恒星形成能否产生能量从 40 GeV 到 10 EeV 的宇宙线质子?

Timur Dzhatdoev[a,*], Ilya Kudryashov[b], Anatoly Semenov[c,b,a]

[a]*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, 60th October Anniversary Prospect 7a, Moscow 117312, Russia*
[b]*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education, M.V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), 1(2), Leninskie gory, GSP-1, 119991 Moscow, Russia*[c]*Department of Physics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University,1(2), Leninskie Gory, GSP-1, 119991 Moscow, Russia*

arXiv:2611.32671v1 [astro-ph.HE] 24 Nov 2026

摘要

大质量恒星的形成最终会导致超新星爆发。典型的超新星遗迹会将宇宙线质子加速至 $E_{max-p} \sim 10$ TeV；对于超新星爆发或超新星遗迹激波速度为亚相对论速度的情况， E_{max-p} 的数值可能达到 $\sim$1 EeV。我们表明，在 40 GeV 至 10 EeV 的能量范围内，可观测到的宇宙线质子谱可以用三个分量之和很好地描述，这三个分量分别对应三个不同的超新星遗迹种群。我们考虑宇宙线起源的两种基本情景：I）超星系情景，假设质子在特征半径为 $H = 1-20$ Mpc 的磁场结构内扩散；II）宇宙学情景，源的最大红移为 $z_{max} = 6$。

1. 引言

恒星形成过程在许多天体物理系统中都非常重要（综述参见 [1, 2, 3] ）。尤其是，大质量恒星的形成会导致超新星爆发；随后，超新星遗迹（SNRs）会将宇宙射线（CR）粒子加速至高能[4, 5, 6, 7, 8]。由强大超新星 [9] 和/或具有亚相对论激波的“发动机驱动型”超新星 [10] 产生的超新星遗迹中的质子 E_{max-p} ，其最高能量 $\sim$1 可能达到 EeV。

本文表明，在从 40 GeV 到 10 EeV 的宽能量范围内，可观测到的质子宇宙射线谱由三个不同的成分构成，它们可能对应于不同种群的超新星遗迹。在第 2 节中，我们对质子谱进行现象学拟合；第 3 节讨论超星系情景；第 4 节讨论宇宙学情景。最后，我们简要讨论宇宙射线宇宙学情景的一种可能扩展

pr子到第5节中的较重原子核。

2. 从 40 GeV 到 10 EeV 的宇宙线质子谱

使用DAMPE探测器 [11]、LHAASO [12] 和IceTop阵列 [13] 测得的质子谱（单位为 $E^{2.75}J_p(E)$，其中 $J_p(E)$为强度）分别以黑色圆点、红色三角形和绿色方块表示于图1中；相关统计不确定性以误差棒表示。质子 $f_p(E)$在全原子核宇宙线谱中的占比，近期由Pierre Auger天文台（PAO）的探测器测得 [14]。利用 [15], 中方程（13）给出的全原子核宇宙线强度 $J(E)$的近似，我们估计质子强度$J_p(E) = f_p(E)\cdot J(E)$（图1中的洋红色星号）。能量刻度因子（例如参见 [16], 中的第5.1小节，以下简称H03）对于LHAASO和IceTop为0.93，对于PAO为0.95；相关强度已据此进行了校正。

利用 emcee代码 [17], ，我们用三个分量之和拟合了 DAMPE、LHAASO、IceTop 和 PAO 测得的合并质子谱：$J_p(E) = J_{p1}(E)+J_{p2}(E) + J_{p3}(E)$，其中前两个分量的参数取自 [18] （下文简称 DS26）中表B1的第二列，并且

$$J_{p3}(E) = K_{p3}\left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma_{31}}\left[1+\left(\frac{E}{E_{k3}}\right)^{w_{k3}}\right]^{-(\gamma_{32}-\gamma_{31})/w_{k3}}, \quad (1)$$

其中 $E_0 = 100$TeV、 $K_{p3} = 1.55\times10^{-5}$ PeV^{-1}m^{-2}s^{-1}sr^{-}、^{1} $\gamma_{31} = 2.61$、 $\gamma_{32} = 3.68$、 $E_{k3} = 1.25$ EeV，以及 $w_{k3} = 7.6$。总体拟合曲线如图 1 中的蓝色实线所示，组分 $J_{p1}(E)$、 $J_{p2}(E)$ 和 $J_{p3}(E)$ 分别以绿色、黑色和红色曲线表示。这些组分的形状分别由“带踝的平滑断裂幂律”（SBPL-A，用于 $J_{p1}(E)$，见 DS26 第 3 节）和“平滑断裂幂律”（SBPL，用于$J_{p2}(E)$ 和 $J_{p3}(E)$，见公式 1）函数形式定义。这些函数形式广泛用于唯象学研究（见 H03 和 [19,20]），并且自然地源于具有不同最大能量的一组宇宙线源（见 [21], 附录 A.5、 [22], DS26 第 2–3 节以及 [23, 24]）。

*通讯作者*Email address:* timur1606@gmail.com (Timur Dzhatdoev)

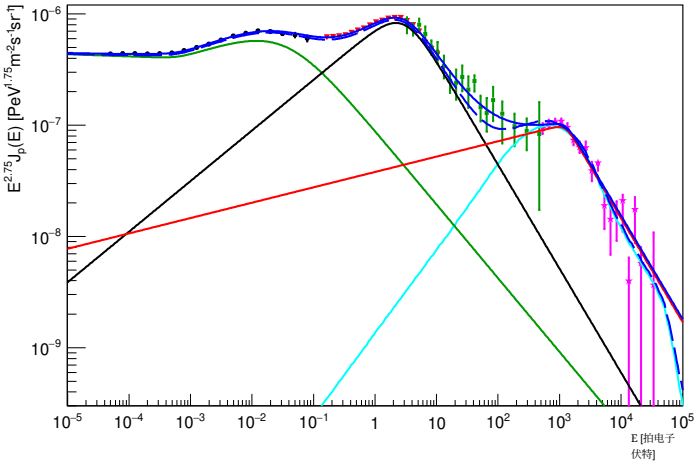

图1：各项实验测得的质子宇宙射线谱（带误差棒的符号）及其拟合曲线；更多详情请参见正文。

3. 超星系情景

诸如星系团之类的河外磁结构可能充当超高能宇宙射线的储存空间 [25]（下文简称 B97）。银河系可能嵌入一个局部结构中，其磁场强度 B 最高可达 $\sim 1\mu$G，半径 H 最高可达 $\approx$20 Mpc[26]。

全原子核宇宙线谱显示出两个膝状拐折，分别位于 $E > 10$ EeV [15]：一个在 $E = 14$ EeV，可能是碳氮氧、硅族和铁族重原子核的加速极限所致；另一个在 $E = 47$ EeV，可能由这些重原子核的光致蜕变造成。最后一种效应导致的强度降低 e 倍，在 $E_{pd} = 75$ EeV 时达到，对应于铁原子核的刚度 $R_{pd} = 2.9$ EV，以及特征能量损失时间尺度 $t_{loss} \sim 10^9$ yr（例如 [27]）[1]。令能量损失时间尺度等于逃逸时间尺度（$t_{loss} = t_{esc}$），并假设 $H = 3$ Mpc，我们估算扩散系数 $D(R_{pd}) = H^2/(6t_{esc})$ $=4.5 \times 10^{32}$ cm^2/s，以及 $D_0 = D(1\,GV) = 3.2 \times 10^{29}$ cm^2/s，假设其依赖关系为 $D \propto R^\delta$，其中 $\delta = 1/3$ [2]。

皮埃尔·奥热合作组测量各向异性的偶极幅度 $\Delta_{exp} = 6.5^{+1.3}_{-0.9}$ %（在 $E > 8$ EeV[28]处）。我们按如下方式估算偶极幅度（例如[29]）：

$$\Delta_{mod}(R) = \frac{3D(R)}{c}\frac{\nabla n(\vec{r},R)}{n(\vec{r},R)}, \qquad (2)$$

其中，c 是光速，$\vec{r} = (x,y,z)$和 $n(\vec{r},R) = \sum_{i=0}^{N} n_i(\vec{r},t_i,R)$ 是质子数密度；$N >> 1$ 是在时刻t_i爆发的超新星遗迹数量。为简便起见，我们假设在时间段 t_{max}（截至当前时刻）内进行准连续注入，并采用 Syrovatsky扩散 [30]。例如，假设在 $t_{max} = 3 \times 10^9$ 年内均匀注入，铁原子核的能量为 $E = 8$ EeV，距离为 $H = 20$ Mpc，且源聚集在距观测者 $0.8H$ 的位置，我们得到 $\Delta_{mod}(R) = 5.6$ %，与 Δ_{exp}相差不远。

4. 宇宙学情景

如果局部（$H = 1 - 20$ Mpc）河外磁场相对较弱（$B \ll 100$ nG），和/或局部不存在超高能（UHE，$E > 1$ EeV）宇宙线源，那么可观测的超高能宇宙线强度可能主要由整个宇宙恒星形成时间线中累积的通量决定。我们假设源的最大红移为 $z_{max} = 6$，并使用公开可用的 CRPropa 3 代码2 [31] 计算可观测的质子超高能谱（图 1 中的青色曲线），其中考虑了质子在宇宙微波背景（CMB）和河外背景光（EBL）光子上的光介子损失、Bethe-Heitler（电子-正电子对产生）损失以及绝热损失（红移）。我们采用 [32]的河外背景光模型；源的宇宙学演化按照 [33]的公式（15）设定。注入质子谱（SBPL 函数形式）在折断前后的幂律指数分别为 $\gamma_{1-inj} = 2$和 $\gamma_{2-inj} = 3.52$；折断能量为 $E_{b-inj} = 3.16$ EeV，平滑参数为 $w_{inj} = 4.9$。宇宙学情景的整体拟合曲线在图 1 中以蓝色虚线表示。由于光介子损失导致的可观测质子谱在 50 EeV 以上开始出现截断（Greisen-Zatsepin-Kuzmin（GZK）效应 [34, 35]），这一现象在图 1 中清晰可见。

5. 讨论

在 $E > 4$ EeV 下，质子可能在可观测的超高能宇宙线强度中处于次要地位；而在 $E > 10$ EeV 下，来自碳氮氧、硅和铁族的相对较重原子核可能占据该强度的主导地位，这与 PAO 的测量结果一致；这也与 [36] 中提出的模型相符。初步估计表明，10 GeV 至 100 EeV 能区内的氦、碳氮氧和铁宇宙线元素谱，以及全原子核宇宙线谱，都可以解释为来自三类不同超新星遗迹的三个种群之和，这些元素谱具有刚度相关截断。要建立这些谱的详细模型，尤其需要对超高能宇宙线原子核的光致蜕变过程进行详细描述；相关计算正在进行中，研究结果将另行发表。

致谢

我们感谢 G.I. Rubtsov 教授进行的有益讨论。本文中的图 1 使用 ROOT 软件

[1] 我们注意到，光致蜕变过程导致残余原子核的质量损失，而非能量损失；此处沿用“能量损失时间尺度”这一术语，是因为这一说法已有公认的传统[2] 我们注意到，在 B97 中，$D_0 = 2 \times 10^{29}$ cm^2/s

工具包 [37]。本研究在俄罗斯联邦科学与高等教育部国家项目“科学”框架下获得支持，合同编号为 075-15-2024-541。

参考文献

[1] R. B. Larson, 《物理学进展报告》66 (10) (2003) 1651–1697。doi:10.1088/0034-4885/66/10/r03.[2]C. F. McKee、E. C. Ostriker, 《天体物理学年度评论》45 (1) (2007) 565–687。doi:10.1146/annurev.astro.45.051806.110602.[3] H. Beuther、E. B. Churchwell、C. F. McKee、J. C. Tan (2006)。doi:10.48550/ARXIV.ASTRO-PH/0602012.[4] V. L. Ginzburg、S. I. Syrovatsky, 《理论物理学进展增刊》20 (1961) 1–83。doi:10.1143/ptps.20.1。[5] G. F. Krymskii, 《苏联物理学文献通报》22 (1977) 327。[6] W. I. Axford、E. Leer、G. Skadron，载于：国际宇宙线会议，国际宇宙线会议第 11 卷，1977 年，第 132 页。[7] A. R. Bell, 《皇家天文学会月刊》182 (2) (1978) 147–156。 doi:10.1093/mnras/182.2.147。[8] R. D. Blandford、J. P. Ostriker, 《天体物理学杂志》221 (1978) L29。doi:10.1086/182658。[9] X.-Y. Wang、S. Razzaque、P. Meszaros、Z.-G. Dai, 《物理评论D辑》76 (8) (2007) 083009。doi:10.1103/physrevd.76.083009。[10] S. Chakraborti、A. Ray、A. M. Soderberg、A. Loeb、P. Chandra, 《自然·通讯》2 (1) (2011) 175。doi:10.1038/ncomms1178.[11]Q. An、R. Asfandiyarov、P. Azzarello、P. Bernardini、Bi 等, 《科学进展》5 (9) (2019) eaax3793。doi:10.1126/sciadv.aax3793.[12] Z. Cao、F. Aharonian、Y. Bai、Y. Bao、D. Bastieri 等, 《科学通报》70 (24) (2025) 4173–4180。doi:10.1016/j.scib.2025.10.048。[13] M. Aartsen、M. Ackermann、J. Adams、J. Aguilar、M. Ahlers 等, 《物理评论D辑》100 (8) (2019) 082002。doi:10.1103/physrevd.100.082002。[14] A. Abdul Halim、P. Abreu、M. Aglietta、M. Ahmed、I. Allekotte 等, 《物理评论D辑》114 (4) (2026) 043016。doi:10.1103/n616-15v5.[15] P. Abreu、M. Aglietta、J. M. Albury、I. Allekotte、A. Almela 等, 《欧洲物理学杂志C辑》81 (11) (2021) 966。doi:10.1140/epjc/s10052-021-09700-w。[16] J. R. H¨orandel, 《天体粒子物理学》19 (2) (2003) 193–220。doi:10.1016/s0927-6505(02)00198-6.[17] D. Foreman-Mackey、D. W. Hogg、D. Lang、J. Goodman, 《太平洋天文学会出版物》125 (925) (2013) 306–312。 doi:10.1086/670067。[18] T. A. Dzhatdoev、A. A. Semenov，arXiv 电子预印本 (2026) arXiv:2606.02748arXiv:2606.02748, doi:10.48550/arXiv.2606.02748 .[19] S. V. Ter-Antonyan、L. S. Haroyan，arXiv 电子预印本 (2000) hep–ex/0003006arXiv:hep-ex/0003006, doi:10.48550/arXiv.hep-ex/0003006 。[20] P. Lipari、S. Vernetto, 《天体粒子物理学》120 (2020) 102441。doi:10.1016/j.astropartphys.2020.102441。[21] M. Kachelriess、D. Semikoz, 《物理快报B辑》634 (2-3) (2006) 143–147。doi:10.1016/j.physletb.2006.01.009。[22] R. Aloisio、V. Berezinsky、P. Blasi、A. Gazizov、S. Grigorieva、B. Hnatyk, 《天体粒子物理学》27 (1) (2007) 76–91。doi:10.1016/j.astropartphys.2006.09.004。[23] C. Evoli, 《物理学与宇宙》1 (1)。doi:10.53941/pac.2026.100008。[24] C. Evoli (2026)。 doi:10.48550/ARXIV.2610.28751。[25] V. S. Berezinsky、P. Blasi、V. S. Ptuskin, 《天体物理学杂志》487 (2) (1997) 529–535。doi:10.1086/304622。[26] J. P. Vallee, 《天文学与天体物理学》251 (1991) 411。[27] F. W. Stecker、M. H. Salamon, 《天体物理学杂志》512 (2) (1999) 521–526。 doi:10.1086/306816[28]A. Aab、P. Abreu、M. Aglietta、I. Al Samarai、I. F. M. Albuquerque 等, 《科学》357 (6357) (2017) 1266–1270。doi:10.1126/science.aan4338.[29] V. S. Berezinskii、S. V. Bulanov、V. A. Dogiel、V. S. Ptuskin, 《宇宙线天体物理学》，1990 年。[30] S. I. Syrovatskii, 《苏联天文学》3 (1959) 22。[31] R. Alves Batista、J. Becker Tjus、J. D¨orner、A. Dundovic、B. Eichmann 等, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》2022 (09) (2022) 035。doi:10.1088/1475-7516/2022/09/035.[32]R. C. Gilmore、R. S. Somerville、J. R. Primack、A. Dom´ınguez, 《皇家天文学会月刊》422 (4) (2012) 3189–3207。doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20841.x。[33]P. Madau、M. Dickinson, 《天体物理学年度评论》52 (1) (2014) 415–486。doi:10.1146/annurev-astro-081811-125615.[34] K. Greisen, 《物理评论快报》16 (17) (1966) 748–750。doi:10.1103/physrevlett.16.748。[35] G. T. Zatsepin、V. A. Kuz'min, 《苏联实验与理论物理学杂志快报》4 (1966) 78。[36] R. Aloisio、V. Berezinsky、A. Gazizov, 《天体粒子物理学》34 (8) (2011) 620–626。doi:10.1016/j.astropartphys.2010.12.008.[37] R. Brun、F. Rademakers, 《核仪器与方法A辑》389 (1-2) (1997) 81–86。doi:10.1016/s0168-9002(97)00048-x。