DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.01.003
文献引用：刘棒棒，王如月．利用同步偏振辐射统计测量磁化强度[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2023，44（1）：17-20+27. LIU B B，WANG R Y. Measure magnetization using synchrotron polarization radiation statistics[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44（1）：17-20+27.

利用同步偏振辐射统计测量磁化强度*

刘棒棒，王如月**

（湘潭大学物理与光电工程学院，湖南 湘潭　411105）

摘要：星际磁场在天体物理中具有重要作用，但测量其强度是极其困难的。本文基于同步偏振辐射理论开发了测量磁化强度的新技术，建立了同步偏振辐射强度的标准差和平均值的比值与阿尔文马赫数的幂律关系。此外，该技术也应用于Planck观测数据，实现了磁化强度的测量。

关键词：磁流体动力学湍流；同步偏振辐射；磁化强度
中图分类号：P142.9　　**文献标识码**：A

Measure magnetization using synchrotron polarization radiation statistics*

LIU Bangbang，WANG Ruyue**

（Department of Physics and Optoelectronics，Xiangtan University，Xiangtan Hunan　411105）

Abstract：The magnetic fields in the interstellar medium play an important role in astrophysics，but measuring the magnetization is extremely difficult. Based on the theory of synchrotron polarization radiation，a new technique for measuring magnetization is developed，and the power-law relation between the ratio of standard deviation and mean of synchrotron polarized radiation intensity and Alfvénic Mach number is established. Furthermore，the technique is also applied to Planck observation data to realize the measurement of magnetization.

Keywords：magnetohydrodynamic turbulence；synchrotron polarization radiation；magnetization
CLC：P142.9　　**DC**：A

0　引　言

磁流体动力学（magnetohydrodynamic，MHD）湍流在天体物理环境中是普遍存在的[1-2]，其对许多关键的天体物理过程有重要作用，例如恒星的形成[3]、宇宙射线的传播和加速[4-5]、热传导[6]以及磁重联[7-8]等。因此，正确掌握MHD湍流的性质能够有效促进对天体物理过程的理解。尽管MHD湍流非常重要，但是其性质的测量是非常困难的，尤其磁化强度的测量。传统测量磁化强度的方法主要有塞曼效应[9]和Davis-Chandrasekhar-Fermi方法[10-11]。前者主要通过分裂的谱线来获得视线方向的磁场强度[12]，但是这种方法不仅对仪器设备的灵敏度要求较高，而且需要较长的观测积分时间，具有一定的局限性；后者主要通过测量磁场方向的变化和速度的色散[10-11]来估计星际介质和分子云中平均磁场

收稿日期：2022-03-01
* 湘潭大学研究生科研创新项目（XDCX2022Y071）
** 通信作者：wangruyue28@163.com

的大小,但此方法依赖的假设太多,因此测量出来的磁化强度精度较低。近年来也有许多测量MHD湍流磁化强度的研究:Lazarian等[13]利用速度梯度技术研究了阿尔文马赫数与速度梯度分布特性的关系,实现了星际介质磁场强度的测量,但这种技术仅仅适用于光谱数据的分析研究;Carmo等[14]对速度梯度技术进行推广,利用同步辐射梯度技术测量了天空平面中的平均磁场强度,证明了同步辐射梯度技术可以很好地测量磁化强度;Hu等[15]基于MHD湍流的各向异性,利用结构函数分析了速度的相关信息,得到在亚阿尔文湍流区,MHD湍流速度的垂直与平行分量的比值与阿尔文马赫数呈幂律关系,从而实现了磁化强度的测量。目前,测量磁化强度的技术虽然很多,但存在一定的局限性。因此,仍然需要发展新技术来实现磁化强度的测量。 Zhang等[16]研究证实,利用同步偏振辐射的方差统计技术可以成功实现湍流谱指数的测量。此外,这也为测量磁场强度提供了一种新的思路。

本文基于同步偏振辐射统计,从数值模拟的角度建立了同步偏振辐射强度的标准差与平均值的比值与阿尔文马赫数的幂律关系,并将此关系应用于真实的Planck观测数据,对磁化强度进行测量。

1 理论基础

1.1 MHD湍流的基本性质

可压缩MHD湍流的性质可以通过2个关键的参数来衡量,分别为阿尔文马赫数($M_{\rm A}$)和声速马赫数($M_{\rm s}$),二者的表达式分别为:

$$M_{\rm A}=\frac{v_{\rm inj}}{v_{\rm A}},\tag{1}$$

$$M_{\rm s}=\frac{v_{\rm inj}}{c_{\rm s}},\tag{2}$$

式中:$v_{\rm inj}$表示湍流的注入速度;$v_{\rm A}=B/\sqrt{4\pi\rho}$是阿尔文速度;$c_{\rm s}$表示声速。$M_{\rm A}$可以揭示可压缩MHD湍流的磁化强度,$M_{\rm s}$能够表征可压缩MHD湍流的可压缩程度。

1.2 同步偏振辐射涨落理论

同步辐射信号是天体物理中磁场信息的重要来源之一。当非热的相对论电子在磁化的湍流介质中绕着磁场做螺旋运动时,可以产生同步辐射信号。通过此观测量的统计分析可以揭示湍流的相关信息。基于此,Lazarian和Pogosyan[17-18]提出利用同步辐射涨落和同步偏振辐射涨落研究MHD湍流的性质。同步辐射涨落理论结合MHD湍流的各向异性理论,能够实现MHD湍流磁场强度的测量[19]。当同步偏振辐射的涨落较小时,磁场的涨落较小,磁场强度较强;当同步偏振辐射的涨落较大时,磁场的涨落较大,磁场强度较弱。假设相对论电子为均匀、各向同性分布时,同步辐射强度(I)和其他斯托克斯参量(Q,U)分别定义为[20]:

$$I=\int_0^L\left[B_x^2+B_y^2\right]{\rm d}z,\tag{3}$$

$$Q=\int_0^L\left[B_x^2-B_y^2\right]{\rm d}z,\tag{4}$$

$$U=\int_0^L 2B_x B_y{\rm d}z,\tag{5}$$

式中:B_x和B_y分别表示垂直于视线方向的2个磁场分量;L表示辐射区的积分深度;z表示视线方向沿着坐标轴z轴。通过式(4)和(5)可得同步偏振辐射强度为

$$P=\sqrt{Q^2+U^2}。\tag{6}$$

2 模拟数据

本文所用模拟数据的分辨率分别为480^3、512^3和792^3,其中分辨率为480^3的数据是由开源的自适应ATHENA[21]和ZEUS[22]代码产生;分辨率为512^3的数据是由Cho和Lazarian[23]编写的代码通过求解周期性边界条件下理想MHD湍流方程产生;分辨率为792^3的数据是由开源的ZEUS-MP/3D[21]代码产生。3种分辨率的模拟数据都包含了密度、速度和磁场的相关信息,通过这些信息可以获得$M_{\rm A}$和$M_{\rm s}$的信息。值得注意的是,$M_{\rm A}$的值是在数值模拟达到稳态后的数据中获取的,不能通过设置初始条件来获取。换句话说,不同分辨率的数值模拟不会获得相同的$M_{\rm A}$,仅仅可能得到其近似值。

3 计算结果

在亚阿尔文湍流情况下,即$M_{\rm A}<1$时,$M_{\rm A}$的对数值与同步偏振强度的标准差(σ)和平均值(μ)之间比值的对数值存在定量关系

$$\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)'=2.026M_{\rm A}'-1.782;\tag{7}$$

在超阿尔文湍流情况下,即$M_{\rm A}>1$时,二者的对数值存在定量关系

$$\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)'=1.663M_{\rm A}'-1.998,\tag{8}$$

式中:$\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)' = \log\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)$, $M_{\rm A}' = \log M_{\rm A}$。根据式(7)和(8),可以得到不同湍流区中,同步偏振辐射 σ 和 μ 的比值与 $M_{\rm A}$ 的幂律关系为:

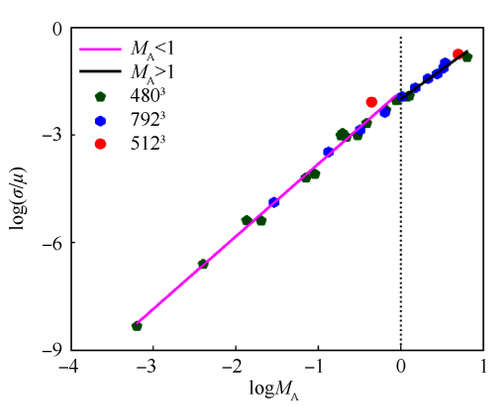
在亚阿尔文湍流区,即 $M_{\rm A} < 1$,

$$\frac{\sigma}{\mu} \propto M_{\rm A}^{2.026 \pm 0.093}; \tag{9}$$

在超阿尔文湍流区,即 $M_{\rm A} > 1$,

$$\frac{\sigma}{\mu} \propto M_{\rm A}^{1.663 \pm 0.201}。 \tag{10}$$

$M_{\rm A}$ 与同步偏振强度的 σ 与 μ 的比值关系如图 1 所示。在亚阿尔文湍流和超阿尔文湍流这 2 种情况下,随着 $M_{\rm A}$ 的增大,同步偏振辐射强度的 σ 和 μ 之间的比值也在增大,这与预期的结果是一致的。因为 $M_{\rm A}$ 与磁场的强度呈反比,见式(1),$M_{\rm A}$ 越大,磁场强度越弱,从而导致同步偏振辐射的涨落程度越明显,因此,同步偏振辐射强度的 σ 越大。另外,研究显示,超阿尔文湍流情况下的线性拟合线的斜率小于亚阿尔文湍流情况下的斜率,即在超阿尔文湍流情况下,线性拟合线较平坦。这可能是由于在 $M_{\rm A}>1$ 的情况下,MHD 湍流的性质发生改变造成的。在这种情况下,大尺度的运动是由动力学湍流主导,而并非 MHD 湍流控制,这可能改变了同步偏振辐射涨落的分布,因此斜率减小。



注:黑色虚线表示 $M_{\rm A}>1$ 和 $M_{\rm A}<1$ 的分界线。

图 1　阿尔文马赫数($M_{\rm A}$)与同步偏振辐射强度的标准差和平均值的比值关系

基于 Planck 卫星获得的同步辐射观测数据[24]得到的 $M_{\rm A}$ 的预测如图 2 所示。首先对所研究数据进行 σ=4 的高斯滤波,之后再将其分成许多小子块,然后求解每一个小子块中同步辐射强度的 σ 和 μ 的比值,最后将图 1 所获得的 $M_{\rm A}$ 和同步偏振强度的标准差和平均值之间比值的定量关系,即式(7)和(8)运用到真实观测数据中,得到表征磁场强度的 $M_{\rm A}$。

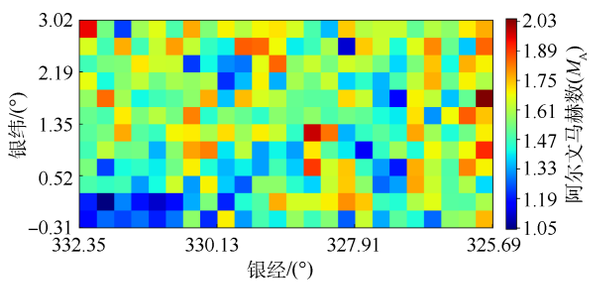


图 2　$M_{\rm A}$ 的预测

通过统计图 2 中每个小子块中 $M_{\rm A}$ 的值,可以获得 $M_{\rm A}$ 的概率分布如图 3 所示,其中红线代表高斯拟合线,置信度为 95%。通过高斯拟合,可以获得高斯分布函数的平均值为 1.540,这反映了所测量天体物理环境的 $M_{\rm A}$ 均值为 1.540。因此,利用同步偏振辐射强度的 σ 和 μ 的比值与 $M_{\rm A}$ 的关系预测了该真实天体物理环境中的磁化强度。

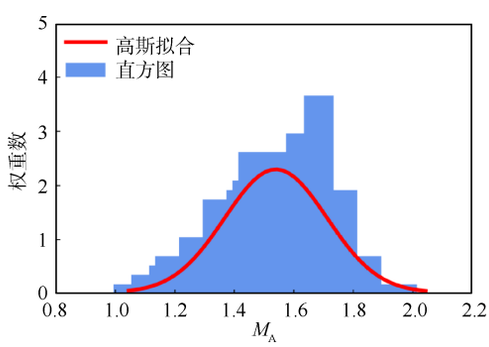


图 3　$M_{\rm A}$ 的概率分布

4　讨　论

本论文中,假设了相对论电子的分布是均匀、各向同性的。实际上,电子的性质会影响辐射的信息,特别是对于存在激波和磁重联的各向异性环境,如分子云环境,但是本文测量的星际介质环境 $M_{\rm s}$ 较小,几乎排除激波的出现。如果将来的研究涉及到具体的天体物理环境,如喷流、超新星遗迹和脉冲星风云周围的区域,相对论电子为各向异性分布的考虑是必要的。另外,在计算斯托克斯参量时,没有考虑辐射转移过程。因为辐射转移过程的考虑存在代码技术和计算时间的限制。实际上,辐射转移可以采用诸如测试分子的办法来研究,如 Yang 等[25]表明辐射转移没有阻碍技术的使用,相反,辐射转移的考虑为测量磁场提供了新途径。此

外,在实际研究过程中,本文尝试了<30 GHz的多组Planck全天数据,选择不同天区的数据进行了研究。但作为以探究测量M_A技术可行性为目的的研究,仅仅提供了一个例子。特别需要指出的是,开源的Planck数据是巡天数据,其中可能含有非湍动辐射的信息。目前,本研究团队正在开展使用低频阵列(low frequency array,LOFAR)射电望远镜数据的研究,已得到更精确的结果。

星际磁场对恒星形成的不同阶段、分子云的形成和演化以及宇宙射线的传播和加速有重要的作用。本文提出的新测量磁场强度的方法,即利用同步偏振辐射强度的σ和μ的比值可以实现磁化强度的测量。在将来,这种方法可以应用于LOFAR、平方千米射电阵列望远镜以及500 m口径球面射电望远镜的观测数据,这为测量磁化强度提供了一种手段。此外,这种方法与其他方法的协同使用,为测量MHD湍流磁化强度提供了一种可能性,并有可能揭示其他重要的MHD湍流性质。

5 结 论

本文基于模拟数据,利用同步偏振辐射强度的σ和μ之间的比值与M_A的定量关系,预测了由Planck卫星所获得的同步辐射数据的磁化强度。从数值模拟中得到:同步偏振辐射强度的σ和μ之间的比值与M_A呈现幂律关系。从Planck卫星所得的观测数据中预测M_A的平均值为1.540。因此,利用同步偏振辐射强度的σ和μ的比值可以实现磁化强度的测量。

参 考 文 献

[1] ARMSTRONG J W, RICKETT B J, SPANGLER S R. Electron density power spectrum in the local interstellar medium [J]. The Astrophysical Journal, 1995, 443(1):209.

[2] CHEPURNOV A, LAZARIAN A. Extending the big power law in the sky with turbulence spectra from Wisconsin Hα mapper data [J]. The Astrophysical Journal,2010,710(1):853-858.

[3] MAC LOW M M, KLESSEN R S. Control of star formation by supersonic turbulence [J]. Reviews of Modern Physics,2004,76(1):125-194.

[4] YAN H, LAZARIAN A. Cosmic-ray propagation: nonlinear diffusion parallel and perpendicular to mean magnetic field[J]. The Astrophysical Journal,2008,673(2):942-953.

[5] CAPRIOLI D, SPITKOVSKY A. Simulations of ion acceleration at non-relativistic shocks I acceleration efficiency [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 783(2):91.

[6] NARAYAN R, MEDVEDEV M V. Thermal conduction in clusters of galaxies [J]. The Astrophysical Journal, 2001,562(2):L129-L132.

[7] LAZARIAN A, VISHNIAC E T. Reconnection in a weakly stochastic field [J]. The Astrophysical Journal, 1999,517(2):700-718.

[8] LAZARIAN A, EYINK G L, JAFARI A, et al. 3D turbulent reconnection: theory, tests, and astrophysical implications [J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(1): 012305.

[9] CRUTCHER R M. Magnetic fields in molecular clouds [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2012,50:29-63.

[10] DAVIS L. The strength of interstellar magnetic fields [J]. Physical Review,1951,81(5):890-891.

[11] CHANDRASEKHAR S, FERMI E. Magnetic fields in spiral arms [J]. The Astrophysical Journal, 1953, 118:113.

[12] FALGARONE E, TROLAND T H, CRUTCHER R M, et al. CN Zeeman measurements in star formation regions[J]. Astronomy and Astrophysics,2008,487(1): 247-252.

[13] LAZARIAN A, YUEN K H, HO K W, et al. Distribution of velocity gradient orientations: mapping magnetization with the velocity gradient technique [J]. The Astrophysical Journal,2018,865(1):46.

[14] CARMO L, GONZÁLEZ-CASANOVA D F, FALCETA-GONÇALVES D, et al. Synchrotron intensity and polarization gradients: tools to obtain the magnetization level in a turbulent medium [J]. The Astrophysical Journal,2020,905(2):130.

[15] HU Y, XU S Y, LAZARIAN A. Anisotropies in compressible MHD turbulence: probing magnetic fields and measuring magnetization [J]. The Astrophysical Journal,2021,911(1):37.

[16] ZHANG J F, LAZARIAN A, LEE H, et al. Studying magnetohydrodynamic turbulence with synchrotron polarization dispersion [J]. The Astrophysical Journal, 2016,825(2):154.

(下转第27页)

劳退化试验研究[J].岩土工程学报，2013，35(增刊2)：1037-1040.
[10] 宋丙辉，谌文武，吴玮江，等.锁儿头滑坡滑带土不同含水率大剪试验研究[J].岩土力学，2012，33(增刊2)：77-84.
[11] 周怡，彭振斌，尹泉，等.板岩质砂土-混凝土界面剪切特性研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2019，50(9)：2233-2241.
[12] 尚文昌.循环荷载下桩-土界面弱化机制研究[D].青岛：青岛理工大学，2016.
[13] 王永洪.黏性土中静力压入单桩受力特性试验研究[D].青岛：青岛理工大学，2018.
[14] 王永洪，张明义，刘雪颖，等.基于桩土界面应力测试的开闭口桩静力沉桩室内试验对比研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2021，52(2)：599-606.
[15] 王永洪，张明义，白晓宇，等.不同含水率状态下黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究[J].防灾减灾工程学报，2018，38(1)：118-123+192.
[16] 刘建军.土石混填路基工程特性及其稳定性分析[D].长沙：湖南大学，2016
[17] 周凯，程寅，黄新.不同桩-土界面直剪试验研究[J].路基工程，2011(5)：93-95+99.
[18] 陈荣刚，马晶，崔壮壮，等.含水率对桩-土界面剪切特性影响的试验研究[J].工业建筑，2020，50(11)：102-105+31.
[19] 桑伟，王保田，刘文彬，等.粘土切削时含水率对界面抗剪强度的影响[J].广西大学学报(自然科学版)，2015，40(4)：943-948.
[20] 刘涛，王勇，孙吉主，等.吸湿环境下膨胀土与桩接触面强度特性试验研究[J].岩土工程学报，2015，37(增刊1)：161-166.
[21] 王永洪，张明义，刘俊伟，等.一种大型桩土界面直剪试验装置的研制与应用[J].岩石力学与工程学报，2018，37(增刊1)：3714-3721.
[22] 中华人民共和国水利部.土工试验标准方法：GB/T50123—2019[S].北京：中国计划出版社，2019.
[23] 张嘎，张建民.粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J].岩土工程学报，2004，26(1)：21-25.
[24] 张嘎，张建民.循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J].岩土工程学报，2004，26(2)：254-258.
[25] 赵春风，龚辉，赵程，等.考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J].岩石力学与工程学报，2012，31(4)：848-855.

(责任编辑：兰丽丽)

(上接第20页)

[17] LAZARIAN A, POGOSYAN D. Statistical description of synchrotron intensity fluctuations: studies of astrophysical magnetic turbulence[J]. The Astrophysical Journal, 2012, 747(1): 5.
[18] LAZARIAN A, POGOSYAN D. Spectrum and anisotropy of turbulence from multi-frequency measurement of synchrotron polarization [J]. The Astrophysical Journal, 2016, 818(2): 178.
[19] GOLDREICH P, SRIDHAR S. Toward a theory of interstellar turbulence II: strong alfvenic turbulence[J]. The Astrophysical Journal, 1995, 438: 763-775.
[20] WAELKENS A H, SCHEKOCHIHIN A A, ENSSLIN T A. Probing magnetic turbulence by synchrotron polarimetry: statistics and structure of magnetic fields from Stokes correlators [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 398(4): 1970-1988.
[21] STONE J M, GARDINER T A, TEUBEN P, et al. Athena: a new code for astrophysical MHD [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2008, 178(1): 137-177.
[22] HAYES J C, NORMAN M L, FIEDLER R A, et al. Simulating radiating and magnetized flows in multiple dimensions with ZEUS-MP [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2006, 165(1): 188-228.
[23] CHO J, LAZARIAN A. Compressible magnetohydrodynamic turbulence: mode coupling, scaling relations, anisotropy, viscosity-damped regime and astrophysical implications [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, 345(1): 325-339.
[24] PLANCK C, ADAM R, ADE P A R, et al. Planck 2015 results X diffuse component separation: foreground maps [J]. Astronomy and Astrophysics, 2016, 594: A10.
[25] YANG B, ZHANG J F, LAZARIAN A, et al. Statistical tracing of turbulent magnetic fields in the optically thick interstellar medium [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 503(1): 768-776.

(责任编辑：兰丽丽)