

太阳模型及演化

借助天文望远镜,可以对太阳表面进行不间断的高精度观测,但为了能解释观测到的结果,需要知道太阳内部的构造。由于太阳内部即光球层以下的太阳辐射被太阳大气层完全吸收,不能从直接观测太阳辐射来获得太阳内部构造。但是我们可以以一些假定为前提,根据太阳的一些可观测参数,构造一个理论太阳模型来推测太阳内部构造。

2.1 标准太阳模型

由于太阳内部存在很多复杂的物理过程,现在人们普遍采用一种标准的太阳模型。基本假设:太阳本体为稳定和球对称流体,并忽略自转和磁场。

2.1.1 确定太阳内部构造的基本方程

1. 质量方程

在球对称假定下,令 M_r 表示半径为 r 的气体球质量, $M_r + dM_r$ 表示半径为 $r + dr$ 的气体质量, ρ 为密度,则厚度为 dr 的球壳的质量即

$$dM_r = 4\pi r^2 \rho dr$$

或

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (2.1)$$

2. 压力平衡方程

为了使太阳构造稳定,太阳内部必须处于静力平衡态。考虑太阳内部离中心 r 处于径向平行的小体积元,由于内部压力较大,此体积



元将在径向上受到一个向外的力,这一力应与体积元所受的引力相平衡,即得

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_r}{r^2} \quad (2.2)$$

这里压力 p 为气体压力 p_g 与辐射压力 p_r 之和。一般地,在讨论压力平衡时,大多数情况下辐射压力可以忽略。

3. 能量平衡方程

太阳内部的稳定还要求它的每一部分物质温度不能改变,否则将引起结构变化,因此必须满足能量平衡。假定半径 r 处的产能率为 $\epsilon(r)$,半径为 r 的球体向外发射的总能流为 L_r ,半径为 $r+dr$ 的球体发射的总能流为 L_{r+dr} ,则在 r 至 $r+dr$ 的球壳内的能量平衡条件为

$$dL_r = 4\pi r^2 \rho \epsilon dr$$

即

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon \quad (2.3)$$

注意,太阳内部的能量平衡与理想的热动平衡不同。在理想的热动平衡下,物体的各部分达到一致的温度,因而没有能流通过。然而在太阳内部与表面之间的温度差别很大,并有能量从表面的输出,因此整个横向不是理想热动平衡的。但是,虽然有能流通过,但是在内部任意一点,没有能量聚集或亏损,这就是局部热动平衡状态,满足能量平衡条件。

4. 能量转移方程

在现阶段的太阳内部,传能的方式主要是辐射和对流。这二者传能方式很不同,必须分别讨论。

(1) 辐射传能

设太阳内部单位质量的物质对辐射的吸收系数为 κ ,单位体积元所吸收的辐射能为 $\left(\frac{L_r}{4\pi r^2}\right) \rho \kappa dr$,相当于辐射损失的动量为

$\frac{1}{c} \left(\frac{L_r}{4\pi r^2}\right) \rho \kappa dr$ 。作用于流体元上的辐射压力梯度 dp_r 应与上述动量

损失相等,即 $dp_r = -\frac{1}{c} \left(\frac{L_r}{4\pi r^2}\right) \rho \kappa dr$ 。另一方面,可以证明辐射压力

$p_r = \frac{4\sigma}{3c} T^4$ 。所以得到



$$\frac{dT}{dr} = \frac{-3 L_r}{16\sigma T^3 4\pi r^2 \kappa \rho} \quad (2.4)$$

(2) 对流传能

当流体满足史瓦西 (Schwarzschild) 判据, 即 $\left| \frac{dT}{dr} \right|_{ad} < \left| \frac{dT}{dr} \right|_{rd}$, 对流发生, 辐射平衡被破坏。此时能量转移方程为

$$\frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr} \quad (2.5)$$

具体计算表明, 太阳内部大约自 $r=0.75R$ (R 为太阳半径) 直到太阳表面附近 (光球底部) 的区域中满足 Schwarzschild 判据, 形成对流。大约从 $0.75R$ 出现对流传能开始, 其所占能流比率向外逐渐增大, 从 $0.75R \sim 0.93R$, 对流传能占总能流的比例由 0.11% 增大到 0.99% , 自 $0.94R$ 直到太阳表面附近, 能量完全由对流传输。

5. 物态方程

压力 p 应是气体压力与辐射压力之和, 即 $p = p_g + p_r$ 。假定气体为理想气体, $p_g = NKT = \frac{k}{\mu m_H} \rho T$, N 为数密度。另外, $p_r = \frac{1}{3} a T^4$, 其中 $a = \frac{4\sigma}{c}$, σ 为斯特藩-波尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常量。于是得物态方程

$$p = \frac{k}{\mu m_H} \rho T + \frac{1}{3} a T^4 \quad (2.6)$$

研究表明, 把太阳视为理想气体是较好的近似, 但它毕竟不是理想气体, 其内部气体压力偏离 $p_g = NKT = \frac{k}{\mu m_H} \rho T$, 在计算太阳内部构造时, 必须进行非理想气体改正。主要考虑静电效应和部分电子简并效应的压力改正。

在考虑静电效应改正时, 主要是在理想其他状态下, 压力纯粹是粒子之间碰撞产生的, 对于带电粒子, 还有静电力相互作用, 从而对压力有贡献。

对于太阳内部, 粒子之间的平均经典能与粒子平均热能的比值约为 0.1 的量级。理论分析表明, 这种静电压力改正可以表示为

$$p_{es} = -\frac{1}{3} \frac{e^3 \left(\sum Z^2 \bar{n}_Z \right)^{3/2}}{8\pi\epsilon_0 (\epsilon_0 kT)^{1/2}} \quad (2.7)$$

其中 \bar{n}_Z 为电荷 eZ 的粒子平均数密度。静电压力改正约为理想气体压力的 $1\% \sim 5.9\%$ 。

部分电子简并效应是在太阳深层, 密度很大, 原子核附近大量的



电子产生的静电屏蔽作用,使原子外层的束缚电子不再受到原子核的作用而成为自由电子,也称为压力电离。压力电离出来的电子速度不服从麦克斯韦(Maxwell)分布,服从费米-狄拉克(Fermi-Dirac)统计规律,平均动能和电子压力(电子简并压)很大。计算表明,在太阳内部自中心到 $0.1R$ 的区域,必须考虑这种部分电子简并压改正。在太阳中心,电子简并压约占总压力的 1.7% 。

由质量方程、流体静力学平衡方程、能量平衡方程和能量转移方程、物态方程组成的方程组,如果确定了太阳内部产能率 $\epsilon(r)$ 、气体吸收系数 $\kappa(r)$ 、平均原子量 μ ,则 5 个方程中只有 5 个未知数:密度 ρ 、压力 p 、温度 T 、光度 L_r 和质量 M_r 。

通常将假定球对称(即所有物理量只与太阳半径 r 有关)、处于静力学平衡(稳定)以及假定内部自转角速度不大和磁场很弱(忽略自转和磁场的作用),而得到的太阳结构模型称为标准太阳模型(Standard Solar Model),以区别于不遵从这些假定的太阳模型。

2.1.2 确定太阳模型的参数

在标准太阳模型中,几个重要参数(平均原子量、内部产能率和气体吸收系数)需要通过其他方法得到。

1. 平均原子量

由太阳光谱分析可以得到太阳大气的化学组成,同时假定太阳内部由于对流的作用,化学组成与太阳大气基本一致。

在物态方程中的原子量用太阳的平均原子量表示出。根据太阳大气的元素丰度,令 X 和 Y 代表氢和氦的质量分数, Z_i 代表其余元素中第 i 种元素的质量分数。平均原子量 μ 可表示成

$$\mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z} \quad (2.8)$$

太阳内部除了日核和靠近表面的边界区域以外,式(2.8)均适用。在太阳表面附近,温度不够高,各元素偏离完全电离较大,式(2.8)不能用,在日核中,由于核反应, X 和 Y 有所变化, μ 值也有所不同。

2. 太阳能源

太阳的主要能源来自内部的核反应过程。太阳的能量主要由两种类型的反应产生:一种是 pp 反应链;另一种是 CN 循环。

