arXiv:2303.12239v1 [astro-ph.HE] 22 Mar 2023

日球层宇宙射线的数据驱动分析：宇宙质子的扩散

N. Tomassetti [1], E. Fiandrini [1], B. Bertucci [1], F. Donnini [2], M. Graziani [1], B. Khiali [3], A. Reina Conde [4,1]
Dipartimento di Fisica e Geologia, University of Perugia, Italy [2] *INFN - Sezione di Perugia, Italy* [3] *INFN - Sezione di Roma Tor Vergata, Italy and* [4] *INFN - Sezione di Bologna, Italy*

理解太阳变化与宇宙射线（银河宇宙射线）之间随时间变化的关系，对于建立空间高能辐射的预测模型至关重要。银河宇宙射线在日球层内传播时，会受到磁湍流和太阳风扰动的影响，从而产生所谓的太阳调制效应。为研究这一现象，我们对银河宇宙射线通量在太阳活动周期内的时间依赖性进行了数据驱动分析。通过对 AMS-02 和 PAMELA 按月在太空采集的银河宇宙射线数据进行全局统计推断，我们确定了银河宇宙射线扩散平均自由程对刚度和时间的依赖关系。本文展示银河宇宙射线质子的研究结果，并从粒子输运基本过程的角度探讨其解释，以及它们与日球层等离子体动力学之间的关系。

I. 引言

银河宇宙射线（GCRs）进入日球层时，会受到太阳调制效应的影响，与日球层外的局部星际谱（LIS）相比，其通量能谱会发生显著变化。要理解太阳调制，关键在于对银河宇宙射线在太阳风及其嵌入磁场中的输运过程进行建模。主要过程包括扩散、漂移、对流和绝热减速。所有这些过程都具有时间依赖性，并遵循准周期性的 11 年太阳活动周期。太阳调制在银河宇宙射线物理和日球物理学 [1, 2]中十分重要。对银河宇宙射线在行星际空间中的时间演化进行建模，对于评估长期载人航天任务中的辐射风险和危害也很重要。在这方面，来自 AMS-02 [4, 5]和 PAMELA [6, 7] 实验的最新高精度、分时数据，为研究银河宇宙射线在较长时间尺度上的调制提供了独特的机会。

II. 方法论

A. 模型

我们构建了日球层的二维描述，将其模拟为一个以太阳为中心的球形气泡。太阳风以速度 $V_{sw}(r,\ \theta,\ t)$ 从太阳径向流出，该速度取决于日球半径 r、日球纬度 θ 和时间t [11]。太阳风穿过位于 $r_{\rm TS} = 85$天文单位处的终止激波后，速度降至亚声速，并在位于 $r_{\rm HP} = 122$ 天文单位处的日球层顶消失。地球位于赤道面上，距太阳 r_0 =1天文单位。行星际磁场（IMF） $vecB$ 缠绕成旋转螺旋结构，其角张角取决于太阳风速度。类似地，日球层电流片（HCS）也按照这一结构建模。HCS 是一个旋转层，将 IMF 分隔为两个极性相反的半球，性半球。HCS 振幅的角尺度尤其取决于磁轴与太阳自转轴之间的倾角 α 。倾角随时间变化，从太阳活动极小期的 $\sim 10^\circ$ （HCS 平坦）到太阳活动极大期及磁极反转期间的 $\sim 80^\circ$ （HCS 呈波状）。自 20 世纪 70 年代至今，威尔科克斯太阳观测站（WSO）每隔 10 天提供一次倾角测量数据 [12]。

日球层中银河宇宙射线的输运由帕克方程描述 [1]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla\cdot[\mathbf{K}^S\cdot\nabla f] - (\vec{V}_{sw}+\vec{V}_D)\cdot\nabla f + \frac{1}{3}(\nabla\cdot\vec{V}_{sw})\frac{\partial f}{\partial(lnR)} \tag{1}$$

其中， f 是银河宇宙射线粒子的相空间密度，$R = p/Z$ 是其刚度（动量/电荷比），$\mathbf{K}^S$是扩散张量的对称部分，V_{sw} 是太阳风速度， V_D 是漂移速度

$$\vec{V}_D = \frac{\beta R}{3}\nabla\times\frac{\vec{B}}{B^2}\,. \tag{2}$$

银河宇宙射线通量 $J = J(t,\ R)$由 $J = \frac{\beta c}{4\pi}n$给出，其中 βc 是其速度， $n = 4\pi R^2 f$ 是其数密度。在本研究中，我们采用1 式，利用随机微分方程方法在稳态条件下（$\partial/\partial t = 0$）求解 [8],

银河宇宙射线粒子的扩散源于它们与湍流行星际磁场的小尺度不规则结构发生散射。漂移运动是由行星际磁场规则分量的梯度和曲率引起的，尤其是在日球层电流片附近。扩散和漂移可以分别作为对称部分和反对称部分，形式上纳入扩散张量 K：$\mathrm{K} = \mathrm{K}^S + \mathrm{K}^A$，其中 $K^S_{ij} = K^S_{ji}$ 和 $K^A_{ij} = -K^A_{ji}$。不过，在方程 1 中，漂移通过 V_D 项显式计入，因此 K 项 [1]中只出现扩散张量的对称部分。$\mathbf{K}^S$ 张量还可分解为平行扩散 $K_\parallel$ 和垂直扩散 $K_\perp$，其中我们假设 $K_\perp = \xi K_\parallel$，且 $\xi \cong 0.02$ [13]。相应的平均自由程分别为 $\lambda_\parallel$ 和 $\lambda_\perp$，因此

$K_{\parallel} = \beta c\lambda_{\parallel}/3$，其中 $\beta = v/c$ 为粒子速度。Palmer 报告了一项关于 ∼0.5 MV–5 GV 刚度范围内平行平均自由程的大规模观测资料汇编 [28]。然而，平均自由程取决于刚度和时间。根据回旋共振条件，当银河宇宙射线的拉莫尔半径 $r_L = r_L(R)$ 与不规则结构的典型尺度 λ 相当时，便会发生散射。根据条件 $r_L \sim \lambda$，可知刚度为 R 的银河宇宙射线会在波数 $k_{\rm res} \sim 1/R$处发生共振。行星际磁场不规则结构遵循 $w(k) \propto k^{-\eta}$这种分布，它表示以波数 $k = 2\pi/\lambda$为变量的行星际湍流功率谱。一个重要参数是指数 η，依据该参数可区分行星际磁场功率谱 [14]的不同状态。由此得到的扩散平均自由程（或扩散系数）对刚度的依赖关系为 $\lambda_{\parallel} \sim R^{2-\eta}$。为描述行星际磁场功率谱 [14], 的不同状态，平均自由程通常参数化为粒子刚度的 双幂律函数。对于平行分量，我们采用以下描述:

$$\lambda_{\parallel} = K_0 \left(\frac{B_0}{B}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{a} \times \left[\frac{(R/R_0)^h + (R_k/R_0)^h}{1 + (R_k/R_0)^h}\right]^{\frac{b-a}{h}}, \tag{3}$$

其中， $R_0 \equiv 1$ GV设定刚度尺度， B_0 是 $r_0 = 1$ 天文单位处行星际磁场 B 的局部值，归一化因子 K_0 的单位为 $10^{23}\ cm^2 s^{-1}$。谱指数 a 和 b 分别设定 $\lambda_{\parallel}$ 在 R_k以下和以上的刚度依赖斜率。参数 h设定过渡的平滑程度。垂直分量由 $\lambda_{\perp} \equiv \xi\lambda_{\parallel}$得出，并在极区 [15]加入小幅修正。

B. 关键参数

一般而言，式3 中的所有参数都可能随时间变化 [16]。我们确定了一组最小的扩散参数： K_0、 a和 b。这些参数及其时间依赖关系将利用 AMS-02 和 PAMELA 的分时银河宇宙射线质子数据确定 [4, 6, 7]。除了扩散参数，我们还定义了一组最小的日球层参数 $\{\alpha, B_0, A\}$，用于描述特定时期日球层随时间变化的状态：日球电流片倾角 α、局部行星际磁场强度B_0及其极性 A。磁极性定义为太阳北极（南极）向外（向内）方向上行星际磁场的符号。为了求解给定银河宇宙射线种类的式1 ，必须将局部星际谱指定为边界条件。对于银河宇宙射线质子，我们的局部星际谱模型通过银河传播计算和银河宇宙射线通量数据获得 [

17–20]。用于约束银河宇宙射线传播模型的数据，来自旅行者1号航天器，覆盖 ∼100 -500 MeV 的动能 [3],，以及 AMS-02 实验，覆盖 $E \sim 100\,\mathrm{GeV}$–2TeV [4, 21, 22]。我们的质子局部星际谱与其他近期模型 [10, 23–27]。质子

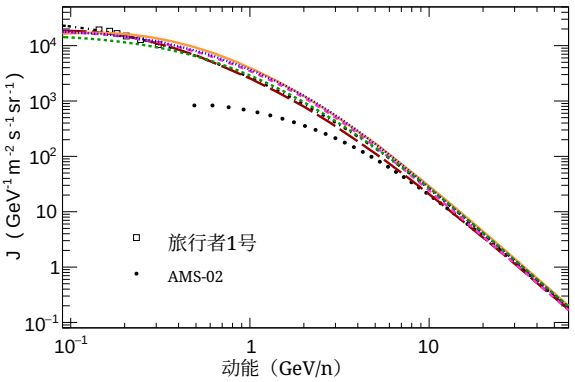


图1. 汇总了不同研究中的质子局部星际谱模型：红色长虚线 [25], 黑色点划线 [24] 蓝色点线 [10], 绿色点线 [23], 粉色虚线 [20], 橙色实线 [27]。数据来自旅行者-1 [3] 和 AMS-02 [21]。

局部星际谱模型汇总见图1，同时列出了旅行者1号和 AMS-02 的数据。

C. 分析

我们通过对 AMS-02 和 PAMELA 报告的银河宇宙射线质子通量月度测量结果进行统计推断，确定随时间变化的银河宇宙射线扩散参数 [4, 6, 7]。然而，每个月还必须指定日球层参数。这些参数根据 WSO 天文台的观测结果（α、 A）以及 ACE 空间探测器的原位测量结果（B_0）进行评估。对于给定的历元 t，在时间窗口 $[t - \Delta T, t]$ 内计算向后移动平均值，其中 $\Delta T = 6 - 12$ 个月。这样可确保平均值 $\hat{}\alpha$、 A 和 B_0 反映在历元 t [11, 25]到达地球的银河宇宙射线所采样的平均行星际磁场条件。因此，对于每个历元，都可以通过对 AMS-02 和 PAMELA 的银河宇宙射线质子测量结果进行全局拟合，确定扩散参数 K_0、 a 和 b 。实际拟合时，我们构建了一个六维参数网格，每个节点对应一种参数配置 $\vec{q} =$ （α、 B_0、 A、 K_0、 a、 b）。该网格包含 938,400 个节点。采用随机方法，在多个动能值（范围为 20 MeV 至 200 GeV）下计算了网格中每个节点对应的银河宇宙射线质子谱 J_m（E、 $\vec{q}$）。该模拟极其耗费 CPU 资源，需要模拟 140 亿条伪粒子轨迹；这些轨迹从地球向后传播至日球层顶，随后根据其局部星际谱重新加权。质子网格完成采样后，按如下方式确定参数。对于在历元 t进行的通量测量 J_d（E、 t），根据模型计算 J（E、 $\vec{q}$）及其参数进行评估。日球层参数 $\hat{}\alpha$、 B_0、 A 固定为其在历元 t的评估值。对于在历元

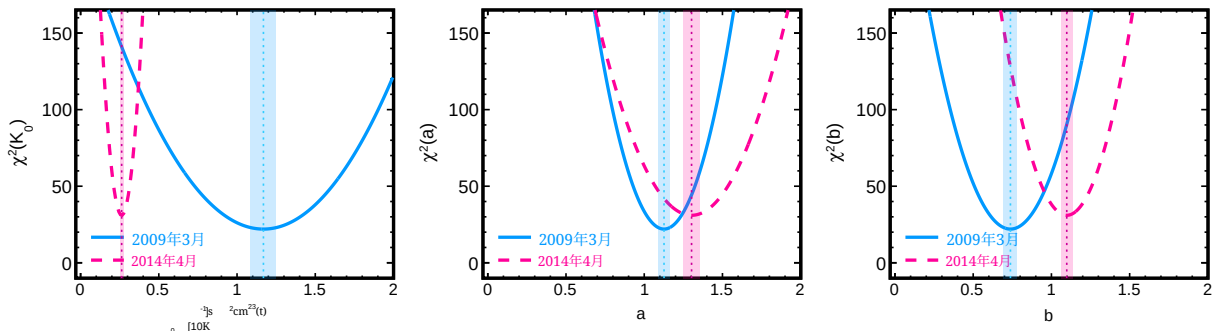


图2. 使用两个时期的宇宙射线质子通量数据，绘制的 χ^2 曲面关于输运参数 K_0、 a和 b 的一维投影：2014年4月（对应太阳活动极大期，粉色虚线，数据来自 AMS-02）和2009年3月（对应太阳活动极小期，蓝色实线，数据来自 PAMELA）。

t观测到的银河宇宙射线通量测量结果 （、），其随能量 变化，扩散参数通过最小化以下函数确定：

$$\chi^2(K_0, a, b) = \sum_i \frac{[J_d(E_i, t) - J_m(E_i, \vec{q})]^2}{\sigma^2(E_i, t)}, \qquad (4)$$

其中，误差为

$$\sigma^2\ E_i\ t\ \ = \sigma_d^2\ E_i\ t\ +(,\ )$$

$\sigma^2_{mod}\ E_i\ t$
(，)(，)。误差涵盖多种因素：数据的实验不确定性、模型的理论不确定性，以及与最小化过程相关的不确定性。图2展示了使用两组通量测量计算得到的 χ^2曲面投影，分别对应两个时期：2009年3月的太阳活动极小期和2014年4月的太阳活动极大期。图中每条曲线均标出了最佳拟合参数及其不确定性带。数据来自 PAMELA（2009年3月）和 AMS-02 实验（2014年4月）。可以看出，AMS-02 数据对参数 K_0 和 b 的约束很强。参数 a 对低刚度数据较为敏感，因此 PAMELA 对其约束更好。总体而言，AMS-02 得出的 χ^2值大于 PAMELA，但拟合的收敛情况整体良好。

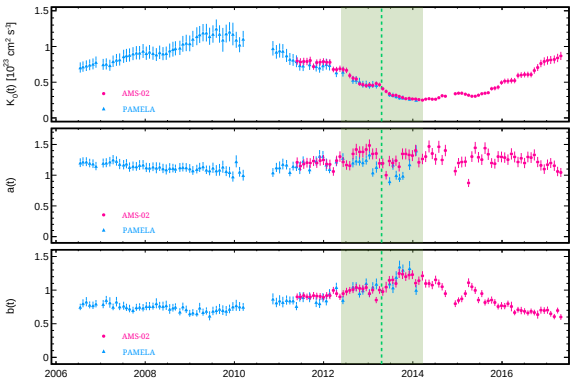


图 3. 使用 PAMELA（蓝色三角形）和 AMS-02（粉色圆圈）测得的宇宙射线质子月通量测量数据，得到的扩散参数 K_0、 a和 b最佳拟合结果。绿色带表示磁场反转时期。在此期间，行星际磁场的极性尚未明确定义。

III. 结果与讨论

除图2所示的两个时期外，我们还对 AMS-02 和 PAMELA 的宇宙射线质子通量测量的整个时间序列进行了拟合。AMS-02 时间序列由 79 个质子通量数据组成，这些数据是在 2011年5月至2017年5月期间按 27 天为间隔测得的。PAMELA 时间序列由 83 个质子通量数据组成，这些数据是在 2006年6月至2014年1月期间按 27 天为间隔测得的。其数据按月提供，涵盖了太阳活动周期 23 和 24 的很大一部分。采用第IIC节所述的最小二乘法，我们得到了扩散参数的时间序列最佳拟合值 K_0、 a和 b，以及相应的不确定度。这些结果如图3所示。拟合涵盖了太阳活动的多个时期，包括太阳活动极小期、太阳活动极大期和行星际磁场反转。通过拟合，我们发现扩散参数表现出明显的时间依赖性，与太阳活动相关 [11]。参数K_0 与月平均太阳黑子数呈反相关，这一点可在力场模型框架下轻松理解，因为调制参数为 $\phi \propto 1/K_0$ [10]。较小的 K_0 值意味着扩散较慢，调制效应也更显著，即对低能银河宇宙射线通量的抑制更强。相反，较大的 K_0 值意味着银河宇宙射线扩散更快，因此对局部星际谱的改变较小。例如，我们发现 K_0（t）与在给定参考能量 [11]处评估的通量 J（E_0，t）呈正相关。我们的发现与其他研究结果高度一致 [16, 24, 25]。在所有这些研究中，银河宇宙射线输运均由平行扩散主导。我们还发现，参数 b 表现出显著的时间依赖性，反映了太阳变化与惯性区磁湍流谱之间的联系。在这一区间内，相关谱指数从 $\eta = 0.74 \pm 0.08$ 演变至

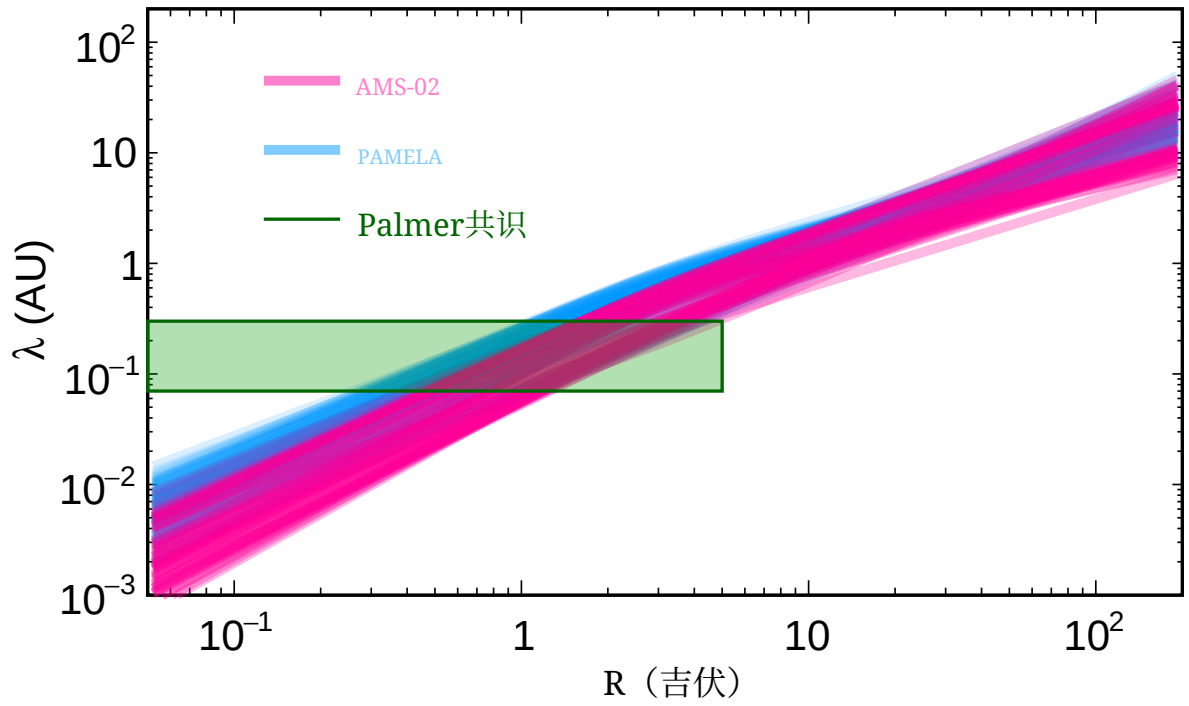


图 4. 扩散平均自由程的范围 $\lambda_{\parallel}$ 随银河宇宙射线刚度变化的关系，该结果是根据所研究时段推断得出的。粉色和蓝色带分别对应 AMS-02 和 PAMELA 数据集。请注意，这两条带大部分重叠。阴影绿色框对应于所谓的 *Palmer consensus* 关于 $\lambda_{\parallel}$ 在刚度低于 5GV 时的平均值[28]。

太阳活动极小期至太阳活动极大期期间的 $\approx 1.3 \pm 0.15$ 。这表明行星际磁场湍流会发生变化 [29, 30]。关于参数 a，我们发现其时间依赖性较弱，即谱指数几乎恒定为 $\eta = 0.79 \pm 0.13$。在这两个区间内，我们的发现均与行星际磁场功率谱的直接测量结果一致 [14]。

重建出扩散参数K_0、 a、 b的完整时间序列后，根据图3 中的最佳拟合值，可以利用方程 $\lambda_{\parallel}(t,\ R)$ 计算随时间和刚度变化的扩散平均自由程 $\lambda_{\parallel}(t,\ R)$，结果见图3。图中展示了根据所研究时段内 AMS-02（粉色圆点）和 PAMELA（蓝色三角形）数据推断出的银河宇宙射线刚度下所有平均自由程的范围。这两条带大部分重叠。平行扩散的平均自由程与观测结果中所谓的 Palmer共识相符 $\lambda_{\parallel}$，图中以绿色阴影框表示 [28]。

IV. 致谢

本研究是在佩鲁贾大学与意大利航天局（ASI）联合研究计划框架下开展的，依据协议 ASI-UniPG 2019-2-HH.0。B. K.、M. G. 和 F. D. 感谢协议 ASI-INFN 2019-19-HH.0 提供的支持。同时感谢佩鲁贾大学基础研究基金的支持。本研究所用的银河宇宙射线数据取自 ASI 空间科学数据中心的宇宙射线数据库。

V. 声明

所有作者均已批准本稿，同意其姓名的排列顺序，并声明不存在利益冲突。作者对本文的内容和撰写负责。

[1] Moraal, H., *Cosmic-Ray Modulation Equations*,《空间科学评论》176 299 (2013);

[2] Potgieter, M. S., *Solar modulation of cosmic rays*, Living Rev. Solar Phys., 10, 3（2013）；

[3] Cummings, A. C. 等, *Galactic cosmic rays in the local interstellar medium: Voyager 1 observations and model results* 831, 18 2016 , 天体物理学杂志（）；[4] Aguilar, M., 等, *Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station* 121, 051101 2018 , 《物理评论快报》（）；[5] Aguilar, M., 等, *Observation of Complex Time Structures in the Cosmic-Ray Electron and Positron Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station* 121, 0511012 , 《物理评论快报》（2018）；[6] Adriani, O., 等, *Time dependence of the proton flux measured by PAMELA during the 2006 July - 2009 December solar minimum* 765, 91, 2013 , 天体物理学杂志（）；[7] Martucci, M., 等, *Proton Fluxes Measured by the PAMELA Experiment from the Minimum to the Maximum Solar Activity for Solar Cycle 24* 854, 天体物理学杂志L2（2018）；[8] Strauss, R. D., Effenberger, F., *A Hitch-hiker's Guide to Stochastic Differential Equations. Solution Methods for Energetic Particle Transport in Space Physics and Astrophysics*, 空间科学评论（2017）；[9] Kappl, R., *SOLARPROP: Charge-sign dependent solar modulation for everyone* 207 2016 , 计算物理通讯（）386-399；[10] Tomassetti, N., *Solar and nuclear physics uncertainties in cosmic-ray propagation* 96, 103005 , 《物理评论D》（2017）；[11] Fiandrini, E., Tomassetti, N., Bertucci, 等, *Numerical modeling of cosmic rays in the heliosphere: Analysis of proton data from AMS-02 and PAMELA*, 即将在《物理评论D》发表, arXiv:2010.08649 , （2021）[12] Hoeksema, J. T., *The large-scale structure of the heliospheric current sheet during the Ulysses epoch* , 空间科学评论 72, 137-148（1995）；[13] Giacalone, J. & Jokipii, J. R., *The Transport of Cosmic Rays across a Turbulent Magnetic Field* , 天体物理学杂志 520, 204（1999）；[14] Kiyani, K. H., Osman, K. T., Chapman, S. C., *Dissipationthe micro and back again and heating in solar wind turbulence: from the macro to* 373 , Phil. Trans. R. Soc. A：20140155（2015）；[15] Heber, B., 等, *Latitudinal distribution of greater than 106 MeV protons and its relation to the ambient solar wind in the inner, southern and northern heliosphere: ULYSSES Cosmic and Solar Particle Investigation Kiel Electron Telescope results* 103, 4809 , 地球物理研究杂志, （1998）；[16] Manuel, R., Ferreira, S. E. S., Potgieter, M. S., *Time-Dependent Modulation of Cosmic Rays in the Heliosphere* 289, 2207 2014 , 太阳物理（）；[17] Tomassetti, N., *Cosmic-ray protons, nuclei, electrons, and antiparticles under a two-halo scenario of diffusive propagation* 92, 081301 2015 , 《物理评论D》（）；[18] Tomassetti, N., *Origin of the cosmic ray spectral hardening* 752, 13 2012 , 《天体物理学杂志通讯》 L（）；[19] Feng, J., Tomassetti, N., Oliva, A., *Bayesian analysis of spatial-dependent cosmic-ray propagation: Astrophysical background of antiprotons and positrons* , 《物理评论D》94, 123007 (2016)；[20] Tomassetti, N., Bertucci, B., Bar-ao, F., 等, *Diffusion of Cosmic Rays in the Heliosphere with TeV Testington and Helium Data from AMS* 121, , 物理评论快报 251104 (2018)；[21] Aguilar, M., 等, *Precision Measurement of the Proton Flux in Primary Cosmic Rays from Rigidity 1 GV to 1.8 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station* 114, 171103 , 物理评论快报 (2015)；[22] Aguilar, M., 等, *Precision Measurement of the Helium Flux in Primary Cosmic Rays of Rigidities 1.9 GV to 3 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station* 115, 211101 , 物理评论快报 (2015)；[23] Boschini, M. J., 等, *Solution of Heliospheric Propagation: Unveiling the Local Interstellar Spectra of Cosmic-ray Species* 840, 115 2017 , 天体物理学杂志（）；[24] Corti, C., 等, *Numerical modeling of galactic cosmic ray proton and helium observed by AMS-02 during the solar maximum of Solar Cycle 24* 871, 253 , 天体物理学杂志 (2019)；[25] Tomassetti, N., Orcinha, M., Bar-ao, F., Bertucci, B., *Evidence for a Time Lag in Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays* 849, 32 2017 , 《天体物理学杂志通讯》（）；[26] Tomassetti, N., *Origin of the proton-to-helium ratio anomaly in cosmic rays* 815, 1 , 《天体物理学杂志通讯》 L (2015)；[27] Tomassetti, N., *Testing universality of cosmic-ray acceleration with proton/helium data from AMS and Voyager-1* 60, 815 825 2017 《空间研究进展》-（）；[28] Palmer, I. D., *Transport coefficients of low-energy cosmic rays in interplanetary space* , 《地球物理与空间物理评论》20, 335 (1982)；[29] Vaisanen, P., Usoskin, I., Mursula, K., *Long-Term and Solar Cycle Variation of Galactic Cosmic Rays: Evidence for Variable Heliospheric Turbulence* , 《地球物理研究杂志：空间物理》124, 804-811 (2019)；[30] Horbury, T. S., Forman, M. A., & Oughton, S., *Spacecraft observations of solar wind turbulence: an overview*, 《等离子体物理与受控聚变》, 47, B703-B717 (2005);