



**I** NTERNACIA  
**K** ONGRESA  
**U** NIVERSITATO

64-a SESIO

Kopenhago, Danio

23 – 30 julio 2011

Amri Wandel (red.)



Universala Esperanto-Asocio





# SETI post 50 jaroj – astrobiologio kaj la serĉado de ekstertera inteligenteco



**Amri Wandel**

Israelano (1954), profesoro de astrofiziko en la Univ. de Jerusalemo kaj gastprofesoro en la Univ. de Los-Anĝeleso. Kreinto de populara kurso pri astrofiziko, astrobiologio kaj vivo ekstertera, kadre de kiu li instruis ekde 1998 pli ol du mil studentojn en ambaŭ universitatoj. Membro de la scienca komitato de la astrobiologia asocio de Israelo (<http://www.ilasol.org.il/contact>). Verkinto de pluraj sciencaj kaj popularaj artikoloj pri SETI kaj astrobiologio kaj ofta preleganto kaj intervjuato pri tiuj temoj.

## Resumo

En la jaro 1960 juna radio-astronomo, Frank Drake [Drejk], ekprovis malkovri inteligentajn radio-signalojn el aliaj steloj per nova potenca aparato: radio-teleskopo. Lia plurmonata observo-kampanjo, nomita projekto Ozma, malfermis novan branĉon de esplorado: Serĉado de Ekster-Tera Inteligenteco (SETI). Sekve okazis centoj da similaj sed multe pli grandskalaj kaj potencaj projektoj, sed ĝis nun senrezulte. En la sepdekaj gravan rolon en SETI ludis sovetiaj astronomoj, en la okdekaj kaj komence de la naŭdekaj – NASA. Naskiĝis nova scienca branĉo, astrobiologio, kiu esploras la eblojn por evoluo de vivo ekster la Tero (<http://astrobiology.nasa.gov>). Grandan impeton kaŭzis la malkovro de ekster-sunsistemaj planedoj, da kiuj oni nuntempe konas jam pli ol kvincent. Pluraj el la lastatempe malkovritaj sunsistemoj havas planedojn similajn al la Tero, kun potencialo de vivo.

La unua prelego trarigardos la 50-jaran historion de SETI kaj prezentos la metodojn kaj aparatojn uzatajn de la sciencistoj por malkovri eksterterajn vivon kaj civilizaciojn. La dua AIS-prelego enfokusigos astrobiologion kaj serĉadon de eksterteraj planedoj, kaj la tria traktos la ŝancojn trovi eksterteran vivon kaj la novajn potencajn radio-teleskop-arojn kiuj, laŭ la SETI-sciencistoj, multe plibonigos la ŝancojn trovi signalojn de eksterteraj civilizacioj.

## SETI after 50 years – astrobiology and the search for extraterrestrial intelligence

### Summary

In 1960 a young radio astronomer, Frank Drake, started trying to discover intelligent radio signals from other stars by means of a new and powerful piece of equipment: a radio telescope. His campaign of observations lasting several months, called Project Ozma, opened a new branch of research: the Search for Extra-Terrestrial Intelligence (SETI). Later there were hundreds of similar, but larger-scale and more powerful projects, yet so far without a result. In the 70s an important role in SETI was played by Soviet astronomers; in the 80s and the early 90s, by NASA. A scientific branch was born, astrobiology, which investigates

the possibilities for life to evolve outside the Earth (<http://astrobiology.nasa.gov>). A large impetus was given by the discovery of extrasolar planets, of which more than 500 are now known. Several of the recently discovered planetary systems have planets similar to the Earth, with the potential for life.

The first lectures will give an overview of the 50-year history of SETI and present the methods and equipment used by scientists to discover extraterrestrial life and civilisations. The second AIS lecture will focus on astrobiology and the search for extrasolar planets, and the third will look at the chances of finding extraterrestrial life and the new powerful arrays of radio telescopes which, according to SETI scientists, will greatly improve the chances of finding signals from extraterrestrial civilisations.

## **Le projet SETI a 50 ans – astrobiologie et recherche d'intelligence extraterrestre**

### **Résumé**

En 1960, un jeune radioastronome, Frank Drake, entreprit d'essayer de découvrir des signaux radio intelligents venus d'autres étoiles à l'aide d'un nouvel appareil de grande puissance : le radiotélescope. Sa campagne d'observation de plusieurs mois, appelée projet Ozma, ouvrait une nouvelle branche de recherche scientifique : la Recherche d'Intelligence Extraterrestre (SETI). S'ensuivirent des centaines de projets similaires, beaucoup plus puissants et à plus grande échelle, mais jusqu'à présent sans résultat. Dans les années 70, les astronomes soviétiques jouèrent un rôle important dans le projet SETI, puis dans les années 80 et au début des années 90, ce fut la NASA. Naquit alors une nouvelle branche scientifique, l'astrobiologie, qui explore les possibilités d'évolution d'une vie en dehors de la Terre (<http://astrobiology.nasa.gov>). Un grand élan fut donné par la découverte de planètes extrasolaires – on en connaît aujourd'hui déjà plus de 500. Plusieurs des systèmes solaires récemment découverts possèdent des planètes semblables à la Terre, avec un potentiel de vie.

La première conférence parcourra les 50 ans d'histoire de SETI et présentera les méthodes et les appareils utilisés par les scientifiques pour découvrir une vie et des civilisations extraterrestres. La deuxième conférence d'AIS sera centrée sur l'astrobiologie et la recherche d'exoplanètes, et la troisième traitera des chances de trouver une vie extraterrestre, ainsi que des nouvelles batteries de radiotélescopes de forte puissance qui, selon les scientifiques de SETI, amélioreront considérablement les chances de détecter des signaux émis par des civilisations extraterrestres.

## **50 år med SETI – astrobiologi kaj søgning efter intelligens uden for jorden**

### **Kort udtog**

I 1960 satte den unge radioastronom Frank Drake sig for at opdage intelligente radiosignaler fra andre stjerner gennem et nyt magtfuldt apparat: radioteleskopet. Hans observationsprojekt, kaldet Projekt Ozma, varede nogle måneder og grundlagde en ny forskningsgren: søgning efter intelligens uden for jorden (SETI). Der er siden blevet foretaget hundredvis af lignende men meget større anlagte projekter, men indtil nu uden resultat. I halvfjerdsere spillede

sovjetiske astronomer en vigtig rolle i SETI, i firserne og halvfemserne er det gledet over på NASA. Der fødtes en ny videnskabsgren, astrobiologi, der undersøger mulighederne for udvikling af liv uden for jorden (<http://astrobiology.nasa.gov>). Der kom fart i foretagendet da man opdagede planeter uden for solsystemet, og dem kender man nu mere end fem hundrede af. Flere af de solsystemer man har opdaget i den seneste tid, har planeter der ligner jorden, med potentiale for liv.

Den første forelæsning gennemgår SETI's 50-årige historie og viser de metoder og apparater som videnskabsfolk bruger for at efterspore liv og civilisationer uden for jorden. Den anden AIS-forelæsning vil fokusere på astrobiologi og søgningen efter planeter uden for vores solsystem, og den tredje vil omhandle chancerne for at finde liv uden for jorden og de nye kraftfulde radioteleskop-netværk, som ifølge SETI-forskerne stærkt vil forbedre chancerne for at opdage signaler fra udenjordiske civilisationer.

## **SETI post 50 jaroj – astrobiologio kaj la serĉado de ekstertera inteligenteco**

### **Enkonduko**

La eventuala ekzisto de vivo ekster la tero ĉiam fascinis la homaron. Ne temas pri la demando, ĉu nin vizitas estaĵoj eksterteraj aŭ NIFOj (Ne Identigitaj Flugantaj Objektoj), sed pri scienca esploro, kiaj estas la kondiĉoj por vivo en la kosmo, kiom da civilizacioj ekzistas, kaj, kiel oni povas komuniki kun ili. Ni esploros la eblojn por vivo en “sun-sistemoj” de aliaj steloj kaj vidos, kiaj estas la kondiĉoj bezonataj por la evoluo de vivo simila al la vivo sur la Tero, kaj lernos pri la lastatempa serĉado kaj trovo de planedoj ĉirkaŭ aliaj steloj, kiu pligrandigas la ŝancojn por trovi vivon eksterteran. La projektoj de SETI (anglalingva akronimo por “Serĉado de Ekster-Tera Inteligenteco”) provas science esplori, kiel komuniki kun eksterteraj civilizacioj. Ni trarigardos la eblecojn kaj metodojn de interstela komunikado kaj provos kompreni la metodojn de SETI kaj METI (branĉo de SETI kiu temas pri Mesaĝado al Ekstertera Inteligenteco): kiel malkovri eksterterajn civilizaciojn, kaj kiel komuniki kun ili?

### **SETI: serĉado de ekstertera inteligenteco**

Se ni iam trovos signojn de eksterteraj inteligentaj estaĵoj, kiel eblos kontakti kaj komuniki kun ili? Tio povas esti tre malfacila tasko, ĉar supozeble tiuj estaĵoj estas tre diferencaj de ni kaj troviĝas tre malproksime de ni. Sciencfikciaj interstelaj ekspedicioj estas celitaj al la steloj. Pli praktika maniero de interstela komunikado estas elsendo de radio-ondoj.

Se ni trovus eksterterajn civilizaciojn kaj kontaktus kun ili, nia civilizacio povus multe progresi, ĉar la homa historio pravas, ke kulturaj interŝanĝoj ofte pliriĉigis kaj fekundigis la kontaktantajn kulturojn (kvankam ili foje detruis), kaj eksterteraj civilizacioj povas esti multe pli neprogresantaj ol la nia. Tial ekstertera kontakto povas esti la plej signifa atingo de la homaro. Kiel do ni povas trovi tiujn eventuale ekzistantajn, eksterterajn kulturojn, kaj se jam trovitaj, kiel komuniki kun ili? Kiel komprenigi niajn mesaĝojn al aliaj civilizacioj, kaj kiel deĉifri eventualajn mesaĝojn de ili? Por respondi tiujn demandojn oni iniciatis antaŭ 50 jaroj la projekton SETI: Serĉado de Ekster-Tera Inteligenteco.

### **Kiel komuniki kun eksterteraj civilizacioj?**

La sciencfikcia metodo por serĉi eksterterajn civilizaciojn povus aspekti kiel la fama televida serio “Star Trek” (stel-vojaĝo): “kuraĝe iri, kien neniu iris antaŭe, por serĉi novan vivon kaj novajn civilizaciojn”. Per la nuna teknologio ĝi tamen ne estas realisma, ĉar eĉ vojaĝo al la plej proksimaj steloj daŭrus milojn da jaroj, kaj la kosto de tia vojaĝo estus giganta. Aldone, eĉ laŭ optimismaj taksoj, steloj kun civilizacioj estas raraj, do plej verŝajne vojaĝo al iu ajn stelo arbitre elektita estus vana. Ni devas pensi pri pli efika metodo por serĉi inteligentan vivon. (Pro la samaj argumentoj, cetere, estas malverŝajne, ke iuj eksterteraj civilizacioj provus efektive atingi nin per spacvojaĝado, kaj sekve seriozaj sciencistoj ne kredas, ke la NIFOj – ne identigitaj flugantaj objektoj – estas ligitaj al eksterteraj vizitoj).

## **Pli efika metodo: radiosignalo**

Elektro-magnetaj ondoj (ekzemple radio) estas la plej rapida mesaĝanto: ili moviĝas kun la rapideco de la lumo. Malsame ol spacvojaĝoj, ricevi kaj sendi radio-mesaĝojn ne postulas multajn rimedojn – nur taŭgajn sendilojn kaj antenojn. Supozeble teknike progresanta civilizacio produktas radi-ondojn, kiel la homaro faradas ekde la dudeka jarcento. Efektive la Teraj radio-elsendoj povas esti ricevataj de aŭskultantoj (se ili ekzistas) sur aliaj planedoj for en la spaco. Ĉar la unuaj radi-ondoj estis elsenditaj nur antaŭ malpli ol cent jaroj, ili progresis al distanco de malpli ol cent lumjaroj de la Tero, kaj sekve nia civilizacio estas ĝis nun malkovrebla de eksterteraj potencialaj aŭskultantoj je distanco de malpli ol cent lumjaroj de la Tero (la distanco, je kiu niaj unuaj radio-elsendoj ĝis nun disvastiĝis en la kosmon).

Supozeble, pli progresintaj civilizacioj ol la nia ekzistadas dum multe pli longa tempo ol ni kaj havas pli fortan kapablon elsendi radi-ondojn. Tiujn eventualajn elsendojn ni povas serĉi en tre ŝparema maniero – ni ne devas sendi multekostajn spacŝipojn, kiuj atingos la celon nur post miloj da jaroj – ni povas aŭskulti jam nun, kaj ni povas aŭskulti en ĉiuj direktoj. Por ricevi radio-elsendojn de la kosmo, oni bezonas tre sensitivajn ricevilojn. Tiaj riceviloj estis konstruitaj en la lastaj kvindek jaroj por studi la (nature) kosmon – radio-teleskopoj. Ili aspektas kiel grandegaj teleroj, kun diametro de dekoj da metroj, kiuj enfokusigas la radi-ondojn. La plej granda radio-teleskopo en la mondo havas diametron de 300 metroj, kaj situas en Arecibo [Aresibo], en Porto-Riko. Oni uzis la radio-teleskopojn por spuri artefaritajn elsendojn de aliaj civilizacioj.

En la jaro 1960 juna astronomo nomata Frank Drake [Drejk] uzis la radio-teleskopon de la observatorio Green Bank, en la okcidenta Virginio (Usono), kun 25-metra telero por la unua SETI-projekto “Ozma”. De tiam estis faritaj dekoj da serĉo-kampanjoj, por spuri signojn de ekstertera civilizacio, sed ĝis nun estis trovita neniu signalo, kiu povas esti interpretata kiel nenatura, inteligenta elsendo.

## **Naturaj aŭ artefaritaj signaloj?**

Serĉante signalojn de la kosmo, ni unue devas zorge certigi, ke la radio-signaloj, kiujn ni ricevas, ne venas el surteraj fontoj, kiuj ja abundas: regulaj radiofoniaj kaj televidaj elsendoj, radaro, navigiloj kaj komunikiloj de civilaj kaj armeaj aviadiloj kaj satelitoj ktp. Eĉ se la ricevita signalo venas el ekstertera fonto, ĝi povas esti natura fenomeno, kaj ne komunikado de alia civilizacio. De la kosmo alvenas multaj radio-ondoj el naturaj fontoj: nia Suno, aliaj steloj, interstela gaso kaj galaksioj.

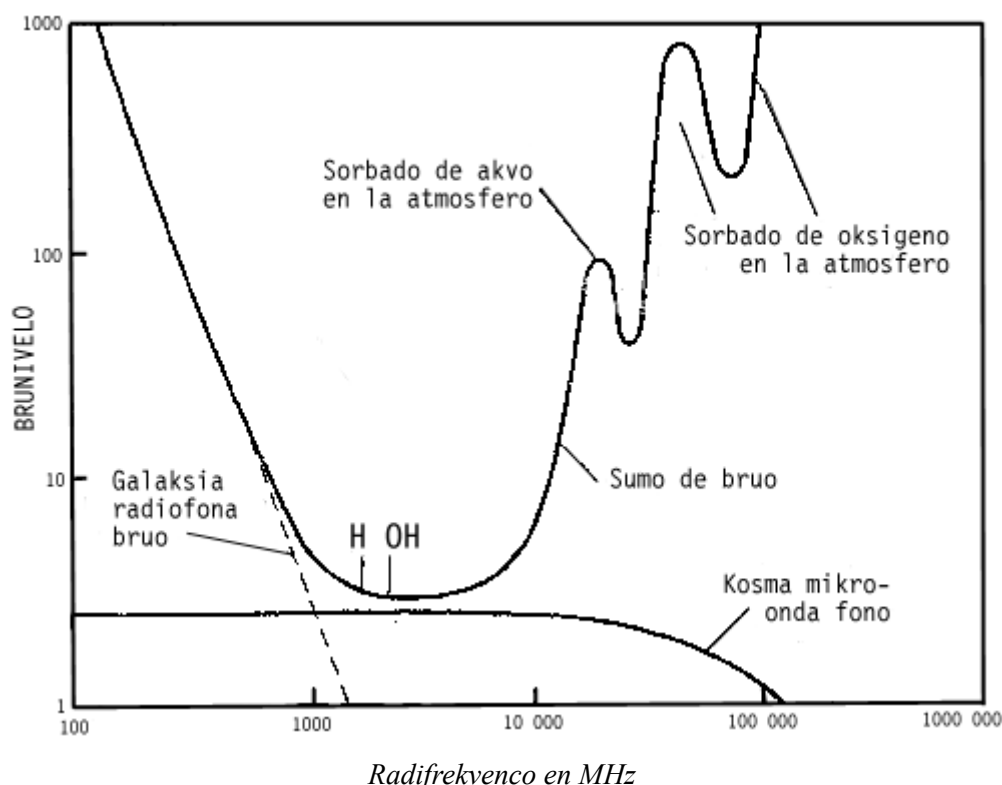
Kiel distingi inter radi-ondoj de natura fonto kaj inteligentaj signaloj? Supozeble la signaloj, kiuj venas de iu civilizacio, havas certan strukturon kaj estas iusence regulaj, kontraŭe al la arbitra bruo, kiu venas de naturaj fontoj.

## **Frekvenco**

Same kiel hejma radio-ricevilo, ankaŭ radio-teleskopoj povas ricevi ondojn en plej diversaj frekvencoj aŭ ondolongoj. Kiun frekvencon uzi por serĉi signalojn de alia civilizacio? Ekzistas preskaŭ senfina nombro da ebloj! Baza kondiĉo estas, ke la natura radio-bruo estu kiel eble plej malalta, kaj ke nia atmosfero estu trairebla por ondoj kun tiu ondolongo. Tiuj kondiĉoj limigas nin al ondolongoj de 3-100 cm (frekvencoj de 1-10 GHz).

Ankaŭ ene de tiu regiono ekzistas multegaj ebloj, kaj estas malverŝajne, ke inteligenta civilizacio malŝparos sian energion elsendante en ĉiuj frekvencoj! Tamen, ekzistas frekvencoj, kiuj estas kvazaŭ universale signitaj: la frekvencoj ligitaj al atomaj energi-ŝtupoj de kosme

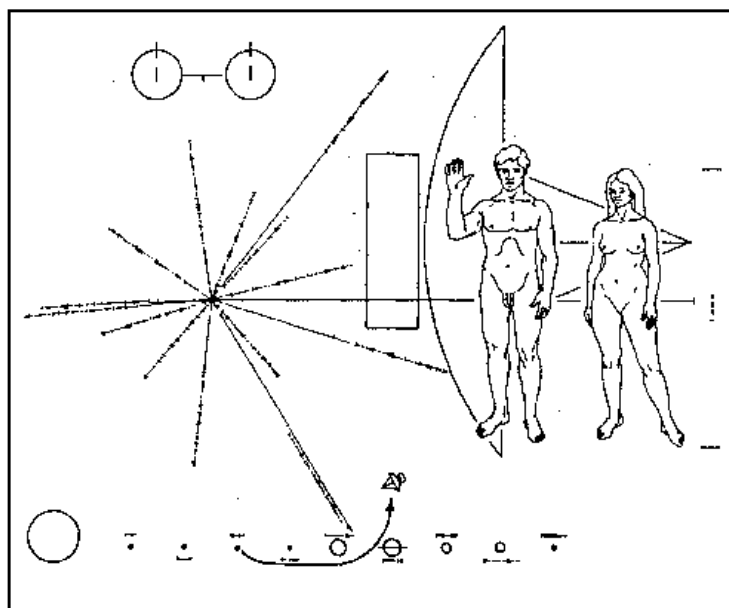
abundaj elementoj. La plej elstara el tiuj estas la baza frekvenco de la hidrogena atomo – la plej abunda materialo en la kosmo. Tiu frekvenco estas 1420 MHz (kiu respondas al la ondolongo de 21 centimetroj). La ondolongo-regiono ĉirkaŭ 21 cm (kiu en la profesia ĵargono nomiĝas “la akvo-truo”) havas la kroman avantaĝon, ke en ĝi la interstela spaco estas travidebla kaj tre kvieta, do oni povas sendi kaj ricevi trans grandaj distancoj kun minimuma interveno de natura radio-bruo. Supozeble ankaŭ la eksterteranoj konas tiujn sciencajn faktojn kaj uzas la samajn argumentojn por elekti tiun ondolongon por interstela komunikado.



## METI: Komunikado kun eksterteraj civilizacioj

Kiel aliaj civilizacioj povus ekscii pri nia ekzisto, kaj ĉu eblas interstela komunikado kun ili? Niajn surterajn radio-elsendojn oni ne povas ricevi tre for de la Sunsistemo, eĉ per la plej potenca ricevilo, ĉar ili estas malfortaj kaj ĉar ili ne estas direktitaj, disvastiĝas en ĉiuj direktoj, kaj post relative malgranda distanco (dekoj da lumjaroj) fariĝas tro malfortaj. Por venki tiun obstaklon, eblas utiligi la radio-teleskopojn “inverse”, por elsendi fokusitajn radio-signalojn en difinita direkto. Tio ricevis la nomon METI (Mesaĝado al Ekster-Tera Inteligenteco). Tia direktita kaj enfokusigita signalo estas multe pli forta ol la ĉiudirekta dissendado (sed kompreneble videblas nur de steloj en tiu difinita direkto). Per la nunaj plej fortaj radio-teleskopoj oni povas sendi kaj ricevi signalojn je distanco de miloj da lumjaroj (supozante, ke ĉe la “alia” flanko ekzistas simila radio-teleskopo por ricevi). Se la elsendo estus direktita al stelo kun civilizacio, teorie eblus komuniki kun ĝi. Kompreneble, pro la grandaj distancoj kaj la limigita rapideco de la radio-ondoj, ĝi estus tre malrapida: ekzemple, se la alia civilizacio troviĝus je distanco de 500 lumjaroj, la tempodaŭro inter sendo de mesaĝo ĝis la ricevo de respondo estus minimume mil jaroj (se oni respondus tuj post ricevo de la mesaĝo).



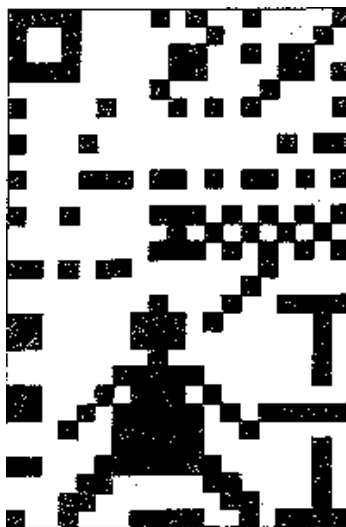


*La mesaĝoplato sur Pioneer 10 kaj 11*

### **La lingva problemo**

Pli profunda obstaklo por inter-stela, inter-civilizacia komunikado estas, kiun lingvon uzi? Kiel ili komprenus niajn signalojn, kaj kiel ni povus deĉifri la iliajn?

Ni ne povas supozi, ke la eksterteraj aŭskultantoj komprenu niajn lingvojn. Necesas do uzi universalajn simbolojn – ekzemple tiujn de matematiko. En 1820 la matematikisto Karl Gauss proponis tranĉi la arbojn de la siberia arbaro en la formo de giganta triangulo, kiu demonstras la geometrian teoremon de Pitagoro. Ĝi signus al eksterteruloj sur la Luno aŭ aliaj planedoj, ke sur la Tero vivas inteligentaj estaĵoj. Cent kvindek du jarojn poste, sur la esplorsatelitoj Pioneer 10 kaj Pioneer 11 senditaj en la spacon for de la sunsistemo oni metis ŝildetojn kun mesaĝo por la eksterteruloj, kiuj eventuale trovas ilin. La mesaĝo konsistis el desegnoj de viro kaj virino, de la Suno kaj la naŭ planedoj, kaj de “mapo”, kiu klarigas la situon de la Suno relative al la steloj.



*Grafika mesaĝo per unuoj kaj nuloj*

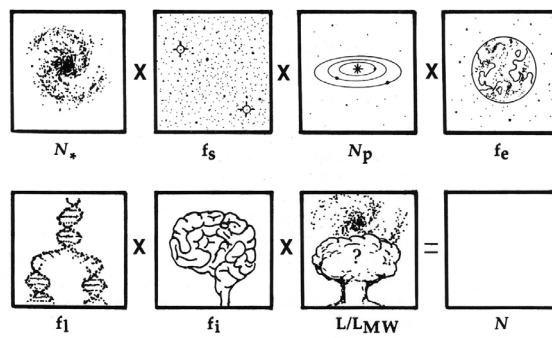
Tamen, la ŝanco, ke eksterteranoj efektive trovos tiujn satelitojn, estas praktike nulo. Kiel argumentite supre, multe pli promesa kontaktomaniero estas radio-komunikado. Sed kiel transsendi mesaĝon per radio-ondoj? Kompreneble simple parolo aŭ sonoj havas la saman problemon ke nia lingvo estas ne komprenebla por “ili”. Pli logika elekto estas grafika reprezentado kiel sur la ŝildo de “Pioneer”. Sed kiel sendi grafikajojn per radio? Eblas adopti la principon de televida elsendo: dividi la “bildon” al linioj kaj kolumnoj, kaj la bildon reprezenti per la binara metodo: serio de nuloj kaj unuj, por blankaj kaj nigraj kvadratetoj. En la jaro 1974 Frank Drake kaj alia fama astronomo Carl Sagan uzis la renovigitan radio-teleskopon de Arecibo por sendi mesaĝon en la direkto de la granda stel-grapolo M-13, kiu estas densa globforma amasiĝo de 300 000 steloj, 25 000 lumjarojn for de la Tero. La mesaĝo konsistis el serio de 1679 nuloj kaj unuj dividitaj en 73 liniojn, ĉiu de 23 karakteroj 1 aŭ 0 (ĉar ambaŭ tiuj nombroj estas primaj, tiu ĉi estas la sola maniero dividi la erojn de la elsendita sinsekvo, kaj tial la ricevintoj povos facile trovi la linian dividon). La bildo enhavis krudajn skemojn de informoj pri ni: diagramo de la sunsistemo, nia aspekto kaj la homa biologio (bazaj molekuloj kaj la DNA-strukturo). La tuta elsendo daŭris tri minutojn, sed respondon oni ne atendu pli frue ol post 50 000 jaroj... kaj eble neniam. En la jaroj 1999-2003 oni sendis el radio-teleskopo en Ukrainio similajn (sed pli longajn) radio-mesaĝojn, direktitajn al pli proksimaj steloj, je distancoj de kelkdekoj da lumjaroj. Eventualajn respondojn al tiuj mesaĝoj oni povus atendi jam en la 22a jarcento, kompreneble nur se ĉe la celitaj steloj efektive ekzistas civilizacio.

## Dua parto:

### Ekstersunaj planedoj kaj la verŝajneco de komunikado

#### La ekvacio de Drake: kiom da civilizacioj ekzistas?

Por respondi tiun demandon la usona astronomo Frank Drake [Drejk] elpensis la ekvacion, kiu portas lian nomon. Kiel desegnaĵo ĝi estas prezentita en la bildo. En ĝi, la nombro de kontakteblaj civilizacioj en la Galaksio ( $N$ ) egalas al la tuta nombro de la steloj en la Galaksio ( $N^*$ ), multobligita per la procentaĵo de steloj similaj al la Suno  $f_s$ , per la nombro de la planedoj  $N_p$ , per la procentaĵo de planedoj similaj al la Tero  $f_e$ , per la probablecoj de evoluo de vivo  $f_l$  kaj de inteligenteco  $f_i$ , kaj per la tempodaŭro de tipa civilizacio,  $L$ .



La plena Drake-ekvacio estas simila al la desegnita versio, kun malgrandaj ŝanĝoj: la nombro de kontakteblaj civilizacioj en la Galaksio ( $N$ ) egalas al la naskiĝ-ritmo de steloj ( $R$  = la nombro de steloj kiuj naskiĝas en la Galaksio en unu jaro), multobligita per kelkaj

faktoroj ( $f$ ) kiuj mezuras la probablecon de efektiva evoluo de inteligenta vivo, kaj per la tempodaŭro de tipa civilizacio ( $L$ , mezurita en jaroj).

$$N = R f_p n f_v f_i f_k L$$

La faktoroj  $f$  k.a. en la ekvacio havas la jenajn signifojn:

- $f_p$  – estas la frakcio de ĉiuj steloj, kiuj havas planedojn,
- $n$  – estas la averaĝa nombro de planedoj kun favoraj vivkondiĉoj,
- $f_v$  – estas la frakcio de tiuj planedoj, sur kiuj vivo efektive evoluas (favoraj vivo-kondiĉoj ne garantias evoluon de vivo, kiel ekzemple sur la planedo Marso),
- $f_i$  – estas la frakcio de planedaj vivo-sistemoj, kiuj plu evoluas kaj produktas inteligentajn civilizaciojn,
- $f_k$  – estas la frakcio de civilizacioj kiuj kapablas iniciati interstelan komunikadon.

El la faktoroj en la Drake ekvacio, nur unu estas relative bone konata:  $R$ , la nasko-kvanto de steloj en nia Galaksio, kiu estas pli-malpli 10 steloj ĉiujare. Pro la lastatempaj malkovroj de planedoj ni povas supozi, ke planedoj estas sufiĉe ofta fenomeno, do  $f_p = 0,1-1$ , kaj se stelo kun planedoj havas 1-3 planedojn en la vivo-taŭga regiono, averaĝe  $n = 2$ .

La valoroj de la ceteraj faktoroj en la ekvacio ne estas konataj, kaj ni povas nur diveni ilin. Kiel ekzemplo ni konsideras du taksojn: “optimisman” kaj “pesimisman”. En la optimisma takso, ĉiu el la faktoroj en la ekvacio havas altan valoron:  $f_p = 1$  (oni supozas, ke ĉiu stelo havas planedojn),  $f_v = 1$  (en ĉiu planedo taŭga por vivo, vivo efektive evoluas),  $f_i = 1$  (ĉiu vivo naskas inteligentan civilizacion) kaj  $f_k = 1$  (ĉiu civilizacio atingas kapablon de interstela komunikado kaj volas komuniki).

La plej malcerta faktoro estas  $L$  – la daŭro de la vivo de civilizacio – antaŭ ol ili pereas, ĉu pro eksteraj kialoj kiel klimatoŝanĝoj, ĉu pro interna degenero aŭ nukleaj militoj ktp. Optimisme ni supozu, ke  $L$  egalas centmil jarojn. Tiam la nombro da civilizacioj kontakteblaj en nia Galaksio estas  $N = 10 \times 1 \times 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 100\,000 = 2\,000\,000$ . En la pesimisma takso, ni supozu, ke  $f_p = 0,1$  (nur unu el dek steloj havas planedojn),  $f_v = 0,1$  kaj  $f_i = 0,01$  (nur sur dek procentoj el la vivo-taŭgaj planedoj efektive evoluas vivo, kaj el tiuj nur unu procento fariĝas inteligenta civilizacio – la ceteraj restas mondoj de animaloj kaj plantoj), kaj  $f_k = 0,5$  (nur unu el du civilizacioj atingas la nivelon de interstela kontaktado kaj deziras komuniki). Por la pesimisma takso pri la vivo-daŭro de tipa civilizacio ni supozu, ke  $L = 1000$  jaroj. En tiu pesimisma takso la ekvacio donas  $N = 10 \times 0,1 \times 2 \times 0,1 \times 0,01 \times 0,5 \times 1000 = 1$  – nur unu civilizacio en la tuta Galaksio: eble ni ja estas solaj...

## Sunsistemoj kaj planedoj ĉirkaŭ foraj steloj

En la lasta jardeko la astronomio sukcesis solvi la demandon ĉu ekzistas inter la steloj aliaj planedoj taŭgaj por evoluo de vivo simile al la Tero? Tio estas la faktoro  $f_p$  en la Drake-ekvacio, kiu taksas ĉu civilizacioj kaj vivantaj estaĵoj estas oftaj, aŭ nia planedo Tero estas la sola kie evoluis la unika fenomeno de vivo kaj civilizacio. Kvankam la respondon al tiu demando ni ankoraŭ ne konas, oni povas taksi la verŝajnecon por la ekzisto de viv-kondiĉoj aliloke, ekster la Tero. El la planedoj de nia sun-sistemo nur la Tero estas taŭga por vivo: malgraŭ pluraj esploroj ni ne trovis signojn de vivo, eĉ ne primitiva, sur aliaj planedoj ene de nia sunsistemo. Por respondi la demandon ĉu la Tero kaj ni estas unika fenomeno aŭ ne, ni

devas do esplori planedojn apud aliaj steloj, en aliaj sunsistemoj. Tiajn planedojn, ekster nia sunsistemo ni nomas mallonge “ekstersunaj planedoj” (angle: Exoplanets).

Ni devas do serĉi vivon ekster nia sun-sistemo. Tio estas malfacila tasko, pro la grandaj distancoj ĝis aliaj steloj: eĉ la plej najbaraj steloj troviĝas je grandega distanco de ni: cent mil oble la distanco inter la Tero kaj la Suno. La nombro de la steloj estas tre granda: en nia Galaksio troviĝas pli ol cent miliardoj da steloj. Oni povas provi taksu la verŝajnecon por evoluo de vivo apud iu ajn stelo, aŭ alivorte, la nombro de steloj kun vivo. Kiel ni vidis, tiu takso dependas de diversaj faktoroj. Unu el la plej esencaj el tiuj, kaj ĝis antaŭ nelonge ne konata faktoro estas la ekzisto de planedoj ĉirkaŭ aliaj steloj (kiuj mem estas sunoj pli-malpli kia nia Suno).

Eĉ se malgranda parto el ili havus planedojn, estus bona ŝanco trovi planedojn kun taŭgaj kondiĉoj por vivo. Ĉu aliaj sunsistemoj kun planedoj similaj al la nia estas ofta fenomeno aŭ tre malofta? Tiu demando estas grava ĉar la sola medio en kiu kredeble povas evolui vivo, estas sur planedoj: la steloj mem estas kiel dirite sunoj, tro varmaj, kaj la interstela spaco estas tro malvarma. Laŭ nia tereca sperto, evoluo de vivo bezonas medion kun likva akvo kaj atmosfero, stabila dum miliardoj da jaroj. Tia medio povas ekzisti nur sur planedo ĉirkaŭiranta stelon similan al nia suno, ne tro for sed ankaŭ ne tro proksima al sia suno.

Ĝis la lastaj jaroj ni ne sciis ĉu multaj steloj havas planedojn kiel en nia sun-sistemo, aŭ planedoj estas malofta fenomeno. Estas tre malfacile observi planedojn ĉirkaŭ aliaj steloj, ĉar la aliaj steloj estas treege malproksimaj de ni, kaj planedoj ne havas propran lumon: ili nur reflektas la lumon de sia suno. Observi planedon eĉ apud proksima stelo similas al provo vidi moneron apud lumturo el distanco de mil kilomeraj. Nur lastatempe la astronomoj sukcesis trovi spurojn de planedoj ĉirkaŭ aliaj steloj: la problemo ne estas nur la granda distanco sed la apudeco de tre forta lumo (la lumturo, nome, la stelo) kiu forkaŝas la propran tre malfortan brilon de la monero (la planedo). Malgraŭ la potenco de la modernaj teleskopoj, rekte observi planedojn ĉirkaŭirantajn aliajn stelojn estas do treege malfacila tasko, ankoraŭ ne ebla per la nunaj rimedoj.

## **Kiel malkovri ekstersunajn planedojn?**

Astronomoj elpensis sep metodojn por malkovri planedojn ĉirkaŭ aliaj steloj.

1. La plej fantazia, sed alloga – se ĝi sukcesas – estas serĉi la radio-elsendojn de civilizacioj kiuj supozeble evoluis sur kelkaj el tiuj planedoj kun taŭgaj kondiĉoj. La problemo kun tiu metodo estas ke ĝi povas malkovri nur planedojn sur kiuj efektive evoluis teknologia civilizacio, kiuj eble estas tre maloftaj, kaj efektive neniu tia signalo estis jam trovita.
2. Alia metodo estas rekta observado de la planedoj, sed kiel supre dirite tiu metodo ne povas sukcesi per la nuna teknologio, ĉar tipa stelo estas milionoble pli brila ol la apuda planedo.
3. Tria metodo aplikeblas nur al tre specialaj kazoj – por planedoj ĉirkaŭ pulsaroj, raraj objektoj kiuj emisias tre regulajn radio-pulsojn.
4. Kvara metodo baziĝas sur efiko nomata gravita lensado – la kurbigo de lumradioj pro la gravita forto de peza objekto, stelo aŭ planedo. Se tia objekto pasas inter ni kaj tre fora lumfonto, gravita lensado povas amplifi la brilecon de tiu fonto dum mallonga tempo, kiam ĝi estas precize en la ĝusta pozicio. En la lastaj jaroj oni trovis plurajn tiajn amplifo-eventojn pro planedeca objekto.
5. Kvina metodo nomiĝas tranzito. Tranzito signifas ke planedo pasas ĝuste inter ni kaj la suno kaj kaŝas malgrandan parton de la suna lumo. En nia sunsistemo tio okazas

kun la planedoj Venuso kaj Merkuro. Por aliaj steloj tiu fenomeno estas multe malpli facile observebla kaj estas aplikebla nur al malmultaj kazoj, kiam la orbito de la planedo estas precize en la sama ebenaĵo kiel nia vid-linio al tiu stelo. Du satelitaj teleskopoj jam funkciis per tiu metodo dum la lasta jaro: la eŭropa-franca “Korot”, kaj la Usona “Kepler”, kiu malkovris pli ol mil planedojn.

6. La sesa metodo utiligas la ŝanĝetojn kiujn planedo kaŭzas en la pozicio de la stelo kiun ĝi ĉirkaŭiras. Ĉiuj steloj moviĝas en pli-malpli cirkla orbito ĉirkaŭ la centro de la Galaksio, sed aldone ili havas propran movadon, rilate al la Suno. Pro la gravita influo de ĉirkaŭiranta planedo tiu movado ne estas en glata linio sed kun ondetoj, kun la periodo de la planeda orbito ĉirkaŭ la stelo (pli detale tio estas klarigita en la venonta alineo).
7. La sepa metodo estas simila al la sesa, sed uzas la ŝanĝojn en la rapideco de la stelo kaŭzitajn de la gravito de la ĉirkaŭiranta planedo. Efektive montriĝis ke la plej sukcesa metodo ĝis nun estas la sepa, kiun ni priskribos pli detale ĉi-sube.

### **Malkovro de eksternaj planedoj per la Dopler-metodo**

En la lasta jardeko astronomoj sukcesis malkovri centojn da planedoj ĉirkaŭ aliaj steloj. Oni tion faris ne per rekta observado de la planedoj, sed per alia metodo, nerekte: analizo de periodaj ŝanĝoj en la frekvenco de spektraj linioj en la lumo de la ĉefa stelo (suno). Por pli bone kompreni tiun metodon necesas klarigi du fizikajn principojn: komunan rivoluadon kaj la Dopler-efikon.

Ofte steloj aperas en paroj, kiujn la astronomoj nomas “duoblaj steloj” – en tia sistemo la du steloj rivoluas, ĉirkaŭiras unu la alian, aŭ pli precize, rivoluas ĉirkaŭ la komuna centro de maso. Se la du steloj havas la saman mason, ilia centro de maso troviĝas meze inter ambaŭ, en la sama distanco de ĉiu el la du. Se la du masoj ne estas egalaj, la centro de maso estos pli proksima al la stelo kun la pli granda maso, kaj la orbito de la pli peza stelo estos pli malgranda ol tiu de la alia, malpli peza stelo. Kiam planedo rivoluas ĉirkaŭ stelo, okazas la sama fenomeno, sed ĉar planedoj estas multe pli malgrandaj ol steloj, la centro de la maso troviĝas tre proksime al la stelo (suno). Ankaŭ en nia sunsistemo, kiam la Tero rivoluas ĉirkaŭ la suno, efektive la Suno samtempe rivoluas ĉirkaŭ la centro de maso de la paro Suno-Tero, kiu troviĝas tre proksime al la centro de la Suno (ĉar la Suno estas multe pli peza ol la Tero). Sekve la rivoluado de la Suno estas tre malgranda, apenaŭ mezurebla. Simile, planedo de alia stelo kaŭzas etan rivoluadon, do moviĝon, de sia stelo (suno).

La moviĝon de stelo pro rivoluanta planedo oni povas mezuri per la Dopler-efiko: la frekvenco aŭ ondolongo de la lumo el moviĝanta fonto ŝanĝiĝas pro la moviĝo, simile al la ŝanĝiĝo en la alteco de la sono de moviĝanta fonto de sono (ekzemple la sibilado de alproksimiĝanta trajno impresas pli alta, kaj ĝi malaltiĝas kiam la trajno preterpasas nin kaj estas malproksimiĝanta).

Laŭ la leĝoj de gravito la stelo, samkiel la planedo, moviĝas en cirkla aŭ elipsa orbito, en perioda maniero. Sekve ĝi alterne proksimiĝas kaj malproksimiĝas de ni. Tio kaŭzas periodan ŝanĝon de la frekvenco de linioj en la spektro de la stelo. Observante la spektron de steloj oni povas serĉi tiajn periodajn ŝanĝetojn kiuj indikas la ekziston de planedo aŭ planedoj. Mezurante tiujn ŝanĝojn oni povas kalkuli la orbiton kaj mason de la nevidebla planedo (aldonaĵo).