暗物质粒子探测卫星研究进展

袁强^{1*}, 常进^{1,2*}

1. 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210023;

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

* 联系人, E-mail: yuanq@pmo.ac.cn; chang@pmo.ac.cn

2021-01-12 收稿, 2021-02-24 修回, 2021-02-25 接受, 2021-02-26 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0400200)和国家自然科学基金(11921003, U1738206)资助

摘要 天文观测表明, 宇宙中广泛存在暗物质, 其丰度是普通物质的5倍, 占宇宙总能量份额的约1/4. 自20世纪30年代天文学家通过引力观测发现暗物质以来, 经过近百年的探索, 其物理本质至今仍然不为我们所知. 另一个世纪谜题是高能宇宙射线的起源、加速和传播. 暗物质的本质和宇宙射线的起源位列美国国家研究委员会(National Research Council)遴选出的21世纪11个宇宙物理学重大科学问题之列. 探测暗物质粒子也是世界各国竞争异常激烈的科技热点. 我国发射的暗物质粒子探测卫星, 其主要的科学目标即通过精确观测高能宇宙射线电子和伽马射线来间接探测暗物质粒子. 作为一个高能粒子探测器, 暗物质粒子探测卫星观测数据也可用于宇宙射线物理和相关天体物理研究. 基于暗物质粒子探测卫星的数据, 我们得到了对宇宙射线电子和质子能谱的最为精确的测量, 揭示了能谱上的新结构, 为限制暗物质粒子属性和理解宇宙射线起源提供了重要数据. 暗物质粒子探测卫星还探测到约250个伽马射线点源以及银河系弥散伽马射线辐射. 本文综述了暗物质粒子探测卫星的设计、运行和数据分析进展.

关键词 暗物质, 宇宙射线, 伽马射线, 空间粒子探测

大量的天文学和宇宙学观测所奠定的标准宇宙学模型认为, 人类熟悉的普通物质的能量密度只占当今宇宙总能量密度的约5%, 而暗物质与暗能量分别占到约25%与70%. 暗物质和暗能量被广泛认为是21世纪物理学面临的新的“两朵乌云”, 对其本质的认识将必定为我们打开新物理世界的大门. 仅仅通过引力效应所揭示的证据无法确切知道暗物质的本质, 比如它们是不是某种新的基本粒子以及相互作用属性如何等. 为了确认暗物质粒子的存在并理解其属性, 我们需要探测到它们引力之外的其他相互作用效应.

理论上的暗物质候选体多种多样, 从非常重的天体(例如原初黑洞)到非常轻的基本粒子(质量比标准模型中最轻的中微子还轻约20个数量级), 其质量和相互作用强度跨度非常大. 在这些形形色色的理论猜想中,

有一类被称为“弱相互作用大质量粒子”(weakly interacting massive particles, WIMP)的候选粒子被认为最可能构成暗物质. 基于这类模型构建的宇宙结构演化模式也与天文观测相吻合. 由于WIMP粒子参与弱相互作用, 我们有望通过粒子物理探测实验探测到它们. 当然, 暗物质探测实验也很具有挑战, 因为它们的相互作用即便存在也非常微弱, 需要实验上非常精确地测量.

一般有三类方法来探测WIMP暗物质粒子, 即所谓的直接探测、间接探测和对撞机探测. 本文讨论的是暗物质粒子的间接探测, 即通过观测高能宇宙射线和伽马射线来探测暗物质粒子湮灭或衰变后留下的信号. 由于地球大气的遮挡, 除了非常高能量段的宇宙射线(和伽马射线)可以通过地面空气簇射实验探测, 通常我们需要发射空间卫星到大气层外去观测.

引用格式: 袁强, 常进. 暗物质粒子探测卫星研究进展. 科学通报, 2021, 66: 1299–1306

Yuan Q, Chang J. Research progress of Dark Matter Particle Explorer (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1299–1306, doi: [10.1360/TB-2021-0054](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0054)

宇宙射线自身的研究也具有非常重要的科学意义。宇宙射线是20世纪初由V. Hess等科学家在研究空气导电性时所发现。虽然已过去100余年,其起源、加速机制和传播过程等基本问题仍然是未解之谜。特别是观测到的宇宙射线最高能量超过 10^{20} eV,远远超过人造加速器能达到的最高能量。宇宙射线所关联的极端加速和极端相互作用等问题使其在物理学中备受关注。因此,在21世纪初美国组织科学家们凝练各个领域21世纪的重大科学问题时,其宇宙物理学分会选出的11个重大问题就包括宇宙射线的起源和加速,以及暗物质的本质。这两个科学问题也是暗物质粒子探测卫星的主要科学目标。

高能粒子的空间探测(包括早期的气球实验探测)虽然已有很长的历史,但真正进入精确测量时代也主要发生在最近10~20年。以阿尔法磁谱仪(alpha magnetic spectrometer, AMS)为代表的一系列空间实验极大地改善了宇宙射线直接探测的精度,取得了一系列重要的新发现,例如正电子比例超出^[1-3]、银心伽马射线超出^[4,5]、正负电子总谱超出^[6-8]、质子和氦核能谱变硬拐折^[9,10]、超新星遗迹伽马射线能谱的 π^0 介子衰变特征^[11]等。某些结果对暗物质的研究产生了巨大的影响,例如正电子超出和银心伽马射线超出等还没有被很好地理解,暗物质湮灭或衰变是这些反常超出的具有吸引力的解释。深入理解这些现象的本质需要在更宽能段的更加精确测量结果。

宇宙射线中的反物质粒子(如正电子和反质子)是探测暗物质粒子的首选,原因是如果暗物质粒子湮灭或衰变,通常会产生等量的正负粒子。然而,宇宙射线中正粒子的数量远多于相应的反粒子数量,例如电子比正电子流量高约一个数量级,质子比反质子流量高出近4个数量级,因此在反物质粒子中更容易看到暗物质留下的信号。但是,探测反物质粒子尤其是高能段反粒子只能借助于磁谱仪实验(如AMS),技术难度高、耗资不菲。正电子占正负电子比例约10%,如果能够非常精确地测量正负电子总能谱而不用区分它们,也将可以有效地探测暗物质。相比较于磁谱仪实验,这条道路的代价将大大降低。这便是暗物质粒子探测卫星(Dark Matter Particle Explorer, DAMPE)的设计理念。在中国科学院战略性先导科技专项支持下,DAMPE卫星于2015年研制完成并于当年12月17日成功发射。DAMPE卫星于2016年3月正式开始科学运行,迄今已平稳运行超过5年时间,获得了大量的科学数据。

1 DAMPE探测器

DAMPE具有三大科学目标:通过高精度观测正负电子和伽马射线的能谱、方向分布来间接探测暗物质粒子,通过精确测量宽能段核素宇宙射线的能谱和各向异性研究宇宙射线的起源和加速,通过观测伽马射线研究黑洞、中子星等极端天体上发生的高能现象。为了成功实现科学目标,我们明确了探测器需要达到的高技术指标,包括相对大的探测面积、 10^6 倍的单元探测器动态范围、 10^4 倍的电子质子鉴别、~1.5%的电子伽马能量分辨率。

DAMPE探测器由4个子探测器构成,分别为探测粒子电荷的塑闪阵列探测器(plastic scintillator detector, PSD)^[12]、测量粒子方向的硅阵列探测器(silicon tungsten tracker, STK)^[13]、测量能量并进行粒子鉴别的锗酸铋($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, BGO)量能器^[14]和辅助进行粒子鉴别的中子探测器(neutron detector, NUD)^[15],如图1所示。DAMPE探测器的详细介绍参见文献^[16],在此仅作简要概述。塑闪阵列探测器通过电离能损效应测量入射粒子电荷,同时也作为伽马光子的反符合探测器。实测数据表明,塑闪探测器可以测量从 $Z=1$ 到 $Z>28$ 的粒子电荷(图2)^[17]。硅阵列探测器同样根据电离能损测量粒子方向,同时也可以测量低电荷核素的电荷。对伽马射线的方向测量,需要首先将其转换成一对正负电子,然后测量正负电子穿过硅探测器留下的信号。为了提高伽马射线的转换率,在硅微条探测器的第2,3,4层中各插入了1 mm厚的钨板。BGO量能器由14层锗酸铋晶体垂直交错排布而成,其厚度达到32个辐射长度,对于10 TeV以下的正负电子和光子,该厚度量能器可以探测到完整的簇射,因此也被称作全吸收型电磁量能器。BGO量能器能量分辨率很高,束流实验结果表明,在10 GeV以上,对电子测量的能量分辨率好于1.5%。BGO量能器还可以根据电磁和强相互作用过程在量能器中产生的簇射形态差异进行高效的电子和质子鉴别。中子探测器由掺硼塑料闪烁体构成,其作用是辅助进行电子和质子的区分。能段越高时,中子探测器的改进效果越明显,因此对TeV以上能区的电子观测至关重要。

DAMPE卫星于2015年12月17日在酒泉成功发射。卫星运行在高度约500 km的太阳同步轨道,周期约95 min,保持指向天顶的巡天姿态。DAMPE平均每天记录下500万事例,截至2020年底,已探测到超过90亿宇宙射线事例,完成全天覆盖扫描10次。DAMPE的设

图1 DAMPE探测器配置示意图
Figure 1 Schematic plot of the DAMPE detector

图2 DAMPE对宇宙射线粒子电荷测量结果^[17]
Figure 2 Charge measurement of cosmic ray particles by DAMPE^[17]

计寿命为3年,目前已稳定运行超过5年时间,并进入第二期延寿运行阶段.探测器的工作状态良好,预计还将持续运行下去.

2 科学成果

2.1 正负电子观测

正负电子观测有两个关键要素,一是能量的准确测量,二是电子-质子的精准识别.正确地测量能量需要对探测器进行精准地刻度.在地面,我们可以通过加速器束流进行能量刻度,但在轨运行的高能粒子探测器却没有标准源进行能量刻度.我们采取最小电离粒子(minimum ionization particle, MIP)事例进行量能器

能量刻度.部分宇宙射线事例在穿过探测器时将不会产生簇射,它们主要通过电离能损过程在量能器中沉积能量,单位长度的能量损失率正比于粒子电荷平方.当带电粒子达到相对论状态时,其电离能损率仅非常弱地依赖于粒子能量,因此可以近似为常数.通过模拟计算可以知道这种MIP事例在探测器中应当沉积的能量,将量能器电子学读数和模拟预期的物理沉积能量进行对比,可以得到BGO量能器的能量刻度系数.此外,地磁场对低能粒子会产生屏蔽效应,导致低能粒子能谱存在截断.通过测量能谱截断的位置,也可以对绝对能标进行检验,结果表明,DAMPE绝对能标的误差大约在2%^[18].能标的确定是在低能下进行的,高能量下的能标取决于探测器的线性.DAMPE探测器每根BGO晶体均采用两端读出的方案,正端(P)和负端(N)具有不同的增益系数,两端测量结果可以相互检验.通过束流实验的数据得到,量能器在0.5~250 GeV能段的能量测量可以保持很好的线性^[16].实测数据也表明,P和N端重建的能量直至约7 TeV均保持高度一致^[19].通过P和N端的测量值比例,我们得到能量分辨率的表征,对正负电子在TeV能段能量分辨率约为1%,与束流实验以及模拟结果一致^[20].

宇宙射线主要由各种原子核构成,其中质子又占了绝大多数.正负电子的流量只有质子流量的千分之一左右,因此准确区分质子和电子是测量电子能谱的另一关键要素.二者的绝对电荷量相同,因此无法通过电荷探测器区分它们.DAMPE采用的办法是借助质子(强子-电磁混合簇射)和电子(电磁簇射)在量能器中的簇射形态差异来区分它们.通过恰当地选取形态变量,例如描述横向展宽的簇射均方根值和纵向发展的最后一层能量沉积比例,我们可以很好地区分出正负电子和质子^[20].电子和质子区分的方法得到了束流实验的验证.同时,我们还可以筛选出在轨数据中的伽马事例,检验其在量能器中的分布,也可以验证所采用的电子质子区分方法(图3).

图4所示为DAMPE前530天数据给出的25 GeV~4.6 TeV能段的正负电子能谱测量结果^[19],以及和其他实验测量的比较^[7,8,21~23].DAMPE观测到了正负电子能谱在约50 GeV处的变硬行为,这一结果此前Fermi已经发现^[7].另一处明显的能谱结构是在~0.9 TeV处的拐折,首次由DAMPE实验以高置信度测到,显著性达到6.6倍标准偏差,能谱指数由拐折前的-3.1变为拐折后的-3.9.此前,地面切伦科夫望远镜H.E.S.S.(High En-

图3 电子和质子在量能器中的形态参数分布。蓝色点为模拟的质子事例，绿色点为模拟的电子事例，红色圈为飞行数据中的伽马事例
Figure 3 Distribution of morphological parameters of electrons and protons in the calorimeter. Blue dots are simulated proton events, green dots are simulated electron events, and red circles are gamma-ray events from the flight data

ergy Stereoscopic System)观测到了正负电子能谱拐折的迹象，但因为H.E.S.S.通过空气簇射进行间接测量，粒子鉴别水平较差，系统误差很大(阴影条带)，无法清晰地说明是否存在拐折结构。该拐折的一个主流解释是，来自TeV能段的正负电子源在时间和空间上呈离散分布。根据传统的宇宙射线产生和传播模型，宇宙射线的源呈连续稳定分布，由此得到的电子能谱在高端遵循幂律谱行为，不会体现出能谱结构。而对TeV能段的正负电子，由于快速的辐射能损导致其有效寿命只有百万年，在该时间内有效传播距离只有千秒差距，有限时间、有限距离之内的宇宙射线源的数量不多。例如，假设超新星爆炸的遗迹是宇宙射线加速源，根据银河系超新星爆发率估计，符合上述条件的源的数量只有10余个，因此其离散分布特征就不能不加以考虑^[24]。考虑邻近的离散电子源确实可以产生TeV附近的能谱拐折^[25]。DAMPE的观测结果为理解TeV电子宇宙射线的来源以及限制源参数提供了重要数据，同时也可以对部分暗物质模型给出重要限制。DAMPE数据还初步显示，在1.4 TeV处可能存在能谱精细结构，需要更多的观测数据加以确证。

2.2 核素宇宙射线观测

对宽能段宇宙射线核素能谱的精确观测是DAMPE的主要科学目标之一。实际上，DAMPE数据中最多的就是各种宇宙射线原子核，其中又以质子和氦

图4 DAMPE观测的电子能谱(红点)和其他实验结果^[7,8,21~23]比较。修改自文献^[19]

Figure 4 Total electron plus positron spectrum observed by DAMPE (red dots), compared with other measurements^[7,8,21~23]. Adapted from Ref. [19]

核最多。测量核素宇宙射线能谱首先需要进行准确的电荷测量。图5所示为沉积能量为447~562 GeV和20~63 TeV能段的轻核(质子、氦核)电荷分布及其与模拟数据的比较^[26]。可以看到，直至数十TeV的沉积能量，质子和氦核电荷峰均可以明显地区别开来，这使得我们可以筛选出非常纯净的质子或氦核样本。定量计算表明，质子和氦核之间的相互污染在大多数能段(沉积能量小于10 TeV)小于1%，在50 TeV左右污染率也仅约百分之几。

与正负电子和伽马射线不同，DAMPE量能器只能探测到入射宇宙射线核素能量的一部分，这是因为强相互作用过程中会产生很多无法被探测到的次级粒子(比如中微子和缪子)。强子级联过程的涨落也使得核素能量测量精度较差。因此，探测器直接记录到的核素事例能谱和入射能谱之间并不能简单转换。通常，人们采取一种被称为能谱反卷积(spectral deconvolution or unfolding)的方法将探测器测量到的“沉积能谱”转换为原初能谱。探测器的能量响应矩阵可以通过蒙特卡洛模拟得到。经反卷积得到原初能量对应的粒子计数后再除以探测器的有效接收度，便可以得到宇宙射线核素的原初能谱。图6所示为DAMPE前2.5年数据给出的质子能谱^[26]，以及与此前其他实验测量结果的比较^[9,27~31]。图中红色点为DAMPE测量结果，其误差棒代表统计误差，阴影条带代表分析过程中的系统误差。对于DAMPE测量结果，最主要的系统误差来自强相互作用

图5 两个沉积能量段轻核事例的电荷值分布^[26]. (a) $0.447 < E_{\text{dep}}/\text{TeV} < 0.562$; (b) $20 < E_{\text{dep}}/\text{TeV} < 63$
Figure 5 Charge distributions of light nuclei in two deposited energy bins^[26]. (a) $0.447 < E_{\text{dep}}/\text{TeV} < 0.562$; (b) $20 < E_{\text{dep}}/\text{TeV} < 63$

图6 DAMPE测量的质子能谱(红点)与其他实验结果^[9,27-31]对比. 修改自文献^[26]
Figure 6 Proton spectrum observed by DAMPE (red dots), compared with other measurements^[9,27-31]. Adapted from Ref. [26]

用模型的不确定度,在全能段,该项系统误差均大于统计误差以及分析过程中的其他系统误差.因此,改进该测量结果需要对强相互作用模型的理解大幅改进,这也是目前宇宙射线物理领域面临的一个主要问题.

DAMPE的结果揭示出质子宇宙射线能谱的两个特征,一是在约500 GeV处的变硬结构,二是在约14 TeV处的变软结构.其中,后一处能谱变软结构由DAMPE实验以高置信度首次清楚地揭示出来.这些复杂的能谱结构表明,常规的宇宙射线起源和加速理论需要做出修正.我们认为,这些结构可能是邻近宇宙射线源留下的印记,比如大量背景源贡献的叠加形成一个相对平滑的能谱,而个别邻近源的贡献不同于背景能谱,产生观测到的10 TeV处类似鼓包的结构^[32].另一

种可能是银河系中存在多种类别的宇宙射线加速源,例如,我们已经知道超新星有不同的产生机制——白矮星的吸积和大质量恒星的坍缩,它们加速粒子的能力和加速出的能谱均可能存在差异,最终不同类别的源产生的能谱叠加起来形成相对复杂的能谱结构^[32]. DAMPE对于氦核以及碳、氧、铁等核素能谱的分析正在进行.我们也期望DAMPE可以在不同种类的核素能谱中发现新的结构,揭示出这些结构的规律,为理解宇宙射线的起源等问题给出重要启示.

2.3 伽马射线观测

DAMPE也是一个伽马射线望远镜,可以通过伽马射线观测间接探测暗物质和研究多种高能天体现象.伽马射线数目稀少,是质子数量的约十万分之一,不足正负电子数量的1/100,因此高准确度鉴别出伽马射线是非常关键的.伽马射线鉴别主要是通过PSD探测器的电荷测量(反符合)和BGO量能器的电磁粒子和强子粒子识别.结合PSD和BGO观测的物理量,我们发展了一套用于伽马射线事例挑选的算法,可以实现伽马射线的高效率、低本底挑选^[33].图7显示了DAMPE观测到的伽马射线天图,其中明亮的银盘辐射和多个伽马射线点源清晰可见.初步分析表明,DAMPE数据中观测到约250个伽马射线源,包括活动星系核、脉冲星和脉冲星风云、超新星遗迹、伽马射线双星等天体类别.

DAMPE的一大优势是能量分辨率很高,在10 GeV以上好于1.5%^[16],因此特别适合伽马射线单能线谱辐射的搜寻.高能(>GeV)的伽马射线线谱被认为是探测暗物质的黄金手段,因为没有任何已知的天体物理过

图7 DAMPE观测到的伽马射线天图
Figure 7 Gamma-ray sky map observed by DAMPE

程可以产生此类伽马射线线谱辐射。线谱探测有两个关键要素,一是能量分辨率,二是统计量。我们也针对线谱探测这一特定的目标优化伽马射线事例挑选,实现能量分辨和事例统计量的最优化,并最终得到对伽

马射线线谱辐射最为灵敏的探测结果,对暗物质湮灭或衰变到单能伽马射线给出最严格的限制^[34]。

3 总结

DAMPE是我国的首个空间高能粒子探测器,其部分指标(如正负电子能量分辨率、TeV能区电子质子鉴别能力)国际领先,迄今已稳定在轨运行超过5年时间,积累了大量宇宙射线数据。基于DAMPE数据,我们获得了25 GeV~4.6 TeV能段正负电子的精确能谱,首次直接观测到能谱在0.9 TeV处的拐折现象;获得了40 GeV~100 TeV能段质子能谱精确测量,发现了其在~14 TeV处的拐折。这些观测结果为理解和认识高能粒子的起源等科学问题提供了新的重要知识。随着DAMPE卫星的持续在轨运行和观测数据的进一步积累,在未来一段时间里,DAMPE必将取得更多的原创成果,有力地促进粒子天体物理学科的发展。

参考文献

- 1 Barwick S W, Beatty J J, Bhattacharyya A, et al. Measurements of the cosmic-ray positron fraction from 1 to 50 GeV. *Astrophys J*, 1997, 482: L191-L194
- 2 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. *Nature*, 2009, 458: 607–609
- 3 Aguilar M, Alberti G, Alpat B, et al. First result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5–350 GeV. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 141102
- 4 Hooper D, Goodenough L. Dark matter annihilation in the galactic center as seen by the Fermi gamma ray space telescope. *Phys Lett B*, 2011, 697: 412–428
- 5 Abazajian K N, Kaplinghat M. Detection of a gamma-ray source in the galactic center consistent with extended emission from dark matter annihilation and concentrated astrophysical emission. *Phys Rev D*, 2012, 86: 083511
- 6 Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. *Nature*, 2008, 456: 362–365
- 7 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Measurement of the cosmic ray e^+e^- spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi Large Area Telescope. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 181101
- 8 Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. Precision measurement of the (e^+e^-) flux in primary cosmic rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 221102
- 9 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. PAMELA measurements of cosmic-ray proton and helium spectra. *Science*, 2011, 332: 69–72
- 10 Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. 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. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 171103
- 11 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 2013, 339: 807–811
- 12 Yu Y, Sun Z, Su H, et al. The plastic scintillator detector for DAMPE. *Astropart Phys*, 2017, 94: 1–10
- 13 Azzarello P, Ambrosi G, Asfandiyarov R, et al. The DAMPE silicon-tungsten tracker. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2016, 831: 378–384
- 14 Zhang Z, Zhang Y, Dong J, et al. Design of a high dynamic range photomultiplier base board for the BGO ECAL of DAMPE. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2015, 780: 21–26
- 15 He M, Ma T, Chang J, et al. GEANT4 simulation of neutron detector for DAMPE. *Acta Astron Sin*, 2016, 57: 1
- 16 Chang J, Ambrosi G, An Q, et al. The DARK Matter Particle Explorer mission. *Astropart Phys*, 2017, 95: 6–24
- 17 Dong T, Zhang Y, Ma P, et al. Charge measurement of cosmic ray nuclei with the plastic scintillator detector of DAMPE. *Astropart Phys*, 2019,

- 105: 31–36
- 18 Zang J J. Measurement of absolute energy scale of ECAL of DAMPE with geomagnetic rigidity cutoff. *Proceeding of Science*, 2017, ICRC2017: 197
 - 19 Chang J, Yuan Q. Precise measurements of energy spectra of cosmic ray electrons and protons (in Chinese). *China Basic Sci*, 2019, 4: 7 [常进, 袁强. 电子和质子宇宙射线能谱的精确测量. *中国基础科学*, 2019, 4: 7]
 - 20 Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. *Nature*, 2017, 552: 63–66
 - 21 Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. Extended measurement of the cosmic-ray electron and positron spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 261102
 - 22 Aharonian F, Akhperjanian A G, Barres de Almeida U, et al. Energy spectrum of cosmic-ray electrons at TeV energies. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 261104
 - 23 Aharonian F, Akhperjanian A G, Anton G, et al. Probing the ATIC peak in the cosmic-ray electron spectrum with H.E.S.S.. *Astron Astrophys*, 2009, 508: 561–564
 - 24 Yuan Q, Feng L. Dark Matter Particle Explorer observations of high-energy cosmic ray electrons plus positrons and their physical implications. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 101002
 - 25 Fang K, Wang B B, Bi X J, et al. Perspective on the cosmic-ray electron spectrum above TeV. *Astrophys J*, 2017, 836: 172
 - 26 An Q, Asfandiyarov R, Azzarello P, et al. Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite. *Sci Adv*, 2019, 5: eaax3793
 - 27 Panov A D, Adams Jr. J H, Ahn H S, et al. Energy spectra of abundant nuclei of primary cosmic rays from the data of ATIC-2 experiment: Final results. *Bull Russ Acad Sci Phys*, 2009, 73: 564–567
 - 28 Yoon Y S, Anderson T, Barrau A, et al. Proton and helium spectra from the CREAM-III flight. *Astrophys J*, 2017, 839: 5
 - 29 Atkin E, Bulatov V, Dorokhov V, et al. New universal cosmic-ray knee near a magnetic rigidity of 10 TV with the NUCLEON space observatory. *JETP Lett*, 2018, 108: 5–12
 - 30 Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. Direct measurement of the cosmic-ray proton spectrum from 50 GeV to 10 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 181102
 - 31 Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II—Results from the first seven years. *Phys Rep*, 2021, 894: 1–116
 - 32 Yue C, Ma P X, Yuan Q, et al. Implications on the origin of cosmic rays in light of 10 TV spectral softenings. *Front Phys*, 2020, 15: 24601
 - 33 Xu Z, Duan K K, Shen Z Q, et al. An algorithm to resolve γ -rays from charged cosmic rays with DAMPE. *Res Astron Astrophys*, 2018, 18: 27
 - 34 Li X, Duan K K, Jiang W, et al. Recent Gamma-ray results from DAMPE. *Proc Sci*, 2020, ICRC2019: 576

Summary for “暗物质粒子探测卫星研究进展”

Research progress of Dark Matter Particle Explorer

Qiang Yuan^{1*} & Jin Chang^{1,2*}¹ Key Laboratory of Dark Matter and Space Science, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China* Corresponding authors, E-mail: yuanq@pmo.ac.cn; chang@pmo.ac.cn

Quite a lot of astronomical and cosmological observations reveal that dark matter widely exists in our Universe. It occupies nearly 1/4 of the total energy budget of the Universe, and is about 5 times more abundant than the normal matter. The nature of dark matter is one of the most important fundamental questions of modern physics and astronomy. To probe dark matter particles is also highly competitive among many countries around the world. China has launched the Dark Matter Particle Explorer (DAMPE; also known as “Wukong”) to indirectly detect dark matter via high-precision observations of high-energy electrons and gamma-rays. As a high-energy particle detector, the DAMPE data can also be useful for probing the origin and propagation of cosmic rays, which is another century-long problem, and the energetic activities of extreme objects such as black holes and neutron stars. DAMPE has the highest energy resolution for electron and gamma-ray measurements, and the highest electron-proton discrimination capability above TeV energies. Using the data recorded by DAMPE, we obtain by far the most precise measurements of the spectra of cosmic ray electrons and protons, and reveal new spectral features which were not discovered or clarified before. For the total electron plus positron spectrum, the DAMPE result covers an energy range of 25 GeV–4.6 TeV, which reaches the highest energy among all the space direct detections. A spectral hardening around 50 GeV, and a softening around 0.9 TeV have been revealed by DAMPE. Some hint of fine structures of the spectrum is also shown which requires more data for confirmation or exclusion. The spectral features of the DAMPE electron plus positron spectrum have very interesting and important implications on the origin and distribution of high-energy electron sources. Particularly, the 0.9 TeV break may reveal the fact that sources of TeV electrons distribute discretely in the Galaxy. The energy range coverage of the DAMPE proton spectrum is from 40 GeV to 100 TeV. For the first time, DAMPE measures the proton spectrum up to 100 TeV with a high statistics. Besides the hundreds of GeV spectral hardening, the DAMPE measurement further reveals a clear spectral softening around 14 TeV. The softening feature of the proton spectrum may be an imprint of nearby cosmic ray acceleration sources. Alternatively, the spectral structures of protons may be due to the superposition of multiple source populations. High-energy gamma-rays have also been robustly identified from the DAMPE data. The analysis shows the detection of luminous diffuse emission from the Galactic plane and nearly 250 pointlike sources in the gamma-ray sky, most of which are active galactic nuclei and pulsars. The DAMPE results offer important data in constraining/understanding the properties of dark matter and cosmic rays. We review the design, operation and data analysis of DAMPE in this work, with a focus on the analyses of spectra of cosmic ray electrons and protons.

dark matter, cosmic rays, gamma rays, space particle detectiondoi: [10.1360/TB-2021-0054](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0054)