

太阳物理学

A. B. 謝維尔內 著

科学出版社

太阳物理学

A. Б. 謝維爾內 著

李 竟 譯

科学出版社

1960

A. Б. СЕВЕРНЫЙ
ФИЗИКА СОЛНЦА
Изд. АН СССР, 1956

內 容 簡 介

本书的作者用生动的語言介紹了我們这个行星系的中心——太阳。全书共分五章。第一章介紹了太阳在宇宙中所占的地位，太阳的质量、大小、溫度等。第二章討論目前認識太阳的最有效的方法(光譜法)及用这个方法所得到的关于太阳物質的知識。第三、四章描述了太阳的物理結構和物理过程，这里生动地介紹了許多有趣的天象，如太阳的黑子、色球及色球爆发、太阳射电等等。最后一章專門討論与我們有切身关系的問題——太阳上的物理过程对地球的影响，从这一章中，讀者可以得知地球上許多重要現象(如极光、宇宙綫、短波无綫电的反射等)的起源。

本书可供一切对太阳感兴趣的讀者閱讀。

太 阳 物 理 学

A. Б. 謝維爾內 著

李 竞 譯

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1960 年 10 月第 一 版

1961 年 12 月第二次印刷

(京) 10,001—14,000

书号: 2258 字数: 102,000

开本: 850×1168 1/32

印张: 4

定价: 0 60 元

目 录

引言.....	1
第一章 作为一个宇宙天体的太阳。太阳在宇宙中的地位.....	2
日地距离.....	2
太阳的质量.....	4
太阳的亮度和辐射能.....	5
太阳表面温度.....	8
太阳在羣星中的地位.....	9
第二章 太阳光譜及其識別.....	13
研究太阳光譜的仪器.....	13
太阳的連續光譜.....	18
光譜綫.....	20
太阳的連續光譜和夫琅和費譜綫的物理本性.....	21
太阳光譜中化学元素的証认.....	24
太阳大气的化学成分.....	28
太阳上的同位素.....	31
太阳上的氦.....	32
太阳和其他宇宙天体的化学成分的比較.....	33
譜綫位置 and 太阳上气体的运动.....	34
太阳的自轉.....	35
爱因斯坦效应.....	36
第三章 太阳的物理結構.....	38
光球的辐射平衡.....	38
米粒組織和对流作用.....	40
太阳色球.....	43
日冕.....	50
第四章 太阳上的物理过程.....	59
研究太阳上物理过程的近代方法.....	59

太阳黑子.....	66
太阳磁场.....	69
光斑和谱斑.....	76
纤维状组织和日珥.....	81
色球爆发(耀斑).....	93
太阳射电.....	98
第五章 太阳上物理过程在地球上的表现.....	107
太阳对地球磁场的作用。极光.....	107
太阳微粒辐射.....	110
太阳紫外辐射和它对地球大气的作用.....	113
参考文献.....	122

引 言

太阳可以看作是一个规模巨大的物理实验室。在太阳上的特高温度和极大压力条件下，进行着在地球上不可能以这种规模进行的一些物理过程（虽然氢弹爆炸的过程——氢核聚变为氦——也是太阳内部发生的一种现象的再现）。

太阳的研究很早以前就开始了，已经累积了许多宝贵的资料。然而，我们现在还不能解释太阳上的一切物理现象。可能，在未来的物理学中所要出现的新内容就归结于这些现象。

对太阳的研究给我们提供了一把了解恒星物理学、以及认识一部分恒星演化的钥匙，因此，它有着重大的实际意义。我们的太阳是生命和我们所掌握的能量储藏的主要源泉。

太阳直接影响着地磁和地球高层大气，创造和破坏着无线电传播的可能性。

在本书中，我们准备讨论那些至今还研究得不够充分的问题，例如，太阳对地球气候和气象趋势的影响，等等。

我们尽量使这本书不仅能与天体物理学无关的学者，并且也能使爱好科学的广大读者感到兴趣。

但是，我们应该预先敬告读者：近代太阳物理学的某些问题和近代原子物理学、尤其是原子理论，有极为密切的联系，因此，在阅读时，即使是对于这些方面的通俗叙述也还是需要认真的思考。第二章的某些段落（连续光谱和谱线的物理性质）和第三章的一些叙述（光球的辐射平衡）基本上就是这类性质的章节。

第一章

作为一个宇宙天体的太阳。 太阳在宇宙中的地位

日 地 距 离

我們都知道，地球在围绕太阳作周年运行时描绘出一个椭圆轨道；太阳居于椭圆的一个焦点。因此，日地距离在一年中是不断地变化着的。我們將日地距离的最大值和最小值之和的一半（即椭圆的半长轴），称为平均日地距离。测定日地距离的一般方法是在地形测量中所通用的，即通过测量已知基线 AB 两端所张的角度来测定到难以到达的客体的距离的方法。

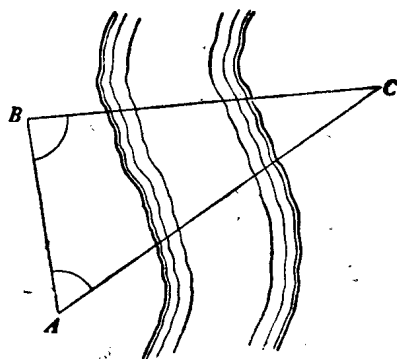


图1 到难以到达的客体的距离的测定

首先，在地球表面选出两点作基线 AB ，测量 A 角和 B 角，求出 C 角；解三角形，便得出所求的距离 AC 或 BC 。显然，基线 AB 越长，这个方法的精确度就越高。地球的大小是已知的，因此在地球上所选定的基线 AB 的长度可以测定。即使取地球直径（12755.94 公里）

作为基线 AB ，那么，在太阳上的一点 C 对于地球直径所张的角也只有 17.6 弧秒。这个角度的一半值称为太阳周年视差。太阳视差的一倍相当于约在一米远之处一根头髮所张的角度。测量这样大小的角度，精确度无法大于 0.1 弧秒，这就导致日地距离的数值

有巨大的誤差(几百万公里)。

因此,天文学家曾采用間接方法来測定日地距离。例如,可以在地球上不同地点观测金星凌日,记录居于日地之間的金星和日面边缘相切的时刻。这一天象的观测可以測定太阳視差。不过,金星凌日是一个非常罕見的天象:最后的两次凌日发生于1874和1882年,下两次将出現于2004年6月8日和2012年6月6日。

分光观测法是一个最簡便又是最近代化的日地距离測定法。下面我們就要闡明如何用分光仪来測定一个光源的运动速度和运动方向。图2的圓圈表示地球的軌道, a , b , c 三点表示地球在軌道上的三个不同位置, d 是一个极遙远的恆星,当地球处在 b 点时,它正居于和太阳相反的一边。由于分光仪所給出的只是速度沿視綫方向的分量(远离观测者或趋近观测者),所以,当地球处在 b 点时,我們測量的是

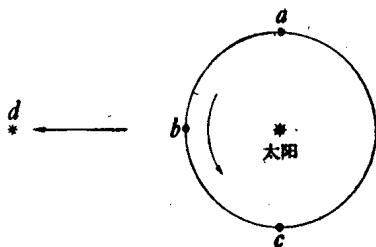


图2 日地距离的分光測定

恆星本身的速度。当地球处在 a 点时,我們測出的是恆星速度減去地球速度(如果恆星是离开地球而运动的),当地球处在 c 点时,則是恆星速度加地球速度。我們如果从在 a 点和 c 点所求出的两次測量中,減去在 b 点所測得的恆星速度,得到的便是地球沿軌道运动的速度了。这个速度是29.7公里/秒。我們將速度乘上一年中的秒数,得出地球軌道的长度。再用 2π 去除这个数值,就求出日地距离。

用各种方法測定日地距离的結果都彼此一致,它是等于14950万公里(誤差約20万公里)。这样巨大的距离我們很难想象。天文学家楊氏(Young)在他的著作“太阳”中提出了一个非常有趣的比喻:“我們假想有一个长臂小儿,他的手可以摸得着太阳。他伸手触了太阳一下,便烧伤了。但是,要到他活到龙鍾高龄的时候,才会

觉得手痛。因为按照赫姆霍兹(Helmholtz)的说法,神经刺激的传播速度约为每秒 30 米”。声音若能在星际空间传播,走完这段距离需要 14 年;炮弹要飞上 9 年;每小时 800 公里航行速度的飞机要飞上 21 年。传播速度为每秒 30 万公里的光线和无线电波经过这段距离一共需 8 分钟。

知道了日地距离,便很容易求出太阳的直径。为此,我们须知道太阳圆面对于地球的张角。这个角度略大于半度,大约相当于我们放在伸直了的手上的一支香烟的张角,这时,香烟几乎正好遮住太阳的圆面。将这个角度乘上日地距离,求得太阳直径等于 140 万公里,即比地球直径大 100 倍以上。

太阳的质量

如果已知地球质量,根据万有引力定律,便可以测定太阳上物质的数量。引力控制地球沿着轨道运行。假如引力的作用一旦中断,地球就会在瞬间内沿着和轨道相切的直线离开太阳飞去。

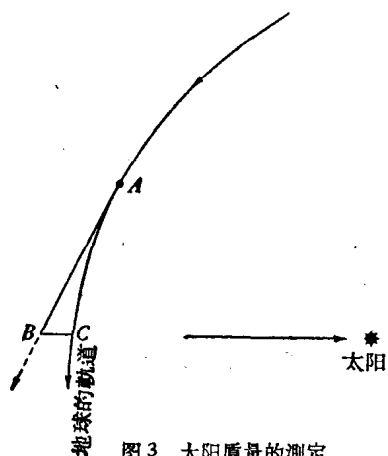


图 3 太阳质量的测定。

然而,引力时时地使地球回复到椭圆轨道上,太阳在每一秒内,大约使地球离开直线 AB 偏离一段距离 $BC = 3$ 毫米(图 3)。直线 AB 即当引力不存在时,地球运行所走的轨道。地球似乎落向太阳的这一现象完全和在地球重力作用之下物体落向地球

的现象相似。我们都知道,落向地球的物体,在第一秒中,经过的距离是 498 毫米。这两段距离——3 毫米和 498 毫米——显然和太阳在离地球这么远处的重力加速度以及地球在地球表面处的重力加速度成正比。因为重力加速度和主体的质量成正比,和被吸

引物体的距离平方成反比,所以我們立即可以計算出,太阳質量为地球質量¹⁾的 329400 倍,即 2.25×10^{27} 吨。

太阳質量是所有大行星質量总和的 740 倍。我們已知太阳的直径大小,因此,用太阳体积去除太阳質量,便得到太阳的平均密度,它是水密度的 1.4 倍。由于太阳是一个熾热的气体球,所以在太阳中心,由于外层的巨大压力,密度要大些;在太阳的外层,密度則小得多。通常我們所談的只是平均密度。

太阳的亮度和輻射能

大家都知道,太阳非常光亮,我們不能直視它,誰也不愿冒着烧瞎眼睛的危險。太阳的亮度究竟有多大呢?不久以前,我們在日常生活中采用烛光来测量亮度:我們曾說,100 烛光的灯,500 烛光的灯。現在我們更常說 100 瓦的灯或 500 瓦的灯。烛光和瓦之間有重大的差別。第一个名詞是指灯在单位時間內在可見光区所輻射的能量(所謂光強),第二个名詞則是灯在单位時間內在可見光区以及非可見光区(紫外光和紅外光)所輻射的总能量。因此,假如我們感兴趣的是眼睛可看到的太阳的(目視)光強,那么我們可以取一支烛的輻射能量作为光強单位。比較任一光源在白色屏上产生的照度和一支烛在距离一米远的同一屏上产生的照度即可以判断出該光源的光強。如果已知光源的照度是一烛光照度的若干倍,又已知光源和影屏的距离,就可以求出以烛光表示的光源的光強,因为照度和距离的平方成反比。测量一烛在一米远的屏上的照度,再测量太阳的照度(为了达到这一点,必須大大地減弱它的光,例如用黑玻璃即可),我們就能算出太阳在天頂投在屏的照度为一烛光的 30000 倍,即它的照度約为 30000 米烛光。我們已知日地距离(14950 万公里),因此便得到太阳的总光強約为 2.5×10^{27} 烛光。太阳在天頂时,地球大气大約使太阳光減弱 20%。計入这个減光数值之后,太阳的光強便为 3×10^{27} 烛光。用太阳的表面积

1) 地球的质量是 6.2×10^{21} 吨。

去除这个数字，得到太阳的一平方厘米表面的光强(表面亮度)约为 50000 烛光。所以，太阳的表面亮度比轉炉中白热的金属表面亮度亮 5000 倍。

但是，天体物理学所感兴趣的不是这一个量，而是太阳的总辐射能量，即瓦数(而不是烛光数)。为了能测量总能量，必须拥有对各种颜色都同样灵敏的辐射接收器。我们肉眼只能感受到总辐射能的一部分，它对紫外光、极红光和红外光都不敏感。目前有两种测量总能量的方法。第一种以运用温差电偶为基础，即测量不同原材料所制的两个导体(铜和铁，铋和锑)的焊接处和两个导体的冷端之间的温差所引起的电流。第二种是直接测量装水的特制容器所吸收的太阳热量。第一种方法所用的仪器称为辐射计，第二种称为太阳热量计。辐射计中有一个放在抽出了空气的容器中的温差电偶。把一个适于吸收辐射的涂黑小圆盘接到温差电偶上。金属导线的空端引到容器之外，接到一个灵敏电流计上。小圆盘所吸收的辐射使小圆盘本身和温差电偶发热。在温差电偶中产生的电流和辐射能成正比。这类辐射计的灵敏度是如此之高，以致于利用现代大型反射望远镜就可以测量恒星的总辐射能量。如果进行太阳辐射能和总辐射能量已知的电灯的比较测量，则可知在地球大气外围处的太阳总辐射能量约为每平方米 1.3 千瓦。把这个数字乘上半径为地球轨道的球体的表面积，我们便求出太阳辐射到空间的总能量等于 3.7×10^{25} 瓦(落在地球上的只是这个数量的二十亿分之一)。我们再用太阳的表面积去除这个数字，得出每平方厘米太阳表面所辐射的能量约等于 6000 瓦。有时用尔格来表示这些量更为方便：太阳的总辐射能为 3.7×10^{33} 尔格/秒，单位表面的辐射是 6×10^{10} 尔格/厘米²·秒。为了描述太阳辐射所损失的能量究竟有多大，我们打一个比方：太阳在每秒中所损失的辐射热相当于在一秒内燃烧 115 亿吨煤所产生的热。太阳每秒中辐射的能量足够在一小时内融解并烧沸 25 亿立方公里的冰，即可融解地球周围 1000 公里厚的冰层！

太阳热量计有许多种类型，它们都具有一个装水的特殊容器

(有些太阳热量計中的水是循环流动的), 以某种方式絕热[例如, 盛在杜瓦 (Dewar) 瓶中]。容器的接受日光的表面涂黑。利用十分灵敏的温度計, 可以測量太阳輻射供水的熱量。

这类測量工作需要精密計算地球大气的吸收作用。白昼天空亮度和大气吸收作用之間可能有密切的关系: 每一个人都能察觉到, 有烟雾时, 天空要亮一些。如果有一个可以同时測量天空亮度的太阳热量計, 我們就能同时測定出地球大气的吸收。这种吸收作用有时逐日有显著变化。終生致力研究太阳輻射的美国太阳物理学家阿包特 (Abbot) 設計了一种这类的仪器, 即所謂温差电偶太阳輻射計 (пиранометр)。阿包特的多年測量研究指出, 在地球大气边缘处, 太阳的輻射能一般都保持为一个相当恆定的值。这个量称为太阳恆量, 即每一分钟中, 落于和太阳輻射垂直的一平方厘米面积上的太阳总輻射能量。它平均等于每分钟每平方厘米 1.94 小卡。这个量 (如果用瓦为单位表示) 和前面所說的用輻射計測定的数值相互吻合。

这个“恆”量在百分之几的限度內呈范围不大的变化。最近 20 年以来的測量資料表明, 太阳恆量的变化可能和太阳活动 (見下文) 的 11 年周期有些关系: 当太阳黑子众多时期, 太阳輻射能也有所增大 (到 1.96 小卡)。太阳恆量可能还有一种約以一年为周期的 (周期为 11.2 月) 十分微弱的变动。这样看来, 我們的太阳还是一个亮度有变化的星——变星; 不过, 这种变化是很不显著的。这种现象是相当奇怪的, 因为我們所观测到的太阳上巨大的物理过程, 完全可以使我們想到太阳的輻射能会有强烈得多的变化。

但是, 主要由于沒有精确了解地球大气的吸收作用, 关于太阳恆量的变化的資料还没有最后确定。特別令科学家伤脑筋的是地球表面 20—50 公里高空处地球大气內所含的臭氧。臭氧吸收掉波长短于 0.29 微米的所有的太阳紫外輻射。臭氧的含量也有变化, 于是便引起太阳常数測量值的变化。此外, 这些臭氧及地球大气中所含的水蒸汽, 一氧化氮和二氧化碳也强烈地吸收太阳紅外輻射 (不过, 紅外輻射中的太阳輻射能只有可見光的能量的一小部

分)。所以，只有上升到离地球表面很高的高空进行测量也許才能最終地解决太阳能是否变化的問題。已經利用气球（上升到 15—20 公里高空）进行过这种测量的嘗試，但是还没有获得确定的結果。不久之前才开始的、利用 V-2 型高空火箭对太阳輻射进行的研究对于解决这个問題最有价值，关于这个問題我們下面还要提及。

太阳表面每平方厘米輻射的能量約为 6000 瓦。物質需要烧热到多高的温度，才能輻射出这么巨大的能量呢？

太阳表面温度

在輻射的基本定律发现之前的一段长时期內，人們对于太阳的温度曾提出了各种各样的假設。为了更清楚地明了太阳温度的問題，我們必須稍微离开一下本題，談一談物理光学。我們都知道，普通的“日光”是各种顏色的輻射的混合物。大自然的各種物体的色彩（顏色）是由于該物体对各种不同顏色的光綫的吸收有所不同。投射在有色物体上的白光在离开該物体或是被它反射出时，失去了那些該物体吸收得最強烈的光綫。所以，一块玻璃看来通常是白的，沒有色彩；而一块煤烟或煤炭看上去是黑色的，因为它們几乎吸收了所有的輻射。如果把一块玻璃和一块煤炭（或煤烟）加热到同样高的温度，那么，煤炭的发光会比玻璃強烈得多。这个简单的例子表明，灼热物体的輻射有一条普遍規律：物体的吸收能力越高，則在加热时它的輻射本領也越大。此外，对于固态物体和液态物体，当它們灼热时，它們的吸收能力和輻射本領的比与物体的类型无关。这个比对于所有的物体都一样，只和物体的温度有关。

“絕對黑体”——一种能吸收投射到它上面所有一切光綫的物体——具有最大的吸收能力，因此也具有最大的輻射本領。一个內壁用煤烟薰黑的絕热空腔体（最方便是作成圓柱形或球形）內部，当空腔体用电或是放在气炉中加热时，具有和絕對黑体非常接近的物理条件。如果在空腔体上开一个小窗洞，从其中射出的輻射也符合于絕對黑体的輻射。假使空腔体内所加的热保持不变，很显然，空腔体内部全部輻射能都将为它的四壁所吸收（如果忽略去

从小窗洞所辐射出的微量能量损失)。在这种条件下,实现了某种平衡:辐射能等于吸收能。因此,绝对黑体的辐射常常被称为平衡辐射。

假如我們已知绝对黑体在各种温度下的辐射本领和吸收能力之比,那么,既然所有的物体的这个比值都相同,了解了任何一种物体的这个比值之后,就可以求出太阳的温度。因为太阳上是灼热的气体,所以太阳的这个比值实际上有多大的问题相当复杂,这是理论天体物理学中一个基本问题。然而,如果我們將太阳看作是一个绝对黑体,由于单位面积的绝对黑体的辐射能和它的温度四次方成正比[斯德方(Stefan)定律],就可以求出太阳温度。利用前面所提的每平方厘米 6000 瓦的数据,算出太阳温度是 5700°K ,我們称之为太阳的有效温度。由于物体会蒸发,直到现在,在地球上还无法将固态物体加热到这样高的温度。例如,极难熔化的元素鎢在 3660° 时即已熔化。但是,太阳并不是最热的恒星,恰恰相反,它还是属于比较冷的恒星的一类。

太阳在羣星中的地位

为了判明太阳在羣星中的地位,必須了解恒星的辐射能。恒星的视亮度本身并不能提供出恒星辐射能的概念:还必须知道到恒星的距离。恒星的视亮度(更确切地说,恒星的光辉)用某种规定的单位——星等——来测量:亮度越大的恒星,它的星等值越小。最亮的恒星是 0 等和 1 等;中等亮度(对肉眼而言)的恒星——3 等;肉眼勉强可及的暗星——5 等,6 等。如果用星等来计算太阳亮度,它等于负 26.7 等[根据尼科諾娃(Е. К. Никольова)不久之前在苏联科学院克里米亚天体物理台中所进行的测量数据]。然而,太阳的这个巨大的星等数值,并不能说明太阳的实际亮度和其他恒星比较的情况,因为最近的一个恒星(半人馬座 α),距离我們也几乎比太阳远 30000 倍:光线从太阳到地球要走 8 分钟,而来自半人馬座 α 的光线則須走 4.3 年。所以,要比较太阳和恒星的实际亮度,必須知道它們都处在同样远近的距离时的亮度如何。我們规定取

10 秒差距(1 秒差距=3.26 光年)作为这样一个共同距离。我們已知在比这个距离更近的范围以內，一共只有 150 个左右已知的恆星。我們把位于 10 秒差距处的恆星視星等称为絕對星等。太陽的絕對星等只不过是 +4.85，也就是說，假如太陽在这样远近的距离时，我們看上去，它是一个肉眼可見的黃色暗星。我們不难把距离已知的恆星的規定星等換算为輻射能量，这样，我們会看到，非常多的恆星的輻射比太陽強 100 倍，1000 倍，甚至于 1 百万倍。

我們知道，在不太高的温度下，物体会发射出暗紅色的光。随着加热温度的增高，发射的光綫逐次轉变为橙色、黃色、最后呈白色。灼热物体的顏色可以作为判別温度的标准。恆星的色泽，大体說来，也可以作为一种判別恆星温度的尺度。更精确而全面地說明恆星的顏色和温度的是所謂光譜型(見第二章：太陽光譜)。灼热的白色恆星——“早期”光譜型 O, B, A (温度从 25000 到 10000 度)，黃色和橙色恆星——光譜型 F, G (8000—5000 度)，紅色恆星——“晚期”光譜型 K, M (4000—3000 度)。我們的太陽是一个中介光譜型 G3 的典型黃星，也就是說，太陽正处在 G 型黃色恆星的顏色系列的中間。太陽不仅在它的顏色和絕對星等方面，連同它的質量而言，也是这一光譜型的典型恆星。大多数恆星所輻射的总能量(光度)和恆星的质量有关，近似地与質量的立方成正比。太陽的質量只有輻射能力最高的恆星的質量的 $\frac{1}{10} - \frac{1}{30}$ ，比光度小的恆星的質量大几倍。

將恆星按照顏色和光度排列起来，会不会有什么秩序呢？要回答这一問題，必須用我們已知其数据的恆星作一幅恆星光度与恆星光譜型(顏色)的关系图。

图 4 所示的是根据巴連那果(П. П. Паренаго)(国立史天堡天文研究所)的最全面的研究結果所繪出这种关系图。我們看到，大多数恆星組成两条多少是連續的、从左上角直向右下角的扁帶，从光度強的青色热星直到光強弱的紅色冷星。这是主序星(上面一条分支)和亚矮星(下面一条分支)。除了这两条分支以外，还有

几条副分支：在图4右上部，由数目比较少的恒星组成。属于这些副分支的恒星的辐射能大，但它们是冷星，这种组合显然只是由于恒星的直径极大，该分支是冷巨星分支。它们的温度和太阳的相同，甚至还低于太阳，它们的巨大辐射是因为它们具有十分庞大的体积。例如，冷巨星天蝎座 α （心宿二）的直径可以和整个我们的行星系的大小相比¹⁾。

为什么恒星在光度-光谱图上的排列是这个样子，而不是另一个样子呢？这一问题的答案是恒星物理结构的最重要的问题之一，它和恒星演化问题有极密切的联系²⁾。

我们可能都已知道，我们所见的所有恒星组成一个庞大的圆盘状系统。这个天体系的直径是60000光年左右，圆盘状的厚度只有直径的1/8。这些数字表明；从银河系最遥远的一端，早在地球上人类生命的初期发出的光，尽管以每秒300,000公

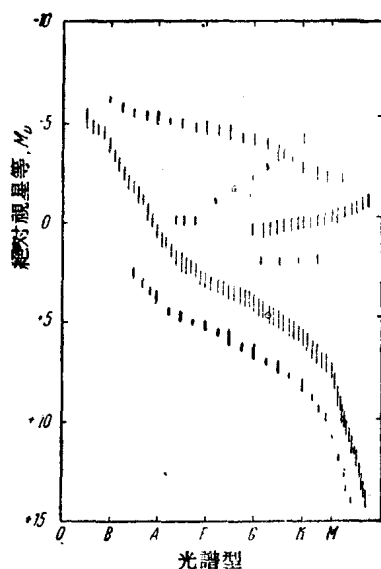


图4 光度-光谱图

里的速度行进，但只是刚刚才到达我们这里！我们的太阳——这个庞大天体系统的恒星之一——处在从银河系中央核心（由恒星、气体和尘埃云组成）到边缘的约3/5的距离上。银河系内恒星的总数是 10^{11} 个，我们可以这样来设想，例如，用一堆重100吨的沙土

1) 这个数字稍大了些，根据最新资料，心宿二的大小约相当于火星的轨道直径——译者注。

2) 关于太阳和恒星的物理结构和演化的讨论，参见 A. Г. Масевич, Источники энергии Солнца и звезд, Изд. АН СССР, научно-популярная серия, 1949.

中的沙粒顆数(設每粒沙重 1 毫克左右)来和这个总数相比較。太阳大概是处在我們銀河系两个巨大的旋渦臂之間。我們的銀河系也和其他的銀河系一样, 沿着旋渦臂聚集着恆星(主要是热星)和星云。

小 結

我們在本章中向讀者介紹了作为一个宇宙天体的太阳的一些基本資料(日地距离, 太阳大小, 質量, 亮度和輻射能, 表面溫度), 并且指出天文学和物理学是如何測量这些数据的。

此外, 我們还援引了現代关于太阳在我們銀河系的羣星中的地位的概念。