde je \hbar redukovana Plankova konstanta i M je masa crne rupe. Koristeći Hokingovu formulu za temperaturu dobijamo da je

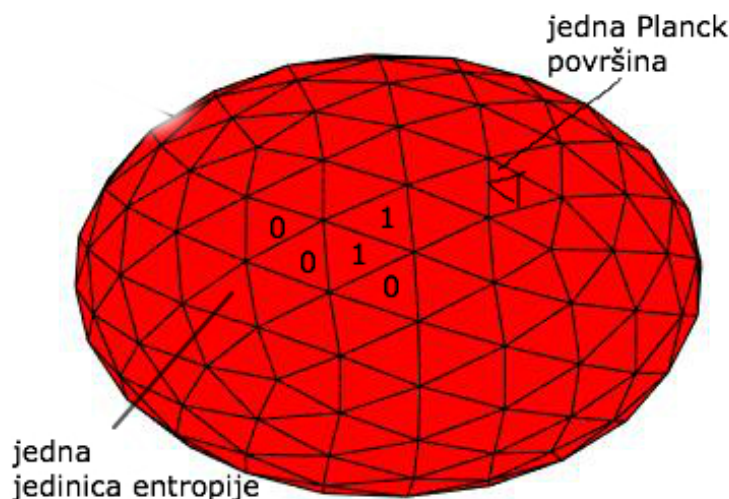
$$dM = TdS = \frac{\kappa\hbar}{8\pi G\hbar} dA \quad (1.13)$$

zbog čega zaključujemo da su crne rupe termalni objekti čija je entropija:

$$S = \frac{Ac^3}{4\hbar G} \quad (1.14)$$

Izvedena formula ima mnogo opštije značenje nego što se na prvi pogled može videti. Naime, ona važi za bilo koju vrstu crnih rupa, bile one rotirajuće ili naelektrisane. Ukoliko uzmemo Plankovu dužinu ($l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$), tada je:

$$S = \frac{A}{4l_P^2} \quad (1.15)$$



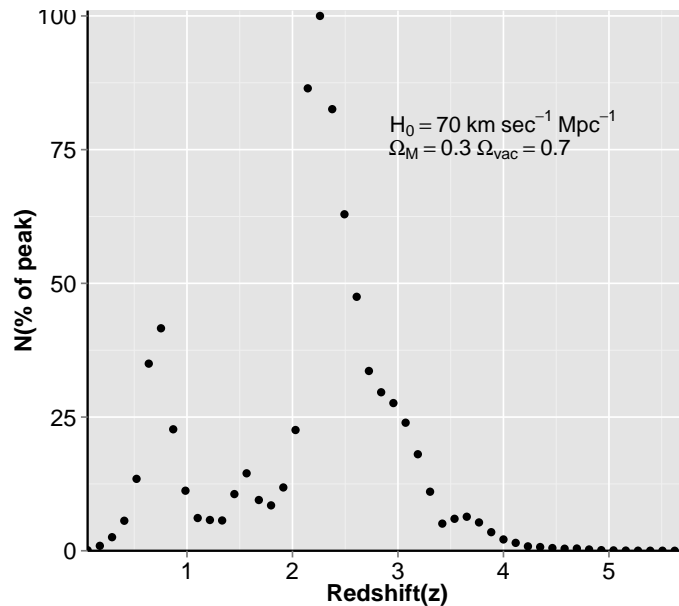
Slika 1.4: Entropija crne rupe je proporcionalna površini horizonta događaja. Crna rupa čiji horizont ima A Plankovih površina imaće $\frac{A}{4}$ jedinica entropije. Svaki trougao je jedna jedinica entropije. Svaki taj trougao može se podeliti na četiri manja jednakostranična trougla, i svaki će biti jedna Plankova površina. Ako uzmemo u obzir vezu između informacije i entropije, možemo reći kao da smo entropiju zapisali na horizontu događaja, gde svaki bit (1 ili 0) odgovara 4 Plankove površine.

Kako smo u jednačini 1.10 pokazali vezu između entropije S i informacije I , vidimo da smo sa jednačinom 1.15 zapravo povezali totalnu količinu informacije u nekom prostoru sa površinom, koja ga ograničava. Osim toga, činjenica da je entropija crne rupe funkcija površine njenog horizonta događaja u suprotnosti je sa našim svakodnevnim iskustvom: npr. u slučaju gasa u laboratoriji entropija je aditivna – dvostruko povećanje zapremine gasa dovešće do dvostrukog povećanja entropije. Očigledno kad je gravitacija dominantna, dolazi do velikih promena.

Razmotrimo sad koliko entropije može biti u nekoj zapremini prostora V . U principu, da bismo povećali entropiju, treba da dodajemo masu u tu zapreminu V . Ovaj proces je limitiran činjenicom da će materija oblikovati geometriju tog regiona. Kad smo ubacili kritičnu masu, region će gravitaciono kolabirati, formiraće se crna rupa čija je entropija $\frac{A}{4}$. Svaki deo materije, koji je upao u region pre kolapsa, po drugom zakonu termodinamike, mora imati entropiju manju od $\frac{A}{4}$. Na osnovu ovog zaključujemo da region zapremine V ne može imati entropiju veću od one, koja je proporcionalna njegovoj površini A . I ovo je zapravo holografski princip, koji su uveli Hoft (t, Hoft) 1993. godine i Susskind (Susskind) 1995. godine. Odnosno, sva informacija o fizici unutar nekog prostora ograničenog horizontom na rastojanju d od posmatrača data je konačnom količinom informacija na horizontu. Broj bitova informacije na horizontu određen je jednom četvrtinom površine horizonta u Plankovim jedinicama (videti sliku 1.4)

Laboratorija Fermilab je 2014. godine započela eksperiment (sa instrumentom Holometar), kojim će pokušati da ispita granice sposobnosti kosmosa da sačuva informacije. Holometar se sastoji od dva Majkelsonova (Michelson) interferometra slična kao u LIGO instrumentima. Interferometri će raditi u dve specijalne konfiguracije. Sam direktor eksperimenta Kreg Hogan (Craig Hogan) 2015. godine je napisao:

„We donot know what we will find“.



Slika 1.5: Relativan broj kvazara (N — izražen u procentima od maksimalne vrednosti) po pokretnom (comoving) elementu zapremine u funkciji crveng pomaka (x-osa). Comoving element zapremine je računat za ulazne kosmološke parametre date u legendi. Podaci su uzeti iz SDSShypDR9 kataloga kvazara [SDSShypDR9 Quasar Catalog (DR9Q)]

Međutim, čak i sami tvorcii holografskog principa su skeptični u pogledu ovog eksperimenta. Hijakatake (Hyakutake), kao i Hanada i dr. (Hanada et al.) 2014. godine su numerički potvrdili, po prvi put, da termodinamika crne rupe može biti reprodukovana iz kosmosa sa manjim brojem dimenzija. Ovo su prvi mali koraci u razrešenju validnosti holografskog principa i očekujemo da u bliskoj budućnosti možemo dati konačan odgovor.

Koristeći funkciju masa super masivnih crnih rupa (the supermassive black hole -SMBH) Egan and Lineweaver (2010) su zaključili da SMBH objekti (koji imaju mase reda veličine $10^9 M_{\odot}$) daju doprinose entropiji vidljivog kosmosa. Kvazari (najluminoznija aktivna galaktička jezgra – AGJ) imaju maksimum prostorne gustine na crvenom pomaku $z \sim 2.3 - 2.5$, što bi odgovaralo unazad vremenu (look-back time) od oko 78% od starosti kosmosa (slika 1.5).

Ovde ćemo navesti primer izračunavanja entropije dvaju crnih rupa, koje se nalaze u objektima Arp 102B i 3C3903.3. Detaljan opis ovih dvaju objekata, podataka i statističkih metoda za određivanje dimenzije (R_{BLR}) širokolinijskog regiona ovih dvaju objekata opisani su u Kovačević i dr. (2014). Kada znamo R_{BLR} , tada masu crne rupe (M_{BH}) možemo odrediti iz teoreme virijala u sledećoj formi $M_{BH} \sim \frac{R_{BLR} V^2}{G}$, pod pretpostavkom da je kretanje gasa oko crne rupe, virijalno i da je V karakteristična brzina gasa na rastojanju R_{BLR} . Kada imamo masu crne rupe možemo izračunati entropiju crne rupe koristeći formulu, koju je dao Penrouz (Penrose) 1989. godine:

$$S = \frac{2\pi kGM^2}{\hbar c \ln 2} \quad (1.16)$$

Da bismo predstavili funkciju mase SMBH u vidljivom kosmosu, koristili smo Šeh-

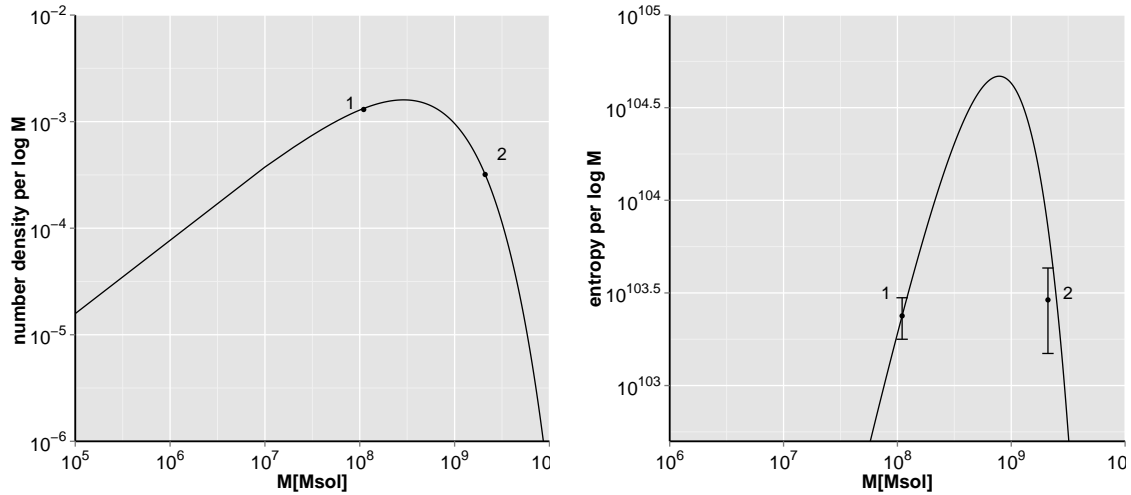
terovu (Shechter) funkciju:

$$\frac{dn}{d \log_{10} M} = \phi_* \left(\frac{M}{M_*} \right)^{\alpha+1} \exp \left(1 - \frac{M}{M_*} \right) \quad (1.17)$$

gde je $\phi_* = 0.0016 \pm 0.0004$, $M_* = 2.9 \pm 0.7 \times 10^8 M_\odot$ i $\alpha = 0.30 \pm 0.04$. Očekivani doprinos objekata sa masama sličnim onima kod Arp 102B i 3C390.3 dati su tačkama 1 i 2 na levom panelu slike 1.6. SMBH gustina entropije povezana je sa SMBH masom sledećom jednačinom:

$$\text{entden} = \frac{4\pi Gk}{c\hbar} \int M^2 \frac{dn}{d \log_{10}(M)} d \log_{10}(M) \quad (1.18)$$

i predstavljena je na desnom panelu slike 1.6. Glavni doprinos je od objekata sa masama oko $10^9 M_\odot$, dok je doprinos objekata sa masama sličnim Arp 102B (tačka 1 na desnom panelu) nešto veći od doprinosa onih sa masama sličnim 3C390.3 (tačka 2 na desnom panelu). Greške izračunatih entropija (videti tabelu 1.1) odredili smo numerički varirajući masu Arp 102B za $0.1 \times 10^8 M_\odot$ i masu 3C390.3 za $0.1 \times 10^9 M_\odot$. Entropije, koje smo dobili za ova dva objekta date su u poslednjoj koloni tabele 1.1.



Slika 1.6: Levi panel: SMBH funkcija mase: broj SMBH po Mpc^3 po logaritamskom intervalu mase. Ordinate tačkaka 1 (0.0013) i 2 (0.000319) su vrednosti SMBH funkcije mase za Arp 102B i 3C 390.3 respektivno. Desni panel: distribucija SMBH entropija. Ordinate tačkaka 1 i 2 su gustine entropija, koje odgovaraju masama SMBH u Arp 102B i 3C 390.3.

Ako pretpostavimo da se SMBH nalaze u gotovo svim od 10^{11} galaktičkih jezgara u vidljivom kosmosu, i ako uzmemo srednju vrednost entropije Arp102B i 3C 390.3 da je 1.7×10^{95} , tada možemo dati grubu procenu ukupne entropije SMBH u vidljivom kosmosu da je 1.7×10^{106} , što je daleko manje od procenjene ukupne entropije kosmosa 10^{122} , koju je izračunao Lojd (2002). Prema tome, vidimo da ukupna entropija u kosmosu nije dostigla limit (koji je određen holografskim principom), zbog čega disipativni procesi mogu da se odvijaju, pa prema tome i sam život u našem kosmosu.

1.4 Poređenje astronomskih i bioloških skala

Ćelije po svojim dimenzijama variraju, pri čemu je neka srednja vrednost oko $10\mu m$ u prečniku. Svaka ćelija je ograničena tankom membranom sa kompleksnom unutrašnjom, gde se nalaze upakovani milioni molekula. Iako nam život izgleda raznoliko

Tabela 1.1: Arp 102B i 3C 390.3: C je talasni opseg kontinuuma, L je linija emisio-nog spektra; R_{BLR} je prečnik širokolinijskog regiona, $SMBHM$ je izračunata masa supermasivne crne rupe, Referenca je rad u kome je izračunata masa crne rupe, ED je gustina entropije, E je entropija.

Objekt	C (\AA)	L	R_{BLR} (dani)	$SMBHM$ M_{\odot}	Referenca	ED $\times 10^{103}$	E
Arp 102B	6356-6406	H α	$15_{-13.8}^{24}$	1.1×10^8	Shapovalova et al. (2013)	(2.378 ± 0.6)	9.22×10^{92}
	5200-5250	H β	$23_{-20.9}^{64}$				
3C 390.3	5369-5399	H α	$24_{-10.5}^{95.8}$	2.1×10^9	Shapovalova et al. (2001)	(7.15 ± 1.4)	3.4×10^{95}
	5369-5399	H β	95_{-48}^{27}				

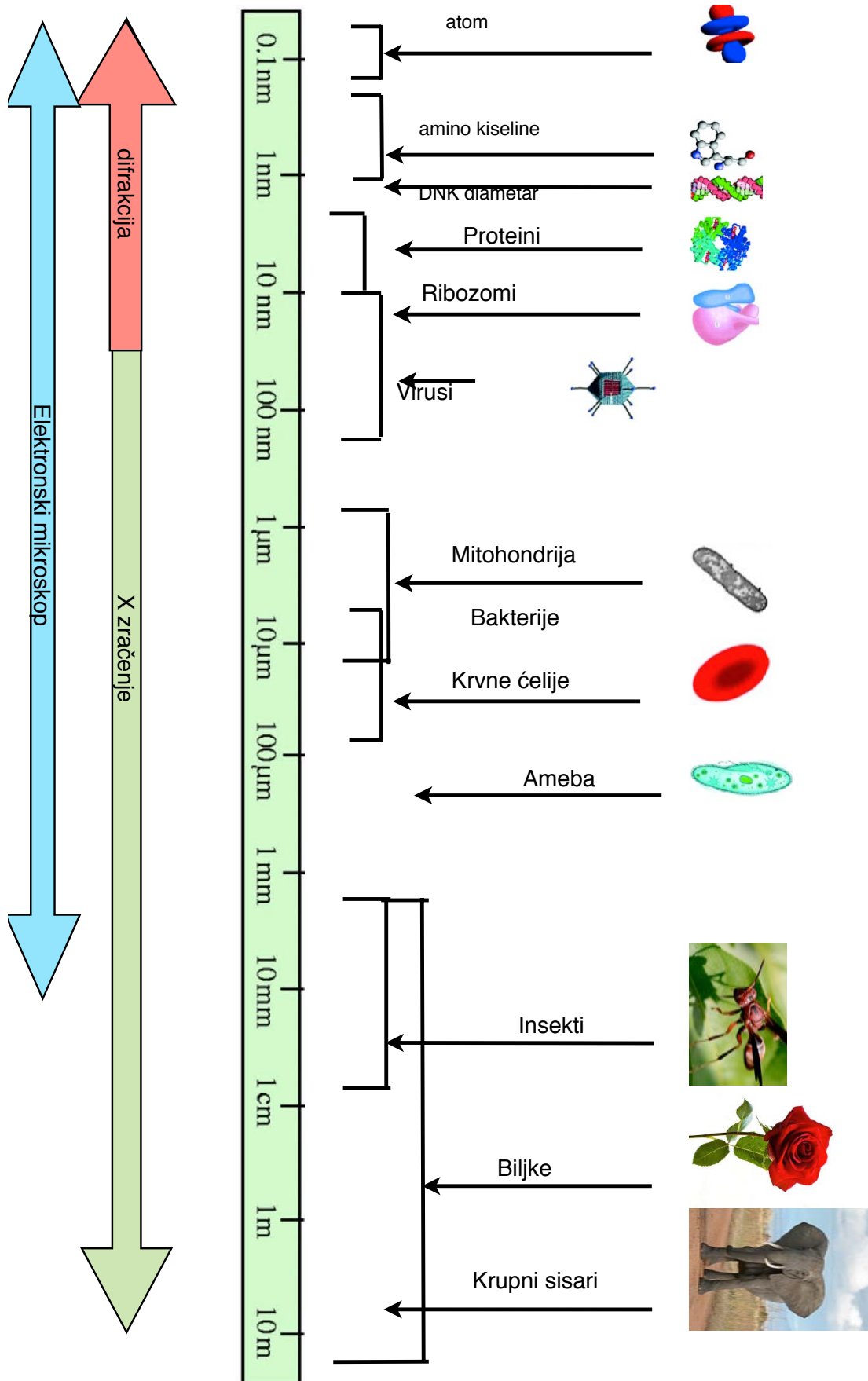
(od insekata pa sve do slonova – videti sliku 1.7), on je ipak značajno sličan na molekularnom nivou. Zbog toga je istraživanje života na skalama dimenzija $10\mu\text{m} - 0.1\text{nm}$ veoma značajno. Istraživanje ćelija putem mikroskopa započelo je pre oko 400 godina, međutim, tek u drugoj polovini 20. veka dolazi do proboja znanja o ćeliji na molekularnom nivou. Neki od tako izučenih molekula su: monomeri (nukleotidi, amino-kiseline i šećeri), koji se zajedno povezuju u polimere (DNK, proteini i polisaharidi); geni (DNK) obezbeđuju šablon za RNK (koja je bliska po hemijskim svojstvima DNK), a koji zatim određuju linearne sekvence amino-kiselina u proteinima; ova linearna sekvenca određuje 3D strukturu proteina, koja se sastoji od helikoidalnih i listolikih podstruktura; proteini potom formiraju glavne strukturne i funkcionalne komponente ćelija; proteini takođe interaguju sa brojnim molekularnim partnerima. Značajni uspesi molekularne biologije postignuti su korišćenjem 'empirijskog redukcionizma', gde se komponente bioloških sistema izdvoje, očiste i potom se njima manipuliše kako bi se dobile informacije o njihovoj strukturi i svojstvima. Naravno da se vodi računa o tome kako ove izolovane komponente funkcionišu u nedirnutoj živoj ćeliji. Jedan od alternativnih pristupa bi bio da se konstruiše primitivni 'veštački život', i u ovom trenutku dosta se radi na tome. Biologija je eksperimentalna i posmatračka, dok je za sada astronomija predominantno posmatračka nauka i stoga zainteresovana za modele fizičkih pojava, koje izučava.

Astronomija vrši istraživanja u širokom opsegu skala: sa primenom Opšte teorije relativnosti istražuje najveće i najmasivnije strukture (uključujući zvezde, galaksije, crne rupe pa čak i ceo kosmos); dok sa primenom kvantne mehanike istražuje najmanje strukture u kosmosu, kao što su elektroni i kvarkovi. Samo u nekim ekstremnim situacijama astronomija primenjuje obe teorije. Primer takvih situacija su singulariteti prostor-vremena, kao u slučaju crnih rupa i stanja kosmosa u neposrednoj okolini Velikog praska, pošto se u ovim slučajevima razmatraju ogromne skale mase (zato je potrebna Opšta teorija relativnosti) i ekstremno male skale rastojanja (zbog čega je potrebna kvantna mehanika). U astronomskim teorijama, koje uključuju kosmičke strune, skale dimenzija bi bile reda veličine protona ili čak nešto manje. Vremenska skala u kosmosu ima dva vida: jedan je pojava nasilnih događaja na kratkim vremenskim skalama, kao što su eksplozija supernovih kada se elementi neophodni za život oslobađaju iz unutrašnjosti zvezda gde su nastali, ili, na primer, sudari malih planeta u protoplanetarnom disku kako bi se formirale planete. Potom se otkriva drugi vid relativno dugih i mirnih perioda, koji omogućavaju razvoj života. Kosmos je pun kataklizmičnih događaja, kao što su supernove, gama bljeskovi, ali, koji su razdvojeni ogromnim rastojanjima u prostoru i eonima u vremenu. Razlog za postojanje ova dva vida vremena je zapravo u dvostrukom karakteru gravitacije.

Ona je princip, koji uređuje našu planetu, npr. da možemo hodati po njoj, ali i rezervoar energije, koji je može uništiti. 'Gravitaciona energija' nema neuređenost i toplotu. Zbog tog svog superiornog kvaliteta lako se može pretvoriti u druge forme energije. Druge vrste energije su pridružene sa neuređenošću i toplotom. Kad smo rekli 'gravitaciona energija', time smo podrazumevali zapravo potencijalnu energiju asociranu sa gravitacionim poljem. Ova fraza se vezuje za kvazare (kvazizvezdane objekte) i druge aktivne galaksije [Lamburn (Lambourne), 2010].

Naime, kvazari emituju ogromnu energiju iz izuzetno male oblasti i jedini mehanizam, koji znamo da može biti efektivniji od nuklearne fuzije na dugim vremenskim skalama jeste oslobađanje gravitacione potencijalne energije padanjem materije u supermasivne crne rupe. U početku bi veći deo gravitacione potencijalne energije bio pretvoren u kinetičku energiju padajuće materije, međutim, kako materija prolazi kroz akrecioni disk, veći deo kinetičke energije se konvertuje u zračenje.

Vratimo se na istoriju razvoja života na našoj planeti. Iz dosadašnjih otkrića u biologiji vidimo da je neophodno oko 10^6 godina da nastane vrsta, 10^7 godina da se razvije rod, 10^8 godina da se razvije nova klasa, oko 10^9 godina da se razvije tip i, naravno, manje od 10^{10} godina da se razvije inteligentan život. Vremenska skala razvoja života je veoma efikasna i zbog toga nije moguće postaviti granice raznolikosti životnih formi. Iz izloženog vidimo da astronomske skale obuhvataju biološke i da napredak u astronomiji na malim vremenskim skalama može doprineti razumevanju funkcionisanja molekula, koji su gradivni blokovi života.



Slika 1.7: Dimenzije nekih bioloških sistema prikazanih na logaritamskoj skali. Opsezi, koji su vidljivi primenom različitih metoda dati su na velikim duplim strelama.

Literatura

- Beckenstein, J. D., Black Holes and Entropy, *Phys. Rev. D*, 7, 2333, (1973).
- Bernal, J. D., Lecture to the British Interplanetary Society, described in Slater AE. *J. Br. Interplanet. Soc.* 12, 114, (1952).
- Carter, B., Bardeen, J. M., and Hawking, S. W., The Four Laws of Black hole Mechanics, *Commun. Math. Phys.*, 31,161, (1973).
- Chaitin, G. J., *Algorithmic Information Theory*, Cambridge Tractacts in Theoretical Computer Science, Cambridge University Press, (2004).
- Chaitin, G. J., *Thinking about Godel and Turing, Esseys on Complexity, 1970-2007*, World Scientific Publishing, (2007).
- Dick, S. J. , *The Biological Universe*, Cambridge Univ. Press, (1996).
- Hanada, M, Hyakutake, Y, Ishiki, G, Nishimura, J, Holographic description of a quantum black hole on a computer, *Science*, 344, no. 6186, 882, (2014).
- Hawking, S. W., Particle Creation by Black Holes, *Commun. Math. Phys.*, 43, 199, (1975).
- Hogan, C., Now Broadcasting in Planck Definition . In: *It from bit or bit from it ? , on physics and information*, Agiore, A, Foster, B, Meerali, Z (eds), Springer VIII, 143, (2015).
- t' Hooft, G. , Dimensional reduction in quantum gravity, gr-qc 9310026, (1993).
- Horneck, G., Exobiology, the study of the origin, evolution and distribution of life within the context of cosmic evolution- a review, *Planet Space Sci.*, 43, 189, (1995).
- Hyakutake, Y., Quantum near-horizon geometry of a black 0-brane, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 033B04, (2014).
- Kovačević , A., Popović , L. Č., Shapovalova, A. I., Ilić, D., Burenkov, A. N., and Chavushyan, V., Time series analysis of active galactic nuclei: The case of Arp 102B, 3C 390.3, NGC 5548 and NGC 4051, *ASR*, 54, 1414, (2014).
- Lafleur, L. J., *Astrobiology*, *Leafl. Astron. Soc. Pac.* 143, 333, (1941).
- Lambourne, R, *Relativity, Gravitation and Cosmology*, Cambridge University Press in association with The Open University Press, (2010).
- Lederberg, J., *Exobiology: approaches to life beyond the earth*, *Science*, 132, 393, (1960).
- Lloyd, S., Computational capacity of the universe, *Phys. Rev. Lett*, 88, 237091, (2002).
- Lloyd, S., *The Computational Universe*, Random House, New York, (2006).
- Melia, F., Falcke, H., The supermassive black hole at the Galactic Center, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 39, 309, (2001).

Penrose, R., *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, Oxford University Press, (1989).

Schmidt, M., *Xenobiology: a new form of life as the ultimate biosafety tool*, *Bioessays*, 32(4), 322, (2000).

Shapovalova, A. I., Popović, L. Č., Burenkov, A. N., Chavushyan, V. H., Ilić, D., Kollatschny, W., et al., *Spectral optical monitoring of a double-peaked emission line AGN Arp 102B: I. Variability of spectral lines and continuum*, *A&A*, 559, A10, 1, (2013).

Shapovalova, A. I., Burenkov, A. N., Carrasco, L., Chavushyan, V.H. et al., *Intermediate resolution H spectroscopy and photometric monitoring of 3C 390.3. I. Further evidence of a nuclear accretion disk*, *A&A*, 376, 775, (2001).

Simpson, G. G., *The Nonprevalence of Humanoids*, *Science* 143, 769, (1964).

Struve, O., *Life on other worlds*, *Sky & Telesc.* 14, 137, (1955).

Susskind, L., *The world as a hologram*, *J. Math. Phys. (NY)* 36, 6377, (1995).

Ward, P. D., Brownlee, D., *The life and death of planet Earth*. New York: Owl Books, (2004).