

## Frank Drake, la sua equazione e l'inizio di tutto

### *Il progetto Ozma*

Se volessimo stabilire quando è iniziata l'epoca in cui l'umanità non solo ha iniziato seriamente a contemplare la possibilità che la vita possa esistere in altri luoghi oltre alla Terra, ma ha anche effettivamente cominciato a cercarla, allora individueremmo l'avvio di questo periodo nell'aprile del 1960.

È a partire da quel mese, e per i tre successivi, che il giovane astronomo americano Frank Drake scrutò il cielo con la parabola di 26 m del radiotelescopio di Green Bank, in Virginia, per cercare possibili segnali radio provenienti da civiltà extraterrestri (Drake, 1961). Drake chiamò la sua ricerca "progetto Ozma", dal nome della principessa di Oz nei racconti di L. Frank Baum, l'autore del romanzo *Il meraviglioso mago di Oz*.

Il progetto consisteva nel puntare il radiotelescopio in direzione di Tau Ceti ed Epsilon Eridani, due stelle simili al Sole distanti solo una decina di anni luce (a.l.), per esaminarne le eventuali emissioni radio in una specifica frequenza che in quell'epoca si riteneva potesse costituire una sorta di richiamo universale utilizzato da una qualche civiltà tecnologicamente evoluta.

Anche se Drake non trovò altro che del rumore di fondo (con l'eccezione di un segnale proveniente da un aereo spia che volava a un'altitudine che per l'epoca era notevole, cioè 25 km), il suo esperimento costituì comunque il primo approccio genuinamente scientifico alla ricerca di vita intelligente nel cosmo, che avrebbe poi ispirato nei decenni successivi il programma collettivo di ricerca noto come SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*, cioè "Ricerca di Intelligenza Extraterrestre").

Come vedremo in seguito, questo programma di ricerca si è molto evoluto rispetto all'epoca di Drake, grazie specialmente all'avvento di

tecnologie che permettono di rilevare segnali radio molto più deboli di quelli accessibili ai primi radiotelescopi, e in una maggiore gamma di frequenze. Inoltre, fin dai primi anni dall'avvio del progetto Ozma, la ricerca non si è limitata solo alle onde radio, ma ha esteso la sua attività a molte altre regioni dello spettro elettromagnetico.

Sebbene nel 1960 cercare segnali extraterrestri fosse un'attività ritenuta stravagante, che poteva mettere a rischio la carriera di un giovane astronomo come Drake, c'erano già tutti i presupposti perché questa idea trovasse terreno fertile: nei mesi in cui Drake era impegnato a mettere a punto il suo progetto, la prestigiosa rivista scientifica *Nature* pubblicò un lavoro intitolato *Searching for Interstellar Communications*, cioè "Alla ricerca di Comunicazioni Interstellari". Gli autori del lavoro sono Giuseppe Cocconi e Philip Morrison, due stimati fisici che nell'articolo sviluppavano la proposta di cercare tra le stelle più simili e più vicine al Sole segnali radio, centrati attorno alla stessa frequenza poi osservata da Drake e trasmessi da civiltà tecnologicamente avanzate con l'obiettivo di entrare in contatto con noi (Cocconi e Morrison, 1959).

Nel mese di maggio del 1960, cioè nel bel mezzo del progetto Ozma, vennero inoltre pubblicati due altri studi, uno su *Nature* e l'altro su *Science*, che avrebbero anticipato alcune delle strade di ricerca intraprese dal SETI moderno.

Su *Nature*, Ronald N. Bracewell propose l'idea che civiltà sufficientemente avanzate tecnologicamente avrebbero potuto disperdere nei sistemi planetari vicini al loro pianeta d'origine delle sonde autonome, note ora come "sonde di Bracewell" (*Bracewell probes*), in grado di rilevare la presenza vita intelligente e quindi di inviare messaggi radio per entrarvi in contatto (Bracewell, 1960): invece di cercare segnali provenienti da sistemi planetari lontani anni luce, la proposta di Bracewell era dunque di cercare queste sonde in orbita attorno al nostro Sole.

L'articolo pubblicato su *Science* era di Freeman J. Dyson, un fisico teorico già noto allora per aver contribuito all'architettura della moderna fisica delle particelle. Nel suo breve lavoro, Dyson argomentava che per svilupparsi e prosperare una civiltà tecnologicamente avanzata avrebbe potuto evolvere al punto da sfruttare al massimo l'energia irradiata dalla sua stella costruendovi attorno una mega struttura, nota ora come "sfera di Dyson", per catturarne l'energia luminosa (Dyson, 1960).

L'eccesso di radiazione infrarossa derivata dall'utilizzo di questa energia sarebbe teoricamente rilevabile da telescopi opportunamente calibrati e puntati verso oggetti di dimensioni stellari insolitamente scuri nello spettro visibile. Lo scenario ipotizzato da Dyson sarebbe

poi stato esteso nel 1964 da N. S. Kardashev a tutte le stelle di una galassia, come apice della traiettoria evolutiva di una super-civiltà tecnologica (Kardashev, 1964).

### *L'equazione di Drake*

L'idea che civiltà extraterrestri possano manifestarsi (intenzionalmente o meno) tramite segnali radio o altre radiazioni elettromagnetiche era già nell'aria quando Drake condusse il suo primo esperimento. Forte dell'interesse che la sua ricerca aveva suscitato, e consapevole di aver dimostrato che la tecnologia era già sufficientemente matura per portare avanti una ricerca scientifica di questo tipo, nel novembre del 1961 Drake organizzò un incontro informale tra una dozzina di scienziati e ingegneri affermati, per discutere le prospettive su come trovare un segnale. L'incontro si svolse all'osservatorio di Green Bank, dove l'anno precedente Drake aveva svolto la sua ricerca, e fu il primo evento scientifico SETI della storia.

Nel preparare l'incontro, Drake decise di concentrare la discussione attorno a una semplice formula che aveva ideato per individuare i principali fattori che determinassero il numero di civiltà extraterrestri presenti nella nostra galassia e impegnate a trasmettere segnali. Questa formula, nota come "equazione di Drake", è data dal prodotto di una serie di fattori, ognuno dei quali rappresenta la probabilità che si verifichi un evento cruciale per lo sviluppo di una civiltà tecnologica e comunicativa. Nella sua forma originale, l'equazione di Drake si presenta così:

$$N_D = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L \quad (1.1)$$

dove:

- $N_D$  è il numero medio di civiltà comunicative attualmente presenti nella nostra galassia;
- $R^*$  è il tasso medio annuo con cui si formano nuove stelle nella Via Lattea;
- $f_p$  è la frazione di stelle che possiedono sistemi planetari;
- $n_e$  è il numero medio di pianeti per sistema planetario in grado di ospitare forme di vita;
- $f_l$  è la frazione dei pianeti su cui si è effettivamente sviluppata la vita;
- $f_i$  è la frazione dei pianeti abitabili su cui si sono evoluti esseri intelligenti;

- $f_c$  è la frazione dei pianeti abitabili che ospitano civiltà extraterrestri in grado di comunicare;
- $L$  è la durata media della fase comunicativa di tali civiltà.

Nel 1961 solo il primo termine ( $R^*$ ) era conosciuto con una certa confidenza ed era pari a circa una nuova stella all'anno o poco più, da cui  $R^* \approx (1 - 10) / \text{anno}$ ; gli altri termini erano oggetto di pura speculazione. Oggi, grazie soprattutto ai dati raccolti negli ultimi dieci anni dal telescopio spaziale Kepler, sappiamo che virtualmente ogni stella ospita sistemi planetari ( $f_p \simeq 1$ ) e che circa un sistema planetario su dieci possiede almeno un pianeta suscettibile di avere le condizioni per ospitare la vita, almeno per come la conosciamo ( $n_e \simeq 0,1$ ).

Il prodotto di questi tre fattori (noti anche come “fattori astrofisici”) è stimato dunque essere dell'ordine di  $(0,1 - 1) / \text{anno}$ : vale a dire che ogni dieci anni nella nostra galassia si formano in media tra uno e dieci pianeti abitabili.

Il concetto di “abitabilità” qui evocato si riferisce esclusivamente alle caratteristiche minime, sia fisiche (densità di massa) sia orbitali (distanza dalla sua stella), che un pianeta deve possedere affinché la temperatura alla sua superficie supporti la presenza di acqua allo stato liquido. Non è affatto scontato che un pianeta che soddisfi queste caratteristiche minime possa effettivamente ospitare la vita. Nel Sistema solare, per esempio, dei tre pianeti rocciosi che orbitano all'interno della zona abitabile circumstellare (cioè la regione di spazio attorno al Sole che riceve un flusso adeguato per l'abitabilità) solo la Terra ha le caratteristiche adatte allo sviluppo e alla proliferazione della vita; invece, le traiettorie evolutive di Marte e Venere hanno reso questi pianeti inospitali alla vita e, per quanto ne sappiamo, sterili (anche se non si esclude che siano stati abitabili almeno per un breve periodo in passato).

Anche se oggi abbiamo una buona stima dell'ordine di grandezza dei primi tre fattori dell'equazione di Drake, il nostro livello di conoscenza circa il possibile valore dei successivi tre termini ( $f_l$ ,  $f_i$ , e  $f_c$ ) è rimasto praticamente invariato dal 1961. Anzi, per quanto riguarda  $f_l$  (cioè la frazione dei pianeti su cui si è effettivamente sviluppata la vita), oggi siamo più disposti ad ammettere la nostra ignoranza rispetto a qualche decennio fa. Se negli anni Sessanta del Ventesimo secolo c'era una certa fiducia nel ritenere che  $f_l \simeq 1$  (confortata soprattutto dall'esperimento di Miller e Urey del 1953 sulla formazione in laboratorio di composti organici a partire le molecole semplici e dalla scoperta di amminoacidi all'interno di meteoriti), oggi siamo consapevoli che l'unico dato a nostra disposizione, ovvero l'esistenza della vita sulla Terra, non è sufficiente per dedurre statistiche sulla vita in

altri pianeti. Il valore di  $f_i$  rimarrà perciò indeterminato, almeno fino a quando non avremo l'evidenza dell'esistenza di forme di vita anche solo microscopiche su altri pianeti.

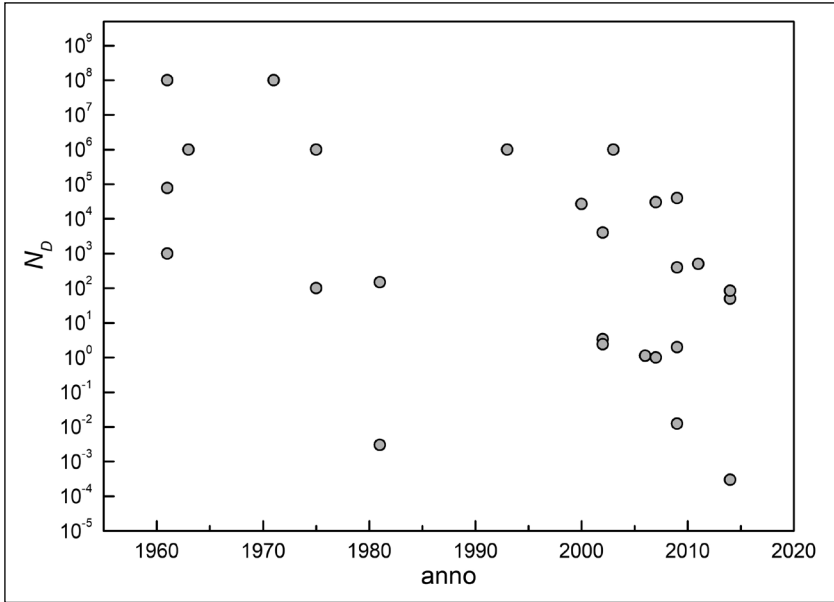
La frazione  $f_i$  di pianeti abitabili su cui si sono evoluti esseri intelligenti e la frazione  $f_c$  di tali pianeti che ospitano specie tecnologicamente avanzate in grado di comunicare soffrono di una certa ambiguità nella loro definizione, che preclude una chiara interpretazione del loro significato. Per esempio, non è chiaro se con il concetto di "intelligenza" evocato in  $f_c$  si intenda la capacità di una specie di divenire potenzialmente tecnologica o debba invece essere interpretato in modo più restrittivo come l'insieme dei processi cognitivi che permettono di interagire con l'ambiente per raggiungere un obiettivo. Da diversi punti di vista, definire "intelligenza" rimane più problematico che definire "vita", perché non esiste una "teoria dell'intelligenza" o persino della funzione cerebrale umana, né tanto meno una teoria generale dell'intelligenza in un contesto cosmico. Inoltre, non è dato sapere a priori se una specie in grado di comunicare con altri pianeti abitati decida di farlo tramite onde radio (come supposto da Cocconi e Morrison, e da Drake stesso) o con altri metodi, come per esempio le sonde di Bracewell sopra citate.

Infine, l'ultimo termine nell'equazione (1.1) rappresenta la quantità che storicamente è stata oggetto di più congetture e speculazioni, rispetto a tutti gli altri fattori dell'equazione di Drake. Esso esprime la longevità  $L$  della fase comunicativa di civiltà extraterrestri in termini della durata media (misurata comunemente in anni), in cui tali civiltà producono segnali che si propagano nello spazio. La gamma di valori di  $L$  che sono stati ipotizzati negli ultimi sessant'anni è molto ampia: si passa da valori dell'ordine di soltanto un centinaio di anni (in analogia con l'età della tecnologia radio terrestre) a valori comparabili al milione di anni o più (come, per esempio, nel caso delle sfere di Dyson citate in precedenza, che potrebbero continuare a emettere radiazioni infrarosse anche molto tempo dopo l'eventuale estinzione delle specie che le hanno costruite).

### *Stime di $N_D$*

È chiaro a questo punto che l'indeterminazione degli ultimi quattro termini dell'equazione di Drake preclude una stima, anche solo qualitativa, del numero medio  $N_D$  di specie tecnologiche in grado di emettere segnali elettromagnetici. Tuttavia, ciò non ha impedito, anzi si potrebbe dire che abbia incoraggiato, una proliferazione di studi congetturali volti a stimarne il valore, per assegnare almeno un ordine di

grandezza a  $N_D$ . Il risultato è efficacemente illustrato nella Figura 1.1, che mostra come i valori di  $N_D$  proposti a partire dal 1961 oscillino tra un desolante  $10^{-4}$  e un iperbolico  $10^8$ , il che rappresenta una variazione di ben 12 ordini di grandezza.



**Figura 1.1** Una selezione delle stime del numero di Drake  $N_D$  in funzione dell'anno di pubblicazione (Sandberg et al., 2018).

Anche se la gamma dei valori di  $N_D$  proposti nell'ultimo decennio è diminuita di qualche ordine di grandezza, la Figura 1.1 ci dà comunque una misura tangibile della nostra ignoranza. Si potrebbe dunque obiettare che sebbene l'equazione di Drake rappresenti un valido tentativo per individuare i fattori chiave per stimare  $N_D$ , in realtà il suo utilizzo pratico non ci fa avanzare di un singolo passo, almeno fino a quando non avremo più dati.

Non tutto però è perduto. Infatti, sia la struttura dell'equazione di Drake sia il fatto che alcuni dei fattori che la compongono sono noti con una certa precisione permettono di stimare, se non l'ordine di grandezza di  $N_D$ , almeno il suo limite superiore, cioè il numero massimo di specie extraterrestri capaci di comunicare che potrebbero esistere nella nostra galassia. Come accennato in precedenza, il prodotto dei tre termini astrofisici dell'equazione (1.1) è dell'ordine di  $(0,1 - 1) / \text{anno}$ , da cui segue che nella Via Lattea il tasso di formazione dei pianeti abitabili non è superiore a 1 all'anno. Inoltre, dato che

ciascuno dei termini  $f_l$ ,  $f_i$ , e  $f_c$  rappresenta una probabilità il cui valore è compreso tra 0 e 1, il loro prodotto può essere al massimo uguale a 1. Il prodotto dei primi sei termini dell'equazione di Drake è dunque  $R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \leq 1/\text{anno}$ , il che implica che  $N_D$  è tale che:

$$N_D \leq L \quad (1.2)$$

dove la longevità  $L$  è misurata in anni.

L'equazione (1.2) stabilisce dunque che il limite superiore del numero di specie tecnologiche nella fase comunicativa è determinato da  $L$ , il che da una parte spiega l'accanimento con il quale si è cercato di stimarne il valore e dall'altra implica che una condizione necessaria (ma non sufficiente) per avere una galassia popolata da molte civiltà extraterrestri è che esse perdurino molto a lungo nella loro fase comunicativa. Questo è chiaramente illustrato nel grafico in Figura 1.2, dove i valori di  $N_D$  della Figura 1.1 sono mostrati in funzione della longevità  $L$ .

In riferimento alla Figura 1.2, se la longevità media è dell'ordine di 100 anni, allora la nostra galassia non può ospitare più di 100 specie extraterrestri.

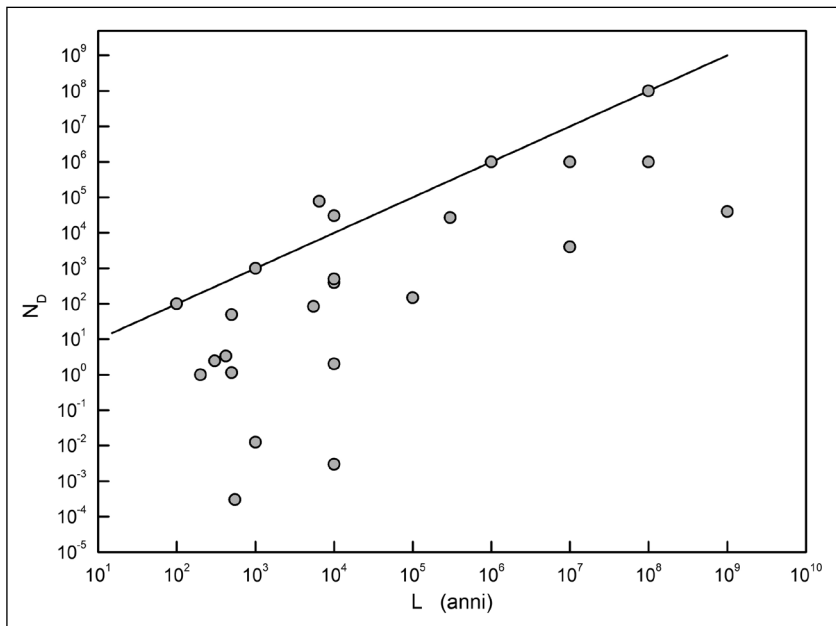


Figura 1.2 Numero di Drake in funzione della longevità media della fase comunicativa delle specie extraterrestri.

Considerato che il numero di pianeti abitabili è dell'ordine di una decina di miliardi (cioè  $\approx 10^{10}$ ), questo implica una probabilità minore di  $10^{-8}$  che uno di essi ospiti una civiltà tecnologica. In altre parole, dovremmo cercare segnali elettromagnetici provenienti da almeno cento milioni di pianeti abitabili per avere una minima chance di individuarne uno (come vedremo in seguito, questa è in realtà un'ipotesi molto ottimistica).

La situazione è più rosea nel caso in cui la longevità media sia di diversi milioni o addirittura miliardi di anni. Se, per esempio, la nostra galassia fosse popolata da civiltà le cui emissioni elettromagnetiche durassero in media 100 milioni di anni, allora potremmo aspettarci dall'equazione (1.2) che  $N_D$  sia al massimo dell'ordine di 100 milioni, e quindi che nella migliore delle ipotesi un pianeta su 100 ospiti tali civiltà.

### *Generalizzazioni dell'equazione di Drake*

La situazione illustrata in Figura 1.1 e in Figura 1.2 non cambierebbe se cercassimo di definire in modo più specifico i vari termini dell'equazione (1.1). Per esempio, già il tasso di formazione di nuove stelle ( $R^*$ ) confonde in un unico tasso annuale medio sia la formazione delle stelle di tipo solare, sia quella di nane rosse e sistemi binari. I moti orbitali di questi ultimi potrebbero infatti rendere difficile l'esistenza di pianeti la cui orbita rimanga stabile per un tempo sufficientemente lungo per ospitare la vita. Inoltre, le forze di marea a cui sono soggetti i pianeti orbitanti nella zona di abitabilità di nane rosse sono tali da sincronizzare il loro periodo di rivoluzione con quello di rotazione, come la nostra Luna che, a causa di questo sincronismo, volge sempre lo stesso emisfero verso la Terra. Pianeti orbitanti attorno a nane rosse avrebbero dunque un emisfero perennemente rivolto verso la loro stella (e dunque sempre illuminato e caldo) e l'emisfero opposto perennemente in ombra e freddo. Sebbene in linea di principio non sia da escludere che la vita possa emergere in tali condizioni, è tuttavia più difficile sostenere che queste stesse condizioni non costituiscano un ostacolo allo sviluppo di specie tecnologiche.

Un discorso simile può essere fatto anche per gli altri fattori dell'equazione di Drake. Per esempio, se volessimo chiudere in una stanza un biologo, un chimico e un astrofisico chiedendo loro di uscire dalla stanza solo dopo aver identificato i fattori che secondo loro contribuiscono a  $f_l$ , cioè alla frazione dei pianeti su cui si è effettivamente sviluppata la vita, probabilmente ne uscirebbero con una formula che comporta altri termini, ognuno dei quali ritenuto essenziale per otte-



nera  $f_l$ . Il biologo potrebbe, per esempio, affermare che alla base della vita (almeno per come la conosciamo) debbano esserci delle molecole auto-replicanti, analoghe al nostro DNA, e indicare in  $f_{\text{bio}}$  la frazione dei pianeti su cui sono presenti molecole aventi tale caratteristica. Il chimico potrebbe indicare nella disponibilità di una ricca varietà di elementi chimici il fattore chiave che assicuri la possibilità che si formino molecole complesse (magari auto-replicanti, per accontentare anche il biologo), e introdurre la probabilità  $f_{\text{chi}}$  che ciò avvenga. Infine, l'astrofisico introdurrebbe la probabilità  $f_{\text{astro}}$  che il pianeta si trovi in una regione della galassia ricca di elementi chimici (così da accontentare sia il biologo sia il chimico), ma dove cataclismi capaci di sterilizzare il pianeta (come supernove, ecc.) siano sufficientemente rari. Una volta usciti dalla stanza, il biologo, il chimico e l'astrofisico potrebbero dunque affermare che secondo loro  $f_l = f_{\text{bio}} \cdot f_{\text{chi}} \cdot f_{\text{astro}}$ , contribuendo dunque ad allungare la lista dei termini che costituiscono l'equazione di Drake, senza tuttavia migliorare la nostra conoscenza riguardo a  $f_l$ .

In linea di principio, ciascuno dei sette fattori dell'equazione di Drake originale può essere scomposto nei suoi costituenti elementari, trasformando l'equazione (1.1) nel prodotto di un grande numero di fattori, ciascuno dei quali rappresenta una condizione necessaria affinché la vita intelligente e tecnologica possa evolvere.

La lista di queste condizioni potrebbe essere ancora più lunga, perché la formulazione originale di Drake si limita a dipingere una galassia i cui abitanti sono esseri viventi che popolano pianeti di altri sistemi stellari e che hanno sviluppato una tecnologia in grado di emettere segnali di natura elettromagnetica. In realtà, le cose potrebbero essere più complesse: una delle critiche rivolte all'equazione di Drake riguarda proprio questa visione, ritenuta eccessivamente riduttiva e che trascura altre possibilità con cui l'intelligenza extraterrestre può manifestarsi. Per esempio, come è già stato accennato, civiltà tecnologicamente avanzate potrebbero inviare sonde nello spazio interstellare per studiare altri sistemi planetari o per cercare altre forme di vita. Sonde auto-replicanti, note anche come "sonde di von Neumann", potrebbero visitare altri sistemi planetari alla ricerca di materie prime da estrarre da asteroidi o comete. Per coordinare queste attività, le sonde dovrebbero comunicare fra loro attraverso grandi distanze e dunque emettere qualche sorta di segnale, magari sotto forma di onde radio oppure onde di un'altra regione dello spettro elettromagnetico. Le sonde, intese come sorgenti di emissioni, non sarebbero dunque vincolate al pianeta nativo delle specie che le hanno costruite e in linea di principio potrebbero colonizzare autonomamente ampie regioni della Via Lattea, se non addirittura la galassia intera. Questo

scenario, come quello che vede migrazioni di intere civiltà alla ricerca di pianeti abitabili da colonizzare (tanto caro alla fantascienza), non è contemplato dall'equazione di Drake nella sua forma originale, che si limita al numero di pianeti in cui sono sorte spontaneamente specie tecnologiche e non prevede la possibilità che queste specie, o le loro sonde, colonizzino altri sistemi stellari (Brin, 1983).

Un altro limite dell'equazione di Drake è che non tiene conto della possibilità che diverse specie tecnologiche, indipendenti l'una dall'altra, possano succedersi nel corso del tempo sullo stesso pianeta. Anche se una civiltà tecnologica dovesse estinguersi, per esempio, dopo 10000 anni dalla sua nascita, la vita potrebbe ancora prevalere sul pianeta per miliardi di anni; in questo lasso di tempo, nuove combinazioni di eventi potrebbero far sorgere una nuova civiltà capace di evolversi e divenire a sua volta tecnologica.

Un ulteriore scenario è quello di una specie tecnologica perfettamente in grado di comunicare, ma che per varie ragioni potrebbe rimanere invisibile a noi. Questo potrebbe essere il caso, per esempio, di una specie il cui livello tecnologico è tale da minimizzare, o addirittura azzerare, la sua impronta elettromagnetica o che ha scelto di operare silenziosamente, per evitare di essere individuata da altre civiltà che potrebbero esserle ostili.

Se dovessimo tenere in considerazione sia la moltitudine di fattori che potrebbero influenzare ogni singolo termine dell'equazione di Drake, sia l'introduzione di tutte le possibilità non considerate nella sua formulazione originale, l'equazione (1.1) prenderebbe una forma del tipo:

$$N_D = \prod_i \xi_i \quad (1.3)$$

dove  $\prod_i \xi_i = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 \dots$  è il prodotto di un numero indeterminato (probabilmente molto grande) di variabili, ciascuna delle quali rappresenta una specifica condizione necessaria per la nascita di specie tecnologiche. L'equazione (1.3) si presta a un'interpretazione statistica dell'equazione di Drake, in cui invece di assegnare valori particolari a ciascuno dei termini  $\xi_i$ , questi vengono trattati come variabili casuali indipendenti, con un proprio valore medio e una propria varianza. Ne risulta che anche  $N_D$  è una variabile aleatoria, il cui valore medio  $\langle N_D \rangle$  può essere ottenuto prendendo il logaritmo naturale di entrambi i membri dell'equazione (1.3) e applicando il teorema del limite centrale (Maccone, 2010):

$$\langle N_D \rangle = \exp \left( \mu + \frac{\sigma^2}{2} \right) \quad (1.4)$$

dove  $\mu$  e  $\sigma^2$  sono rispettivamente la somma dei valori medi e delle varianze di  $\ln(\xi_i)$ . A causa della funzione esponenziale,  $\langle N_D \rangle$  dipende fortemente dai valori di  $\mu$  e  $\sigma^2$ : in particolare, quanto più ampio è l'intervallo di valori che le variabili  $\ln(\xi_i)$  possono assumere, e quindi maggiore è la loro indeterminazione, tanto più grande è  $\sigma^2$  e, di conseguenza,  $\langle N_D \rangle$ .

A prima vista, questo risultato sembra suggerire che meno sappiamo quali valori possano assumere i fattori  $\xi_i$  dell'equazione (1.3), maggiore è il numero medio di specie tecnologiche nella galassia. In realtà, per grandi  $\sigma/\mu$ , i possibili valori che  $N_D$  può assumere si estendono su un intervallo così ampio che l'equazione (1.4) non rappresenta più una misura affidabile della popolazione extraterrestre. Per illustrare questo aspetto, consideriamo la probabilità  $P_1$  che  $N_D \leq 1$ , ovvero la probabilità che l'umanità sia la sola specie tecnologica in tutta la galassia. Come è mostrato in Figura 1.3,  $P_1$  tende rapidamente al 50% per  $\sigma/\mu > 10$ , il che implica una probabilità piuttosto alta che siamo soli nella Via Lattea, malgrado un valore elevato di  $\langle N_D \rangle$ . Al contrario, per  $\sigma/\mu < 1$ , che rappresenta un regime di bassa incertezza rispetto alle variabili dell'equazione (1.3),  $P_1$  tende rapidamente a 0. In questo caso, possiamo affermare con certezza quasi assoluta che la Terra non è l'unico pianeta abitato da una specie tecnologica.

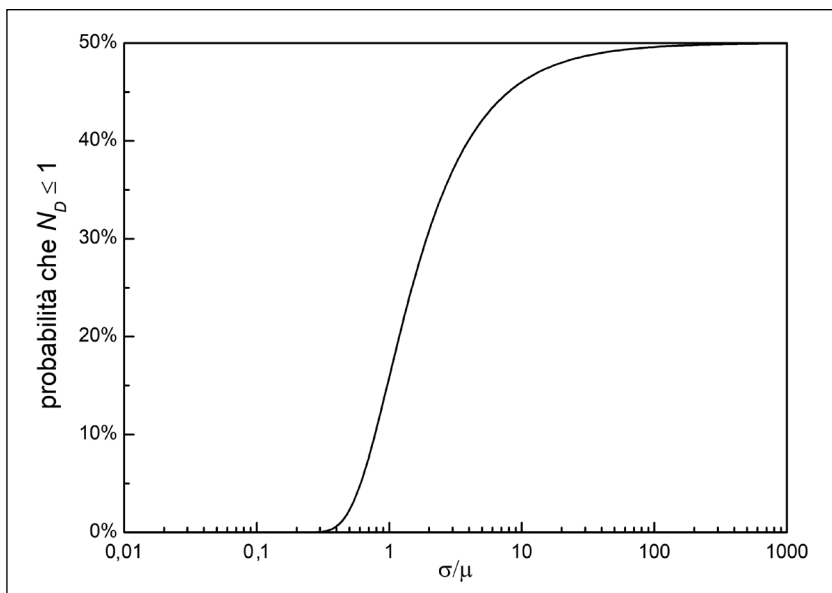


Figura 1.3 Probabilità che l'umanità sia la sola specie tecnologica nella Via Lattea.

## *L'equazione di Drake e la legge di Little*

Immaginiamo di possedere un piccolo negozio e di dover decidere se assumere uno o più commessi per gestire i clienti. Sebbene il numero di clienti possa variare nel corso del tempo, la decisione dipende in ultima analisi da quanti clienti in media sono presenti in qualsiasi momento. Se, per esempio, prevediamo in media più di cinque clienti, assumere un commesso ridurrebbe il tempo che ogni cliente trascorre nel negozio, aumentando la soddisfazione dei clienti ed evitando che se ne vadano senza aver acquistato a causa della prolungata attesa per essere serviti.

Sebbene intuitiva, la decisione di assumere un commesso ha una giustificazione matematica nella legge di Little, formulata formalmente nel 1961 dal fisico John D. C. Little per lo studio delle catene di distribuzione nei processi produttivi (Little, 1961). Applicata alla situazione descritta, questa legge afferma che il numero medio a lungo termine  $N_C$  di clienti nel negozio è uguale al tasso di arrivo medio  $\Gamma_C$  (cioè il numero medio di clienti che entrano nel negozio in un dato intervallo di tempo), moltiplicato per il tempo medio  $L_C$  che un cliente trascorre nel negozio:  $N_C = \Gamma_C \times L_C$ . Se il tasso di arrivo dei clienti è costante, assumere un commesso farebbe diminuire  $L_C$  e, di conseguenza, il numero  $N_C$  di clienti da servire diminuirebbe anch'esso, permettendo una più efficace gestione del servizio commerciale.

Ma cosa c'entra la legge di Little con l'equazione di Drake? Ebbene, come evidenziato da Amedeo Balbi, quest'ultima non è altro che un'applicazione della prima, in cui al posto dei clienti in un negozio consideriamo intelligenze extraterrestri che rilasciano segnali elettromagnetici (Balbi, 2018).

Per verificarlo, riprendiamo l'equazione (1.1). Dal significato dei primi sei fattori dell'equazione, deduciamo che il loro prodotto è il tasso medio di emissione di segnali elettromagnetici nella nostra galassia (ovvero quanti segnali vengono trasmessi in media, volontariamente o meno, nell'unità di tempo), che chiameremo  $\Gamma$ , mentre  $L$  è la durata media di tali segnali, che indicheremo più opportunamente con  $\langle L \rangle$  per sottolineare che si tratta di una quantità mediata sull'insieme di tutte le durate possibili. Una volta compartimentata in questo modo, l'equazione di Drake assume la stessa forma della formula di Little:

$$N_D = \Gamma \cdot \langle L \rangle \quad (1.5)$$

Come nell'esempio precedente, il numero medio di clienti presenti in qualunque momento nel negozio è dato dal prodotto tra il tasso medio di arrivo dei clienti e il tempo medio di permanenza nel

negozio; allo stesso modo, l'equazione (1.5) esprime il numero medio di specie extraterrestri che in qualunque momento emettono segnali come il prodotto tra il tasso di emissione e la longevità media dei segnali.

Il vantaggio di esprimere la formula di Drake nella forma compatta dell'equazione (1.5) è che ora l'indeterminazione dei singoli fattori nell'equazione (1.1) è assorbita in un unico parametro ( $\Gamma$ ), il cui significato può essere facilmente generalizzato per includere scenari più esotici di quelli originalmente previsti da Drake come, per esempio, la possibilità già evocata che segnali elettromagnetici siano emessi da sonde autonome, sfere di Dyson o altre mega-strutture, radio-fari disseminati nello spazio interstellare, ecc. A questo scopo, nel seguito del libro useremo il termine generico “emettitore” per indicare qualunque sorgente extraterrestre di radiazioni elettromagnetiche di origine artificiale. Queste, per brevità, verranno chiamate “tecnosegnali” o “tecnosegnali”, per distinguerle da altre possibili manifestazioni della tecnologia extraterrestre che non implicino la diretta produzione di radiazioni nello spettro elettromagnetico (come, per esempio, relitti di astronavi o gas inquinanti nell'atmosfera di pianeti extrasolari, come sarà discusso nel Capitolo 2).

### *L'equazione temporale di Drake*

La forma compatta dell'equazione (1.5) si presta ad affrontare un'ulteriore critica all'equazione di Drake, che sottolinea come questa non tenga conto che la comparsa di civiltà tecnologiche nella galassia (o più in generale di emettitori extraterrestri) possa variare nel tempo (Ćirković, 2004; Forgan, 2009; DeVito, 2024). In effetti, l'equazione (1.5), come la formulazione originale di Drake in (1.1), descrive un regime stazionario dove il tasso di comparsa delle tecnosegnali è indipendente dal tempo (il valore di  $\Gamma$  di oggi è lo stesso di ieri, così come lo era un milione di anni fa), mentre non solo il tasso di formazione delle stelle è cambiato durante la storia della Via Lattea, ma anche il tasso di formazione dei pianeti e, più in generale, l'abitabilità della galassia stessa.

Quest'ultimo concetto si riferisce al fatto che dall'epoca della sua formazione, circa 13,8 miliardi di anni fa, la Via Lattea ha visto importanti cambiamenti nella sua composizione chimica. All'inizio, la prima generazione di stelle si era formata in una galassia dove i soli elementi chimici presenti erano l'idrogeno e l'elio, che le reazioni di fusione nucleare all'interno delle stelle trasformavano in elementi più pesanti. Alla fine del ciclo di vita di stelle sufficientemente massicce,

tutti gli elementi della tavola periodica potevano essere sintetizzati e rilasciati nel gas interstellare dall'esplosione di supernove. Questi elementi venivano poi riassorbiti nelle successive generazioni di stelle, arricchendo progressivamente la galassia degli elementi chimici necessari alla formazione di pianeti (e forse della vita). Nella Via Lattea, la metallicità (cioè il parametro utilizzato in astrofisica per indicare la frazione in massa di elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio) è dunque aumentata nel corso del tempo, all'inizio rapidamente poi, man mano che la frequenza di supernove diminuiva, sempre più lentamente. Se da una parte la morte violenta di stelle massicce contribuiva ad arricchire di elementi pesanti la galassia, dall'altra costituiva un elemento di pericolo per l'abitabilità di pianeti vicini, perché le violente esplosioni di supernove rilasciano raggi cosmici, raggi gamma e raggi X che possono essere fatali per la vita.

Tenendo conto dell'effetto combinato della diminuzione con il tempo del tasso di supernove e dell'aumento della metallicità, oggi si ritiene che il tasso di formazione di pianeti abitabili (cioè pianeti rocciosi orbitanti attorno a una stella simile al nostro Sole a una distanza favorevole alla nascita della vita) abbia avuto un massimo piuttosto ampio attorno a 8 miliardi di anni fa (la vita è comparsa sul nostro pianeta solo 4,5 miliardi di anni fa), per attestarsi in epoche più recenti a circa 0,1-1 pianeta l'anno.

Se dunque l'abitabilità della galassia si è evoluta nel tempo, è plausibile ritenere che la comparsa della vita (che sia semplice, complessa o tecnologica) sia essa stessa una funzione del tempo, e dunque che l'equazione (1.5) debba essere generalizzata in modo da tener conto di questa evoluzione. Il problema è che se abbiamo una certa idea di come l'abitabilità della Via Lattea sia cambiata nel tempo, poco o nulla sappiamo di quale effettivamente sia l'evoluzione temporale della vita nella galassia, né tanto meno della vita tecnologica. Ciò che si può ragionevolmente supporre è che se applichiamo il principio di mediocrità, noto anche come "principio copernicano", secondo il quale la comparsa della vita sulla Terra non ha nulla di speciale, allora la probabilità che su altri pianeti si formino biosfere che durino abbastanza a lungo da far evolvere la vita va di pari passo con l'abitabilità stessa della galassia. Su questa base, si può ipotizzare che il tasso di comparsa di specie tecnologiche e il conseguente rilascio di tecnoemissioni possa essere caratterizzato da una scala temporale non troppo dissimile da quella dell'abitabilità della Via Lattea, cioè dell'ordine di qualche miliardo di anni.

A questa visione gradualistica, si può però obiettare che la vita tecnologica non segue necessariamente i dettami della vita biologica. Come abbiamo visto in precedenza, una o più specie tecnologicamen-

te avanzate a un certo punto della loro storia potrebbero intraprendere la colonizzazione di altri sistemi planetari, sia tramite migrazioni di intere civiltà verso pianeti precedentemente terraformati da sonde robotiche per creare habitat adatti, sia attraverso la proliferazione nella galassia di macchine autoreplicanti dotate di intelligenza artificiale. In uno scenario di questo tipo, la comparsa di numerosi siti galattici che possano essere potenziali emettitori di tecnosegnali avverrebbe presumibilmente su una scala temporale più breve di quella che caratterizza l'abitabilità della Via Lattea. Come vedremo nel Capitolo 9, è stato stimato che un centinaio di milioni di anni possa essere un tempo più che sufficiente per la colonizzazione dell'intera galassia, quindi la colonizzazione di regioni più limitate richiederebbe tempi più brevi.

Riassumendo le argomentazioni precedenti, da una parte appare ragionevole supporre che il tasso di comparsa di emettitori sia una funzione del tempo ( $t$ ) e che dunque questa dipendenza temporale debba essere espressa da una qualche generica funzione  $\Gamma(t)$ ; dall'altra parte, ignoriamo perfino la scala temporale su cui varia  $\Gamma(t)$ .

Un'altra fonte di indeterminazione è rappresentata dalla forma dell'equazione temporale che determina la dipendenza del numero di Drake da  $t$ . Un esempio ispirato da processi di tipo *birth-death* è dato dalla soluzione dell'equazione differenziale (Prantzos, 2013):

$$dN_D(t) / dt = \Gamma(t) - N_D(t) / L \quad (1.6)$$

dove il tasso di comparsa degli emettitori è controbilanciato dal secondo termine, che descrive la scomparsa degli emettitori secondo un tasso pari a  $1/L$ . La soluzione generale dell'equazione (1.6) prende la forma seguente:

$$N_D(t) = \int_0^t dt' \Gamma(t') e^{-(1/L)(t-t')} \quad (1.7)$$

In questa equazione, ogni rapida variazione del tasso  $\Gamma(t)$  viene smussata dalla funzione esponenziale, che stabilisce la lunghezza della correlazione temporale. Nel caso in cui  $\Gamma(t)$  sia costante nel tempo, l'equazione (1.7) si riduce a  $N_D(t) = \Gamma L (1 - e^{-t/L})$ , che per  $t/L \gg 1$  riproduce il limite stazionario dell'equazione di Drake.

È possibile generalizzare questa equazione in termini di una serie di equazioni differenziali accoppiate che corrispondono alla formazione delle stelle, alla formazione dei pianeti, alla nascita della vita, alla sopravvivenza della biosfera e all'emergere dell'intelligenza (Madau, 2023; Schleicher e Bovino, 2023). Questo insieme di equazioni introduce diverse scale temporali determinate dall'astrofisica (tassi di formazione di stelle e pianeti), dalla biologia (tempi di emergenza ed

evoluzione della vita) e dalle scale temporali delle civiltà tecnologiche (emergenza, diffusione e decadimento). Tuttavia, l'effetto complessivo è dominato dalla scala temporale più lenta, che presumibilmente è quella della formazione delle stelle.

### *Oltre l'equazione di Drake*

L'idea di Frank Drake di formulare un'equazione che guidasse la discussione del primo evento SETI della storia ha avuto un grande successo, testimoniato dal fatto che la sua equazione continua a ispirare una grande quantità di studi e ricerche a distanza di più di sessant'anni dalla sua formulazione. Come abbiamo visto, nel corso dei decenni l'equazione di Drake è stata oggetto di numerose modifiche e generalizzazioni, volte a includere aspetti che non erano stati contemplati nel 1960 come, per esempio, la dipendenza temporale o la possibilità che specie tecnologiche possano espandersi in altri sistemi planetari.

Il tema con cui terminiamo questo Capitolo non riguarda dunque la descrizione di ulteriori generalizzazioni dell'equazione (1.1), ma intende sottolineare un aspetto cruciale per l'intera impresa del SETI che però non è contemplato, almeno in principio, nell'equazione di Drake. Quest'ultima, infatti, è architettata in modo da fornire il valore medio di emettitori extraterrestri che sono attualmente attivi, ma non indica se e quanti di loro potrebbero essere effettivamente osservati, anche solo teoricamente, da noi che siamo qui sulla Terra.

Immaginiamo una specie tecnologica distante 100 a.l. da noi che abbia appena acceso un radiofaro per trasmettere segnali radio in tutte le direzioni. Sebbene questo radiofaro sia attualmente attivo (dunque dovrebbe essere incluso nel numero di Drake  $N_D$ ), non avremmo modo oggi di rilevarlo e dovremmo attendere cento anni affinché il suo segnale arrivi sul nostro pianeta.

Un altro scenario è quello che vede il radiofaro inviare un fascio direzionale di segnali radio in direzione di un sistema planetario diverso dal nostro, e che lo stia facendo ininterrottamente da più di cento anni. Anche in questo caso, il radiofaro è attivo e, nonostante la possibilità che se il suo segnale fosse diretto verso il nostro pianeta noi potremmo oggi intercettarlo, il fatto che trasmetta in direzione di un altro sistema planetario lo rende invisibile ai nostri radiotelescopi. Uno scenario di questo tipo (ma più estremo) è quello in cui tutti gli  $N_D$  emettitori attivi nella galassia siano dei radiofari che inviano segnali in direzioni diverse. Di questi, solo i segnali diretti verso il nostro pianeta saranno un giorno potenzialmente osservabili, mentre tutti gli altri saranno perduti per sempre. Di conseguenza, potremmo sperare



di rilevare solo una frazione del numero totale  $N_D$  di emettitori attivi (e sperare che questa frazione sia maggiore di 0).

Questo tipo di scenario richiede l'uso di indicatori statistici diversi da  $N_D$ , capaci di calcolare la probabilità che un segnale sia rilevabile in base alla distribuzione delle specie tecnologiche (o dei loro trasmettitori) nella galassia, alla durata delle loro emissioni, al tempo di attivazione dei segnali e ad altre caratteristiche. Nei prossimi Capitoli, costruiremo passo dopo passo l'impianto teorico che ci permetterà di fare ciò.