

第 11 章 生命、宇宙以及一切的终极答案

Yes, and how many years must a mountain exist
Before it is washed to the sea?
Yes, and how many years can some people exist
Before they're allowed to be free?
Yes, and how many times can a man turn his head
And pretend that he just doesn't see?
The answer, my friend, is blowin' in the wind
The answer is blowin' in the wind

Yes, and how many times must a man look up
Before he can see the sky?
Yes, and how many ears must one man have
Before he can hear people cry?
Yes, and how many deaths will it take 'til he knows
That too many people have died?
The answer, my friend, is blowin' in the wind
The answer is blowin' in the wind

— Bob Dylan, *Blowin' In The Wind*

11.1 Don't Panic

在《银河系漫游指南》的广播系列和第一本小说中，一群超智能、多维生物希望找到生命、宇宙以及一切的终极答案。为此，它们建造了超级计算机深思（Deep Thought），耗

费了七百五十万年计算，得到的答案竟然是 42。这个答案毫无意义，因为那些生物根本不知道终极问题究竟是什么。



Figure 11.1 电影剧照

当被要求揭示终极问题时，深思表示自己无能为力，但可以帮助设计一台更强大的计算机来完成这一任务。这台新计算机将生物体纳入“计算矩阵”，运行时间长达一千万年。这台计算机就是地球，而它的多维创造者则以老鼠的形态观察其运行。

老鼠还在地球上等待着最终问题的计算结果。可惜，实验环境出了点小问题：一种新近进化出的猿类在不知情的情况下接管了实验场地，甚至开始试图理解它。他们用石头造工具、用铜线造天线，夜晚抬头看星空，心想或许那上面也有谁在注视着他们。于是，在计算尚未完成之际，这些猿类决定自己去寻找答案。

11.2 搜寻地外文明计划

†11.1 [作者注]

论文题目：Searching for Interstellar Communications
发表：Nature, Vol. 184, pp. 844-846

†11.2 [作者注]

论文题目：Interstellar and Interplanetary Communication by Optical Masers
发表：Nature, Vol. 190, pp. 205-208

搜寻地外文明计划 (SETI, Search for extraterrestrial intelligence) 的故事开始于 1959 年。在这一章节中，我们将以 Cocconi Morrison (1959)^{†11.1} 和 Schwartz Townes (1961)^{†11.2} 的两篇论文为脉络。

科学技术的发展使得人们开始想象和地外文明接触的可能，既然外星文明没有主动降临地球来寻找我们，想要获得有关外星文明的信息，我们只能能够主动给外星文明“发送好友申请”。由于平方反比定律的存在，我们向外发射的信号强度会随着距离的增加急剧减小，为了能够用尽可能小的功率让信息能够抵达目的地，传递信息的载体不能四散开来传递（即需要减少方向色散）。此外，这个载体还需要有极快的速度（即减少时间色散）以降低延迟。宇宙虽然接近真空，但并非空无一物，四处弥散的稀薄等离子体的存在也会影响载体从而使得信号失真，这要求我们的载体和宇宙介质的作用微弱，从而能保持信息的高保真度。另外还需要载体容易产生和调制。考虑诸多因素后，我们认为电磁波是最好的选择。

聪明的读者可能会疑惑，为什么不使用激光？这是因为人类史上的第一束激光在 1960 年才由 Theodore Maiman 利用一个高强闪光灯管来刺激刚玉制备出来，并且后面那篇论文就是有关这个问题的。

在解决了信息载体的大致方向后，我们需要确定具体的频段。

高层大气（约 60 km 以上）在太阳紫外线和 X 射线作用下被电离，形成自由电子和离子组成的等离子体。电磁波入射时，其电场驱动电子做受迫振动，电子运动方程为

$$m_e \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -e \mathbf{E}_0 \cos(\omega t), \quad (11.1)$$

其中 m_e 为电子质量， e 为电子电荷， $\omega = 2\pi f$ 为电磁波角频率。积分两次可得电子位移

$$\mathbf{x}(t) = -\frac{e}{m_e \omega^2} \mathbf{E}_0 \cos(\omega t), \quad (11.2)$$

电子运动产生电流密度

$$\mathbf{J} = -n_e e \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{n_e e^2}{m_e \omega} \mathbf{E}_0 \sin(\omega t), \quad (11.3)$$

其中 n_e 为电子数密度。代入麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right), \quad (11.4)$$

并假设平面波形式 $\mathbf{E} \propto e^{i\omega t}$ ，可得等离子体介电常数

$$\varepsilon_p(\omega) = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right), \quad \omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0}}, \quad f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}. \quad (11.5)$$

当入射电磁波频率 $f < f_p$ 时， $\varepsilon_p < 0$ ，电磁波被反射；当 $f > f_p$ 时，波可透射。

高频电磁波在大气中衰减主要源于分子的量子化共振吸收。大气分子（如 H₂O、O₂）具有离散的旋转和振动能级 E_n ，光子能量为

$$E = hf, \quad (11.6)$$

当光子能量匹配分子能级间隔

$$hf = E_m - E_n = \Delta E, \quad (11.7)$$

分子吸收光子从低能级 E_n 跃迁至高能级 E_m ，导致电波衰减。水分子由于电偶极矩，其转动能级跃迁在 $f \approx 22.235$ GHz 非常强；氧气分子具有磁偶极矩，其吸收在 $f \approx 57$ – 64 GHz 和 $f \approx 118.75$ GHz 显著。

截至到这里，我们讨论的是信号从地球发射到太空时的，地球大气层对电磁波的频率要求，但是为了让微弱的地球发射的信号能被探测到，必须选择一个背景噪声最少的寂静频率（即，提高信噪比让我们的信号不会被当成宇宙活动的噪声被处理掉）。考虑银河系背景辐射和恒星自身辐射后，我们可以得到一个大概的频率区间。由于宇宙中大部分元素是氢，那么我们的波频最好和氢有关。

氢原子由一个质子和一个电子组成并且中性氢原子在特定能级跃迁时会发出一个特征谱线，这个特征谱线的产生来自于氢原子的超精细结构，而超精细结构来源于电子和质子自旋磁矩的相互作用。

将氢原子简化为两个自旋粒子系统：电子，磁矩为 μ_e ；质子，磁矩为 μ_p 。

电子在质子产生的磁场 \mathbf{B}_p 中的相互作用能量由哈密顿量描述：

$$H = -\boldsymbol{\mu}_e \cdot \mathbf{B}_p \quad (11.8)$$

质子磁场 \mathbf{B}_p 可以分解为经典偶极场和接触场：

$$\mathbf{B}_p(\mathbf{r}) = \mathbf{B}_{\text{classic}}(\mathbf{r}) + \mathbf{B}_{\text{contact}}(\mathbf{r}) \quad (11.9)$$

经典偶极场公式来源于矢量势：

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\boldsymbol{\mu}_p \times \mathbf{r}}{r^3}, \quad \mathbf{B}_{\text{classic}} = \nabla \times \mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\boldsymbol{\mu}_p \cdot \hat{\mathbf{r}})\hat{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\mu}_p], \quad r > 0 \quad (11.10)$$

然而在原点处，点偶极子的磁场奇异，需要通过“正则化”处理。考虑将质子视作半径为 R 的均匀磁化球，内部磁场为：

$$\mathbf{B}_{\text{inside}} = \frac{2\mu_0}{4\pi R^3} \boldsymbol{\mu}_p \quad (11.11)$$

对球体体积积分：

$$\int_V \mathbf{B}_{\text{inside}} dV = \mathbf{B}_{\text{inside}} \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{2\mu_0}{3} \boldsymbol{\mu}_p \quad (11.12)$$

取 $R \rightarrow 0$ 极限，将其用 δ 函数表示，得到接触场：

$$\mathbf{B}_{\text{contact}}(\mathbf{r}) = \frac{2\mu_0}{3} \boldsymbol{\mu}_p \delta^3(\mathbf{r}) \quad (11.13)$$

于是接触哈密顿量为：

$$H_{\text{contact}} = -\boldsymbol{\mu}_e \cdot \mathbf{B}_{\text{contact}} = -\frac{2\mu_0}{3} (\boldsymbol{\mu}_e \cdot \boldsymbol{\mu}_p) \delta^3(\mathbf{r}) \quad (11.14)$$

磁矩与自旋算符的关系为：

$$\boldsymbol{\mu}_e = -g_e \mu_B \frac{\mathbf{S}_e}{\hbar}, \quad \boldsymbol{\mu}_p = g_p \mu_N \frac{\mathbf{S}_p}{\hbar} \quad (11.15)$$

代入哈密顿量：

$$H_{\text{contact}} = -\frac{2\mu_0}{3} \frac{g_e \mu_B g_p \mu_N}{\hbar^2} (\mathbf{S}_e \cdot \mathbf{S}_p) \delta^3(\mathbf{r}) \quad (11.16)$$

总自旋算符定义为：

$$\mathbf{F} = \mathbf{S}_e + \mathbf{S}_p, \quad \mathbf{S}_e \cdot \mathbf{S}_p = \frac{1}{2} (F^2 - S_e^2 - S_p^2) \quad (11.17)$$

电子和质子自旋 $s_e = s_p = 1/2$ ，总自旋 $f = 1$ （三重态）或 $f = 0$ （单重态），因此：

$$\langle \mathbf{S}_e \cdot \mathbf{S}_p \rangle = \begin{cases} +\frac{\hbar^2}{4}, & f = 1 \text{ (triplet)} \\ -\frac{3\hbar^2}{4}, & f = 0 \text{ (singlet)} \end{cases} \quad (11.18)$$

对于氢原子 1s 轨道，电子波函数在原点的概率密度为 $|\psi_{1s}(0)|^2$ ，接触项能量期望值为：

$$E = \langle H_{\text{contact}} \rangle = -\frac{2\mu_0}{3} |\psi_{1s}(0)|^2 \langle \boldsymbol{\mu}_e \cdot \boldsymbol{\mu}_p \rangle \quad (11.19)$$

（这里省略了一些步骤，留给读者自行验证）

能级差为：

$$\Delta E = E_{\text{triplet}} - E_{\text{singlet}} = \frac{2\mu_0}{3} g_e g_p \mu_B \mu_N |\psi_{1s}(0)|^2 \quad (11.20)$$

其中：

$$|\psi_{1s}(0)|^2 = \frac{1}{\pi a_0^3} \quad (11.21)$$

最后，根据普朗克-爱因斯坦关系计算频率和波长：

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} \approx 1.420 \text{ GHz}, \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \approx 21.1 \text{ cm} \quad (11.22)$$

至此，我们发现我们获得这个谱线刚好位于我们的可用频率区间内，从而说明这样的方法是可行的。

但理论可行，但是否我们就一定能成功的找到地外文明呢？我们无法估计成功的概率，但如果不去寻找，那成功的机会必定是零。**(The probability of success is difficult to estimate; but if we never search, the chance of success is zero.)**

11.3 估算地外文明的方程

11.3.1 奥兹玛计划 (Project Ozma)

Project Ozma 的名字来源于 L. Frank Baum (《绿野仙踪》的作者) 笔下虚构国度 Oz 的女王 Ozma，她所在的地方非常遥远，难以到达，并且居住着奇怪而奇异的生物。Baum 在他的系列书里，为了继续叙述 Oz 的事件，在第七本书的序言中引用了一个孩子的建议“用无线电和 Oz 通信”来获得后续报道。

该计划在 1960 年时被媒体大范围宣传，因此认为是第一个现代的搜寻地外文明计划试验。这个计划的提出者是时年 29 岁的 Frank Drake，他使用 NRAO 的 26 米射电望远镜，搜索来自鲸鱼座 τ 星和波江座 ϵ 恒星系统的可能信号。在 1960 年 7 月终止该计划前，没有探测到地外文明的信号。