

# 银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说

刘四明

(中国科学院紫金山天文台 210034)

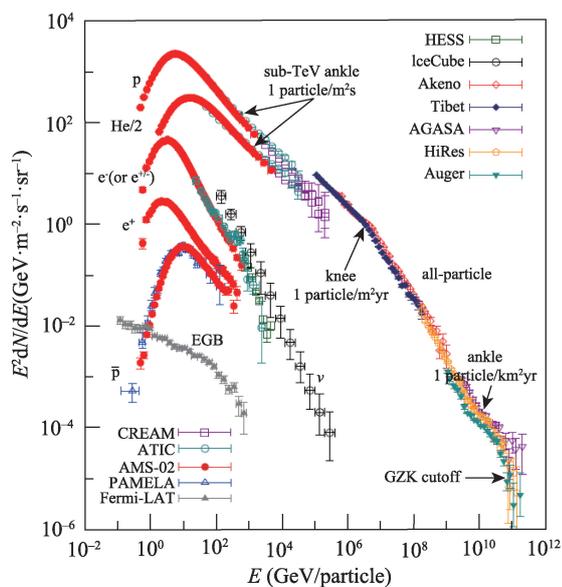
20世纪初,随着人们对空气电离度测量精度的不断提高,大气电离现象被普遍观测到并被归因于放射性元素衰变产生的高能辐射。1911~1913年奥地利物理学家维克托·赫斯(Victor Franz Hess)通过一系列高空气球实验发现了来自外太空的可以导致空气电离的辐射——宇宙线<sup>①</sup>,他也因此获得了1936年的诺贝尔物理学奖(图1(a))。20世纪30年代,人们通过对来自地球东西方向宇宙线流量不对称性的分析,逐渐认识到它们主要是由带正电的高能粒子组成,受地球磁场影响,来自西方的宇宙线流量更高。后来的一系列研究表明,99%的宇宙线是原子核,其中约10%为 $\alpha$ 粒子即氦核,更重的原子核占1%左右。考虑到宇宙线的高流量,1934年巴

德(W. Baade)和兹维基(F. Zwicky)指出,它们可能来自于超新星爆发<sup>②</sup>。由于宇宙线粒子带电,在星际介质中传播时将受到星际磁场的影响,因此地球附近观测到的宇宙线空间分布几乎是各向同性的,这也导致我们无法通过对宇宙线的成像观测来确定宇宙线源。但是宇宙线可以和背景等离子体相互作用产生从射电到伽马射线的电磁辐射,随着射电天文、X射线天文、伽马射线天文的发展,人们不仅发现了超新星爆发产生宇宙线的观测证据,还发现了其他一些可以产生宇宙线的高能天体<sup>③~⑥</sup>。

基于宇宙线的能谱特征(图1(b)),人们目前普遍认为能量低于 $10^{15}$ eV(1 PeV)的宇宙线主要来自于银河系,而能量高于 $10^{18}$ eV(1 EeV)的宇宙线主要



(a)



(b)

图1 (a) 1912年赫斯在气球实验后着陆;(b) 宇宙线流量密度随宇宙线能量的变化

来自于河外高能天体源。能量低于 $10^9\text{eV}(1\text{GeV})$ 的宇宙线由于受太阳风的影响,很难到达地球附近。由太阳活动产生的高能粒子的能量通常也低于 $1\text{GeV}$ <sup>⑦</sup>,因此在地球附近观测到的能量低于 $1\text{GeV}$ 的高能粒子主要产生于太阳系。虽然银河系中很多高能天体都可以产生宇宙线,但是超新星遗迹被普遍认为是最主要的银河系宇宙线源。这就是所谓的银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说。

## 一、银河系宇宙线超新星遗迹起源学说的确立

虽然在1934年巴德和兹维基就已经提出超新星爆发是产生宇宙线的主要天体源,但是当时人们对超新星爆发过程、宇宙线的性质以及高能带电粒子加速的物理机制的认识都很初级。巴德和兹维基主要是通过对宇宙线流量的分析和超新星爆发能量释放的量级估计得出超新星是主要宇宙线源的结论。直到1948年随着射电天文的诞生和发展,人们才发现超新星遗迹中存在 $\text{GeV}$ 高能电子的直接证据<sup>⑧</sup>,这些高能电子可以通过在磁场中的回旋加速运动产生射电辐射。这些观测同时表明,星际磁场普遍存在,费米(E.Fermi)由此提出了高能粒子可以通过和运动磁云随机相互作用而被加速到很高能量的著名的费米高能粒子加速机制<sup>⑨</sup>。虽然更定量的分析表明这一过程本身的效率不足以维持观测到的宇宙线流量,但是人们普遍接受这一高能带电粒子通过与运动磁场作用而被逐渐加速的物理机制并将其应用到对各种高能天体源中高能粒子加速过程的分析。在此基础上发展出来的扩散激波粒子加速理论已成为高能宇宙线的标准加速模型<sup>⑩</sup>。

需要特别指出的是超新星爆发不仅可以通过把前身星物质向星际介质中的抛射产生高速激波进而加速粒子,有些超新星爆发还可以产生高速旋转的脉冲星,它们可以通过磁场消耗转动能而加速粒子。对蟹状星云的伽马射线观测表明,脉冲星可以把电子加速到 $\text{PeV}$ 的能量<sup>⑪</sup>。但是总体而言超新

星遗迹激波携带的动能要比脉冲星的转动能高两个量级,银河系宇宙线应该主要由超新星遗迹激波加速产生。然而由射电观测探测到的主要是能量在 $\text{GeV}$ 量级的相对论电子,宇宙线中质子的流量要比电子的流量高近两个数量级,并且人们预期银河系宇宙线的能量可以高达 $\text{PeV}$ 。

超新星遗迹激波可以产生能量在 $\text{TeV}(10^{12}\text{eV})$ 量级高能电子的证据直到1995年通过X射线观测才发现<sup>⑫</sup>。在微高斯量级的星际磁场中, $\text{TeV}$ 电子可以通过回旋加速运动产生X射线辐射。考虑到粒子加速过程中电子能损率比原子核高很多,超新星遗迹激波应该可以把质子加速到更高的能量。后来随着地面伽马射线天文观测的进展,有一百多个 $\text{TeV}$ 伽马射线源被发现,它们中有一小部分为银河系高能源,其中有几十个和超新星遗迹有关联。但是这些高能辐射不仅可以由高能原子核(包括质子)产生,也可以由高能电子产生。超新星遗迹激波可以加速高能原子核(主要是质子)的直接证据直到过去几年才被空间伽马射线卫星观测到<sup>⑬</sup>。在通常的星际环境下,由于电子辐射效率比原子核高很多,超新星遗迹激波产生的高能电子更容易通过对相关辐射的观测被间接探测到。

图2给出了费米卫星观测得到的能量在 $1\text{GeV}$ 以上的伽马射线光子在全天空的分布以及已经认证的部分超新星遗迹(左)和脉冲星(右)。图中一半以上的点源是非常活跃的一类星体,还有一部分是活动星系(核),它们的空间分布各向同性。分布在银盘上的伽马射线源主要是脉冲星和超新星遗迹。由于脉冲星可以有效地加速辐射效率很高的电子,伽马射线观测上认证的脉冲星要比超新星遗迹多很多。沿着中间银盘方向,可以看到弥散的伽马射线辐射,它们主要是由分布在银河系中的宇宙线和星际介质相互作用产生。虽然某些大质量X射线双星和球状星团也被探测到,它们释放的总能量要比超新星遗迹低很多,所以人们普遍认为超新星遗迹是最主要的银河系宇宙线源。

虽然恒星演化理论预期在银河系中每隔100年

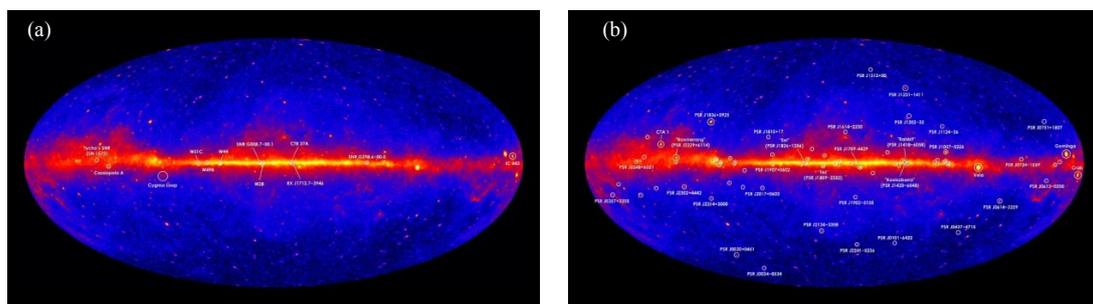


图2 Fermi 伽马射线卫星的全天空成像中的一些超新星遗迹(a)和脉冲星(b)

将有3次左右的超新星爆发,但是受到观测灵敏度、星际介质屏蔽以及超新星爆发环境等因素的影响,到目前为止已经探测到的脉冲星有近2000颗,它们中有的寿命可达上亿年;通过射电观测认证的超新星遗迹有300个左右,它们的寿命分布在一百多年到几十万年之间,更老的超新星遗迹由于和星际介质融合而无法识别。在伽马射线上认证的脉冲星有一百多颗,超新星遗迹有几十个并且大多是年龄在几千年以上并且和分子云相互作用。年龄在1万年以内的超新星遗迹有几十个,它们预期会产生强的伽马射线辐射。由于高能电子通过辐射损失能量的速度比较快,内部存在TeV电子进而可以产生非热X射线辐射的超新星遗迹寿命一般在1万年以内,这样的遗迹也有十几个。

对于那些年龄在几百年到几千年的超新星遗迹,在射电、光学、X射线、伽马射线等波段都有比较详细的观测。图3给出了一个在TeV伽马射线能段非常亮的超新星遗迹的X射线到伽马射线的成像,这些结果表明,在不同波段上观测到的超新星

遗迹的结构有比较好的相关性。而对于年老的和分子云相互作用的超新星遗迹,它们多波段成像的相关性会明显降低,这个和有关辐射产生机制的不同密切相关。

## 二、银河系宇宙线超新星遗迹起源学说的最新发展

虽然对银河系高能源的多波段观测以及有关粒子加速理论的发展支持银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说,人们需要把超新星遗迹的多波段观测特征和宇宙线的观测特征定量的联系起来才能完善这一学说。总体而言有关研究可以分为两大方面:

1. 宇宙线在星际介质中的传播和与星际介质的相互作用。宇宙线和星际介质的相互作用可以产生弥散的射电、伽马射线辐射。这一研究可以和有关星际介质的观测研究相结合进而限制宇宙线在银河系中的传播特征。经过过去十几年的努力,人们已经发展了多个数值模拟程序,它们以星际介

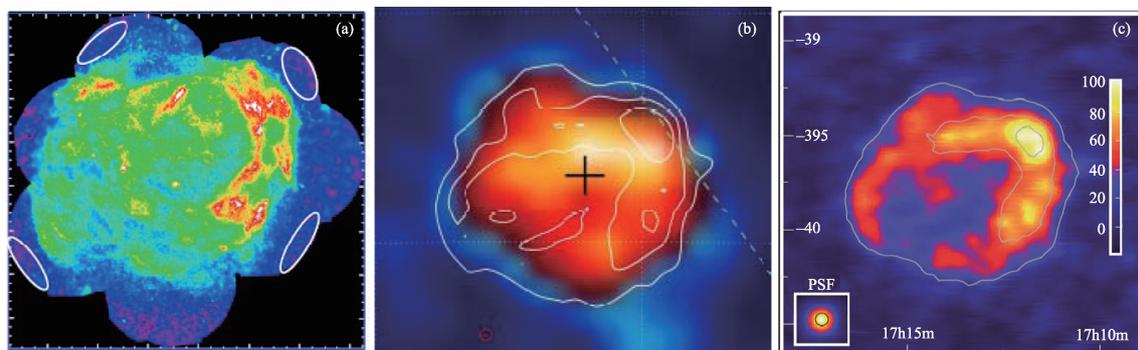


图3 超新星遗迹RX J1713.7-3946的X射线(a)、GeV(b)、TeV(c)成像

质的观测特征为背景,可以定量系统地研究宇宙线在银河系中的传播以及和星际介质的相互作用。从而实现利用多波段观测资料,研究宇宙线的传播特征。前面提到的宇宙线和磁云相互作用的随机费米粒子加速机制也可以在这一研究过程中被定量描述<sup>⑧</sup>。

2. 宇宙线在高能源区的加速过程,即宇宙线的产生问题。为了利用多波段观测研究宇宙线的起源,我们需要结合有关的辐射机制。这方面的物理理论基础比较成熟,涉及的主要辐射机制有高能电子的同步辐射(产生射电和X射线)、逆康普顿散射、韧致辐射以及高能质子与背景原子核的非弹性散射和相关的次级过程(主要产生伽马射线)。针对个别超新星遗迹的多波段观测,结合有关辐射机制,利用磁流体数值模拟等工具我们可以详细研究超新星的爆发和有关的粒子加速过程。对于超新星遗迹RX J1713.7-3946,通过对其多波段辐射能谱的拟合,我们不仅能够得到其中高能电子的能谱分布,还可以确定遗迹中的平均磁场。这些结果可以和磁流体数值模拟相结合,进一步用来研究这个遗迹的空间结构(图4)。

多波段观测不仅可以用来研究个别超新星遗迹中高能粒子的分布特征,还可以用来研究有相关观测的超新星遗迹样本中高能粒子的分布特征,进而研究高能粒子能谱分布随超新星遗迹的演化。

这些研究对于澄清超新星遗迹中的粒子加速过程并且确定这些被加速的高能粒子对宇宙线的贡献至关重要。图5(a)显示了由35个射电和伽马射线观测的超新星遗迹组成的一个样本的多波段能谱。虽然超新星遗迹的射电能谱总体而言表现为一个幂律结构,超新星遗迹的伽马射线能谱表现出明显的演化特征。年轻超新星遗迹的伽马射线能谱通常比较硬,并且在几个TeV处截断,这一伽马射线辐射很可能是由高能电子通过逆康普顿散射过程产生。年老超新星遗迹的能谱比较软,GeV辐射比TeV辐射功率高几个量级,这些遗迹通常和分子云相互作用,伽马射线辐射由高能原子核的非弹性散射过程主导。

这些辐射能谱特征表明流量较低的高能(>TeV)宇宙线主要是在年轻的遗迹中被加速而占宇宙线主体的能量较低(~GeV)的宇宙线主要在年老的遗迹中被加速。这一结果也能够用来解释近些年观测到的宇宙线能谱的精细结构(图5(b))<sup>⑨</sup>。考虑到年轻超新星遗迹在银河系的分布更不均匀,银河系宇宙线的高能成分不仅可以归因于年轻超新星遗迹,还可以归因于临近的超新星遗迹在演化早期的粒子加速过程。这一图像也可以用来解释银河系宇宙线微弱的各向异性特征(图6)<sup>⑩</sup>。而超新星遗迹激波粒子加速的两个阶段的划分可能和超新星遗迹激波是否和高密度分子云相互作用密切相关。

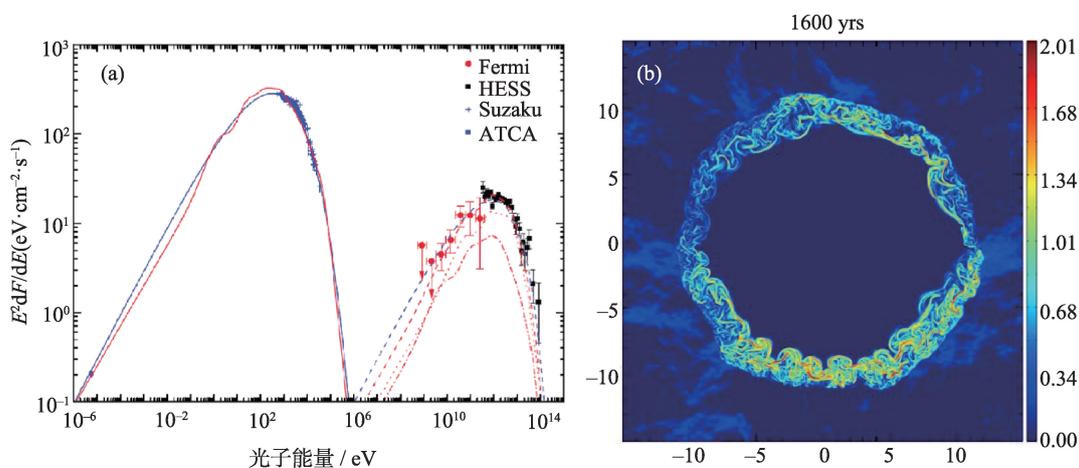


图4 超新星遗迹RX J1713.7-3946的多波段辐射能谱(a)以及通过磁流体数值模拟得到的超新星遗迹中磁场的结构(b)

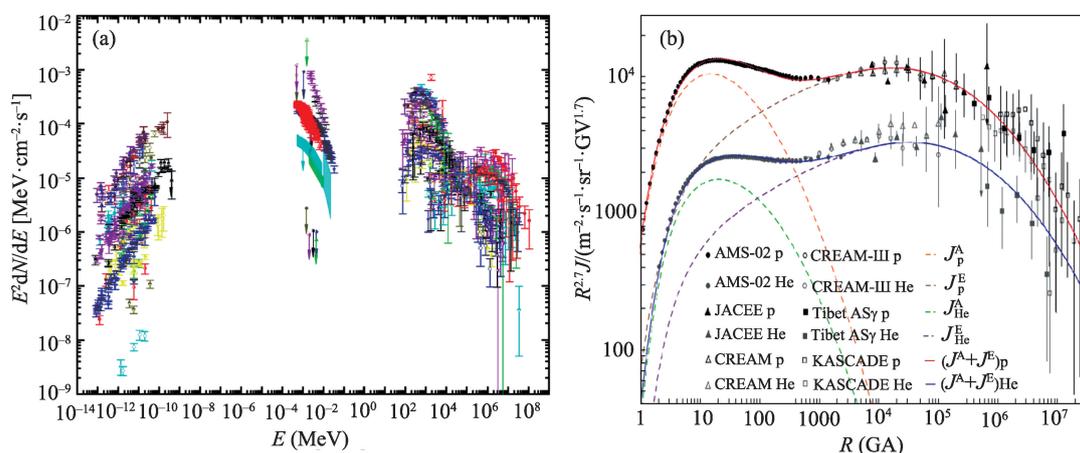


图5 35个在射电和伽马射线观测到的超新星遗迹多波段辐射能谱(a)以及对银河系宇宙线反常能谱结构的拟合(b)

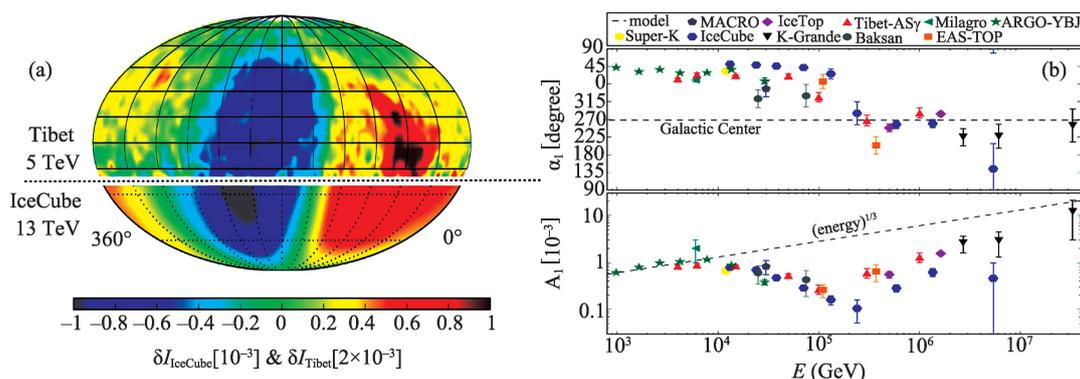


图6 TeV宇宙线流强的各向异性(a)以及各向异性偶极分量的方位角和幅度对宇宙线能量的依赖(b)

### 三、结语和展望

宇宙线从发现至今已经有100多年的历史,早期对它们的观测有力地推动了粒子物理的发展。虽然80年前人们已经指出超新星爆发可能是宇宙线的主要来源,但是由于宇宙线带电,我们无法对其进行成像观测,宇宙线的天文学起源一直是高能天体物理领域的一个极富挑战性的研究课题。随着射电、光学、X射线、伽马射线天文的不断发展,有越来越多的观测证据支持银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说。我们急需把有关超新星遗迹的观测特征和宇宙线的观测特征直接联系起来以澄清有关的宇宙线加速和传播过程。

对银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说的详细分析表明,这一学说包含两部分主要内容:第一

超新星遗迹激波是否能够提供足够的能量来维持银河系宇宙线的流量;第二超新星遗迹激波能否把高能粒子加速到PeV的能量。对超新星爆发的研究和相关观测表明,平均而言超新星遗迹激波可以携带 $10^{51}$ 尔格的动能,只要将这一能量的10%转化为GeV宇宙线,就可以维持银河系宇宙线的流量。而超新星遗迹的射电能谱随遗迹演化而变硬的观测事实暗示着年老遗迹的宇宙线加速总效率更高,超新星遗迹激波的整体粒子加速效率可以达到10%以上<sup>②</sup>。

针对第二个问题,虽然人们普遍认为PeV宇宙线应该在年轻遗迹中被加速,但是我们目前还没有探测到这些高能宇宙线产生的高能伽马射线辐射。位于西藏羊八井的宇宙线观测站是世界上仅有的几个宇宙线观测基地之一,有关观测对宇宙线

的研究贡献突出。在这些宇宙线实验经验积累的基础上设计建设的高海拔宇宙线观测站(LHAASO, 图7)将在几十到几百 TeV 能段给出高灵敏度的观测,有望澄清超新星遗迹能否产生 PeV 宇宙线的问题。暗物质粒子探测卫星悟空(DAMPE)对 TeV 宇宙线能谱的精确测量也将有助于完善银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说。

需要特别指出的是对电子宇宙线特征的定量描述也是完善银河系宇宙线超新星遗迹起源学说的一个重要方面。这是因为超新星遗迹的很多辐射特征都是由高能电子决定的。费米机制指出相对论粒子的加速效率只依赖于粒子的刚度,所以高能电子的观测可以用来分析对应原子核的能谱特征。在电子宇宙线观测方面,LHAASO 和 DAMPE 都将给出开创性的观测结果。

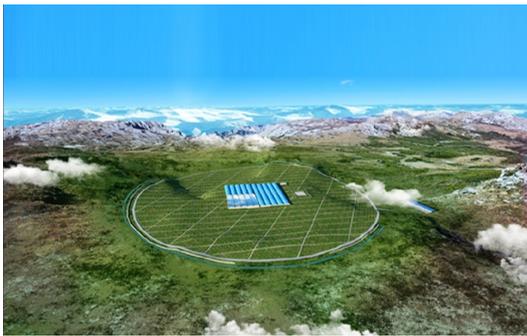


图7 由分布在1平方千米范围的各种探测器组成的高海拔宇宙线观测站(LHAASO)

在理论研究方面,有关粒子加速过程仍然存在非常大的不确定性。这里的主要困难来自于激波上游高能粒子和背景等离子体的相互作用比较复杂,特别是加速效率比较高的时候。幸运的是,随着多波段观测数据质量的不断提高,我们有可能可以通过观测直接限制激波上游高能粒子的扩散系数以及高能粒子从激波上游的逃逸。银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说可以在不久的将来得到进一步完善。

### 参考文献

① Hess VF. Über beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei

sieben Freiballonfahren. Phys. Z. 1912, 13:1084

[https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray)

- ② Baade W, Zwicky F. Cosmic rays from super-novae. Astronomy, 1934, 20:259
- ③ Dubner G, Giacani E. Radio emission from supernova remnants. Astron Astrophysics Rev, 2015, 23:3
- ④ Koyama K, et al. Evidence for shock acceleration of high-energy electrons in the supernova remnant SN1006. Nature, 1995, 378: 255
- ⑤ Ackermann M, et al. Detection of characteristic Pion-decay signature in supernova remnants. Science, 2013, 339:807
- ⑥ Funk S. Space- and ground-based Gamma-ray astrophysics. Annual Reviews of Nuclear and Particle Science, 2015, 65:245
- ⑦ 刘四明. 宇宙中高能带电粒子的加速. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2015, 45(11):119509
- ⑧ Fermi E. On the Origin of the Cosmic Radiation. Physical Review, 1949, 75:1169
- ⑨ Yuan Q, et al. A statistical model for the  $\gamma$ -ray variability of the crab nebula. ApJ, 2011, 730:L15
- ⑩ Zhang YR, Liu SM, Yuan Q. Anomalous Distributions of Primary Cosmic Rays as Evidence for Time-dependent Particle Acceleration in Supernova Remnants. ApJ, 2017, 844:L3
- ⑪ KachelrieB M, Neronov A, Semikoz DV. Cosmic ray signatures of a 2-3 Myr old local supernova. Physical Review D, 2018, 97: 063011
- ⑫ Zhang YR, Liu SM. Global constraints on diffusive particle acceleration by strong non-relativistic shocks. MNRAS, 2018, doi: 10.1093/mnras/sty3136

