



张丙开 著

极高能宇宙线能谱的测量

The Measurement of UHECR Spectrum with the HiRes Experiment

UHECR
Spectrum

中国科学技术大学出版社

国家自然科学基金面上项目 (NO.11273008) 资助成果



极高能宇宙线能谱的测量

The Measurement of UHECR Spectrum with the HiRes Experiment

张丙开 著

UHECR
Spectrum

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

极高能宇宙线一般是指能量高于 10^{18} eV 的宇宙线粒子,其能谱测量、起源、化学成分、加速机制和传播过程等是目前宇宙线物理研究的主要内容。本书概述了极高能宇宙线研究的基本特点,包括极高能宇宙线的能谱、成分和起源。简要介绍了美国 HiRes (High Resolution Fly's Eye) 极高能宇宙线实验,系统分析了 HiRes 实验立体观测数据。根据探测器的特点,发展了一套新的簇射几何重建方法,使得簇射到达方向的角分辨达到 0.4° ,这对极高能宇宙线源的研究具有重要意义;同时改进了簇射的能量重建,使得实验的能量分辨达到 11%。为了检验事例重建的方法和估计探测器的孔径大小,对探测器进行了细致的模拟,通过模拟数据和观测数据的对比,发现模拟数据很好地吻合了观测数据。大气质量对探测器的探测效率及孔径大小有较大的影响,本书研究了探测器孔径大小、空气质量和簇射几何的关系,通过一定的几何限制和能量限制,使得当能量高于 $10^{18.2}$ eV 以后,探测器的有效孔径大小几乎不受空气质量的影 响。在此基础上,测量了极高能宇宙线的能谱,在 10.8 倍标准偏差的置信水平下确认了“踝”的存在,同时发现有迹象显示 GZK 截断的存在(3.7 倍标准偏差)。本书所介绍的研究成果可供相关研究人员参考,相关的数据处理方法也能够为其他类似探测器的设计提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

极高能宇宙线能谱的测量/张丙开著.—合肥:中国科学技术大学出版社,2017.2
ISBN 978-7-312-04125-9

I. 极… II. 张… III. 宇宙线探测—能谱—测量 IV. O572.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 311222 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥市宏基印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 8.75
字数 164 千
版次 2017 年 2 月第 1 版
印次 2017 年 2 月第 1 次印刷
定价 32.00 元

前 言

宇宙线是来自宇宙空间的高能带电粒子流,包括电子、质子和各种元素的原子核,其能量从 10^7 eV 一直延伸到 10^{21} eV,跨越了十几个量级,其流强跨度更大,达 32 个量级。自从 1912 年被发现以来,对宇宙线的研究至今已 100 余年,并已结出累累硕果,但宇宙线尤其是极高能宇宙线的起源为何仍然是个谜。宇宙线起源之谜被列入 21 世纪 11 大科学难题之一。围绕着这一核心问题,国际上投入了大量人力、物力,从实验和理论上对宇宙线的能谱、化学成分、大尺度分布、加速和传播特征等进行研究,以期揭开宇宙线起源的神秘面纱。宇宙线方向测量和能谱测量对于寻找宇宙线起源具有尤为重要的意义。

探测极高能宇宙线有两种最常用的技术手段,一种是利用光学探测器进行探测;另一种是使用次级粒子密度探测器进行探测。国际著名极高能宇宙线实验——HiRes 实验,采用的就是大气荧光探测技术来探测极高能宇宙线。本书作者参与了该实验的数据收集整理、噪声事例剔除、方向重建、能量重建、模拟计算、探测器标定、孔径估计与能谱测量等工作。作者在这个实验的每个过程中均做出了创新性的工作,尤其是在方向重建和孔径估计与能谱测量方面,发展出了一套基于空间和时间相结合的宇宙线事例立体方向重建方法,极大地提高了方向重建精度,创造性地利用能量与几何限制,成功地解决了大气荧光探测器有效孔径因空气质量问题而估计不准的难题,得到了不随空气质量变化的、比较稳定的有效孔径,从而精确地测量了极高能宇宙线的能谱。通过一系列的创新,得到了高质量的数据样本,获得了高分辨的方向信息和精细的极高能宇宙线能谱。这些出色的工作,得到了整个 HiRes 工作组的高度认可。

本书系统介绍了极高能宇宙线实验数据的处理过程和相关物理结果,这些研究成果对于宇宙线大尺度分布分析与相关天体关联分析、宇宙线起源研究具有重

要意义,可供相关研究人员参考。相关的数据处理方法也能够为其他类似探测器的设计提供重要借鉴。

以上相关研究结果能够成书,作者要衷心感谢中国科学院高能物理研究所曹臻研究员的指导,感谢阜阳师范学院有关领导和部门的关心和支持,感谢国家自然科学基金委的支持,更感谢中国科学技术大学出版社的精心组织和辛勤付出。

由于作者的学识和水平有限,书中难免会有疏漏和错误之处,敬请各位读者不吝赐教。

张丙开
2016年12月

目 录

前言	(i)
第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 极高能宇宙线	(4)
2.1 宇宙线的发现	(4)
2.2 宇宙线的起源和加速	(4)
2.3 宇宙线的能谱	(6)
2.4 宇宙线的成分	(10)
2.5 宇宙线的方向	(14)
2.6 广延大气簇射	(19)
2.6.1 广延大气簇射的成分	(20)
2.6.2 广延大气簇射的纵向发展	(20)
2.6.3 电磁级联的横向扩展	(23)
2.6.4 广延大气簇射的探测	(25)
第 3 章 HiRes 实验	(27)
3.1 探测器概况	(27)
3.2 探测器标定	(34)
3.2.1 光电倍增管和电子学的标定	(34)
3.2.2 大气的标定	(34)
第 4 章 宇宙线事例重建	(41)
4.1 人工事例和噪声事例的去除	(41)
4.2 几何重建	(45)
4.2.1 HiRes 2 平面重建	(48)
4.2.2 HiRes 1 平面重建	(49)

4.2.3 事例剔除	(51)
4.3 能量重建	(53)
4.3.1 光信号估计	(53)
4.3.2 纵向发展曲线的拟合	(56)
4.3.3 原初能量的确定	(56)
4.4 事例挑选	(58)
第 5 章 探测器模拟	(62)
5.1 模拟事例的产生	(62)
5.2 光的产生	(63)
5.2.1 大气荧光	(63)
5.2.2 切仑科夫光	(66)
5.3 光的传播	(67)
5.3.1 瑞利散射	(68)
5.3.2 气溶胶散射	(68)
5.3.3 臭氧吸收	(70)
5.4 光学模拟	(72)
5.5 电子学模拟	(73)
第 6 章 模拟数据和观测数据对比	(74)
6.1 分辨率研究	(74)
6.2 模拟和实验对比	(88)
第 7 章 能谱测量结果	(100)
7.1 有效孔径	(100)
7.2 能谱测量	(108)
7.3 不确定性分析	(112)
7.4 与其他测量结果的比较	(117)
第 8 章 总结	(123)
参考文献	(125)

第 1 章 绪 论

极高能宇宙线(Ultra-High Energy Cosmic Rays,简称 UHECR)一般是指能量高于 10^{18} eV 的宇宙线粒子。对极高能宇宙线的研究起始于 20 世纪 60 年代,能量高于 10^{20} eV 的宇宙线事例也是在那个时期首次被观测到的^[1]。随后,越来越多的高能宇宙线事例先后被不同的实验观测到。这些极高能宇宙线是从哪里产生的?又是如何被加速到这一能区的?它们的化学成分到底是什么?这些问题一直没有解决。由于极高能宇宙线的流强较低(对于能量 10^{20} eV 的宇宙线粒子,每世纪每 100 km^2 能探测到一个左右),一般的探测器很难探测到足够多的事例,给人们研究解决这些问题带来了困难。极高能宇宙线的起源、化学成分、加速机制和传播过程等是目前宇宙线物理研究的主要内容。这些研究对粒子物理、高能天体物理和宇宙学等相关学科的研究具有重要的意义,很可能是揭示某些新的基本物理规律的突破点。近年来,随着探测技术的改进,出现了一些大型的探测器,如在 AGASA 实验^[2]、HiRes 实验^[3]、Pierre Auger 实验^[4]以及 Telescope Array 实验^[5]中使用的探测器。通过对宇宙线的能谱、到达方向和原初成分的研究,人们对该能区宇宙线的认识逐渐增强。

目前一般认为这些极高能宇宙线是宇宙中高能天体剧烈活动的产物,但尚未发现直接的证据;也有人认为这些极高能宇宙线粒子可能是产生于宇宙形成早期的某些重粒子的衰变^[6]。

精确地测量宇宙线的能谱是理解宇宙线的起源和加速机制的有效手段之一。国际上几个著名实验已经测量了极高能宇宙线的能谱^[2, 7-13]。人们发现宇宙线的能谱在极高能区和低能区类似,整体上仍然满足幂律谱的形式,但在 $10^{18.5}$ eV 附近,能谱发生了拐折,这就是通常所说的“踝”。尽管能标不同,但几个实验均观测到了“踝”,“踝”的位置基本上在 $10^{18} \sim 10^{19}$ eV 之间。“踝”的成因目前尚不清楚,仍存在一定的争论。Wibig 等人^[14-15]认为“踝”是由于宇宙线起源的不同导致的,他们认为“踝”是宇宙线银河系内起源和银河系外起源的分界线,在“踝”能量以下的宇宙线主要来自银河系内,而“踝”以上的则主要是银河系以外起源的宇宙线。Berezinsky 等人^[16-17]则持不同的观点,他们认为仅仅河外起源就足以解释“踝”的存在,“踝”是由于河外质子

宇宙线与宇宙微波背景相互作用产生电子对的必然结果,从河内起源到河外起源的过渡发生在能量低于“踝”的地方。

关于是否存在 GZK 截断,也是这一能区的问题焦点之一。1965 年,2.7 K 宇宙微波背景辐射(CMB)被发现之后,Greisen、Zatsepin 和 Kuz'min 指出^[18-19]:当宇宙线质子成分能量高于某一阈能 E (约为 6×10^{19} eV) 时,将与宇宙线微波背景(CMB)光子相互作用,产生 π 介子,损失一部分能量,直到粒子的能量低于相互作用的阈能。核子成分也会通过光子瓦解过程(Photo-Distintegration)丢失能量。粒子的能量越高,能量丢失越快。因此,宇宙线能谱在 $10^{19} \sim 10^{20}$ eV 某处会产生截断,即 GZK 能谱截断。不过 Wibig 等人^[20]认为如果原初的注入谱足够平而且能量延伸得足够高,能谱中也可以没有 GZK 截断。在实验上,这一效应很难确定,一方面因为统计性太低,另一方面由于探测器本身的特点及能量定标等原因,不同实验测得的 GZK 能区的能谱有一定的差异。

就曝光量最长的极高能宇宙线实验来看,研究者们给出了不同的结果。AGASA 实验^[2]观测到了 GZK 能量以上的连续平滑的能谱,谱指数几乎没有发生改变。

Yakutsk 实验^[8]和 HiRes 实验则观测到了很强的 GZK 截断迹象^[9-12,21,22]。

Pierre Auger 实验^[13]只给出了能谱的测量结果,观测到了 GZK 截断迹象。

能谱的精细测量将帮助人们理解宇宙线的起源。HiRes 实验采用大气荧光探测技术,该实验的主要目的是测量极高能宇宙线的能谱、成分和到达方向,它能够测量簇射的纵向发展、确定簇射发展的极大以及簇射发展极大对应的大气深度。该实验有两个探测器:HiRes 1 和 HiRes 2。这两个探测器各自独立运行,独立获取数据。但数据分析可以采用两种不同的模式:单眼模式和立体模式。如果分别分析两个探测器的数据,称为单眼模式。单眼模式的能谱测量已经完成^[9-12]。如果一个簇射被两个探测器同时观测到,则可以采用立体模式进行分析。立体观测可以很好地重建簇射的几何,相应地改善能量的重建精度,因而可以更精细地测量极高能宇宙线的能谱。

本书利用 HiRes 实验的观测数据,采用立体分析模式,精细地测量了能量高于 $10^{18.2}$ eV 的宇宙线的能谱。本书的第 2 章,全面介绍了极高能宇宙线的观测特征,如能谱、成分和各向异性等,同时介绍了高能宇宙线在大气中引发的广延大气簇射。随后,在第 3 章中详细介绍了 HiRes 实验,其中包括探测器的标定。第 4 章重点介绍了对立体观测数据的处理,其中包括激光事例、氙灯事例和噪声事例的去除以及簇射的几何重建和能量重建。第 5 章详细介绍了探测器的模拟,讨论了光的产生、光的传播等物理过程。最新的标定数据被放进模拟,使得模拟更加能够反映探测器的性能。紧

接着在第 6 章,用模拟数据检验了事例的重建方法,研究了探测器的角度分辨和能量分辨,同时对模拟数据和观测数据进行了详细的对比。在第 7 章,统计了探测器的曝光时间,考虑了大气质量对探测器的影响,估计了探测器的有效孔径,随后测量了原初宇宙线的能谱,并对能谱进行了初步分析,简单讨论了能谱中的“踝”和 GZK 特征,同时还讨论了一些因素对能谱的影响。

第 2 章 极高能宇宙线

2.1 宇宙线的发现

所谓宇宙线,是指来自宇宙空间的带电粒子流。1912 年, Hess^[23] 乘气球升到 5 km 的高度,发现电离室的电流随高度的增加而增加,并且确认白天和夜间没有差别。由此他得出结论:来自地球外部的一种新的穿透辐射产生了这个电流,并把它取名为宇宙射线(简称宇宙线),能量高于 10^{18} eV 的宇宙线一般称作极高能宇宙线^[24]。

2.2 宇宙线的起源和加速

极高能宇宙线的起源是什么? 其又是如何被加速到如此高的能量的? 这些粒子是如何到达地球的? 它们的化学成分是什么?

这些问题至今仍然没有得到很好的回答。目前一般认为活动星系核、射电星系、中子星等剧烈活动的天体可能是极高能宇宙线的起源。但粒子是如何被加速到如此高的能量的? 目前的加速机制,无论是统计加速机制^[26]还是直接加速机制,都不能很好地进行解释。不过无论何种加速机制, Hillas^[25] 对宇宙线可能的源做了基本的限制:被加速的宇宙线粒子必须满足一个基本的原则,即如果一个宇宙线粒子在一个磁场强度为 B 的源中逐步被加速,则它的回旋半径也将越来越大,当回旋半径超过源的尺度范围时,该粒子将逃出,不能再被源加速,这时粒子获得的最高能量为

$$E_{\max} = \beta ZeBL \quad (2.1)$$

这里, β 是源的中心区扩散速度(相对于光速 c), Z 是粒子的电荷数, L 是加速区的

大小。

Hillas^[25]给出了能够把粒子加速到能量高于 10^{20} eV 的源的磁场和尺度大小的关系。如图 2.1 所示,实线以上的部分,是可以把质子加速到 10^{20} eV 的源,虚线表示能够把铁核加速到 10^{20} eV 的限制。从图上可以看出,只有很少的天体,如中子星、活动星系核和射电星系等能够把质子加速到 10^{20} eV 以上,铁核更容易被加速到如此高的能量。

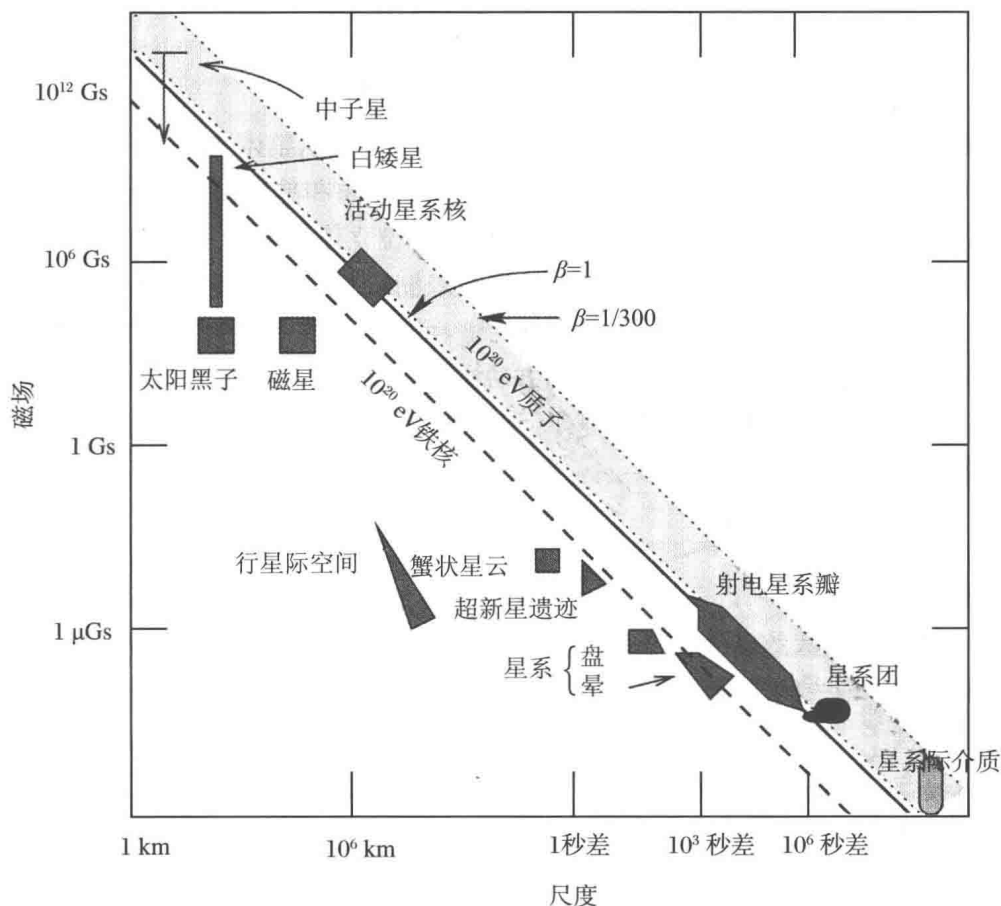


图 2.1 一些可能的宇宙线源的尺度和磁场^[25]

不管宇宙线起源于何种天体,也不管通过何种加速机制加速,粒子能被加速到的最大能量为 $E_{\max} \approx ZeBR$ 。实验上已经观测到 10^{20} eV 以上的事例,这对任何加速机制都是严峻的挑战,因为目前最活跃的天体在合理的尺度 R 和磁场 B 的情况下,也很难能够把粒子加速到如此高的能量^[25, 27, 28]。如果再考虑粒子在传播过程中的能量损

失等因素,这一问题将更加严峻。所以有人试图利用自上而下(Top-Down)模型来解释这些高能宇宙线粒子的起源^[6],认为宇宙形成早期产生的一些重粒子通过衰变或者宇宙空间某处平衡的破缺都可以导致如此高能量的宇宙线。该模型避开了宇宙线的加速机制,但现在不能解释宇宙线何以有如此高的能量密度。

2.3 宇宙线的能谱

在绪论部分已经对宇宙线的能谱做了一些介绍,这里从整体上进行一些补充。宇宙线的微分能谱定义为单位面积、单位时间、单位立体角和单位能量间隔内通过的粒子数。积分能谱则定义为单位面积、单位时间和单位立体角内通过的能量大于 E 的粒子数。人们用各种各样的探测技术和手段已经测量到了不同能量段的初级宇宙线能谱^[24](图 2.2)。从低能端到 10^{14} eV 的能谱,可以在大气层外直接测量;高能端的粒子,由于其流强较低,一般采用间接的方法测量。初级宇宙线的能谱从能量 10^7 eV 一直延伸到能量 10^{21} eV,其强度跨越了近十几个数量级。从整体上看,能谱遵循着非热的幂律谱形式:

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{\alpha}$$

谱指数 α 大约为 -3 ,所以宇宙线的流强随着能量的增加而急剧下降。在 10^{11} eV 附近,每平方米每秒大约能接收到一个宇宙线粒子;在 10^{18} eV 附近,每平方千米每年能接收到一个宇宙线粒子;到了 10^{20} eV 时,每一百平方千米每世纪大约能够探测到一个宇宙线粒子。因此,在不同的能量段需采用不同的探测手段。在不同的能量范围,能谱又存在着明显的结构。在 5×10^{15} eV 附近,存在着一个拐折,谱指数从约为 2.7 变化到约为 -3.0 ,人们称之为“膝”。在随后的 2.5 个数量级上,谱指数几乎保持常数。在 10^{17} eV 附近,能谱发生了拐折,谱指数从约为 -3.0 变化到约为 -3.27 ,人们称之为第二个“膝”。在 3×10^{18} eV 处,能谱又发生了拐折,谱指数从约为 -3.2 变化到约为 -2.7 ,一般称此处为“踝”。对于“膝”和“踝”的成因有很多解释,例如,成分的改变、起源的不同等。为了看清能谱的细致结构,图 2.3 用另外一种方式显示了宇宙线的能谱,即流强乘以能量的三次方(E^3)。从图上可以较清楚地看出“膝”、第二个“膝”及“踝”的结构和位置。

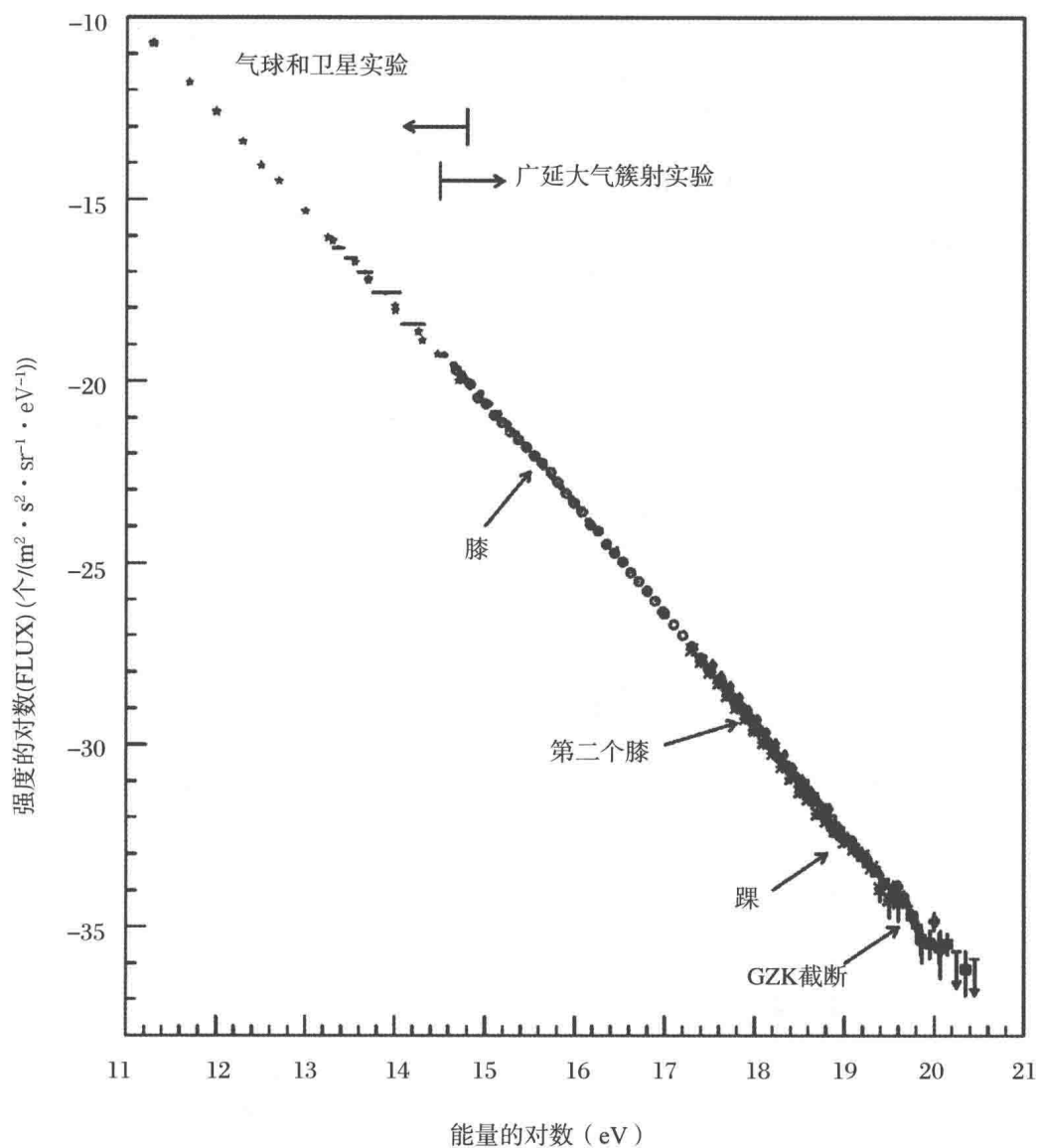
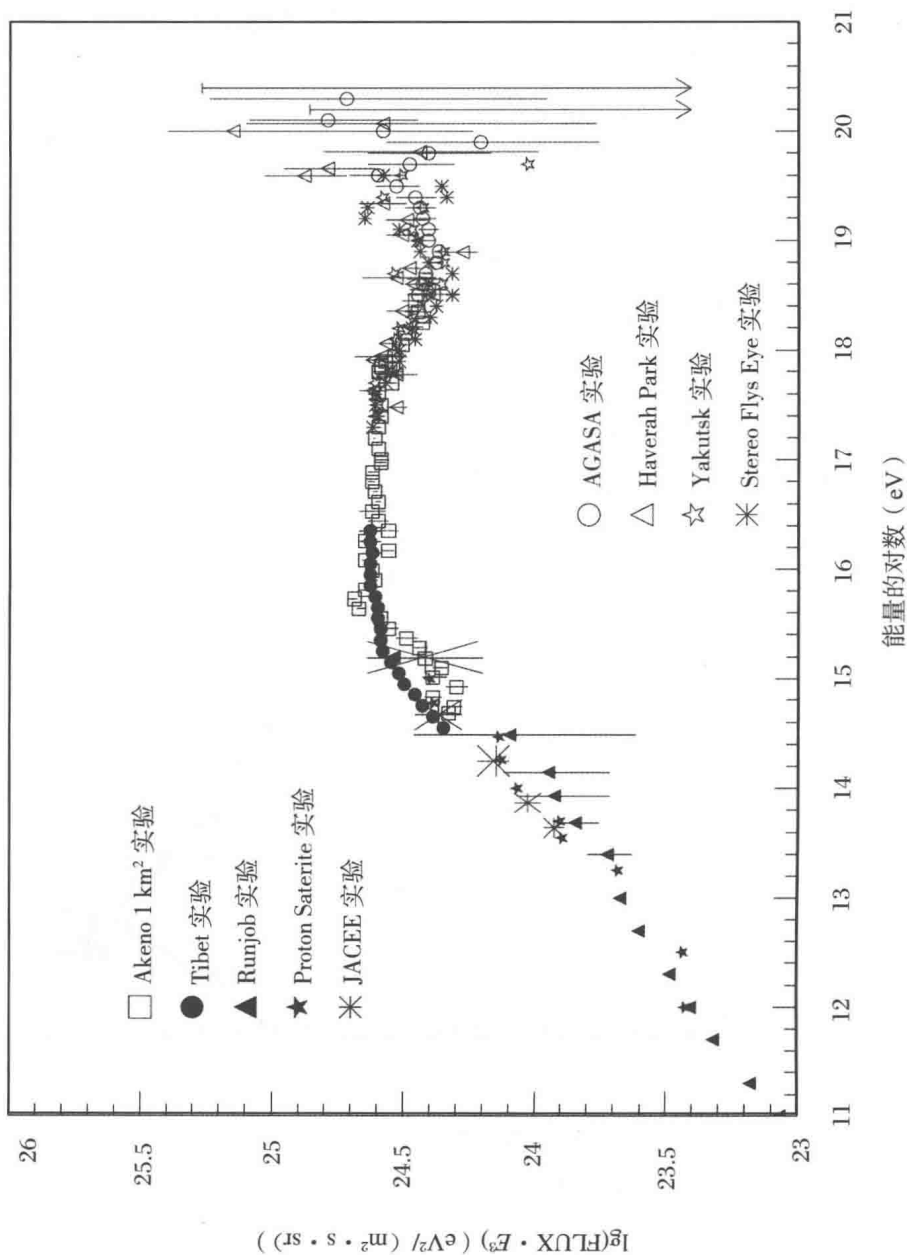
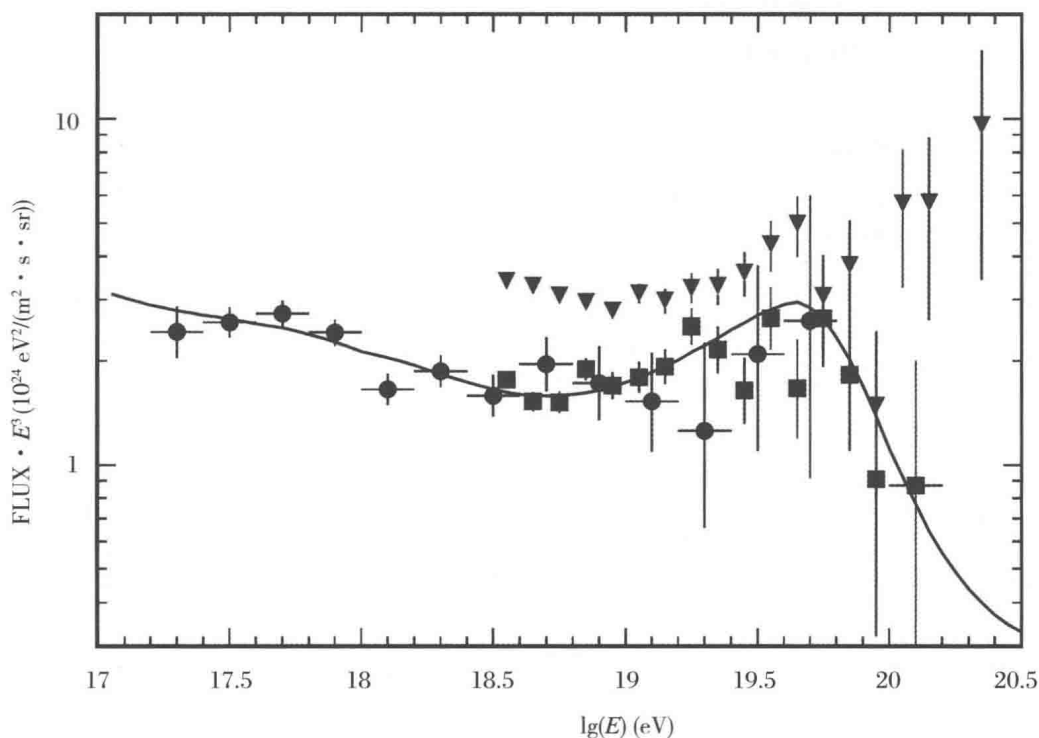


图 2.2 不同实验观测的宇宙线全粒子能谱

图 2.3 不同实验观测到宇宙线的全粒子微分能谱^[30]

在能谱的末端,还存在着一个尚未解决的疑问,即是否存在 GZK 截断。如果能谱超过 GZK 截断能量,还一直延伸且没有压低,人们就需要较大的事例样本来研究宇宙线事例成团或各向异性,以期发现它们的起源。如果存在着 GZK 效应,那么可以研究该能量附近的能谱形状,在宇宙学的尺度上研究源的分布和演化^[29]。能谱的形状及结构能够提供宇宙线本质及起源的信息。最重要的一点就是整个能谱整体上满足幂律的形式,因此任何可能的源或加速机制必须能够解释这种谱形。图 2.4 给出了 HiRes 实验单眼模式和 AGASA 实验测量的极高能宇宙线能谱。



圆点和方点分别是 HiRes 2 和 HiRes 1 单眼模式测量的能谱,倒三角形是 AGASA 实验测量的能谱。实线是河外源和河内源模型拟合的结果

图 2.4 HiRes 实验和 AGASA 实验测量的极高能宇宙线能谱^[21]

2.4 宇宙线的成分

测量原初宇宙线的成分同样能够提供关于源的信息。对于能量低于 10^{14} eV 的宇宙线,可以通过直接测量的方法测量其成分,例如,通过放在高空气球或者卫星上的闪烁体探测器进行测量。但在高能端,宇宙线的流强急剧下降,无法再采取直接测量的方法,只能采用间接测量的方法,也就是测量广延大气簇射,通过测量大量的次级粒子来研究原初宇宙线的成分,因此成分测量比能谱和方向测量困难得多。

鉴于目前的观测手段还不能逐事例区分成分,所以人们只好采用统计的方法通过大样本的事例来研究宇宙线的原初成分。目前用于成分研究的主要观测量有两个:一个是簇射发展到极大时的大气深度 $X_{\max}$,另一个是簇射中 μ 子成分和电磁成分的比率。不过,这些方法都对强相互作用模型有一定的依赖。在成分分析中,人们一般只关心质子成分和铁核成分,因为它们代表着两个极端。即使这样,仍很难区分它们,所以,对混合成分的区分一般都采用这两种成分的模式。

簇射发展极大处的大气深度 $X_{\max}$ 是一个与成分直接关联的物理量,一般通过研究 $X_{\max}$ 随能量的变化来研究宇宙线的成分。尽管该方法对模型有一定的依赖,但所有的强相互作用模型均显示重核成分在大气中沉积能量要比轻核快,相应的簇射发展极大位置要浅。Linsley^[31] 首先给出了 $X_{\max}$ 随能量的变化率 ER (Elongation Rate) 的定义:

$$ER = \frac{dX_{\max}}{d \ln E}$$

对于铁核和质子成分,该变化率可以通过模拟给出,而且它们的斜率基本不受相互作用模型的影响,如 QGSJet 模型^[32] 和 Sibyll 模型^[33]。观测到的 $X_{\max}$ 随能量变化曲线应该在这两种模型之间,如果曲线变得更陡,则说明成分逐渐向轻核转变;如果相反,则说明成分由重变轻。这种定性的分析基本不受模型的影响,但如果要定量地研究各种成分的多少,则对模型有较强的依赖,根据不同的模型会得出不同的结论。另外, $X_{\max}$ 的涨落也包含着成分的信息,根据模拟,质子的涨落为 53 g/cm^2 ,铁核的涨落为 22 g/cm^2 ,而且涨落对模型的依赖也较小。通过研究 $X_{\max}$ 的分布也可以研究原初宇宙线的成分。

大气荧光探测器能够直接测量簇射发展极大处的大气深度 $X_{\max}$,切伦科夫光探