

恒星物质的不透明度

李 焱

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘 要

简单介绍了恒星物质的透明性质在恒星结构、演化、振动等许多恒星物理基本问题研究中的重要性 and 决定恒星物质不透明度的物理过程, 回顾了第一代不透明度数据 LAOL 的发展历程与存在的问题, 介绍了新一代不透明度数据 OPAL 的发展和目前观测与理论之间依然不一致的地方。

关键词 恒星: 内部 — 恒星: 物质不透明度 — 恒星: 演化

分类号: P144

1 物质的不透明度在恒星结构演化研究中的地位

恒星的内部结构是由流体静力学平衡方程、能量守恒方程、引力势的泊松方程和能量传递方程联合确定的。能量从恒星内部向恒星外部的传递主要有三种方式, 即辐射、对流与传导。在恒星内部辐射平衡区, 能量主要通过辐射的方式向外传递。当恒星中心核的密度高到出现电子简并过程时, 电子气体的热传导将成为能量传递的主要方式。在恒星内部对流区, 对流运动将向外传递大量热量。

在恒星内部辐射平衡区内, 如果一个典型尺度上的光学深度远大于 1, 那么能量的传递可以用扩散近似描述^[18,29]:

$$F_R = -\frac{4\sigma}{3\kappa\rho}\nabla T^4 \quad (1)$$

上式中 F_R 是辐射能量通量, σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, T 是温度, κ 是单位质量的不透明度, ρ 是密度, $\kappa\rho$ 是单位体积的不透明度。辐射能量通量的大小是由恒星内部的核产能与引力能释放来决定的, 因此从方程 (1) 可以看出, 不透明度决定了恒星内部的温度结构。

然而从更广泛的影响上来看, 不透明度的大小影响着恒星物理中许多至关重要的问题, 是研究恒星物理的一个非常关键的因素。例如在 HR 图上, 大量的恒星分布在一些特定的区域里, 形成诸如主序带、红巨星分支、渐近巨星分支等。这些恒星集合在 HR 图上所处的位置与恒星内部的不透明度密切相关, 一般不透明度增大将使这些恒星集合向红的方向移动。

对流不稳定性的出现同样可以说是物质不透明度的一个直接结果。在恒星内部一些不透明度非常大的区域内, 当局地温度梯度大于绝热温度梯度时, 流体将不再稳定, 离开初始位置的小流团受到的浮力不再是使其返回初始位置, 而是更加远离初始位置, 即发生所谓对流运动。对流运动的出现不但可以传递大量的热量, 同时也将改变当地的温度结构, 甚至影响到当地的流体静力学平衡。

周期性的脉动是恒星中经常出现的一种剧烈活动现象, 解释产生脉动的原因则是恒星物理必须回答的一个基本问题。研究发现许多变星的脉动是和物质的透明性质密切相关的, 即是由所谓“ κ 机制”激发的。这种机制的工作原理可以这样来简单理解: 一般来说物质的不透明度正比于密度, 而反比于温度的 3.5 次方; 在恒星内部完全电离区, 一层流体向内运动时, 其密度和温度随之升高, 使得这层流体的不透明度下降, 这将引起辐射通量变大而使得更多的热能逃逸到恒星外壳, 即流层通过做功把机械能转变为热能, 从而耗散脉动。但是在部分电离区内, 一层流体向内运动时, 同样使得其内密度和温度随之升高, 但是这时物质将大量电离, 并把一部分热能转变为电离势能储存起来, 这样温度的升高将受到强烈抑制, 使得流层内不透明度有可能变大, 引起辐射通量变小而阻止热能逃逸到恒星外壳, 结果被阻挡的一部分热能转变为脉动的机械能而激发脉动运动。正因为不透明度在这里所起的关键作用, 这种激发机制才被冠以“ κ 机制”的名称。

脉动变星在 HR 图上往往占据特定的位置, 一般称为脉动不稳定带。对由 κ 机制激发的脉动来说, 激发区应该位于恒星外壳中适当的深度, 太深了被阻挡的辐射能只占内能的极小一部分, 形不成可观的功; 太浅了流层密度太低造成总功值太小, 不能抵消恒星内部的耗散。脉动不稳定带的位置敏感地依赖于恒星内部不透明度的结构。

除了恒星以外, 物质的不透明度还是研究吸积盘、星际物质等相关领域问题的一个重要环节。

2 决定恒星物质不透明度的物理过程

产生于恒星中心核内的热能通过辐射与对流等形式传递到恒星的表面。电磁辐射在穿越一层物质时会与物质发生相互作用。在恒星内部, 这种作用最常见的形式有以下几种: (1) 束缚-束缚跃迁: 辐射中光子的能量正好等于物质中原子、离子的两个特定能级的能量差, 电子吸收一个光子后从低能级跃迁到高能级, 形成一条谱线吸收。(2) 束缚-自由跃迁: 吸收一个光子后, 电子所获得的能量超过了它在原子、离子中的结合能, 因而成为自由电子, 并且超过的部分成为自由电子的动能。这种过程也称为光致电离过程或光电效应, 产生从某一频率开始的连续吸收。(3) 自由-自由跃迁: 在等离子体中, 自由电子在和离子碰撞改变运动方向时会吸收光子而得到附加动能, 并仍然处于自由状态。这种过程常常被称为韧致跃迁, 并产生连续吸收。(4) 电子散射: 位于辐射传播途中的自由电子在电磁波的电场作用下发生周期运动, 并向各方向进行辐射, 这种过程就称为 Thomson 散射。原传播方向的辐射流量会有所减弱, 但显然电子并没有从辐射中得到附加能量, 损失的辐射能将分布到其它方向上。经过上述这些物理过程的作用, 辐射在穿越一层物质后会有所减弱。可以预料, 减弱的程度与入射辐射的强度成正比, 而比例系数将由物质的性质确定, 这个系数就被定义为不透明度。方程 (1) 描述的是总辐射流对不透明度和温度梯度的依赖关系, 当然不透明度也应当是

辐射频率的某种平均值, 并且辐射强度大的频率应该占大的权重。在恒星结构演化研究中最常用的是不透明度的 Rosseland 平均值, 它采用了黑体辐射强度作为权重因子。因此也可以想到, 连续吸收是不透明度的主要组成部分, 而一条吸收线只能阻碍一个频率的辐射传递, 对不透明度的贡献不大。只有在一个宽的频率范围内存在密集的谱线覆盖, 才会对不透明度产生可观的贡献。

决定物质不透明度还有很多复杂的因素。例如, 不同的原子、离子有不同的能级结构, 氢原子和类氢原子、离子等简单粒子的能级结构可以从理论上确定, 对复杂的多电子粒子, 有时必须借助于实验方法才能确定其能级结构。电子在各能级上的占据规律也存在类似的复杂性。对单个原子、离子来说, 在热动平衡条件下, 各能级上电子的占据数服从 Boltzmann 方程和 Saha 方程。但在高密等离子体中, 离子间的距离有时会接近到其外圈电子轨道出现互相重叠, 并影响到电子在这些轨道上的占据规律。同样的问题还出现在电子在不同能态间的跃迁几率等其它复杂的物理过程中。当然, 不透明度还同物质的化学组成紧密关联。

3 第一代恒星物质不透明度

恒星物质的不透明度是由一系列复杂的物理规律决定的, 它的计算也是极其复杂的。一般来说, 各种吸收过程对不透明度的贡献同温度有非常密切的关系。当温度较低时, 原子没有电离或者仅仅是部分电离, 不透明度主要来自于束缚-束缚跃迁和束缚-自由跃迁产生的吸收。随着温度升高, 原子可能已近乎完全电离, 自由-自由跃迁成为不透明度中起支配作用的因素。但是当温度很高时, 感应发射会抵消这些吸收过程的作用, 而电子散射便起着支配作用。

散射对不透明度的贡献主要来自于电磁波驱动自由电子运动造成的 Thomson 散射, 它的散射截面是一个常数。对完全电离气体来说, 散射不透明度可以用下面近似公式计算^[18]:

$$\kappa_e = 0.2(1 + X) \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (2)$$

式中 X 是氢在总质量中所占的比重。

对理想气体来说, 假定其处于热动平衡状态, 粒子的运动速度服从 Maxwell 分布, 原子、离子的能级结构可以用 Bohr 原子模型处理, 并且电子在每个电离态上的占据数由 Saha 方程确定, 那么对产生连续吸收的束缚-自由和自由-自由跃迁可以近似得到 Kramers 不透明度公式^[18]:

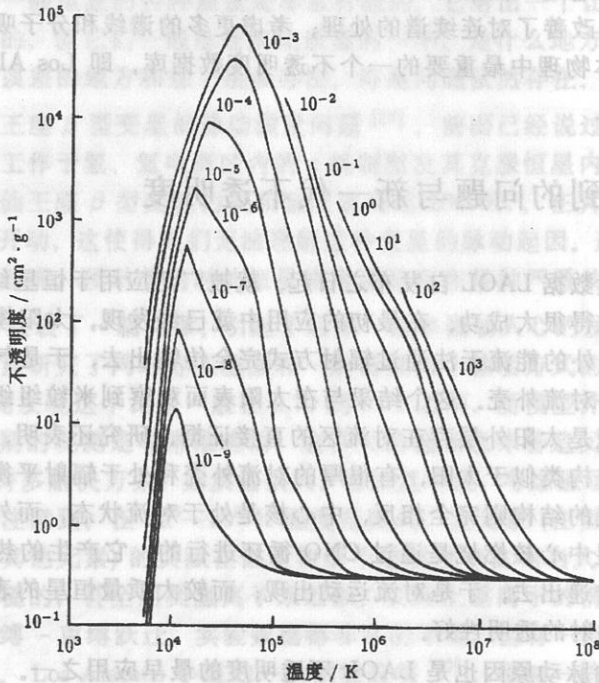
$$\kappa_a \propto \rho T^{-3.5} \quad (3)$$

对恒星来说, 具有线状谱的束缚-束缚跃迁对不透明度的贡献是复杂而难以准确确定的。最重要的一种情形是在温度很低, 例如低于 3000K 时, 原子将复合形成大量分子, 出现分子的转动跃迁和振动跃迁, 并由此形成由密集的谱线构成的宽吸收带。这种吸收带的存在是低温不透明度的主要来源^[1]。

鉴于不透明度在决定恒星结构问题上所发挥的重要作用, 尽可能准确地确定恒星物质的不透明度是构造能够同观测结果进行实际比较的恒星结构演化模型的一个关键步骤。这是一个非常复杂而繁琐的工作。在研究中得到广泛应用的第一代系统的恒星物质不透明度表出现

表 1 Aller 组成的元素成分表 (归一化到 1)^[2]

元素	质量丰度	数丰度
H	0.59603	0.858971
He	0.38388	0.139309
C	0.00283	0.000342
N	0.00093	0.000096
O	0.00843	0.000766
Ne	0.00599	0.000431
Na	0.00003	0.000002
Mg	0.00036	0.000022
Al	0.00003	0.000001
Si	0.00053	0.000027
Ar	0.00079	0.000029
Fe	0.00017	0.000004

图 1 第一代 Los Alamos 恒星物质不透明度^[21]

于 60 年代, 当时由 Cox 博士为首的研究小组在美国 Los Alamos 科学实验室通过大量计算, 发表了十二种不同化学组成的不透明度表^[15,11]。下面介绍对其中一种特殊化学组成 (Aller 组成) 计算得到的不透明度数据。Aller 组成是根据当时大量恒星表面元素丰度的观测值来确定的一组被认为是代表典型的星族 I 型恒星的元素丰度组成, 其中各种元素的具体成分比例由表 1 给出。Cox 等人的计算考虑了 Aller 组成中每一种元素的束缚-自由吸收、自由-自由吸收和电子散射, 考虑了 H⁻ 离子的束缚-自由和自由-自由吸收, 以及少量分子如 H₂⁺ 和 H₂ 的吸收过程; 不同于前人的是还考虑了束缚-束缚吸收对不透明度的作用。他们认识

到, 由于周围离子电场的影响, 每个离子的吸收线谱系会稍许偏离平均谱系位置, 这样总的谱线将会展宽, 并引起谱线吸收效应的急剧放大。在他们的计算中, 考虑的谱线数目从几十根到上万根。图 1 给出了他们实际计算得到的不透明度的数值, 其中每条线旁的数字代表密度的数值, 以 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为单位。

图 1 中有几个特征是值得一提的。在温度为 $10^4 - 10^5 \text{ K}$ 的区域内不透明度急剧增大是由于氢和氦电离释放出大量电子造成的, 这是因为束缚 - 自由吸收与电子密度成正比。温度进一步增大时, 原子基本上完全电离了, 不透明度也变得接近于 Kramers 公式的行为。高温端的不透明度变平是散射的特征。比较有光谱线吸收的结果, 发现在温度为 10^5 K 、密度为 $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为中心的一个区域内, 谱线吸收可以使不透明度最大增大三倍。重元素对不透明度的贡献主要在 10^6 K 以上温度区域, 其 K 层、L 层、M 层等内层电子在这里发生光致电离过程。

自从第一代 Los Alamos 不透明度发布以来, 这个小组一直在不断改进不透明度的精度。其中最主要的几项改进是: 根据新的测定, 铁在化学组成中的比例提高了十倍; 重新测定了一些能级的数值以及改善了对连续谱的处理; 考虑更多的谱线和分子吸收的作用等等。这一系列工作形成了天体物理中最重要的一个不透明度数据库, 即 Los Alamos Opacity Library (LAOL) [12-14,22,36]。

4 LAOL 遇到的问题与新一代不透明度

第一代不透明度数据 LAOL 自发布之日起, 就被广泛应用于恒星结构、恒星演化、恒星振动等研究中, 并取得很大成功。在最初的应用中就已经发现, 太阳模型中的氢、氦电离区内不透明度很大, 向外的能流无法通过辐射方式完全传输出去, 于是气体物质出现上升和下降运动, 形成很厚的对流外壳。这个结果与在太阳表面观察到米粒组织很好地吻合起来, 人们早就认为米粒组织是太阳外层存在对流区的直接证据。研究还表明, 在主序阶段, 质量比太阳还小的恒星的结构类似于太阳, 有很厚的对流外壳和处于辐射平衡状态的核燃烧核; 而质量大于太阳的恒星的结构则完全相反, 中心核是处于对流状态, 而外壳是辐射平衡的。这是因为较大质量恒星中心核燃烧是通过 CNO 循环进行的, 它产生的热量比 p-p 链多, 无法完全通过辐射方式传递出去, 于是对流运动出现; 而较大质量恒星的表面温度较高, 密度较低, 因而其外壳对辐射的透明性好。

检验造父变星的脉动原因也是 LAOL 不透明度的最早应用之一。1926 年 Eddington 在他的《恒星内部结构》一书中就阐述了不透明度对穿越物质的辐射所起到的阀门作用 [20], 但当时人们对辐射怎样穿过物质了解得很少, 只知道物质被压缩时变得更透明, 并将熄灭脉动。Zhevakin 于 1953 年在一篇文章中指出, 恒星外层物质的透明性质和内核物质的正好相反, 被压缩时变得更不透明, 从而有利于激发造父变星的脉动 [38]。但是他的这个建议没有引起人们的注意。利用 LAOL 不透明度, Baker 和 Kippenhahn 于 1962 年分析了一颗 $7 M_{\odot}$ 恒星演化通过造父不稳定带时的脉动情况, 发现模型每次穿过不稳定带时就会振动, 振动周期与观测到的完全一致, 并且激发脉动的因素正是氦电离区内不透明度所起到的阀门作用, 他们把它称为“ κ 机制” [7,16]。类似的研究很快在盾牌座 δ 型变星 [8,35]、天琴座 RR 型变星 [6,24]、白矮变星 [19,34,37] 等脉动变星上展开, 最终弄清了 HR 图上所谓“经典脉动不稳定

带”的成因就是 Eddington 早就考虑过的不透明度阀门机制。

随着恒星物理研究的发展,到了 80 年代初期,人们也开始注意到一些非常重要的问题很难用当时的标准理论解释。其中一个例子是著名的造父变星质量矛盾问题^[9]。测定恒星的质量不是一件轻而易举的工作,特别是孤立的恒星。现有的常用方法都是间接测定。如通过观测可以确定恒星的光度、有效温度和化学组成,它将在 HR 图上占据一个点;然而对于一种特定的化学组成,不同质量的恒星在 HR 图上的理论演化轨迹是不同的,通过比较观测点与一组演化轨迹的位置,可以推断被测恒星的质量,一般称这种方法确定的质量为演化质量。对一颗脉动变星来说,脉动的周期又是一个可观测量,它将在周期-光度图上占据一个确定的位置;当然不同质量恒星理论计算得到的周期-光度关系是不同的,比较观测点与一组不同质量恒星的周-光关系,可以推断出被测变星的质量,而这种方法确定的质量常称为脉动质量。有时可以观测到一颗脉动变星上存在两个脉动周期并形成拍频现象,利用这两个观测数据和与前相似的方法,还可以得出一个独立的质量值,有时称为脉动“拍频”质量。比较这些不同方法确定的同一颗恒星的各种质量是非常有趣的,它给出一个让人费解的结果,即各种脉动质量是很接近的,但它们一般总是演化质量的一半。是什么地方弄错了?天文学家们检查了各种可能存在误差的地方和想了很多办法,可是问题依然存在。

另一个困难是仙王座 β 型变星的脉动激发问题^[17]。前面已经说过,位于经典脉动不稳定带上的变星是由于工作于氢、氦电离区内的 κ 机制激发其克服恒星内核中的耗散效应而产生脉动运动的。但是仙王座 β 型变星的表面温度就高达 20000K,在其内部物质几乎是完全电离的, κ 机制无法开动,这使得人们无法理解这种变星的脉动起因。这两个问题成为 80 年代恒星物理研究的拦路虎,预示着当时的恒星物理理论存在某种严重缺陷。

1982 年, Simon 发表了一篇文章,引起了后来一连串激动人心的发现。在这篇只有四页的文章中, Simon 着重研究了同时存在基频和一阶谐频两个脉动方式的造父变星这两个周期的比值问题^[33]。观测发现这个比值一般在 0.70 到 0.71 之间,而模型计算得到的一般为 0.74 左右。通常对脉动周期的观测是非常准确的,这样大的偏差意味着造父变星的理论模型存在问题。前人曾提出过许多解决方案,如质量损失、增加氦丰度、考虑磁场等等,但都没有得到普遍接受。而 Simon 注意到,在 10^5 — 10^6 K 温度范围内,重元素(在恒星结构演化研究中一般指除氢和氦以外的其他元素)的贡献在恒星物质不透明度中占相当大的比重。LAOL 对重离子的处理是相当粗糙的,甚至用类氢离子来近似。实际上重离子的情况是相当复杂的,无论是光致电离还是束缚-束缚跃迁,实验数据都非常的不足。但有一点可以肯定,重元素的影响是加大不透明度。Los Alamos 小组的一些试验表明^[27],增加一些窄的谱线就可以增大不透明度达 40%。Simon 认为,重元素对不透明度的贡献可能比当时估计的大 2—3 倍。他用经过这样人为加大的不透明度重新构造了造父变星模型,结果发现得出的脉动周期比观测完全符合。表 2 给出了他的一个计算结果。他认为这种增大还可能造成仙王座 β 型变星的脉动激发。Simon 工作的重要意义在于,他不但确切地指出了在 10^5 — 10^6 K 温度范围内不透明度应当增大 2 至 3 倍,而且明确提出原来不透明度偏低是由于重元素的处理不当造成的。以后的发展表明, Simon 的思想是极有预见性的,而后人正是沿着这一思路最终取得突破性进展的。

Simon 的看法提出以后,类似的所谓“不透明度实验”对于各种类型的脉动变星广泛展开,结果都肯定了 Simon 的结论^[3,4]。与此同时,精确处理重离子辐射吸收过程的工作也在

加紧进行。1988 年, Mihalas、Hummer 和 Dappen 考虑了库仑相互作用对原子中电子在各

表 2 Simon 计算的造父变星周期比^[33]
 $(M = 5M_{\odot}, L = 1100L_{\odot}, T_e = 5800K, X = 0.70, Z = 0.02)$

模型	P_0	P_1/P_0
正常不透明度	3.126	0.742
加大不透明度	3.306	0.713

个能级上的占据规律的影响, 提出了 MHD 物态方程^[23,28]。1992 年, 美国 Lawrence Livermore 国立实验室的 Rogers 和 Iglesias 改进了重元素的原子构型模型, 在 Simon 预期的温度范围内将不透明度的数值提高到原来的三倍左右。Rogers 和 Iglesias 认识到, LAOL 用来处理重元素原子构型的类氢离子模型只对满电子壳层外只有一个电子时是适用的, 多于一个电子时是不正确的。这时由于电子之间的自旋角动量与轨道角动量相互耦合(L-S 耦合), 能级呈现出复杂的多重态结构, 使得谱线的数目大大增加。特别是对铁的 M 层电子来说, 单个电子自身的自旋与轨道角动量相互作用很强, 以至于出现所谓的“j-j”耦合, 进一步加剧了谱线的分裂。例如从一个构型到另一个构型的跃迁, j-j 耦合可以使得谱线的数目从 L-S 耦合的 10000 条增加到 50000 条。他们的计算表明, 铁 M 层电子的自旋-轨道相互作用是他们给出的不透明度比过去大的主要原因^[25]。Rogers 和 Iglesias 计算了大量不同化学组成的不透明度数据, 并称之为 OPAL 不透明度^[31]。表 3 是用来计算 OPAL 不透明度的重元素以质量计的丰度比, 由 Grevesse 在 1991 年给出。图 2 比较了 OPAL 和 LAOL 不透明度。

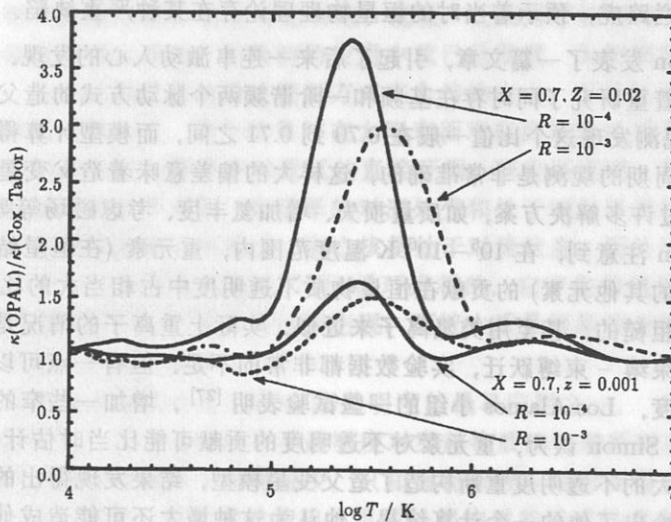


图 2 OPAL 不透明度与 LAOL 不透明度的比较^[31]

线旁的标注中, X 代表氢的质量丰度, Z 代表重元素的丰度, $R = \rho/T_6^3$, ρ 是密度, T_6 是以百万度为单位的温度

在图 2 中可以看到, 大多数地方两种不透明度的差别在 30% 以内。但在 $10^5 - 10^6$ K 温度范围内, OPAL 比 LAOL 不透明度明显增大。对氢丰度 $X = 0.70$ 、重元素丰度 $Z = 0.02$ 来说, 最大可达近 4 倍, 位于 2.5×10^5 K 温度处。不透明度的增大同重元素的丰度密切相关,

表 3 Grevesse 组成的元素成分表 (归一化到 1)^[31]

元素	质量丰度
C	0.24714
N	0.06208
O	0.52837
Ne	0.07637
Na	0.00127
Mg	0.02360
Al	0.00187
Si	0.02209
S	0.00179
Ar	0.00230
Ca	0.00147
Fe	0.02164

当重元素丰度 $Z = 0.001$, 不透明度的增大只有 1.5 倍。因为不透明度的增大主要是铁引起的, 可以预料其与重元素丰度成正比。实际上有两个小组几乎同时在考虑不透明度的改进, 一个就是 OPAL 小组, 另一个叫做 Opacity Project (OP) 小组。1994 年, OP 不透明度数据发布, 除了在温度大于 10^6 K 的区域小有不同, 二者符合得非常好^[32]。这些数据构成了新一代的恒星物质不透明度。

新一代不透明度在恒星模型中的应用得出了人们期待已久的结果, 它成功地解决了造父变星的质量矛盾, 解决了双脉动方式造父变星和盾牌座 δ 型变星的周期比问题, 解释了仙王座 β 型变星的脉动激发问题^[10,26,30]。这一系列令人瞩目的成就成为近几年天体物理学的热门话题和一系列国际会议的中心议题。

5 仍然存在的问题

经过几年的研究比较, 我们发现即便是使用新一代不透明度数据, 恒星结构演化和脉动模型在与观测对比时仍然存在一些严重问题。比较用 OPAL 和 OP 不透明度构造的标准太阳模型, 发现二者有很大差异。分别利用这两种不透明度, 取重元素丰度 $Z = 0.02$, 构造了 $1M_{\odot}$ 零年龄主序星模型, 并通过调整初始氦丰度 Y 和外壳对流混合长参数 α , 使模型在今天的太阳年龄具有观测到的光度、半径和有效温度值。这两个模型的一些数据由表 4 给出, 其中 T_c 、 ρ_c 、 X_c 为太阳中心温度、密度和氢丰度, d_{con} 、 T_{con} 为对流层深度和底部温度, Cl、Ga 为氯和镓探测到的中微子流量, SNU 为太阳中微子单位。OPAL 太阳模型与其他人计算得到的标准太阳模型很相似, 而 OP 太阳模型给出相当低的中微子流量、相当低的初始氦丰度和略浅的对流区。

表 4 标准太阳模型结果

Model	α	Y	T_c	ρ_c	X_c	d_{con}	T_{con}	Cl	Ga
			$/10^7$ K	/g			$/10^6$ K	/SNU	/SNU
OPAL	1.83	0.279	1.56	149	0.33	0.279	2.18	7.96	140
OP	1.90	0.223	1.49	145	0.39	0.268	1.98	3.83	113
中微子流量观测值 ^[5]								2.55	79

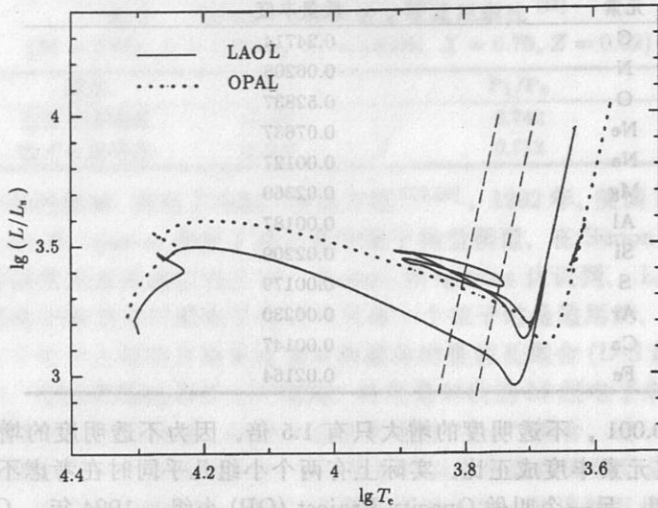


图3 利用 LAOL 和 OPAL 不透明度计算一颗 $7M_{\odot}$ 恒星在 HR 图上的演化轨迹

两条垂直虚线以内区域是造父变星在 HR 图中所处的位置

我们还比较了利用 OPAL 和 LAOL 不透明度构造的 $7M_{\odot}$ 恒星模型在 HR 图上的演化情况。我们用经过修改的 Kippenhahn 恒星演化程序进行计算，并取初始化学组成为典型的星族 I 型 ($X = 0.70$, $Z = 0.02$)，外壳对流混合参数 $\alpha = 1.8$ ，计算结果见图 3。可以看到，和 LAOL 模型计算结果相比较，OPAL 模型的光度较高，红巨星和渐近巨星分支的位置较红。用 OPAL 不透明度计算出的主序宽度也略宽于用 LAOL 不透明度计算的。值得注意的是，此前的研究表明，中等质量恒星演化的一个显著特点是在中心氦燃烧阶段恒星模型在 HR 图上出现从红巨星演化到蓝巨星又返回红巨星的来回移动现象，就象图 3 中 LAOL 模型所表现出来的那样。从观测的角度来说，太阳附近的恒星计数表明红巨星和蓝巨星的数目是相当的，这就要求理论计算出的恒星模型在红巨星和蓝巨星阶段度过相仿的时间。表现出从红到蓝来回移动特征的模型基本满足这个要求。但是 OPAL 模型就完全不存在来回移动的演化特征，模型作为一颗红巨星度过其全部中心氦燃烧时期，然后演化进入渐近巨星分支。这样的模型在红、蓝巨星的计数问题上与观测结果矛盾。特别应该强调的是，模型在从红到蓝或从蓝到红的移动过程中将穿过造父不稳定带而成为一颗造父变星。模型由主序演化过来而第一次穿过造父不稳定带时所花的时间很短，观测到它的几率不大，故此一般认为造父变星应该是处于氦燃烧阶段蓝红来回移动时期。OPAL 模型完全不存在来回移动的演化特征，也就没有机会看到它成为一颗造父变星。实际上造父变星的数目是很多的，OPAL 模型完全不能满足造父变星在星团中的计数特征。这些问题极可能预示着，新一代不透明度数据有可能仍然存在相当大的误差。这个问题的研究一旦获得进展，将具有重大的科学意义。

6 总 结

恒星物质的不透明度在恒星物理研究中具有重要作用。随着量子力学和计算机技术的发

展, 各种复杂混合物的不透明度数据被计算出来, 并应用于恒星结构演化等方面的研究中。与大量观测事实比较发现, 早期的不透明度数据存在较大的误差, 并且天文学家可以推断出存在误差的温度、密度范围和应修正的幅度。根据天文学家给出的线索按图索骥, 物理学家找到了问题的根源并改进了不透明度的精度。然而我们认为问题并没有完全解决。新一代不透明度的公布不应该是研究的终结, 而只是新一轮研究的开始。我们期待着今后不断出现激动人心的发现。

参 考 文 献

- 1 Alexander D R, Ferguson J W. *Ap. J.*, 1994, 437: 879
- 2 Aller L H. *The Abundance of the Elements*. New York: Interscience Publishers, 1961
- 3 Andreasen G K. *Astron. Astrophys.*, 1988, 201: 72
- 4 Andreasen G K, Petersen J O. *Astron. Astrophys.*, 1988, 192: L4
- 5 Bahcall J N. *Ap. J.*, 1996, 467: 475
- 6 Baker N. In: Stein R F, Cameron A G W eds. *Stellar Evolution*. New York: Plenum Press, 1962. 333
- 7 Baker N, Kippenhahn R. *Z. Astrophys.*, 1962, 54: 114
- 8 Chevalier C. *Astron. Astrophys.*, 1971, 14: 24
- 9 Cox A N. In: Cox J P, Hansen C J eds. *Pulsations in Classical and Cataclysmic Variable Stars*. Boulder: JILA, 1982. 157
- 10 Cox A N, Morgan S M, Rogers F J et al. *Ap. J.*, 1992, 393: 272
- 11 Cox A N, Stewart J N. *Ap. J. Suppl.*, 1965, 11: 22
- 12 Cox A N, Stewart J N. *Ap. J. Suppl.*, 1970, 19: 243
- 13 Cox A N, Stewart J N. *Ap. J. Suppl.*, 1970, 19: 261
- 14 Cox A N, Tabor J E. *Ap. J. Suppl.*, 1976, 31: 271
- 15 Cox A N, Stewart J N, Eilers D D. *Ap. J. Suppl.*, 1965, 11: 1
- 16 Cox J P. *Ap. J.*, 1963, 138: 487
- 17 Cox J P. In: Madore B F ed. *Cepheids: Theory and Observations*, IAU Colloq. No.82, Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 126
- 18 Cox J P, Giuli R T. *Principles of stellar structure*. New York: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1968. 181; 373; 378; 380
- 19 Dziembowski W, Koester D. *Astron. Astrophys.*, 1981, 97: 16
- 20 Eddington A S. *Internal Constitution of the stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 1926
- 21 Ezer D, Cameron A G W. *Icarus*, 1963, 1: 422
- 22 Huebner W F, Merts A L, Magee N H et al. *Los Alamos Scientific Report*, 1977, LA-6760-M
- 23 Hummer D G, Mihalas D. *Ap. J.*, 1988, 331: 794
- 24 Iben I. *Ap. J.*, 1971, 166: 131
- 25 Iglesias C A, Rogers F J, Wilson B G. *Ap. J.*, 1992, 397: 717
- 26 Kiriakidis M, El Eid M F, Glactel W. *M.N.R.A.S.*, 1992, 255: 1
- 27 Magee N H, Merts A L, Huebner W F. *Ap. J.*, 1975, 196: 617
- 28 Mihalas D, Dappen W, Hummer D G. *Ap. J.*, 1988, 331: 815
- 29 Mihalas D, Mihalas B W. *Foundations of radiation hydrodynamics*. Oxford: Oxford University Press, 1984. 459
- 30 Moskalik P, Dziembowski W A. *Astron. Astrophys.*, 1992, 256: L5
- 31 Rogers F J, Iglesias C A. *Ap. J. Suppl.*, 1992, 79: 507
- 32 Seaton M J, Yan Y, Mihalas D et al. *M.N.R.A.S.*, 1994, 266: 805
- 33 Simon N R. *Ap. J.*, 1982, 260: L87
- 34 Starrfield S G, Cox A N, Hodson S W et al. *Ap. J. Lett.*, 1983, 268: L27
- 35 Stellingwerf R F. *Ap. J.*, 1979, 227: 935

- 36 Weiss A, Keady J J, Magee N H. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1990, 45: 209
- 37 Winget D E, van Horn H M, Tassoul M Ap. *J. Lett.*, 1982, 252: L65
- 38 Zhevakin S A. *Russian A. J.*, 1953, 30: 161

Opacity for Stellar Matter

Li Yan

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

Abstract

Opacity for stellar matter is of fundamental importance in the study of many basic problems of stellar physics, such as the stellar structure, evolution, and oscillations. The physical processes which determine the stellar opacity are briefly introduced, and the history of the widely used opacity data, LAOL, is reviewed, laying special emphasis upon its applications to problems of the stellar structure and pulsations, which have been solved and have not been solved. Then the newly published opacity data, OPAL, are discussed concerning its physical improvements over the LAOL and its successful applications to problems which can not be solved by the LAOL, and the still unsolved problems in the stellar physics are mentioned as well.

Key words stars: interiors—stars: opacity—stars: evolution