

文章编号 1001-8166(2002)06-0806-05

太阳风中磁流体湍流的特征和本质

涂传诒

(北京大学地球物理系,北京 100871)

摘 要 在空间探测的早期,太阳风湍流现象就已经被空间飞船的观测发现了。但是太阳风湍流不同于过去学术界熟悉的流体湍流。虽然国际学术界已进行了长期的研究,但太阳风湍流的本质仍不能得到明确的认识,许多观测现象都得不到解释。涂传诒等^[1-5]研究了这些现象,促进了理论上的新进展。这些研究指出,太阳风起伏中存在着非线性湍流相互作用,但不是完全发展的湍流,而是正处于由阿尔芬波向着完全发展的湍流过渡的状态。这一新的概念把阿尔芬波传播理论与磁流体湍流理论结合起来,导致了理论上的新进展,从而揭示了太阳风湍流的本质,阐明了一系列过去不能解释的观测现象。着重介绍了这些研究的成果和意义。

关 键 词 太阳风,磁流体,太阳风湍流

中图分类号 P353.7 **文献标识码** A

太阳的外层大气——太阳日冕,持续不断地向外膨胀从而形成由太阳径向外的等离子体流,通常被称为“太阳风”。太阳风使彗星形成很长的向着远离太阳方向伸延的慧尾。当人们欣赏美丽的慧尾的时候就可以想像太阳风的存在。在地球高纬区看到的多彩的极光现象,也是进入地球磁场的太阳风质子经加速后在地球大气中沉降而引起的。空间飞船的直接观测表明,太阳风主要由质子和电子组成,但有少量氦核及微量重离子成分。在地球轨道附近,太阳风高速流的速度可达 700~800 km/s,质子数密度通量约为 $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$,质子温度约为 $3 \times 10^5 \text{ K}$ 。据推测,在约 100 个天文单位(天文单位 = 日地平均距离 = $1.5 \times 10^8 \text{ km}$)以外,太阳风将与起源于银河系的星际气体交界,太阳风所占据的空间范围称为“日球层”。研究太阳风的物理过程及其规律已成为空间物理学中一个新的学科分支——日球层物理学。

太阳风的发现是 20 世纪空间探测的重要发现之一。经过近 40 年的研究,人们对太阳风的物理性质有了基本了解,但是至今仍然不清楚太阳风是怎样起源及其是怎样被加速的。很明显,太阳大气通过太阳风的形式不断的损耗其质量和能量。可是太阳风怎样得到质量的供应及能量的供应的问题是空间物理学领域中经长期研究仍悬而未决的一大基本课题。

在太阳风由日冕向外膨胀的过程中,太阳磁场也被太阳风携带着拉到行星际空间,从而使太阳风成为一种磁流体介质。由磁流体力学的基本理论,我们知道磁流体介质中有 3 种基本波模,那就是阿尔芬波和快、慢磁声波。在这种介质中,通常可略去扩散作用。沿着同一磁力线排列的流体微团永远在同一磁力线上。由于与导电的太阳风流体相互作用,这种与物质冻结的磁力线,在弯曲时具有张力而在密度不均匀时具有压力。阿尔芬波就是由于冻结

收稿日期 2002-08-07,修回日期 2002-09-12.

* 基金项目 国家自然科学基金项目“太阳风质子和重离子回旋洪振的准线性理论”(编号:40174045);国家自然科学基金重大项目“太阳剧烈扰动的日冕过程”(编号:49990452);国家重点基础研究发展规划项目“行星际空间对日冕物质抛射的响应过程”(编号:G-2000078405)资助.

作者简介 涂传诒(1940-),男,教授,中国科学院院士,主要从事空间物理学的研究 E-mail:cytu@public3.bta.net.cn

磁力线的张力驱动形成的横波,而快、慢磁声波则是由磁压力和热压力共同形成的纵波。除了这种线性波动以外,磁流体介质中还会有由非线性力控制的湍流。非线性力使具有不同波矢的波之间有相互的能量交换。通常波能是由长波长向短波长串级传输而形成具有 $-3/2$ 幂律的功率谱。另外,磁流体介质中还会有不太活动的传输结构。

在空间探测的早期,太阳风湍流现象就已经被空间飞船的观测发现了。但是太阳风湍流不同于过去学术界熟悉的流体湍流。虽经国际学术界长期研究,太阳风湍流的本质仍不能得到明确的认识,许多观测现象都得不到解释。在20世纪80年代以前,人们不知道太阳风中起伏的本质是线性波动,还是非线性湍流,还是传输结构。因而无法计算其携带的能量和相应的耗散机制。当时国际学术界对于太阳风湍流的本质的认识,停留在两个极端上,要么是完全发展的磁流体湍流,要么是线性阿尔芬波。在20世纪60年代,人们希望用经典的Kraichnan^[6]磁流体湍流的理论来描述太阳风中的起伏^[7]。在70年代,由于发现了起伏有某些阿尔芬波的特性(如磁场矢量与速度矢量的相关变化),学术界又都相信太阳风中矢量起伏反映了向外传播的阿尔芬波^[8]。在80年代初,学术界又开始用湍流的语言和统计方法来描述和分析数据。

磁场变化与速度变化相关的观察结果说明起伏具有阿尔芬脉动的特性。可是太阳风起伏并不是纯阿尔芬波。它有斜率为 -1.7 的功率谱。这说明非线性的湍流过程起着控制作用。湍流是非线性过程,而阿尔芬波是线性过程。两种描述方法是互不相容的。虽经国际学术界在整个70~80年代初的重点研究,怎样描述阿尔芬脉动的问题仍然是个谜。

为了统一描述阿尔芬脉动的特性和湍流特性,Dobrowolny等^[9]提出在日冕底部,湍流过程起控制作用从而形成律谱。而当太阳风膨胀到空间飞船观测到的空间范围,非线性湍流作用消失了,太阳风起伏表现为向外传播的纯阿尔芬波。可是Bavassano等^[10]由Helios飞船观测数据得到的分析结果不能用纯阿尔芬波的理论解释。Bavassano等发现在 0.3AU 脉动功率谱的低频部分有 -1 的斜率并向 -1.7 斜率发展。正如Matthaeus等^[11]指出的,以往发表的文章都不能回答这样一个根本的重要问题,

即太阳风的起伏中是否存在磁流体湍流的非线性相互作用?

涂传诒等^[1-5]回答了这一问题。这些文章指出,太阳风起伏中存在着非线性湍流相互作用,但不是完全发展的湍流,而是正处于由阿尔芬波向着完全发展的湍流过渡的状态。这一新的概念导致把阿尔芬波传播理论与磁流体湍流理论结合起来。这些成果被国际学术界论文评价为“开辟了更加完整地研究太阳风湍流的道路”^[12];“已成为许多重要文章的基础”^[13];Goldstein等^[16]指出:“最终的目的是统一波传播和湍流发展的这两种形态。在这一方向上,已有一些初始的努力”。接着该文引了几个有关文献,其中涂传诒等^[1,2]是被引文献中发表时间最早的两篇。上述关于太阳风中起伏的本质的新的理解,导致了以下4方面理论上的新进展,从而揭示了太阳风湍流的本质,阐明了一系列过去不能解释的观测现象。

第一,创建了描述太阳风湍流传输特性的“类WKB湍流理论”,阐明了太阳风中湍流功率谱发展现象。这一理论把描述波传播的几何光学近似的线性理论与描述起伏非线性相互作用的湍流理论结合了起来。在太阳风中,向外传播的阿尔芬波遵从线性几何光学近似理论。而向外传播的阿尔芬波与局域产生的向内传播的阿尔芬波的相互作用是非线性的。如何把线性描述与非线性描述结合起来,是建立新理论的关键。涂传诒等^[1,2]用两尺度的扰动法和非线性项局域处理法,假定非线性串级的效应与弱非均匀介质中的传播效应是同数量级的小量,从而得到结合这两种效应的湍流功率谱方程。该谱方程的解释与Bavassano等^[10]发表的观测结果相符得很好。

Zhou等^[14]指出作为另一个重要的新进展,涂传诒^[1,2]和他的合作者显示了怎样把湍流串级加热效应结合到描述向外传播的类WKB的传输方程中。Grappin等^[15]指出涂传诒等^[1,2]首次尝试在描述起伏的非线性发展的模型中加入平均径向流的效应。Goldstein^[16]指出涂传诒等^[1,2]把Kolmogoroff型和Kraichnan型非线性惯性区现象学嵌入描述波在空间传输的几何光学近似(WKB)理论的框架中。Feynman等^[17]用位于不同日心距离上的3个飞船的数据证实了涂传诒^[2]的理论结果,从而得出结论支持涂传诒^[2]提出的关于在太阳风起伏中存在能

中观测的速度结构函数特性。将涂传诒^[1, 2]导出的串级函数引入湍流间歇理论,建立了描述非完全发展的磁流体湍流的速度结构函数的理论。湍流间歇现象的研究表明,湍流的串级过程在空间中不是均匀分布的,能量串级过程发生在流场中某些局部区域,而在另一些区域可能没有串级发生。通常用流场结构函数的标度指数与理论模型比较来研究湍流的间歇特性。Marsch^[23]发现太阳风高速流中测量到的结构函数的特性不能用任何已有的描述结构函数的模型来解释。已有的模型都是用来描述完全发展的湍流的,假设串级率不随尺度变化而变化。

涂传诒^[4]没有用流行的串级率随标度不变的假设,而是把涂传诒^[2]描述非完全发展湍流的串级率公式引入到湍流间歇的模型(借助于 P 模型 Meenevau 和 Sreenivasan 1987)中,建立了推广的描述结构函数特征的模型,从而阐明了太阳风中速度结构函数的特征。Carbone^[24]指出,“涂传诒等^[4]在太阳风湍流能谱观测的启发下,引入了一个推广的结构函数模型,用来描述非完全发展的湍流,本文这一结果是从另一个角度确认如下事实,如同涂传诒等^[4]等强调的那样,高速流可能不是处于完全发展

的湍流状态”。Horbury 等^[25, 26]指出“涂传诒等^[4]最近把间歇包括在涂传诒^[2]的发展中的湍流模型中”。通过与 Ulysses 飞船的观测结果比较后,Horbury 等得到结论,对于湍流过渡区“涂传诒等模型比较 HBFS(Horbury, Balogh, Forsyth and Smith)的方法要好得多”(如图 3 所示)。

参考文献(References):

[1] Tu C Y, Pu Z Y, Wei F S. The Power spectrum of interplanetary Alfvénic fluctuations: Derivation of the governing equation and its Solution[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 695-9702.

[2] Tu C Y. The damping of interplanetary Alfvénic fluctuations and the heating of the solar wind[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 7-20.

[3] Tu Chuanyi, Marsch E. MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: observations and theories[J]. Space Science Review, 1995, 73: 1-210.

[4] Tu Chuanyi, Marsch E. MHD Structures, Waves and Turbulence in the Solar Wind Observations and Theories[M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1995.

[5] Tu Chuanyi, Marsch E, Rosenbauer H. An extended structure-function model and its application to the analysis of solar wind intermittency properties[J]. Annales Geophysicae, 1996, 14: 270-285.

[6] Kraichnan R H. Inertial-range spectrum of hydromagnetic turbulence[J]. Physical of Fluids, 1965, 8: 385.

[7] Coleman P J Jr. Turbulence, viscosity and dissipation in the solar-wind plasma[J]. Astrophysical Journal, 1968, 153: 371.

[8] Belcher J W, L Davis Jr. Large-amplitude[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76: 534.

[9] Dobrowolny M, Mangeney A, Veltri P. Fully developed anisotropic turbulence in interplanetary space[J]. Physical Research Letters, 1980, 45: 144.

[10] Bavassano B, Dobrowolny M, Mariani F, et al. Radial evolution of power spectra of interplanetary Alfvénic turbulence[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87: 617.

[11] Matthaeus W H, Zhou Y. Turbulence and Nonlinear Dynamics in MHD Flows[M]. North-Holland: Elsevier Science Publishers, 1989.

[12] Matthaeus W H, Zhou Y, Oughton S, et al. Solar Wind Seven[A]. In: Marsch E, Schwenn R, et al eds. Proceedings of 3rd COSPAR Colloquium Held in Goslar[C]. Germany: Pergamon Press, 1992. 511-516.

[13] Bruno R, Bavassano B. Origin of low cross-helicity regions in the inner solar wind[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96: 841-851.

[14] Zhou Ye, Matthaeus W H. Non-WKB evolution of solar wind fluctuations: a turbulence modeling approach[J]. Geophysical Research Letter, 1989, 16: 755-758.

[15] Grappin R, Mangeney A. Can we understand Alfvénic turbulence

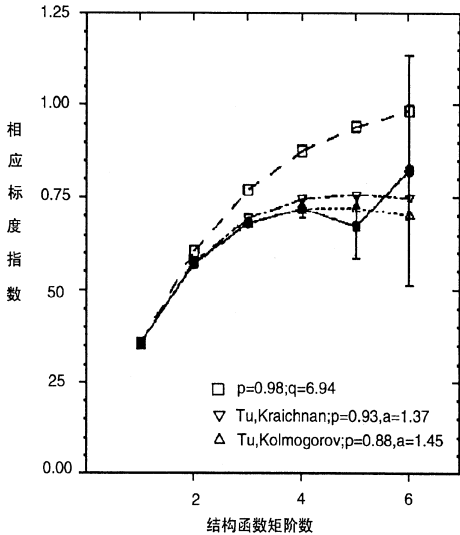


图 3 涂传诒^[5]湍流间歇模型与 Ulysses 飞船观测值的比较
 Fig 3 Comparison of Tu Chuanyi's turbulent intermittent model and Ulysses airship observed values
 横轴是太阳风速度结构函数矩的阶数,纵轴是相应的标度指数。图中圆点为观测值,正三角和倒三角为 Tu 等模型的结果,正方形为 Horbury 等模型的结果^[25]

- via simulation of the MHD equations? [A]. In: Winterhalter D, et al eds. Solar Wind Eight AIP Conference Proceedings [C]. 1996, 382: 252-255.
- [16] Goldstein M, Roberts D A. Magnetohydrodynamic turbulence in the solar wind [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1995, 33: 283-325.
- [17] Feynman J, Ruzmaikin A A, Smith E J. Radial evolution of the high/low frequency breakpoint in magnetic field spectra [A]. In: Winterhalter D, et al eds. Solar Wind Eight AIP Conference Proceedings [C]. 1996, 382: 347-350.
- [18] Schwartz S J, Feldman W C, Gary S P. The source of proton anisotropy in the high-speed solar wind [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86: 541.
- [19] Marsch E. MHD turbulence in the solar wind [A]. In: Schwenn R, Marsch E, eds. Physics of Inner Heliosphere II [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 152-241.
- [20] Feldman W C, Marsch E. Kinetic phenomena in the solar wind [A]. In: Jokipii J R, Sonett C P, Giampapa M S, eds [A]. Cosmic Winds and the Heliosphere [C]. Tucson: University of Arizona Press, 1997. 617-675.
- [21] Hu Y-Q, Habbal S R. Resonant acceleration and heating of solar wind ions by dispersive ion cyclotron waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 17 045-17 056.
- [22] Mangeney A, Grappin R, Velli M. MHD turbulence in the solar wind [A]. In: Priest E R, Hood A W, eds. Advances in Solar System Magnetohydro-Dynamics [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 327-336.
- [23] Marsch F. Structure functions and intermittency of velocity fluctuations in the inner solar wind [J]. Annual Geophysicae, 1993, 11: 227-238.
- [24] Carbone V, Bruno R. Cancellation exponents and multifractal scaling laws in the solar wind magnetohydrodynamic turbulence [J]. Annual Geophysicae, 1996, 14: 777-785.
- [25] Horbury T S, Balogh A, Forsyth R J, et al. Ulysses observations of intermittent heliospheric turbulence [J]. Advance Space Research, 1997, 19: 847-850.
- [26] Horbury T, Tsurutani B. Ulysses measurements of waves, turbulence and discontinuities [A]. In: Balogh A, et al eds. The Heliosphere Near Solar Minimum [C]. Springer and Praxis Publishing, 2002. 167-226.

THE NATURE OF SOLAR WIND TURBULENCE

TU Chuan-yi

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The solar wind turbulence was found in the early days of spacecraft observations. Although many international scientists studied on this topic for many years, the nature of the solar wind turbulence had not yet been discovered till the middle of 1980s. The solar wind turbulence is different from the fluid turbulence. Many observations could not be explained by the previous theory. Tu Chuanyi et al.^[1-5] pointed out that non-linear turbulent interactions exist in the solar wind fluctuations. However the solar wind turbulence is not a developed turbulence. It is in a state of transition from Alfvén waves to developed turbulence. This new idea combined the Alfvén wave propagation theory with the turbulence transfer theory and led to a few theoretical development, which discovered the nature of the solar wind turbulence and explain several important observations.

Key words Solar wind; MHD; Solar wind turbulence.