1．γ射线暴（短条）；gamashexian，γray burst

γ射线暴于20世纪60年代由美国间谍卫星（监测苏联的太空核试验）偶然发现。γ射线暴发生的时间和方位不定，而且各向同性，是银河系外的事件。γ射线暴持续的时间很短，分布在10毫秒到几百秒之间，但在300毫秒和50秒处各有一个明显的峰，表明有两种不同类型的γ射线暴：短暴（短于2秒）和长暴（长于2秒），短暴占1/3的比例而长暴占2/3的比例。γ射线暴的能量很大，爆发瞬间，其能量与全宇宙在此伽玛射线波段的总能量相当，γ射线暴是宇宙中最强的电磁辐射事件。γ射线暴的事例率约为每天1-2个，所幸，这些事件发生在远离银河系的地方，否则巨大的能量有可能在地球上导致灾难性事件。γ射线暴的典型红移是3（发生于约116亿年前），迄今所知的最大红移γ射线暴于2009年4月23日观测到，其红移是8.2（约131亿年前）。在初始爆发之后，γ射线暴在更长的波长范围内（X射线、紫外、光学、红外和射电）伴有长时间的余辉，正是通过余辉的观测，人们可以找到其宿主星系并测量到它的红移。研究人员认为长暴与大质量恒星塌缩（超新星爆炸生成中子星，夸克星或黑洞）相关，而短暴则与双中子星或中子星-黑洞并合相关，图1两种γ射线暴模型的示意图。1998年，通过余辉观测，人们首次发现γ射线暴的确与一颗大质量超新星关联，此后又发现了多起类似的事例。2015年人们已首次观测到双黑洞并合的引力波事件，将来有望观测到双中子星和中子星-黑洞的并合事例，再联合伽玛暴实验的观测，有望解开短暴起源之谜。



图1. 伽玛射线暴火球激波模型图

1994年，EGRET卫星实验发现在一个γ射线暴爆发约一个半小时后，探测到一个18 GeV的高能伽玛光子。Fermi-LAT于2008年发射以来，观测到十多个具有10 GeV以上伽玛光子的γ射线暴。2013年，在一个γ射线暴爆发之后的200多秒，Fermi-LAT探测到迄今为止最大能量的伽玛暴光子，它的能量是95 GeV。人们发现，高能伽玛通常比低能的伽玛光子出现的晚，这表明高能粒子的加速需要一个时间过程。Fermi-LAT的有效探测面积只有1平方米，地面宇宙线观测站LHAASO建成之后，在100 GeV能区的有效面积将达到近万平方米，可有效观测高能γ射线暴。

伽玛暴爆发的时标很短，且由于它们距地球很远，光子在宇宙空间已传播了上百亿年，它们是测量光速色散关系从而是检验量子引力效应的重要方法。一些量子引力理论认为，真空具有泡沫结构，高能光子的光速较低能光子的光速要小。哪怕10 keV到数十GeV的光子光速存在极其微小的差别，长时间的传播也可以使这个差别得到很大的放大。事实上，Fermi-LAT实验通过测量一些伽玛暴里的高能和低能爆发时间之差，对光速不随能量而变的问题做出了最严格的限制。伽玛射线暴由于具有极高的亮度使得人们可以观测到很高红移的事件。这也为研究宇宙的早期演化演化提供了重要的手段。

2．初级宇宙线（短条）；yuanchuyuzhouxian，初级宇宙线，primary cosmic rays

初级宇宙线是指那些在宇宙加速器上被加速出来的高能带电粒子，这些粒子是电子、氢原子核和氦原子核，以及那些在恒星演化过程中产生的原子核。初级宇宙线在所观测到的所有宇宙线中占绝对主导的比例。初级宇宙线在随后的传播过程中，会与星际空间里的磁场，电磁辐射场和尘埃物质发生作用，自己会被打碎并产生出次级的粒子，比如正负电子，伽玛射线，中微子，还有那些恒星演化中难以产生的原子核。锂,铍,硼由碳和氧核碎裂而来，钪，钛，钒，铬，锰则由铁核碎裂而来。相比初级宇宙线，这些传播过程中产生的宇宙线则被称为次级宇宙线。原初宇宙线的成分应该与太阳系元素丰度基本相同。观测发现22Ne（氖-22）与20Ne（氖-20）的丰度比是太阳系的120倍，这表明可大量产生22Ne的Wolf–Rayet星（一种大质量恒星）应该显著贡献了银河宇宙线。

通过比较原初和次级宇宙线成分，人们能够得到许多有关宇宙线加速和传播的知识。在低能（每核子1个GeV左右）宇宙线中测量只能通过电子捕获而衰变的59Ni（镍-59）及其次级产物59Co（钴-59）的丰度，由于原初宇宙线中看不到59Ni，人们可以推断这些宇宙线的加速有个大于105年的延迟。这样的延迟表明产生59Ni的过程与加速其衰变产物59Co的过程很可能是两个独立的恒星爆炸事件。另外， 60Fe（铁-60）通过β-衰变，半衰期为260万年，原初宇宙线中测到了60Fe表明这些宇宙线的加速延迟不超过几百万年。此外，通过测量原初宇宙线C，N，O及其次级产物Li，Be，B的丰度和能谱，人们推算出宇宙线在银河系的传播时间以及扩散系数与能量的依赖关系。

3．宇宙线（短条）；yuzhouxian，宇宙线，cosmic rays

宇宙线 (cosmic rays) 泛指一切来自地球之外的高能粒子、高能伽玛射线乃至现在还未知的各种粒子，比如可能存在的暗物质粒子等。已知的宇宙线主要由原子核构成，86%为氢原子核（质子），12%为氦原子核，1%为碳、氮、氧及铁的原子核，还有1%的电子，是初级宇宙线。图2给出了太阳系和宇宙线各个元素的相对丰度的比较。质子、氦核和电子在宇宙的早期生成，是宇宙可见物质的主要构成材料，碳、氮、氧和铁等则来自恒星演化。初级宇宙线在传播过程中，与气体尘埃、背景光子场和磁场作用，可以产生伽马射线、中微子、正电子、反质子等次级宇宙线，但它们只占宇宙线总量的0.1%。早期的研究中，人们受X射线、伽马射线性质的影响，密立根以为这种能电离空气的来自地球之外的辐射也是一种电磁辐射，因而为它取名为宇宙射线，并一直沿用至今。银河系宇宙线的数密度约为10-9/厘米3，能量密度约为1电子伏特/厘米3，与银河系磁场的能量密度相当。宇宙线粒子的能量大约分布于109eV到1020eV之间（其实也有低于109eV的宇宙线，一些人称之为低能宇宙线，109-1012eV间的称为高能，1012-1015eV的称为甚高能，1015-1018eV称为超高能，大于1018eV的称为极高能。需要注意的是，伽马和中微子等的各种类似称谓会对应不同的能量范围），基本表现为幂率谱。宇宙线的寿命大约为107年，根据银河系的体积，可以估计出银河宇宙线的总功率大概为1041尔格/秒。宇宙线的起源、加速和传播问题是宇宙线研究的基本问题。当前，所观测到的最高宇宙线粒子的能量达到3×1020电子伏特，约50焦耳，如此高能的粒子是从什么地方，又是如何被加速到这样的能量的是人们极为关心的科学问题。在这样的能量下，已知物理学基本规律在此能量下是否还成立也是重要的科学问题。此外，次级宇宙射线粒子包含了原初宇宙线与环境相互作用的大量信息，这些信息对于量子引力，天体物理学和宇宙学研究有重要意义。



图2：太阳系和宇宙线各个元素的相对丰度比较（碳的相对丰度归一化到100）

4．宇宙线的观测（中条）；yuzhouxiandeguance，宇宙线的观测，cosmic rays observation

宇宙线的观测和发现源于人们在20世纪初叶对大气导电率的研究，人们发现密封容器内验电器会发生自发放电。很多欧洲和北美的物理学家都为大气电离研究做出过重要贡献，他们在地面上、隧道里、海面上、海水下、铁塔上、高山上以及高空气球上进行了测量。其中集大成者是奥地利的物理学家，维克多·赫斯。赫斯设计的验电器使用了3毫米厚的铜壁以承受高海拔的条件。在1911-13年期间，他带着验电器做了10次气球飞行。1912年8月7日的决定性飞行中，赫斯的实验揭示出高海拔空气电离率有显著加强的现象。一个月后，赫斯在德国明斯特的一个会议上报告了他的结果：“这次观测结果可能最容易的解释是假设有穿透能力很强的辐射自上而下进入大气层，并且仍能够在低海拔的密闭容器中产生部分观测到的电离。” 赫斯的实验是发现宇宙线的标志性发现。正因为他的重要发现，赫斯获得了1936年度的诺贝尔物理学奖。

发现宇宙线之后，人们使用新发展的粒子探测技术，对宇宙线开展了系列的研究。通过所观测到的宇宙线强度的东西不对称性，人们意识到宇宙线主要为带正电荷的粒子，地磁场的偏转效应导致东西方向的宇宙线粒子轨迹发生了不对称的改变。实验中，人们发现分布在不同位置上的探测器可同时探测到宇宙线，由此意识到宇宙线具有广延的性质，并最终理解到这是由于原初宇宙线在大气中与气体物质发生反应，产生次级粒子，而这些次级粒子继续与大气相互作用，又产生新的次级粒子，如此级联簇射，形成散布在一个方圆几百米的范围内。除此而外，通过宇宙线实验，人们发现了正电子、μ介子、π介子、K介子、奇异重子，重核子等许多“基本粒子”，这些发现为粒子物理的发展奠定了基础。上世纪中至上世纪末，通过太阳中微子和大气中微子实验，人们发现了不同种类的中微子具有可以互相转化的性质（中微子振荡），这是宇宙线对粒子物理研究所做出的新贡献。

宇宙线流强随能量快速变小。能量每增加10倍，单位能量间隔内的宇宙线流强下降约10的2.7次方倍。由于这个原因，只有较低能量的宇宙线可以通过空间实验进行探测，而高能的宇宙线则需要通过地面探测器进行测量。简单的讲，宇宙线观测就是针对各种粒子或辐射，测量它们的原初方向分布、时间分布和能量分布，从中寻找宇宙线的起源，研究宇宙线的加速机制和宇宙线的传播规律，探索天体物理和粒子物理的新现象。

空间实验包含气球实验、卫星实验和空间站实验，受限于空间载荷，空间实验的探测器比较小，一般不超过1个平方米的探测面积。由于PeV（10的15次方电子伏特）宇宙线的流强是一年一平方米一个，空间实验的观测能量最大不超过一个PeV。空间实验直接探测未与大气发生反应的宇宙线，通过粒子谱仪和量能器等粒子探测器，可以测量原初宇宙线粒子的电荷（从而确定粒子种类）、能量和方向信息。

地面实验通常测量宇宙线与大气发生反应之后产生的次级级联簇射粒子，或它们所产生的大气切伦科夫光，或激发大气分子所发出的苂光信号。级联簇射过程中高能次级粒子会产生多个低能次级粒子，使粒子数量不断增加，但次级粒子随能量减小和电离能损的加剧作用则导致粒子数减小，竞争的过程使次级粒子数量在某个大气深度处达到极大，这个位置被称为簇射发展极大位置，在这个位置观测可以获得最高的观测效率。但簇射极大位置依赖于原初宇宙线粒子的能量，PeV宇宙线的簇射极大位置约在海拔4000米高度，100 TeV宇宙线约在5000米海拔高度。这也是为什么地面宇宙线观测需要到4000米以上海拔的原应。地面实验可以通过测量簇射粒子在观测平面上的位置分布信息，估计出原初宇宙线的能量，通过测量簇射粒子在观测平面上的时间分布，估计出原初宇宙线的方向。大气簇射阵列实验的优点是全天候，可同时观测很大的空间区域，缺点是角度和能量分辨率比较差。

簇射中的接近光速运动的带电粒子在大气中能产生切伦科夫光，可用大气切伦科夫成像望远镜来观测。大气切伦科夫光与次级簇射粒子间的夹角部过一度，具有很好的方向性，可以用来测量原初宇宙线的方向。大气切伦科夫光主要来自簇射发展极大位置处的次级粒子，因而可以用来准确的测量原初宇宙线粒子的能量，但缺点是切伦科夫光子数很少，只能在无月的夜晚进行观测，且现有的望远镜技术一次只能观测一个很小的空间区域。

簇射粒子还能激发大气中的氮分子发出荧光，这些光子也包含能量信息和方向信息，该类实验的优点是具有很大的观测面积，但由于荧光没有方向性，可供观测的光子更少，因而只有极高能宇宙线事例适合用这个方法进行观测。地面实验通常通过联合测量多个簇射参数以确定原初宇宙线的种类。另外，这个方法也正为试验性的空间实验所采用。2016年，俄罗斯发射的一颗卫星上载有一台大气荧光望远镜，从空中探测极高能宇宙线在大气层中产生的荧光。

宇宙线实验的观测方法极为广泛，高能中微子的观测就是通过探测布置在海面或南极冰下几公里的光电倍增管，探测次级簇射粒子在水中或冰中产生的切伦科夫光来实现的。长期以来，人们还探索级联簇射粒子在大气中，在冰里或盐层里所发出的射电信号来进行探测。甚至还有人探索把声纳装置放在海水里探测因宇宙线簇射的次级粒子发出的声音信号。图3给出了宇宙线各种成分的能谱。

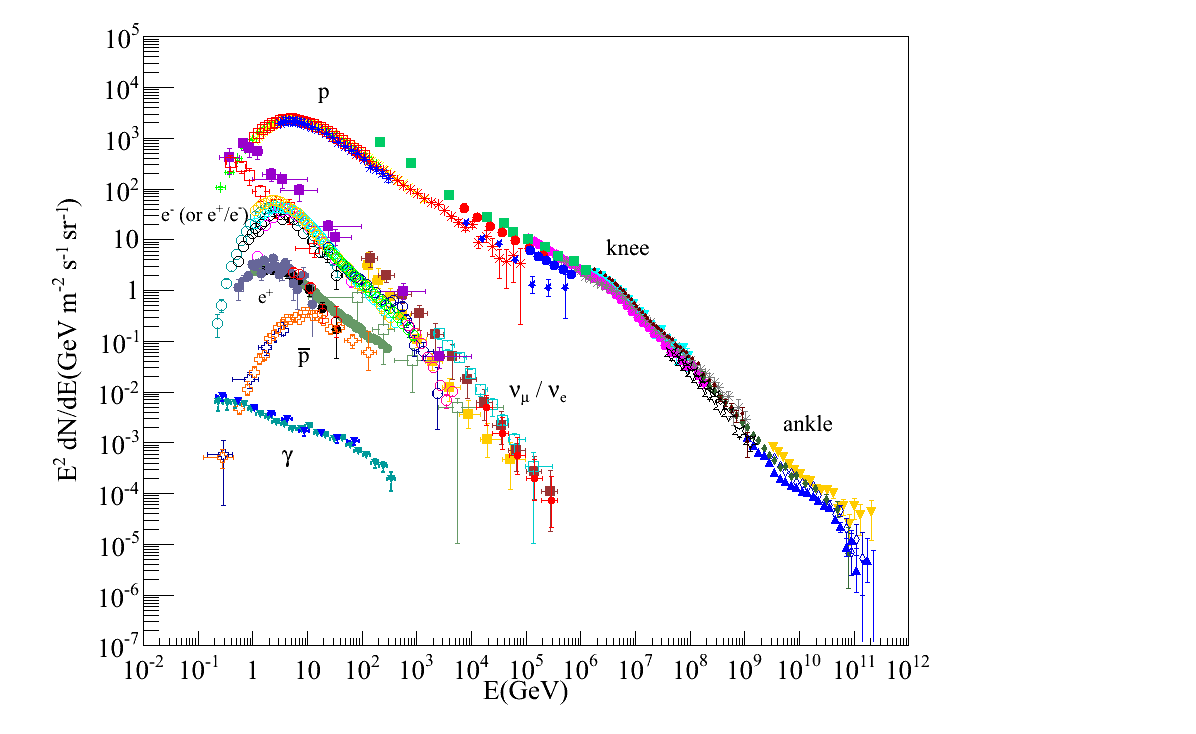


图3：宇宙线各种成分观测能谱

5．宇宙线的起源和传播（中条）；yuzhouxiandeqiyuanhechuanbo，宇宙线的起源和传播，origin and propagation of cosmic rays

宇宙线的起源和传播问题是宇宙线研究中的基本问题，至今尚没有得到很好的解决。当前广为大家所接受的理论认为，宇宙线起源于剧烈的天体演化（比如超新星爆发，微类星体和活动星系核的吸积，伽玛射线暴等）并被其产生的激波所加速。激波是由剧烈爆发过程所产生出来的超声速物质和环境中的介质相撞时挤压而成，在这高速运动的簿层里，高温高压使物质电离成为含有湍流的等离子体。当一个带电的粒子和这个激波面相碰时，会有一定的概率被激波里的无规磁场反弹回去。在质心坐标系里这是一个弹性的散射，但在实验室坐标系里看则是激波把一部分机械能传递给了粒子，使粒子得到了加速。加速后的粒子会飞向远处，但由于普遍存在的磁场，一部分粒子又会回转过来，被激波再次加速。正是由于再次加速的只是部分的粒子，其他粒子已经逃逸出加速区，高能的粒子就越来越少，其能谱将呈现幂率谱的形式。尽管描述具体过程的数学方程有些复杂，但其最重要的一个特性也可以有个很简单的描述。和粒子物理实验室中的加速器类似，宇宙粒子加速器能够加速的最大粒子的能量也正比于被加速粒子的电荷（z）、宇宙加速器的磁场强度（B）、加速器的尺度（L）和激波面的速度（βs）。这个关系最早由Hillas指出。根据这个关系，极高能宇宙线的候选源应该是河外的一些天体，EeV能量以下的源则可以是来自银河系内的天体。此外，我们还可以看出，太阳表面和行星际空间的激波可以把宇宙线加速到GeV能量，而这些太阳高能粒子的事件已的确多次被观测到。

银河系宇宙线的传播已有相当系统的研究，但由于有关磁场和星际介质分布知识的不完备，仍存在细节上的不确定性。针对带电粒子构成的宇宙线，其传播可以在最简单的近似下用一个扩散方程来描述。银河系磁场形成了一个包裹着银盘的“扁箱子”把宇宙线束缚在里面，但通过箱子的边界，大量的宇宙线仍会泄露（或扩散）出去。泄漏或扩散的速度与能量有关，高能的快而低能的慢。宇宙线的扩散系数张量和各处的磁场直接关联。仔细分析，在传播过程中，宇宙线还会因为电离或库伦散射而损失能量，也会因为和环境中的电磁波的相互作用而获得能量。此外，宇宙线在传播过程中和星际介质发生反应可以产生初级宇宙线中所不包含的锂、铍、硼和亚铁元素（锰，铬，钒，钛等）等次级宇宙线粒子。正是通过这些元素的丰度和能谱的测量，人们发现宇宙线的平均寿命大概是千万年，而且发现在此期间，它们仅有三分之一的时间处于银盘里，其它时间则在物质稀少的银晕里。通过测量弥散伽玛射线的能谱，人们可以推算出和星际介质发生反应的宇宙线的流强，从中我们可以得到宇宙线在银河系各处的分布信息并发现宇宙线在银盘各处的分布还是相当均匀的，差别应在一个量级以内，这也表明宇宙线在银河系内的传播还是比较有效的。

由于99%的宇宙线粒子为带正电的原子核，银河宇宙线在泄漏（或扩散）的过程中伴随有电荷的流动，会产生宏观的电流和宏观的磁场，值得一提的是，银河宇宙线的能量密度与银河磁场的能量密度几乎相等，约1eV/cm3，这或许表明宇宙线和银河磁场间存在某种作用和关联。如同运动的空气会产生风，运动的宇宙线会导致宇宙线强度的各向异性。近年来，TeV-PeV能区宇宙线各向异性的测量不断取得新结果，为研究银河宇宙线的整体运动带来了新的信息。根据各向异性推测的宇宙线流动及其所产生的银河系磁场在形态上与观测到的银河系大尺度磁场有相似的结构，这是一个有趣的情况。

6．宇宙线物理（中条）。Yuzhouxianwuli，宇宙线物理，cosmic rays physics

宇宙线是来自太阳系外唯一的物质样本，是连接无穷大宇宙和无穷小粒子的桥梁，是我们理解物质大尺度结构及其演化，理解微观粒子的复杂多样性及其相互作用的重要手段。

尽管目前世界上最大的LHC加速器可以把质子能量加速到7 TeV左右，但与自然的加速器相比，最大加速能量仍相差千万倍的量级。宇宙加速器是什么？它们是如何工作的？在如此高的能量下，物理学基本规律是否会发生变化？有关宇宙线起源、加速和传播问题是当今基础科学的前沿问题，名列欧、美科学决策机构为基础科学研究所凝炼出的6或11个基础科学重大问题之中。此外，宇宙线及其相关研究也是研究极端条件下天体辐射和演化，研究星系际电磁辐射背景，间接暗物质粒子探测及研究宇宙演化的重要手段。宇宙线研究将对太阳高能活动及空间气象监测和预报发挥重要的作用。

（1）宇宙线起源和加速研究

由于银河宇宙线的功率和成份，人们普遍认为，银河宇宙线主要来源于超新星爆发以及爆发后形成的超新星遗迹（SNRs)上的扩散激波，最大加速能量可以达到PeV，形成了宇宙线能谱“膝”结构。根据近几十年伽玛射线观测的研究发现，银河宇宙线的候选者应该还包含诸如脉冲星云，伽马射线双星，微类星体，OB星协，恒星形成区以及银心黑洞等天体。观测这些银河系天体在TeV-PeV能区的伽玛射线辐射，为发现银河宇宙线的加速源并研究其加速机制具有重要意义。

由于宇宙线能谱在 PeV处发生拐折，而后在EeV能量又变得平坦，人们一般认为EeV以上的宇宙线来自银河系外。活动星系核AGN和伽玛射线爆GRB是最可能的候选源。

（2）银河宇宙线的传播研究

银河系普遍存在微高斯强度的磁场，宇宙线受此磁场偏转失去了源的方向，主要通过扩散过程进行传播，表现出高度的各向同性。由于存在密度梯度及各地磁场结构的差异，宇宙线强度表现出微弱的各向异性。精确测量宇宙线的各向异性对于宇宙线传播模型的研究具有重要意义。

在传播过程中，银河宇宙线会与物质尘埃和背景光子场发生作用，产生包括正负电子，反质子，伽玛和中微子等次级粒子，重核会碎裂成轻核，如硼等。电子在磁场中通过同步辐射或逆康普顿过程辐射伽玛光子。观测TeV-PeV能区原初宇宙线能谱，次级粒子和原初粒子比，电子能谱和弥散伽马射线的辐射对于研究银河宇宙线的传播具有重要意义。

（3）宇宙线能谱的精确测量

自从1958年发现宇宙线全粒子能谱在1015-1016 eV之间存在一个“膝”的结构以来，“膝”的成因一直是宇宙线物理中的一个重要的研究课题。精确测量分成分的宇宙线能谱对于揭开这个谜团有重要意义。LHC实验针对宇宙线实验所需要的强相互作用模型问题，在接近束流的方向上开展了LHCf和TOTEM实验，强相互作用模型业加精确，为分成分的能谱测量提供了重要的基础。根据大量地面EAS实验和大气荧光实验的结果，“膝”以上的宇宙线能谱还有丰富的结构，精确测量这些结构并理解其起因对于研究超高能宇宙线的起源具有重要意义。

（4）暗物质粒子的探测及基本物理学规律的研究

天文学和宇宙学研究表明，宇宙中存在大量的暗物质粒子，在星系的中心区密度尤其高。根据粒子物理的理论，这些暗物质粒子很可能是弱相互作用大质量粒子（WIMP）。WIMP可以通过湮灭或衰变而产生高能伽玛射线，正负电子或中微子等，并且衰变产物的能谱具有显著的独特结构，可以被宇宙线实验中发现。如果WIMP的质量超过几个TeV，地面宇宙线实验将成为主要的探测手段。

量子引力理论目前尚未成熟，其中一些研究认为量子引力效应会破坏洛伦兹不变性（LIV），导致不同能量的光子在真空中具有不同的速度。通过诸如GRB这样的快速时变现象，人们可以研究量子引力和LIV效应，目前最强的模型限制结果来自Fermi-LAT的GRB观测。大视场和全天候实验能有效地监测GRB和AGN的时变，开展量子引力效应和LIV研究。

（5）太阳高能活动及交叉学科的研究

太阳是离我们最近的宇宙线加速源，可以把宇宙线加速到GeV能区。太阳活动导致的高能粒子爆发是很多灾害性空间环境事件的起因。监测太阳系宇宙线强度的变化研究太阳宇宙线的加速过程，对于宇宙线加速和太阳物理研究具有重要意义。此外，太阳临近范围内（1 AU）磁场的变化，不仅可以对磁暴作出预报，还有重要的研究价值。

通过宇宙线与大气物理过程的同步观测，建立大气层过程与效应观测平台，研究大气臭氧层变化、辐射与气溶胶变化及云、雷暴、闪电和降水过程及其与高能宇宙射线之间可能存在的关系，是探索中的研究课题，对于国民经济和人类社会发展及安全具有重要意义。