

第二太阳光谱

叶 式 辉

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘 要

在太阳大气中, 共振散射可引起辐射的线偏振。用偏振度测量精度达 10^{-5} 的仪器, 已经探测出完整的偏振辐射谱, 这称为第二太阳光谱。它具有大量的、与通常太阳光谱截然不同的特征和结构。已有的研究发现它们与量子力学干涉、同位素效应、分子散射等物理过程有关。利用第二太阳光谱, 可以进一步开展太阳物理的多项研究。

关键词 偏振 — 太阳: 第二太阳光谱 — 太阳: 太阳物理

分类号: P182.3

1 引 言

太阳的光谱, 包括分布在广阔波段的连续谱以及数以万计的夫琅和费吸收线和发射线, 是一个丰富的信息宝藏。从 1672 年牛顿的棱镜分光实验算起, 对它的研究已有 300 多年的历史了。利用太阳光谱, 可以探测太阳大气的化学成分、物理参数、结构模型以及形形色色活动现象的产生机制与演变规律。通过磁场敏感谱线的塞曼效应, 还可以研究太阳的磁场。最近半个多世纪中, 太阳光谱的观测从可见区向短波和长波两个方向扩充, 先后到达紫外、X 射线、 γ 射线以及辽阔的红外波段。此外, 随着斯托克斯偏振量度学 (Stokes polarimetry) 的兴起, 磁敏谱线不仅有单纯的强度 (I) 轮廓, 还有代表线偏振的 Q 和 U 轮廓以及表示圆偏振的 V 轮廓。这些都是硕果累累的研究领域。本文要介绍的是太阳光谱学的一个新的飞跃, 这就是“第二太阳光谱”。它的神秘面纱刚揭开不久, 就已经显示出蓬勃的生命力, 值得我们密切注视和努力探索。

2 散射形成的偏振光谱

光的散射是人们早已熟悉的自然现象。例如白昼晴空的蔚蓝色和落日的血红色, 都是太阳光在地球大气中的瑞利 (Rayleigh) 散射引起的。散射不仅能够改变光线强度的空间分布, 还可以产生偏振 (有关基础知识见《中国大百科全书·物理学》(1978), “光的散射”条)。在

太阳大气中没有磁场的情况下，相干散射也可以引起线偏振。这方面的研究早已开始进行^[1-3]，但过去只发现少数较强的共振线具有可以察觉的偏振。实际上，绝大多数谱线的线偏振度都在 10^{-3} 以下，被一般仪器的“噪声”淹没而无法测出。为了精密测量线偏振，瑞士苏黎世联邦高级工业学院天文研究所的科学家在 1990 年左右研制出“苏黎世成像斯托克斯偏振计” ZIMPOL(Zürich Imaging Stokes Polarimeter)^[4-7]。它使用 CCD 传感器和光电调制系统(调制频率为 42 和 84 千赫)，可以消除大气视宁度扰动和 CCD 像素增益不精确所引起的“噪声”，使偏振测量的精度达到 10^{-5} 。把这架精密仪器与美国国家太阳台的 McMath-Pierce 望远镜(这是目前世界上口径最大的太阳望远镜)合用，对从 3200Å 开始，经过整个可见光区直至近红外区的广阔波段进行探测，奇迹就出现了。在线偏振度随波长的谱分布中，许多谱线呈现出复杂微妙的结构，与我们早已熟悉的太阳光谱迥然不同。按俄罗斯天文学家 Ivanov 的建议，这种线偏振度的分布谱称为“第二太阳光谱”。(为表示区别，下文中把一般的太阳辐射强度谱称为“第一光谱”。)就内容的丰富和物理内涵的深奥来说，第二光谱比起第一光谱毫不逊色，甚至远远超过。于是，太阳光谱研究的历史翻开了新的一页。

3 奇异和丰富的第二太阳光谱

为了显示两种太阳光谱的不同面貌以及线偏振与圆偏振的差异，图 1 的上、中、下三部

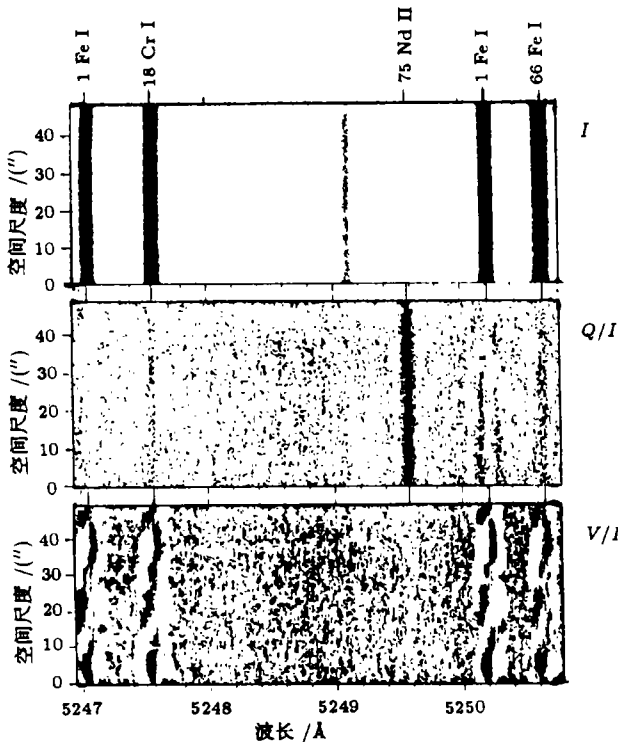


图 1 第一、第二太阳光谱和圆偏振在日面分布的比较^[9]

分分别给出同在 5247—5251Å波段的第—光谱 (I)、第二光谱 (Q/I) 和圆偏振度 (V/I) 的谱分布。这三个图形的纵坐标都表示以角秒为单位的日面局部区域。最上面的符号给出谱线的归属, 例如“66 Fe I”代表中性铁原子的第 66 个多重线系。由图可以看出: (1) 第一和第二光谱截然不同, 前者的众多较强吸收线在后者只是依稀可见, 并变为发射线, 而后的唯一吸收线 (Nd II 5249.59Å) 在前者几乎看不见。(2) 圆偏振度 V 是日面纵向磁场强度的量度 (见文献 [8] 中的 (6.7) 和 (2.1) 两式), 下图中黑、白两种颜色代表不同极性。引人注目的是大约每隔 30'' 极性反转一次。这是超米粒的尺度, 也是磁篷 (magnetic canopy) 结构的反映。第一和第二光谱都没有这种图像。

为了进一步表明第二光谱的特征, 图 2 展示著名的钠黄线 D₁ 和 D₂。上图是普通谱线轮廓图。横坐标为波长, 纵坐标是

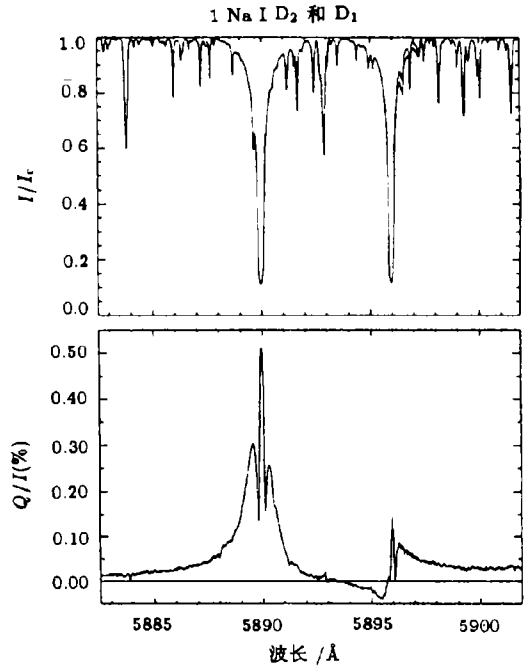


图 2 第一和第二光谱中的 Na I D₁、D₂ 线^[9]

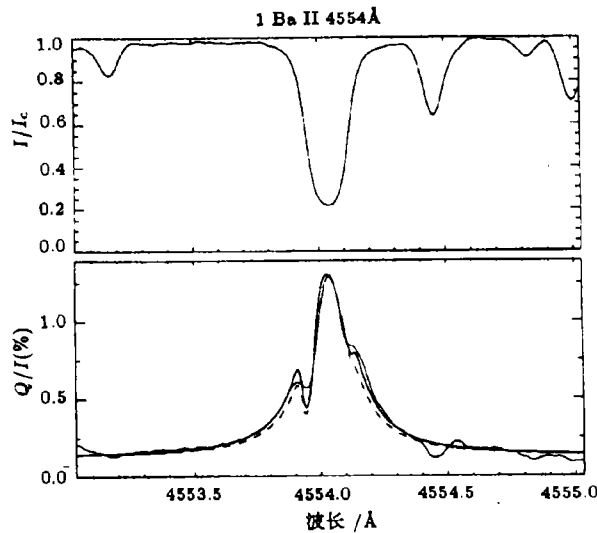


图 3 第一、二光谱中的 Ba II 4554Å^[10]

更令人惊奇的是图 4。各图的上部都用垂直实线和虚线分别标出 C₂ 和 MgH 分子谱线的位置。这些众多的分子谱线在第一光谱中难觅踪影, 但在第二光谱却一一崭露头角。为什么第二光谱特别青睐分子谱线? 这也是一个发人深省的问题。顺便提到, 左图的上、下部分都

谱线强度 I 与连续谱强度 I_c 之比。下图为 Q/I 的百分比为纵坐标的第二光谱中的 D₁、D₂ 轮廓。与第一光谱相比, 可说是面目全非了。D₂(λ5889.97) 成为有复杂精细结构的发射线, 而 D₁(λ5895.94) 则既有发射部分, 也有较小的吸收部分。下一节中将说明, 这是量子力学干涉 (quantum-mechanical interference) 效应形成的。

图 3 显示的是另一种形态。Ba II 4554Å在第一光谱 (上图) 中是吸收线, 而在第二光谱 (下图) 成为发射线。前者结构简单, 后者却变得甚为复杂。具体说来, 线心狭窄, 而较宽的线翼有明显的支线, 并且两翼不对称。后面要说明, 这是同位素形成的精细结构。

是几次扫描合成的图像。就第一光谱而言, 各次记录略有差异, 这在左上图的中部和右侧可以察觉, 但历次扫描得出的第二光谱记录 (见左下图) 完全吻合。这说明 ZIMPOL 测量的重复性是很好的。

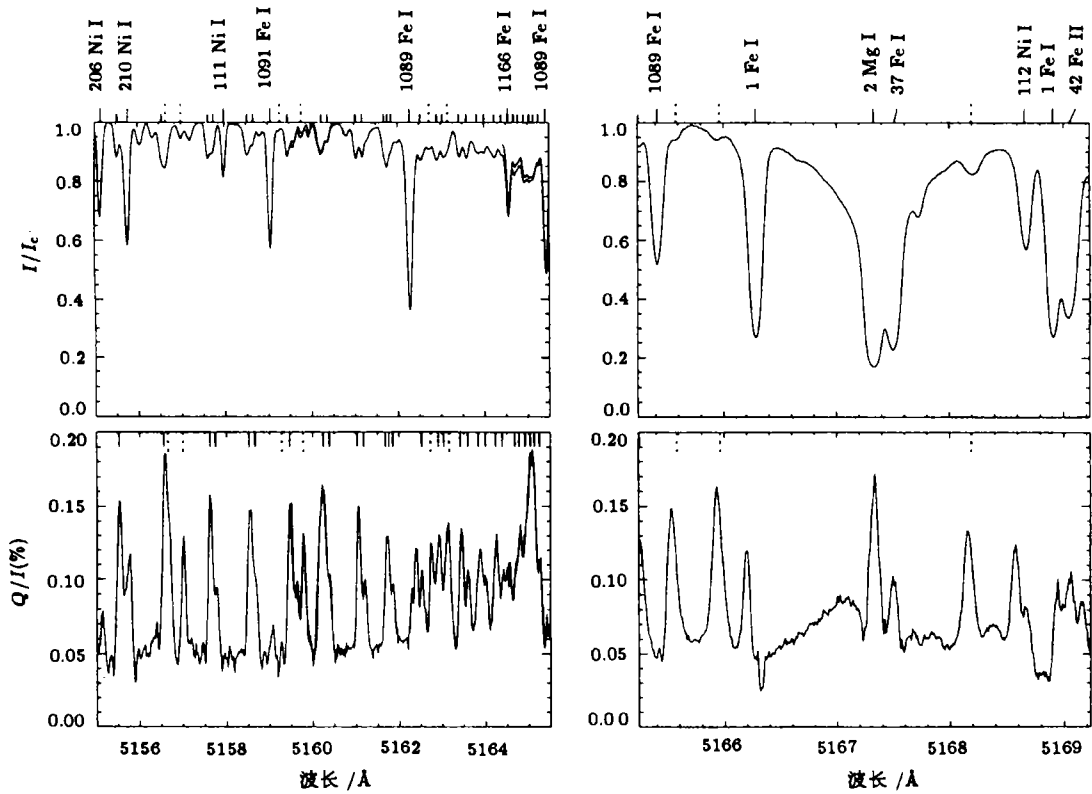


图 4 第二太阳光谱中的分子谱线^[9]

由于篇幅限制, 上面只列举少数实例。但已能说明第二太阳光谱蕴藏着独有的特征和大量奥秘, 并与第一光谱有本质性差异 (详见文献 [9—12])。

4 深邃的物理内涵

第二太阳光谱的众多奇异特征是怎样形成的? 现有的研究还处在初始阶段, 但已有下列一些有意义的结果。

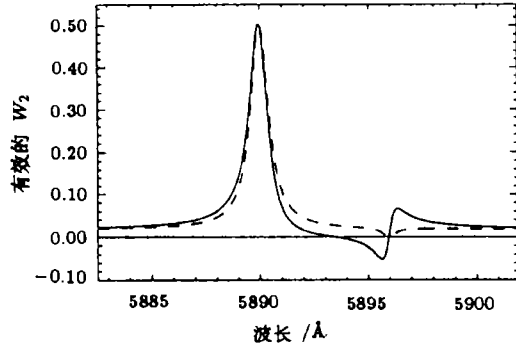
(1) 量子力学干涉——Na I D₁ 和 D₂ 系统的整个偏振度分布曲线, 是由这两条谱线的跃迁上能级 $J = 3/2$ 和 $1/2$ 之间的量子力学干涉决定的。这与 Ca II H、K 线的情况相似。Stenflo^[7,11,12] 对这个效应建立了理论模型。大致说来, 一次散射跃迁的极化性 (polarizability) 是由有关能级的总电子角动量量子数决定的。对于没有精细结构的原子跃迁, 这是量子数 J ; 而在有精细结构的情况下, 为量子数 F 。极化性可用代表散射过程中经典偶极散射的百分数 W_2 表示。 $1-W_2$ 则为各向同性的, 无偏振的散射的成分。如果在一次散射过程中处于激发

状态的上能级不只一个，而这些能级由于精细结构和超精细结构而分裂开，则应考虑这些能级之间的量子力学干涉。D₁ 和 D₂ 两条谱线的散射，就属于这个类型。

实际上，除散射外还须考虑其他的原子跃迁过程。因此应当使用有效的 W₂ 因子，即

$$W_{2,\text{eff}} = W_2 \frac{\varphi_\nu}{\varphi_\nu + a} + b \frac{a}{\varphi_\nu + a}$$

此处 φ_ν 代表面积归一化的谱线不透明度轮廓， a 是表示连续谱不透明度的一个参数， b 为常数，表征 W₂ 对连续谱的有效性。Stenflo^[8,13] 选取 $a = 24.5$ 和 $b = 0.018$ ，得到有效的 W₂ 随波长的分布曲线（见图 5）。图中的实线与图 2 下面第二太阳光谱中 D₁、D₂ 的轮廓十分接近。虚线说明如果不考虑 $J = 3/2$ 和 $1/2$ 两能级之间的干涉时，理论分布曲线在 D₁ 处的 S 形反转不复存在。



(2) 同位素效应——Ba II 4554Å 谱线跃迁 图 5 在 D₁、D₂ 范围内 W_{2,eff} 随波长的分布^[9]

迁的量子数与 Na I D₂ 相同，但与之相应的“D₁ 线”为 Ba II 4934Å。电离钡的这两条谱线的波长相距甚远，因此它们的精细结构之间的量子力学干涉可以忽略。这时由电子角动量与核自旋耦合所产生的超精细结构分裂起作用了，于是同位素效应显露出来。Ba II 有多种同位素。具体说来，核子数为偶数（主要是 138）的同位素占 Ba II 总含量的 82%，它们的核自旋量为零，因此没有超精细结构。与此相反，占含量 18% 的奇数（主要是 137 和 135）同位素，其核自旋量不为零，而是 $I = 3/2$ ，这时超精细结构出现了。在一次散射过程中，原子从初始能级（用字母 a 表示）跃迁到中介能级（b），然后到达终止能级（f）。对于奇数同位素，这三个能级都分裂开来，其超精细结构如图 6 中的细横线所示。至于偶数同位素，没有分裂开的超精细结构，它们的 a、b、f 三个能级的位置由图中三条粗横线表示。由于超精细结构的存在，Ba II 4554Å 在第二光谱中的轮廓（图 3 下）分裂为三条。中间的尖峰属于偶数同位素，而两侧的小峰归奇数同位素所有。图中的细实线为观测轮廓，而粗实线与虚线分别是考虑与不考虑能级超精细结构之间的量子力学干涉时的理论轮廓。由图 3 下可见，前、后两个理论轮廓分别在红、紫两翼与实测结果符合得较好。至于属于偶数同位素因而没有超精细结构情况下产生的线心尖峰轮廓，则与观测基本吻合。

1 Ba II 4554 Å

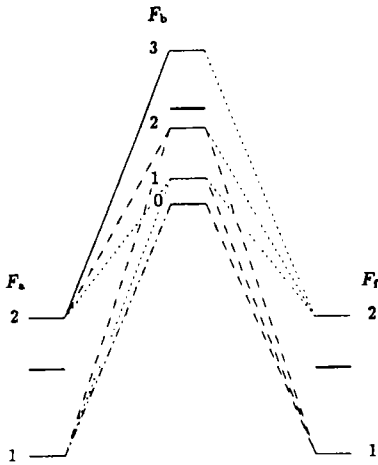


图 6 Ba II 4554Å 的同位素效应^[10]

(3) 散射物理——散射是一个复杂的物理过程。就原子辐射来说，当初始和终止能级的 n 、 L 和 J 三个量子数都分别相同时，这是瑞利散射，否则为喇曼 (Raman) 散射。作为瑞利

散射的一个特例，如果入射与散射辐射的频率相同，这是共振散射。在喇曼散射中，与此相应的情况为荧光散射。至于分子辐射，情况更为复杂，需要考虑米氏 (Mie) 散射。对于这些散射过程所产生的偏振效应，可以在经典物理和量子力学两个框架内进行计算。详细的计算方法以及由散射引起的偏振度与频率重新分布的矩阵表达式，可见文献 [7,13,15]。

还应谈到，对第二太阳光谱的若干现象目前还难以理解。大的问题不少 (前面提到的第二光谱为何特别垂青于分子谱线便是一例)，细枝末节的疑点就更多。例如 Stenflo^[14] 就承认用量子力学干涉、超精细结构以及非弹性碰撞，都无法解释图 2 中第二光谱 D₂ 线心的尖峰。

5 前 景 展 望

第二光谱的发现为太阳物理学开辟了一个丰富多彩和奇妙诱人的新领域。可以预料，下列几方面的工作将会陆续开展起来：

(1) 太阳大气物理 —— 运用辐射转移理论，分析谱线轮廓和连续谱及其由日面中心到边缘的变化 (简称为 CLV)，来研究太阳大气的结构、物态和演变，这是一项经典课题。现在值得庆幸，第二光谱可以为它增添大量新资料。Stenflo 等人^[16] 对 H α 、H β 、D₁、D₂ 等许多谱线进行 CLV 观测。

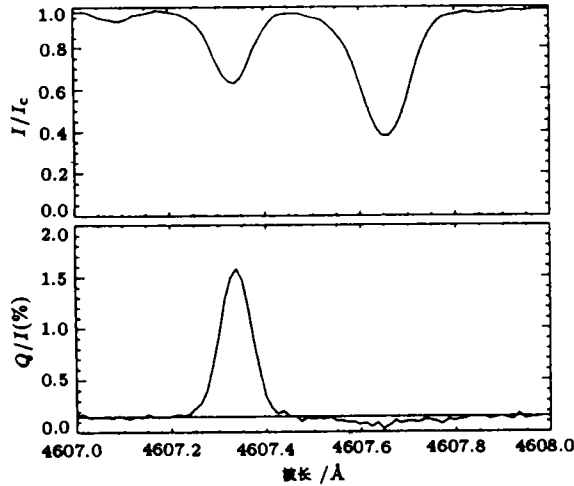
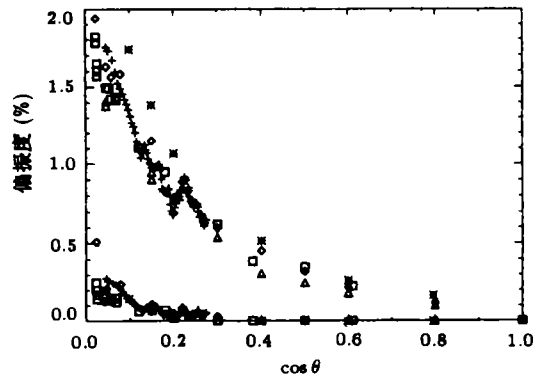


图 7 第一、二光谱中的 Sr I 4607.34Å^[16]

测量得最仔细的是 Sr I 4607Å。这首先是因为它在第二光谱中是一条强线。(见图 7，图的上、下部分各为第一、二光谱，都是在日心角 $\theta = \cos^{-1}0.1$ 处记录的。) 其次，因为它适于探测隐而不见的湍流磁场 (说明见文献 [17])。这条线在第二光谱中的一系列特征量都与 θ 有关，即都有 CLV 效应。现在仅以偏振度为例说明。具体情况见图 8，图中的上、下两排各为该谱线及其附近连续谱的实测结果；五种符号分别代表不同次的观测。



现在需要谈到，第二光谱有 CLV 效应是理所当然的，这是因为由散射产生的偏振状态与散射方向有关，于是第二光谱与 θ 有关。但是难能可贵之处是第二光谱的 CLV 效应在日面边缘特别显著；而第一光谱愈靠近边缘愈微弱，因而愈难观测。如所周知，对应于不同 θ 角的辐射来自大气的不同层次。愈近边缘， $\cos \theta$ 愈小，辐射来自愈高层次 (即光球上层和色球)，这样的观测资料愈珍贵。因此，用第二光谱进行 CLV (即临边昏暗) 观测，比起第一光谱要优越得多。

(2) 太阳磁场 —— 传统观测所依据的塞曼效应有一定的局限性。这主要是它对微弱磁场以及受空间分辨率限制或湍流使极性不同的磁流混杂在一起的磁场很难奏效。解脱这种困境的出路是运用汉勒 (Hanle) 效应^[17,18]。这个效应的表现形式之一是消偏振 (depolarization), 而偏振与形成第二光谱的散射过程有关。利用第二光谱中对汉勒效应敏感程度不同的若干条谱线进行差分汉勒效应研究, 可能成为对太阳微弱磁场和湍流磁场的一种有效诊断方法。

(3) 化学元素和同位素含量 —— 元素含量测定是天体光谱分析的传统项目。由于谱线稀少或很微弱, 一些元素的含量很难测准。第二太阳光谱为此提供了新的机会。一个突出的例子是 Li I 6708Å^[14]。它和其他锂线相似, 在第一光谱中很弱, 但它在第二光谱中却是一条强线。至于同位素含量, 对天体演化和核反应的研究有重要意义。我们在第 4(2) 节以 Ba II 4554Å 为例叙述了同位素效应在第二太阳光谱中的表现。因此通过第二光谱来研究同位素是一个切实可行的办法。事实上, 前面提到的 Ba II 的奇数和偶数同位素的相对含量, 正是 Stenflo^[15] 用 4554Å 的轮廓求得的。

(4) 理论物理 —— 从本文第 4 节可以了解到, 第二太阳光谱的若干特征与量子力学干涉、超精细结构、同位素效应等物理理论有关。运用这些理论可以研究第二太阳光谱。反过来, 利用后者的丰富资料, 我们能够检验和发展与原子物理、量子力学以及与散射、偏振等过程有关的理论。实际上, 把天体作为实验室来促进物理学的发展, 这种事例在历史上已经屡见不鲜了。

还应谈到, 因为光的散射以及由此引起的偏振现象在众多的天体和浩瀚的太空中是普遍存在的, 第二太阳光谱的观测和研究方法应该能向行星、恒星、星际物质以及极光、夜天光的光谱推广。虽然由于它们比太阳暗弱得多, 对它们的偏振 (这里指线偏振, 其强度比一般测量的圆偏振要小一个数量级) 观测必定会困难得多。但是随着仪器技术的迅猛发展, 可以预期这方面的研究是有光明前景的。

总的说来, 在短短几年间第二太阳光谱的探索已经取得了令人鼓舞的成就。我们完全有理由相信, 它今后将要取得的丰硕成果必定能与第一太阳光谱媲美。

参 考 文 献

- 1 Stenflo J O. *Astron. Astrophys.*, 1980, 84: 68
- 2 Stenflo J O et al. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1983, 52: 161
- 3 Stenflo J O et al. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1983, 54: 505
- 4 Povel H P et al. In: November L J ed. *Solar polarimetry*, 1991: 102
- 5 Stenflo J O et al. *LEST found. tech. rep. No.54*, 1992
- 6 Povel H P. *Opt. Eng.*, 1995, 34: 1870
- 7 Stenflo J O. *Solar magnetic fields—polarized radiation diagnostics*. Dordrecht: Kluwer, 1994
- 8 Ye Shihui. *Magnetic fields of celestial bodies*. Dordrecht: Kluwer, 1994
- 9 Stenflo J O, Keller C U. *Astron. Astrophys.*, 1997, 321: 927
- 10 Stenflo J O. *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 344
- 11 Stenflo J O, Keller C U. *Nature*, 1996, 382: 588
- 12 Keller C U, Stenflo J O. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1996, 28: 912
- 13 Stenflo J O. In: Stenflo J O, Nagendra K N eds. *Solar polarization*. Dordrecht: Kluwer, 1996: preprint
- 14 Stenflo J O. *Solar Phys.*, 1996, 164: 1
- 15 Stenflo J O. In: Mein N ed. *Forum THEMIS. Proc. of a conf. held at Meudon*, 1996, 1997: preprint
- 16 Stenflo J O et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 322: 985

- 17 Fraurobert-Scholl M et al. *Astron. Astrophys.*, 1995, 298: 289
18 Stenflo J O. In: November L J ed. *Solar polarimetry*, 1991: 416

The Second Solar Spectrum

Ye Shihui

(*Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Abstract

The coherent scattering in the solar atmosphere may give rise to a linear polarization of radiation. By use of an instrument with an accuracy of polarization degree measurements of 10^{-5} , the spectrum of linearly polarized radiation can be obtained. This is called the second solar spectrum. It contains a large number of spectral structures, which are quite different from those of the common solar spectrum. As revealed by existing studies, they are concerned with quantum-mechanical interference, isotope effects, molecular scattering and other physical processes. By analysing the second solar spectrum, many kinds of solar researches can be carried out. This paper presents an overall and brief introduction to this completely new field of research.

Key words polarization—Sun: second solar spectrum—Sun: solar physics