

# 我国的宇宙线物理研究六十年

马宇蓓<sup>†</sup> 况浩怀

(中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

2012-11-21 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: mayq@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130103

**摘要** 为纪念宇宙线物理诞生 100 周年, 文章介绍了中国的几位老一辈的物理学家在宇宙线和粒子物理研究中曾做出的卓越贡献, 回顾了我国 60 年来, 特别是最初阶段, 新中国的宇宙线研究的发展历程, 对研究的不同阶段取得的成果举例做了介绍.

**关键词** 宇宙线, 粒子物理

## 60 years of cosmic ray physics research in China

MA Yu-Qian<sup>†</sup> KUANG Hao-Huai

(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** To commemorate the 100th anniversary of the birth of cosmic ray physics, we introduce several of the elder generation of physicists who made outstanding contributions in the research field of cosmic rays and particle physics. Then, looking back over the past 60 years, we review the development of cosmic ray research in China, especially during the beginning years. Some typical achievements in various subjects are presented.

**Keywords** cosmic ray, particle physics

### 1 宇宙线发现的一百周年

1912 年, 奥地利物理学家维克多·赫斯(Victor F. Hess)乘坐气球把密封的电离室带到高空, 发现了来自地球大气层外的贯穿辐射. 他在连续进行了 6 次气球实验后, 8 月 7 日用了 1600m<sup>3</sup> 的氢气球进

行了第 7 次的飞行, 首次飞到了 5350m 的高空, 测到了电离度随飞行高度的增长, 在 5000m 高空时强度是地面的 9 倍, 而且白天和黑夜相同, 从而推断出是来自太阳系外宇宙空间的贯穿辐射. 同年赫斯在物理学杂志(*Phys. Zeit.*)上发表了题为《第 7 次气球自由飞行中的贯穿辐射》<sup>[1]</sup> 的论文. 从那以后, 物理学家们花了近 20 年的时间研究这种贯穿辐射

究竟是什么，确认了是高能带电粒子，并称其为宇宙射线(cosmic ray)。

宇宙射线(简称宇宙线)一经发现，就反映出其作为交叉学科的特性。从1912年至今的100年中，宇宙线物理研究创造了其历史的辉煌。现已知道宇宙线的主要成分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，其能量分布的跨度达十多个数量级( $10^5$ — $10^{21}$ eV)。研究宇宙线本身，包括它的化学成分、起源、加速和传播特性，在这一百年中自始至终都是重要课题。

在缺少人工制造的粒子加速器的年代，宇宙线为粒子物理与核物理研究提供了唯一的高能粒子源，是研究高能微观粒子与物质相互作用规律的唯一工具。1930年，我国留学美国的学者赵忠尧先生在研究硬伽玛射线在不同物质内的散射效应(即康普顿散射)时，发现在重原子核中存在一种反常的吸收和特殊的辐射，这种特殊的辐射能量为 $0.5\text{MeV}^{[2, 3]}$ ，这一实验促使他的同学卡尔·戴维·安德森(C. D. Anderson)在他们共同的导师密立根(R. A. Millikan)的建议下改进了自己用于研究X射线光电效应的云室，重新研制有强磁场的云室，于1932年拍摄到了比放射源能量高一个量级的宇宙线粒子的径迹，发现了正电子<sup>[4, 5]</sup>。为此，赫斯和安德森获得了1936年度的诺贝尔物理学奖。这一成果使人类对物质结构的认识拓宽到除了质子和电子以外的其他基本粒子，证实了反物质的存在。从那以后，借助于云室建造技术和测量方法的不断改进，以及核乳胶等径迹探测器的应用，1936年安德森发现了 $\mu$ 子，1946年发现了奇异粒子，1947年鲍威尔(C. Powell)用核乳胶发现了 $\pi$ 介子，1949年中国物理学家张文裕先生发现“ $\mu$ 原子”等等。直到1952年，在宇宙线实验中已发现了一批新粒子。那一时期，许多知名科学家如布莱克特(P. Blackett)、鲍威尔等因在宇宙线研究领域的重大发现或重大技术改进而获得诺贝尔物理学奖，而许多诺贝尔物理学奖的得主如威耳逊(C. Wilson)、密立根、康普顿(A. Compton)、波特(W. Bothe)等，以及一批知名物理学家如罗西(B. Rossi)、惠勒(J. Wheeler)等都在宇宙线研究中做出过重要贡献。近年来，世界最高能量的强子对撞机LHC已经可以把质子和质子对撞的质心系

能量提高到 $1.4\times 10^{13}\text{eV}$ ，近日已观测到可能解释为Higgs粒子的事例，宇宙线研究更多地转向高能天体物理。然而在加速器达不到的超高能和极高能区，用宇宙线研究超高能相互作用仍有着不可或缺的地位。

上世纪60年代人造卫星上天以后，高能天文学诞生。对宇宙线研究而言，它意味着可以在外太空直接测量初级宇宙线的成分，更为重要的是，借助于高能X射线、伽玛射线或中微子天文观测，人们终于可以摆脱因星际磁场对宇宙线带电粒子的偏转而无法直接探测到宇宙线源的困扰。宇宙线起源的问题与高能天体物理、宇宙学相互之间渗透和交叉更加紧密。对宇宙线的定义也从经典的带电粒子逐渐扩展到整个高能电磁波段。同时，深空探测技术的发展，又为人类开启了另一扇大门，那就是离我们最近的太阳的高能粒子发射现象和在日地空间传播效应的研究，宇宙线物理形成了三大主流研究方向——起源(OG)、高能相互作用(HE)和太阳高能现象(SH)。

本文重点介绍的是，在上述大背景下，我国宇宙线事业的发展历程，新中国早期的宇宙线研究，以及60年中的部分研究成果。

## 2 新中国的宇宙线研究六十年

我国的宇宙线研究几乎与新中国同龄，1949年10月1日开国大典后的第二个月，中国科学院即在北京成立。半年以后，1950年5月19日在北京成立了中国科学院近代物理研究所，吴有训兼任所长。1951年开始，即在该所内建立了宇宙线组，由王淦昌、肖健负责。1953年10月，近代物理研究所改名为物理研究所，钱三强曾任所长，研究所设有高能研究室，包括宇宙线组和加速器物理实验组，王淦昌、张文裕先后任室主任。1958年研究所又更名为原子能研究所，由第二机械工业部(以下简称二机部)和中国科学院双重领导，以二机部为主。1972年，因周总理的批示“这件事不能再延迟了”，指的是要发展高能物理，建造高能粒子加速器，1973年2月1日，原子能研究所一部易名，成立中国科学院高能物理研究所，张文裕为第一任所

长，宇宙线室随之成立，以后发展为粒子天体物理中心。这一段时间的机构调整，说明当时国家在考虑如何布局和发展我国的原子能事业和高能物理事业。从那以后的40年中，我国的宇宙线研究队伍扩大到国内多家高等院校和研究所，其中高能物理研究所始终扮演着排头兵的角色。

建国初期，我国的宇宙线研究队伍虽小，但力量很强，赵忠尧、王淦昌和张文裕先生都是在新中国成立前就已经在核物理、粒子物理或宇宙线领域做出过有重大国际影响的成果，并与国际知名物理学家有过合作或交流的学者。他们三位都领导过我国早期的宇宙线研究。



图1 赵忠尧

赵忠尧先生(见图1)，1902年出生，1927年夏赴美国加州理工学院留学，师从1923年诺贝尔物理奖得主、校长密立根(R. A. Millikan)教授。他是国际上第一个观测到正电子的产生和正负电子湮灭现象的人，他在这段时间的工作曾得到卢瑟福(E. Rutherford)的高度评价<sup>[6]</sup>。1945年，赵先生再次赴美，用多板云室研究宇宙线高能簇射，得到出色的结果<sup>[7]</sup>。



图2 王淦昌

王淦昌先生(见图2)，1907年出生，1933年在德国柏林大学获博士学位，导师迈特纳(L. Meitner)，1941年，王淦昌在国内生病期间，系统分析研究了当时已经用过的各种探测中微子的方法，1942年1月，他的论文《关于探测中微子的一个建议》<sup>[8]</sup>在美国《物理评论快讯》(Physical Review Letters)上发表。美国的物理学家詹姆斯·阿伦(J. S. Allen)采纳了他的建议后于同年6月在《物理评论》(Physical Review)上发表了题目为《一个中微子存在的实验证据》的文章<sup>[9]</sup>，“王淦昌—阿伦实验”是世界上第一个比较确切地验证中微子存在的著名实验。

张文裕先生(见图3)，1910年出生，1935—

1938年在英国剑桥大学卡文迪什实验室获得博士学位，导师是该实验室主任、诺贝尔物理奖得主卢瑟福(E. Rutherford)。张先生于1944—1949年再次赴美，在美国普林斯顿大学巴尔摩(Palmer)实验室访问工作，发现在一定条件下带负电的 $\mu$ 子会被原子核俘获并释放一个轨道电子，从而形成 $\mu$ 介原子。1949年1月，他在美国《现代物理评论》(Rev. Mod. Phys.)上发表论文<sup>[10]</sup>，受到实验室主任惠勒(J. A. Wheeler)同期文章<sup>[11]</sup>的引用，在J. Hiffner等人的专著《 $\mu$ 子物理》<sup>[12]</sup>一书中被称作“张辐射”、“张原子”。

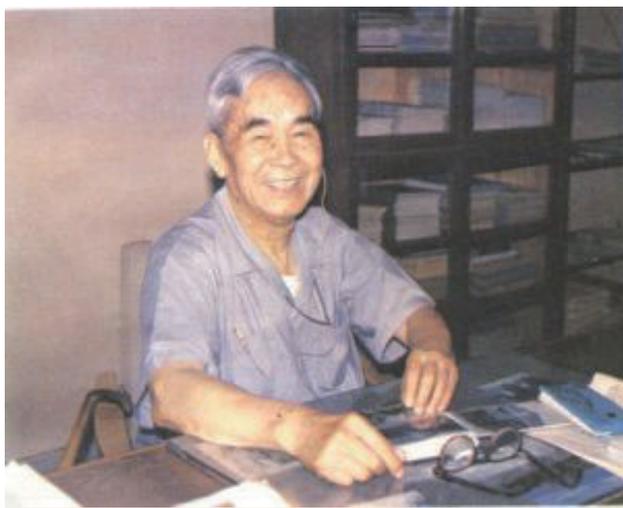


图3 张文裕

这三位先生有一个共同特点，就是学风严谨，重视实验，而且亲自动手做实验装置。他们都有一颗强烈的敬业爱国之心，赵先生于1945年第二次出国是由当时的中央研究院派出，除了做研究工作外，为以后国内的研究做了许多技术准备，新中国成立后，赵先生毅然于1950年底辗转回国；张先生因在国内无法开展工作于1943年二次赴美，建国初期由于受到美国麦卡锡主义的迫害，经过了五年时间的努力，于1956年从美国绕道欧洲才得以回到祖国；王先生则是1934年留学回国，1945年后到美国做宇宙线研究，还和赵先生共同制造一台50cm多板云室带回国内。三位先生是中国科学院最早期的院士，是新中国核科学和高能物理事业的奠基人和开拓者。

还应当提到的一位是肖健先生(见图4)，1920年出生，1944年毕业于西南联合大学物理系，

还应当提到的一位是肖健先生(见图4)，1920



图4 肖健

1947年留学美国加州理工学院，成为安德森的研究员。新中国成立，肖健因急于回国放弃了继续攻读博士学位的机会，于1950年获硕士学位后即刻回国。在我国早期的宇宙线研究中，肖健成为几位前辈的主要助手，他“只管耕耘，不管收获”，在较长的时间是宇宙

线研究的学术领导，“文革”期间曾遭受迫害，后转向粒子物理，1980年成为中国科学院院士。

由于这几位前辈的学问和人格魅力，我国的宇宙线和粒子物理研究结合非常紧密，不分彼此，几十年来宇宙线为加速器和粒子物理培养和输送了不少人才，著名“两弹一星”专家吕敏就经历过宇宙线的早期研究工作的锻炼。由于另有重任，几位前辈在宇宙线方面工作的时间长短不一，相对都比较短暂，我们大家都为有他们作为我国宇宙线事业的第一代学科带头人而自豪。

我国的宇宙线研究大体可以分为三个阶段，从建国初期到1973年左右，大体可看成宇宙线研究的第一阶段，在前辈们的带领下，侧重于以云雾室为主要探测工具的高能宇宙线相互作用的研究和奇异粒子的寻找。1954年在云南落雪山海拔3180m处建立了中国第一个高山宇宙线实验室，安装了赵忠尧、王淦昌从美国带回的50cm多板云室，建造了30cm磁云室。用这两个小云室探测到700多个奇异粒子(主要是 $\Lambda^0$ 超子和 $K^0_s(0^0)$ 介子)事例，并对它们进行了全面分析，还研究了宇宙线粒子电磁簇射现象和高能电子直接产生电子对的截面等，发表了一批好文章，例如文献[13—22]。1958年，在大跃进形势下，在张文裕、肖健、力一领导下，在原落雪山实验室附近9km处海拔3220m海子头山顶上建设了新的高山宇宙线站，实验设备由三个大型云室组成，上层为靶室，中层为磁云室，下层为多板室，对单电荷粒子的最大可测动量为100 GeV/c，电离测量误差为10%，设备的总重近300吨，在当时是世界同类装置规模最大、水平最先进的仪器之一。在当时的经济条件下，能建设这样一套大云室系统，

已经是很大的投入了。最初，大云室的物理目标放在超过当时加速器能量(几十GeV)的高能物理研究上。因为经历三年困难时期，大云室的建造花了7年时间，到1965年建成，后又因“文化大革命”，岁月蹉跎，研究工作受到影响，到60年代末，国际上加速器的能量已提高到与大云室相同的量级，原定的高能物理的研究方向已不具优势。于是，研究组根据当时粒子物理前沿的热点课题，突出了寻找夸克(我国粒子物理理论家曾称为层子)的研究。夸克(quark)可能具有1/3或2/3分数电子电荷，大磁云室能够可靠地鉴定分数电荷粒子，但是实验中没有找到分数电荷粒子(以后的研究表明，夸克是存在的，但是被囚禁在强子内，所以找不到)，却在1972年获得了一个可能的重质量粒子事例。后来研究组又较系统地测量了3220m高度的 $\mu$ 子强度和能谱，测量了 $\pi^-$ 介子、质子、反质子等的流强以及它们之间的比值，其中反质子流强是当时国际上的首次实验结果。此外，还有高山宇宙线高能粒子形态学的测量，对研究宇宙线在大气层中的传播和超高能核作用模型的检验也具有重要意义。

大云室的建造和一个重质量荷电粒子事例，获1978年全国科学大会重大成果奖。由于以上提到的十多年的研究成果，以肖健、霍安祥为首的研究团队荣获1987年全国自然科学三等奖。

第二阶段是1976年“四人帮”打倒以后，1977年全国自然科学学科规划会议在北京召开，当时肖健和几位前辈都已离开，何泽慧院士作为副所长分管宇宙线研究，由宇宙线研究室主任霍安祥负责，与主要骨干李惕碛、丁林垵等一起制定了宇宙线的发展规划。霍安祥总结了以往的经验，提出了“立足常规、着眼新奇”的发展思路，很得何泽慧先生的赞赏。一批新中国成长起来的中青年科研骨干，走出国门、调研学习，开始了多种探测方法、多个研究方向的探索，寻找赶超国际先进水平的突破口。开展的项目包括：甘巴拉山高山乳胶室实验；怀柔和羊八井广延空气簇射(EAS)阵列技术和实验；大气切连科夫光探测和甚高能伽玛射线天文观测技术(兴隆观测站)和实验；平流层科学气球技术和空间X射线天文观测技术和观测；高能宇宙线引起的水声的探测；用固体径迹探测器对宇宙线重

核成分进行测量等等。这些项目大部分由国内多个单位合作进行。经过一段时间的努力，研究的重点逐渐明朗。

第三个阶段大约是从上世纪90年代算起，研究课题集中到中日合作AS $\gamma$ 和中意合作YBJ-ARGO高山宇宙线实验，中意合作地下暗物质探测(DAMA)实验，若干卫星载空间天文项目(包括载人航空间天文项目、AMS国际合作项目、空间X射线调制望远镜项目(高能物理研究所)、空间宇宙线高能电子测量和暗物质探测(紫金山天文台，中国科学技术大学，高能物理研究所)，等等)。中意合作在宇宙线中寻找冷暗物质粒子候选者WIMP的DAMA实验持续了20年，观察到了可被解释为暗物质粒子的年调制效应。此外，根据理论家将云南事例解释为最小超对称理论预言的稳定粒子，我们开展了利用加速器实验装置L3大型磁谱仪在宇宙线中寻找这种粒子的研究，以及其他常规的宇宙线课题的研究，在这些被称为非加速器粒子物理研究中，我们做出了很好的成果。我国的宇宙线研究开始进入了迈向国际前沿的新阶段。

### 3 新中国宇宙线研究成果举例

#### 3.1 大云室的建造和一个可能的重质量粒子事例

云雾室(简称云室)是最早的带电粒子径迹探测器，其基本原理是，带电粒子在穿过有饱和蒸汽的容器时，会使气体电离并形成凝结核，从而沿着粒子的路径会因过饱和而形成凝结水珠，从而形成粒子径迹，通过拍照便可用于分析。如果在云室外加上磁场，便会测到粒子偏转的径迹，从而测量粒子的动量和水珠的凝结状况，就可以反映出粒子的运动速度。在云室中放上不同物质的板做“靶”，可以研究粒子与物质相互作用的特性，拍下的照片可以把粒子的相互作用过程展现得清清楚楚。在宇宙线的早期研究中，云雾室曾一度是最好的几乎是唯一的工具。云室的局限是其尺寸和可加磁场的大小有限，随着可建造的加速器的能量逐步提高，云室的作用就慢慢“退居二线”了。威耳逊1896年发明了云雾室，于1927年获得了诺贝尔物理学奖。

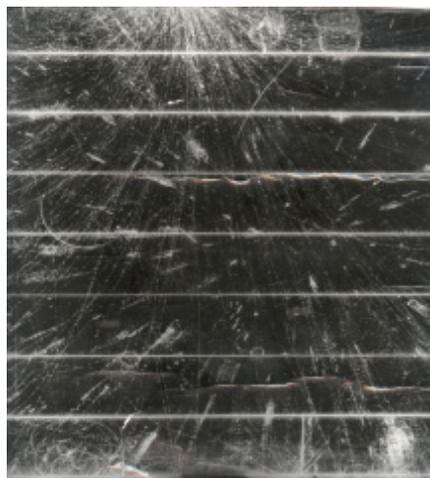


图5 云南站大云室组中层磁云室测到的一个电磁级联簇射事例

图5是云南站大云室组中层磁云室拍到的一个大电磁簇射，中心区大于1GeV的电子有30多个，按原子量近似估计，这个簇射的总能量在0.5 TeV以上。

1972年测到的一个可能的重粒子事例(又称云南事例)<sup>[23]</sup>，照片可见图6和图7。其中图6(a)是云室的正中全景相机拍摄的照片，图7是左侧水珠相机(只照云室中心区域)拍摄的照片，两个相机的放大倍数不同。

事例包括3个粒子的径迹，互相分得很开，图6(b)为示意图，从左到右分别标为a, b, c，分别表示粒子a, b, c的径迹。从图7可以看出，粒子a, b的电离程度相近，粒子c的径迹与粒子a, b相比要淡得多，表明其速度较低。粒子b, c的径迹很直，在磁场中偏转小，表明它们动量很大。c粒子速度低而动量很大，表明它质量很大。分析结果表明，c粒子质量下限为12GeV。考虑实验误差，c粒子质量小于1GeV(即它是质子)的可能性为千分之二。它

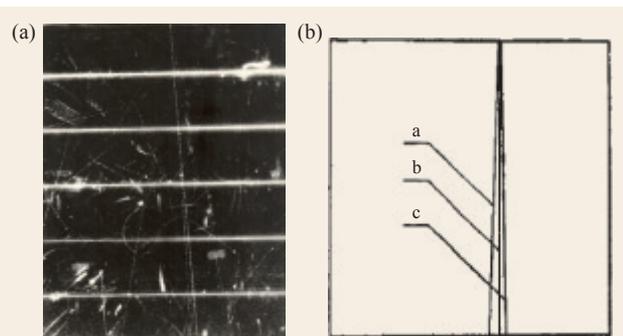


图6 (a)云南事例(16580号)正面全景照片；(b)16580号事例素描



图7 云南事例(16580号)左侧水珠照片

穿过整个云室没有衰变，可能是稳定粒子，或寿命大于 $5 \times 10^{-9}$ s。

### 3.2 甘巴拉山高山乳胶室

1973—1976年，任敬儒等采用特殊的X光胶片处理方法，从国产的各种X光胶片中选择了适合高山乳胶室使用的胶片，首先在云南3220m高山上设置了规模较小的乳胶室，经过曝光处理和测量后，为西藏大型乳胶室建设打下了基础。1977年，中国科学院高能物理研究所在西藏海拔5500m甘巴拉山建立了世界上最高的高山乳胶室，先后有山东大学、云南大学、重庆建筑工程学院和郑州大学参加了合作。1980年，开始了中国与日本东京大学宇宙线研究所等7个单位的合作，参加人数达到76人（中方60人，日方16人）。以后又在珠穆朗玛峰脚下北坳地区（6500m，1978年）、羊八井站（4300m，1990年）两处建立了高山乳胶室，获得了4个不同高度的超高能核作用的数据。十年内，共建铅乳胶室138吨，铁乳胶室300吨，总曝光量为1000平方米·年。中方主要负责人为任敬儒、霍安祥、况浩怀、王承瑞等。利用高山乳胶室开展了 $10^{15}$ — $10^{17}$ eV超高能核作用的实验研究。主要研究成果有，得出了 $10^{15}$ eV以上能区非弹性截面随能量 $E^{0.06}$ 的规律上

升，平均横动量缓慢上升，并有横动量多喷注现象发生。近年来，在研究超高能作用中还获得了一些稀有事例，包括高多重数同心环状事例、远距离双心事例、多个大横动量事例等。所有这些现象，为研究超高能作用特性及可能存在的相变过程提供了重要的实验事实。利用乳胶室得到的大量实验结果还对超高能核作用现有的一些理论模型进行了检验，并对超高能宇宙线初级成分进行了探讨。从1973—2000年在《高能物理与核物理》、《山东大学学报》、*Physical Review*等杂志上共发表论文84篇，“大面积高山(5500m)乳胶室建造和超高能核作用的研究”项目，先后获得1986年中国科学院科技进步一等奖、1987年国家自然科学三等奖等多个奖项。

乳胶室的局限是粒子的初能定不准，甘巴拉山乳胶室实验的后期，外围添加一个空气簇射阵列（以决定每个事例的初能）的重要性日显突出，但甘巴拉山的地势不宜于布置阵列。上世纪90年代，乳胶室移到羊八井，与那里的大气簇射阵列联合运行。1999年，丁林培提出建立电子学的电磁簇射探测器以探测大气簇射轴心区高能粒子的建议，实际上，该建议的实施可作为乳胶室实验的继续和发展。2007—2011年，黄晶在羊八井先后建立了由16台和124台簇射探测器组成的大气簇射轴心探测器，并已取得可喜的成果。

### 3.3 高空科学气球和球载X射线天文观测

1977年，中国科学院高能物理研究所李惕碛（1997年中国科学院院士）、顾逸东（2005年中国科学院院士）等倡议发展平流层高空气球和球载高能天文观测，以顾逸东为首成立了高空气球组，并随之进行了大型零压式高空气球的研制工作。1979年，开始在中国科学院有关局的组织领导下，在高能物理研究所、大气物理研究所、空间科学中心、上海天文台、广州电子技术研究所等单位合作下，于1985年建成了“万立方米级高空气球技术系统”，并通过了国家鉴定，顾逸东等获得国家科技进步奖二等奖。一期工程的完成使我国成为国际上少数几个能独立研制和发放高空科学气球的国之

一. 至今,我国成功发放气球的 $\text{最大体积已达 } 40 \text{ 万立方米}$ 、 $\text{最大负载约为 } 1500 \text{ 公斤}$ 、 $\text{最高升限为 } 42 \text{ 公里}$ 、 $\text{最长飞行时间为 } 18 \text{ 小时}$ . 利用高空科学气球广泛开展了宇宙线、空间物理、大气物理、遥感技术等学科的观测和研究. 2003年,姜鲁华等“40万立方米高空气球”研究项目,获北京市科学技术奖二等奖. 目前已具备生产、发放60万立方米气球的能力.

在利用高空气球的宇宙线和高能天文观测方面,1980年,任国孝等用固体径迹探测器测得高空宇宙线元素分布,并进行了高能核-核反应的研究. 1984年5月,高能物理研究所的研究小组用HAPI-1探测器在33公里高空对蟹状星云跟踪观测两小时,成功地得到了蟹状星云脉冲星硬X射线辐射周期和清晰的脉冲相位分布,这是我国第一次对宇宙活动天体高能发射的成功观测,1986年“空间硬X射线望远镜和蟹状星云脉冲星观测”研究项目获中国科学院科技进步奖二等奖(李惕碚等). 1985年9月,用HAPI-2探测器在我国10万立方米气球上飞行8小时,对天鹅座X-1和天鹅座X-3进行了成功的观测,获得了天鹅座X-1高能X射线能量谱. 这个实测结果为致密天体表面辐射机制的研究提供了很有价值的 $\text{数据}$ ,引起各国高能天体物理学工作者的关注.

### 3.4 载人航天空间天文项目

1992年,随着国家发展载人航天技术及其空间应用,我国的宇宙线物理工作者获得了在数百公里的高度上进行宇宙线和高能天文观测的机会. 观测时又遇到了正值太阳活动峰年的2001年,获得了可喜的成果.

以探测和研究宇宙 $\gamma$ 射线暴和太阳耀斑等高能辐射的宽波段能谱特征和快速时变现象为主要科学目标,中国科学院高能物理研究所和紫金山天文台合作提出并自主研制了“太阳和宇宙天体高能辐射监测仪”,并使其成为我国载人航天空间科学和应用系统中的空间天文项目. 监测仪由超软X射线、X射线和 $\gamma$ 射线等3个核探测器组成,在功能上各自独立而又互相关联,互相补充. 2001

年1月10日随神舟二号飞船发射升空,飞行高度350公里,至6月26日飞船完成其使命,探测器在轨工作期间性能稳定,取得了包括30多例 $\gamma$ 射线暴、100多例太阳耀斑、3个最强的太阳耀斑和地面高能粒子涨高(GLE)事例、太阳活动峰年期地磁粒子沉降事件在内的一大批重要观测结果,反映出优秀的 $\text{数据质量}$ 和较高的观测灵敏度,所获成果超出预期,实现了我国首次对宇宙伽玛暴等高能爆发现象的空间实测研究. 探测器的设计思想、研制技术和观测数据已推广或应用到国内空间天文学、空间物理学、太阳物理学和对月探测等相关领域.

研究项目曾获多个奖项,例如“神舟二号宽波段空间伽玛射线暴观测研究及仪器研制”获2004年度国家科技进步二等奖(马宇菁、张南、王焕玉等).

### 3.5 利用加速器实验装置的宇宙线研究

利用丁肇中教授领导的国际合作组在欧洲核子中心建成的世界最大的磁谱仪L3,研究原初宇宙线在大气中产生的 $\mu$ 子的能谱和电荷比,寻找宇宙线中的重质量粒子和奇异粒子,这是首次由中国的宇宙线学者和国内外粒子物理专家合作,利用加速器终端的仪器测量宇宙线粒子的一个国际合作项目,由中国、瑞士苏黎世高等工程学院、德国DESY、荷兰、西班牙、印度等多个国家和小组的研究人员参加,中方在何祚庥、庆承瑞、陈和生等的努力下,得到中国科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院联合支持. 项目命名为L3宇宙线(L3+Cosmics,简称L3+C). 从1998年开始,中国组在国内研制了 $154\text{m}^2$ 的塑料闪烁探测器(占研制总面积的76%),安装在L3磁谱仪的顶部和侧面,作为宇宙线粒子的选择和触发的探测器,并参与研制了独立于L3系统的触发电路和数据采集装置. 这是当时中国参与的所有国际合作项目中经费和人力投入比例最大的一个实验. 图8为中国组成员正在磁谱仪顶部安装闪烁探测器,图9为三面装有宇宙线触发探测器的L3磁谱仪. 该项目获得了多项成果:合作组形成了14项研究课题,于1999—2000年获取120亿个事例的数

据, 数据总量 14TB. 中国组成员坚持了长达六年以上的数据处理工作, 其中包括: 在搜寻宇宙线中的重质量粒子的工作中获得的流强上限值接近各类稳定新粒子的搜索水平; 做了宇宙线日影分析、月影和反质子流量分析(引用 31 篇); 研究了 2000 年 7 月 4 日特大太阳耀斑与高能宇宙线的关联, 以及高能  $\mu$  子暴源的发现等高能天文学课题; 研究成果写成了文章在有关刊物上发表, 离现在最近的一篇文章“Observation of a VHE cosmic-ray flare-signal with the L3+C muon spectrometer”发表在 2010 年.

合作组的一项重要成果是, 首次获得 20—3000 GeV 能区的高精度大气  $\mu$  子动量谱及其在  $60^\circ$  天顶角以内的角分布<sup>[24, 25]</sup>, 以及正负  $\mu$  子强度比<sup>[24]</sup>, 自 2006 年开始, 这些结果被录入《粒子物理 PDG 数据库》(见其中的图 24.4 和 24.5), 至目前为止, 查 HEP inspires 检索系统表明, 发表这些结果的文章被引用达 120 篇. 这项工作为检验宇宙线大气级联的各类作用模型、准确推断大气中微子谱提供了重要依据. 特别值得一提的是, 为国际知名的超级神冈(Super-K)中微子实验做中微子计算的两个小组(即汤姆·盖塞(T.Gaisser)小组和日本的以鸿达教授(M. Honda)为首的 HKKM 小组), 在 L3+C 结果发表以前, 这两组的结果曾有比较大的区别. L3+C 的测量结果发表以后, HKKM 发现计算结果差异较大, 因此改进了相互作用模型, 增加了高能  $\mu$  子产生率, 获得的计算结果与 L3+C 实验符合, 从而两个小组的计算基本一致<sup>[26, 27]</sup>, 为 Super-K 的大气中微子测量及中微子震荡研究做出了贡献. 图 10 综合了 L3+C 等实验数据和两个小组的理论拟合结果<sup>[28]</sup>.

L3+C 实验在国际上已成为用加速器设备从事宇宙线研究的一个范例, 近期欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC), 其重要端口的实验装置,



图8 1998年, 中国组成员正在安装用于宇宙线粒子触发的闪烁探测器

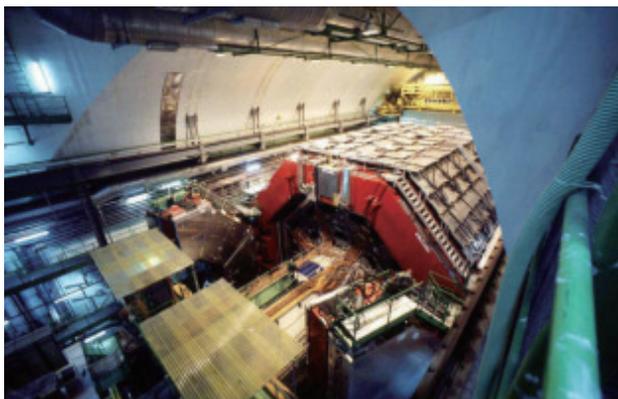


图9 L3+C 谱仪(L3 高11m, 长12m, 顶部和两侧面铺设了202m<sup>2</sup> 闪烁探测器作为宇宙线粒子的触发系统, 触发效率达到98%)

都设有朝前区物理装置, 以测量超高能区相互作用截面, 检验宇宙线相互作用模型(如 LHCf, ALICE 等).

被列入粒子物理数据表的, 还有 AMS 合作组测量的初级宇宙线能谱<sup>[29]</sup>(见《粒子物理 PDG 数据

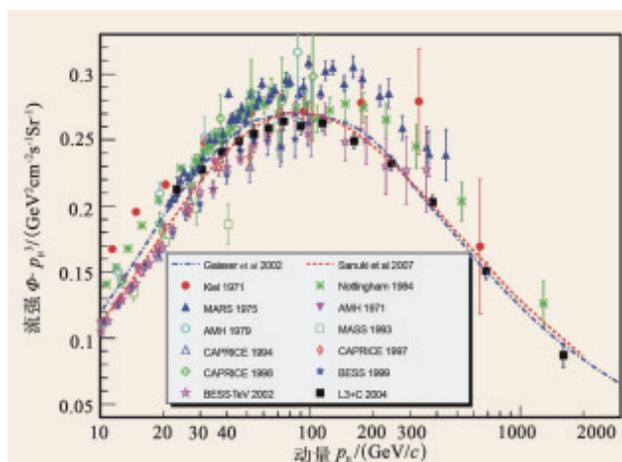


图10 L3+C 测量的大气  $\mu$  子能谱与其他实验结果比较以及两个理论模拟的结果<sup>[24]</sup>

库》中图 24.1)和羊八井测量的全粒子谱(见《粒子物理 PDG 数据库》中的图 24.9, Tibet 07)

### 3.6 宇宙线研究中的数据处理和方法

丁林垵、朱清棋等配合高能宇宙线实验建立和完善了一个研究超高能宇宙线通过大气发生复杂相互作用的软件系统,包括强子作用的几种类型(强子—核作用、核—核作用、衍射和非衍射过程、弱和硬散射、电磁级联、粒子衰变)以及数据分析程序和一系列应用程序.它一开始是为了对高山乳胶室的观察结果进行物理解释,后来发展到可应用于解释高能 $\mu$ 子和大气簇射的情况.应用这一软件系统对高山乳胶室簇现象(包括簇的强度和衰减、横向分布、关联、多团结构现象)进行了系统的分析和解释.还给出了超高能宇宙线初级混合成分的比例.对高山乳胶室的二团事例,充分考虑了重核效应、部分子的 QCD 大横动量效应甚至次夸克的效应,尚不能完全解释实验,预示着可能存在更大的横动量产生过程.对高山乳胶室的环状事例,通过研究和模拟,得到了类似特征的事例,表明这一事件可能是相变存在的证据.这一系列工作获得了 1988 年中国科学院科技进步奖二等奖.

1983 年,由李惕碛、马宇菡合作发表在美国天体物理杂志的题目为《 $\gamma$ 射线天文结果的分析方

法》的文章,提出了向源—背景观测模式下检验一个观测正结果的显著性分析的方法<sup>[30]</sup>,在国际上有“李马准则(prescription)”,“Li—Ma sigma”之称,在实验数据处理过程中成为判断在背景上的微弱超出是否为源信号,是否可宣布一项新发现的重要统计判据,尤其在宇宙线研究观测、特别是甚高能伽玛射线天文观测领域中有广泛引用.早年得到的负结果多,文章也多发表在国际宇宙线会议等会议文集中,近年来甚高能伽玛射线天文领域在观测上有重大突破,有许多重要成果相继发表,同时美国 ADS 数据库也把一些重要国际会议和预印本逐步列入统计,引用逐年增加.截止到 2012 年 10 月 10 日,美国 ADS 统计的引用 451 篇,其中正式发表的文章 339 篇,各年度引用情况见图 11.

### 3.7 宇宙线各向异性测量

关于羊八井的空气簇射阵列实验,中日合作 AS $\gamma$ 项目和中意合作 YBJ-ARGO 项目的情况,已另有专文介绍.本文仅介绍其中一个代表性的物理成果——关于宇宙线的各向异性度测量.

羊八井中日 AS $\gamma$ 合作组中的胡洪波、张毅等分析了 1997 年 2 月至 2005 年 11 月近 9 年时间在西藏羊八井稳定运行获得的 400 亿个观测事例,做出了宇宙线强度在天球坐标系上北半球的相对强度分

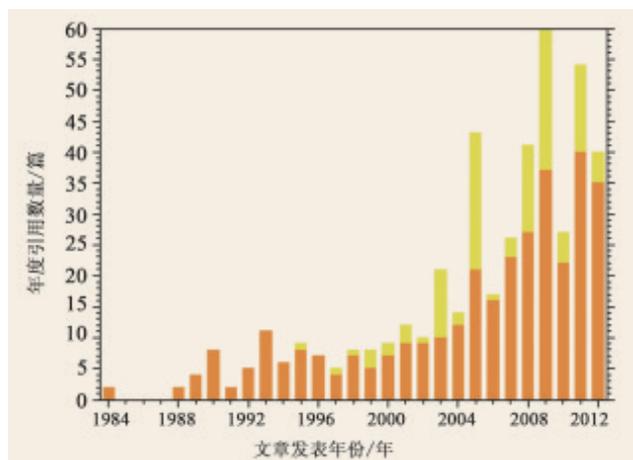


图 11 美国 ADS 数据库统计的李—马文章按年度引用数量(总引用数为 451 篇,其中桔红色为 SCI 文章的年度引用数量 339 篇,黄色为同年尚未正式发表的文章数量,截止到 2012 年 10 月)

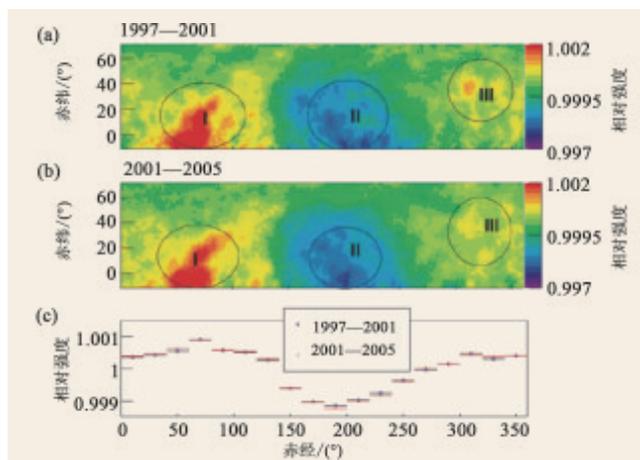


图 12 羊八井 AS $\gamma$ 阵列观测的宇宙线强度在赤经(RA)—赤纬(Dec)坐标系上的各向异性分布,图(a)和图(b)反映两个不同时段,颜色代表相对强度值,(c)为赤纬的值向赤经方向上的投影

布, 获得了在千分之五高精度跨度上的宇宙线强度的各向异性分布. 图 12 给出了分两个时段的分布图, 其中图 12(a) 是 1997 年 2 月至 2001 年 10 月的分布图, 覆盖了第 23 次太阳活动峰年太阳磁场最强的时期; 图 12(b) 是 2001 年 12 月至 2005 年 11 月的分布图, 这是太阳磁场活动变弱的 4 年; 两个分布图上区域 I 和 II 与以前其他小组已发表的工作基本一致, 只是结构更为精细, 而 III 区(中心用十字架标出)揭示了围绕天鹅座环区(Cygnus region)一个新的宇宙线增强区的存在, 中心位置在(赤纬  $38^\circ$  和赤经  $309^\circ$  处,  $5^\circ$  范围, 用李一马公式计算显著性获得 13.3 倍标准偏差. 图 12(c) 是前两个结果向赤经(恒星时)方向上的投影, 两个结果几乎一致, 说明宇宙线的各向异性随恒星时是完全稳定的, 不随太阳活动变化. 研究表明, 宇宙线等离子体与星际间气体物质和恒星共同围绕银河系中心旋转. 研究结果还表明, 宇宙线的各向异性在能量高到  $50\text{TeV}$  时大大减弱, 而到  $300\text{TeV}$  时完全消失. 这些结果发表在 2006 年美国的 *Science* 杂志上<sup>[31]</sup>, 并在同期刊登评论文章<sup>[32]</sup>.

文章的发表引起了国际同行的关注, 引文已达 137 篇, 宇宙线各向异性研究成为能做该实验的各个实验组研究的热点课题之一, 而且做得越来越细, 包括不同方向、不同尺度、不同能量等等. 因为它涉及到仍然未知的宇宙线起源的问题, 被认为是最近几十年来最重要的宇宙线实验观测结果之一.

**致谢** 本文在写作过程中得到丁林垞、姚志国、贾淑梅、胡洪波、姜鲁华、陆穗林等多位同仁的帮助, 在此表示感谢. 由于文章篇幅有限, 许多研究成果不能一一列出, 在选材上亦未免会有疏漏, 在此致歉.

## 订阅《物理》得好礼 ——超值回馈《岁月留痕》

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价 180 元/年).

咨询电话: (010)82649266; 82649277; Email: physics@iphy.ac.cn

## 参考文献

- [1] Hess V F. Phys. Zeit., 1912, 13:1084
- [2] Chao C Y. PNAS, 1930, 16:431
- [3] Chao C Y. Phys.Rev., 1930, 36:1519
- [4] Anderson C D. Phys. Rev., 1933, 43:491
- [5] Anderson C D, Anderson H L. The Birth of Particle Physics. eds. Brown L, Hadsson L. Cambridge University published, 1983. 131
- [6] Chao C Y, Kung T T. Nature, 1933, 11(4): 709
- [7] Chao C Y. Phys. Rev., 1949, 75:581
- [8] Wang K C. Phys. Rev. Lett., 1942, 61:97
- [9] Allen J S. Phys.Rev., 1942, 61:692
- [10] Chang W Y. Rev. Mod. Phys., 1949, 21:166
- [11] Wheeler J A. Rev. Mod. Phys., 1949, 21:133
- [12] Hiifner J, Scheck F, Wu C S. Muon Physics. eds. By Hughes V W, Wu C S. Academic Press, 1977. 7, 202
- [13] Xiao J. Phys. Rev., 1950, 78:290
- [14] 王淦昌, 郑仁圻, 吕敏. 物理学报, 1955, 11:421
- [15] 王淦昌, 萧健, 郑仁圻等. 物理学报, 1955, 11:493
- [16] 郑仁圻, 吕敏, 萧健等. 物理学报, 1956, 12:376
- [17] 王淦昌, 吕敏, 郑仁圻. 科学记录, 1957, 1:21
- [18] 吕敏, 郑仁圻, 李鹤年. 物理学报, 1958, 15:230
- [19] 霍安祥. 物理学报, 1958, 15:219
- [20] 吕敏. 科学记录, 1959, 3:58
- [21] 张文裕. 物理学报, 1961, 17:271
- [22] 王世伟, 况浩怀, 袁余奎. 物理学报, 1963, 19:205
- [23] 原子能研究所云南站. 物理, 1972, 1:57
- [24] L3+C Collaboration (Archard P *et al.*). Phys. Lett., 2004, B598:15
- [25] Unger M *et al.* (L3 Collab.). Inter. J. Mod. Phys., 2005, A20:6928
- [26] Sanuki T, Honda M *et al.* Phys. Rev. D, 2007, 75:043005
- [27] Gaisser T K. AP&P, 2002, 16:285; Physica Scripta T, 2005, 121:51
- [28] Yao Z. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 2008, 175—176:294
- [29] AMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2000, 490:27; Phys. Lett. B, 2000, 494:193
- [30] Li T P, Ma Y Q. Astrophys. J., 1983, 272:17
- [31] Amenomori M *et al.* Science, 2006, 314:439
- [32] Duldig M. Science, 2006, 314:429

## 读者和编者

2012 年《物理》创刊 40 周年, 为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅两年(2013—2014 年)《物理》杂志的订户, 将免费获得《岁月留痕——<物理>40 年集萃》一本(该书收录了从 1972 年到 2012 年在《物理》各栏目发表的四十篇文章, 476 页精美印刷, 定价 68 元, 值得收藏).