

高海拔宇宙线观测站开启“超高能伽马天文学”时代

刘佳 曹臻[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2021-05-27 收到

[†] email: caozh@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210605

从古至今,人类对宇宙星空的向往就从未中断,它激发了人类无尽的遐想与不断探索未知的欲望。当我们仰望星空,人类对宇宙的无尽联想与探索就开始了。

肉眼看到的星空已让我们如此着迷,而如果有真实的来自太阳系外的物质能送到你身边,会让人更加兴奋与惊奇!而这样的物质样本,其实在我们身边无处不在,那就是宇宙线^[1]。宇宙线又称宇宙射线,宇宙线粒子中约90%是质子,9%是氦原子核,更重的原子核及电子、光子等粒子占剩下的1%。

每一个到达地球的宇宙线核子,都要历经一段非常浪漫曲折的旅程才能与我们相遇。因为银河系中到处都存在着磁场,而核子本身带有电荷,当宇宙线核子从源区产生后,会不断受磁场影响,要在银河系内“漫游”数千万年,才有可能遇到地球,然后被我们观测到^[2]。

宇宙线核子的旅程过于曲折,导致人类极难对其溯源,就连是什么天体或者怎样的天体现象产生了它也全无线索。这就是困惑了科学界百年之久的“宇宙线起源之谜”。

既然核子带电导致无法溯源,那么人们可以用不带电的光子来测量宇宙线源。对应宇宙线源的光子能量,在超高能伽马能段,如果我们可以测量超高能伽马射线,就可以获取宇宙线源的信息。

但是有三个主要原因阻碍了该观测窗口的打开:(1)在超高能伽马射线能段,原初的光子数量

极少。即便被称为“伽马天文标准烛光”的蟹状星云,每一平方公里一天接收到的超高能伽马光子还不到一个;(2)地球大气会吸收这些光子,因此能够到达海平面,被人们探测到的光子就更加稀少了;(3)光具有“波粒二象性”,低能光子的行为更像波,而高能光子的行为更像粒子。这些高能光子躲在高能粒子中间,要想甄别并且探测到这些高能光子极其困难。

高海拔宇宙线观测站 LHAASO(Large High Altitude Air Shower Observatory),位于海拔4410 m的四川省稻城县海子山,总占地面积达1.32平方公里,是用于宇宙线物理与伽马射线天文研究,由我国科学家提出并自主建设的新一代复合型探测器阵列。LHAASO主要由三个子探测器阵列组成:一平方公里阵列(KM2A),由5195台1 m²电磁粒子探测器和有效面积达42000 m²的缪子探测器组成;水切连科夫探测器阵列(WCDA),面积为78000 m²,由2个157.5 m×150 m和1个307.5 m×100 m的相邻大型水池构成,水深4.4 m;广角切连科夫望远镜阵列(WFCTA),由18台视场范围为16°×16°的成像大气切连科夫望远镜组成。其整体

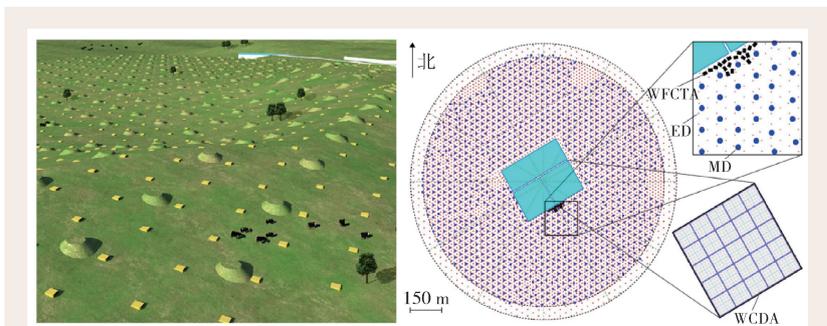


图1 LHAASO项目的主要子探测器。左图为一平方公里阵列,右图水切连科夫探测器阵列(WCDA)和广角切连科夫望远镜阵列(WFCTA)

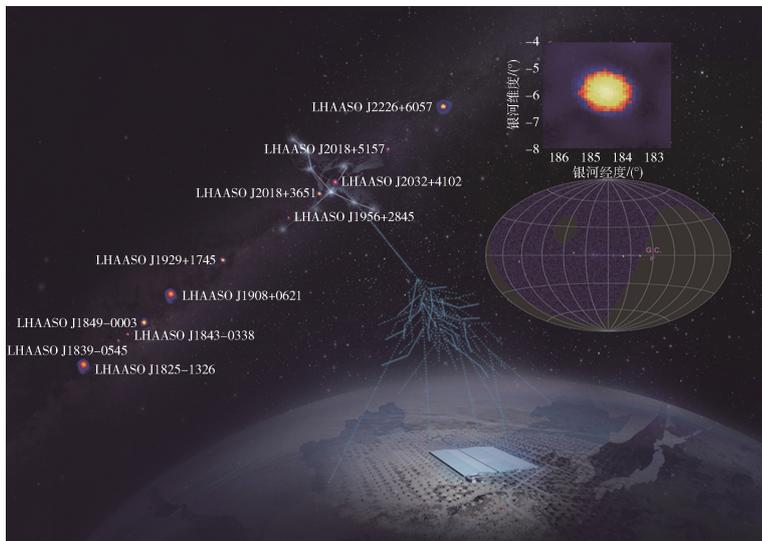


图2 LHAASO实验中12个稳定伽马射线源示意图(能量超过拍电子伏的光子,来自天鹅座内非常活跃的恒星形成区)

的布局如图1所示^[3]。

LHAASO实验一平方公里探测器阵列占地1.32平方公里,克服了原初光子数少的困难,对视场内的超高能伽马射线源有足够的探测面积。其海拔4400 m的选址优势,克服了大气吸收问题,针对超高能伽马射线能段有最佳的能量与方向测量。原初高能宇宙线粒子在穿过大气层的过程中会与大气中的原子核发生碰撞产生簇射,从而生成大量的次级粒子。宇宙线核子与大气原子核发生强子级联过程产生的次级粒子中含大量缪子,而伽马与大气原子核发生电磁级联过程产生的次级粒子几乎不含缪子。通过测量次级粒子中的缪子数量,可以很好地区分宇宙线核子与伽马光子,从宇宙线核子信号中挑选出伽马信号^[4]。

尚在建设中的LHAASO,基于已经建成的1/2规模KM2A阵列,利用2020年11个月的观测结果^[5]。在银河系内发现了12个超高能宇宙加速器,

参考文献

- [1] Hess V F. Phys. Z., 1912, 13: 1084
- [2] Strong A W *et al.* Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2007, 57: 285
- [3] 曹臻, 张力, 毕效军等. LHAASO计划项目建议书. 中国科学院高能物理研究所, 2009

并记录到最高1.4 PeV(1 PeV=10¹⁵ eV)伽马光子,这是人类观测到的最高能量光子,改变了人类对银河系的传统认知,开启了“超高能伽马天文学”的时代(图2)^[6]。

LHAASO实验中能量超过拍电子伏的光子,来自天鹅座内非常活跃的恒星形成区。12个稳定伽马射线源,能量一直延伸到1 PeV附近,它们是位于LHAASO视场内银河系中最明亮的一批伽马射线源。LHAASO测到的伽马光子信号高于周围背景7倍标准偏差以上,源的位置测量精度优于0.3°。这次观测积累的数据还很有限,但所有能被LHAASO观测到的源,它们都具有

0.1 PeV以上的伽马辐射,也叫“超高能伽马辐射”。这表明银河系内遍布拍电子伏加速器,而人类在地球上建造的最大加速器(欧洲核子研究中心的LHC)只能将粒子加速到0.01 PeV。银河系内的宇宙线加速器存在能量极限是个“常识”,过去预言的极限就在0.1 PeV附近,并且伽马射线能谱在0.1 PeV以上有“截断”现象。LHAASO的发现完全突破了个“极限”,证实大多数源没有截断。

LHAASO的实验结果开启了“超高能伽马天文”观测新时代,表明以天鹅座恒星形成区、蟹状星云等为代表的高能辐射天体,即年轻的大质量星团、超新星遗迹、脉冲星风云等是银河系超高能宇宙线起源的最佳候选天体,有助于破解宇宙线起源这个“世纪之谜”。科学家们也需要重新认识银河系高能粒子的产生、传播机制,探索极端天体现象及其相关的物理过程,并在极端条件下检验基本物理规律。

- [4] He H. Radiat. Detect. Technol. Methods, 2018, 2: 7
- [5] Aharonian F *et al.* Chin. Phys. C, 2021, 45: 025002
- [6] Cao Z, Aharonian F A, An Q *et al.* Nature, 2021, DOI: 10.1038/s41586-021-03498-z