

# 利用宇宙线研究微观和宇观世界

霍 安 祥

(高能物理研究所)

自从宇宙线发现 70 多年来,它为人类认识微观和宇观世界作出了重大贡献。在高能加速器问世以前,利用宇宙线作为唯一的高能粒子源在微观世界的研究方面曾有过一系列重大发现,如正电子、 $\mu$  子、 $\pi$  介子、K 介子、超子、电磁级联过程、核级联过程、广延大气级联现象等,从而开辟了粒子物理这门重要的前沿学科。直至现在,宇宙线研究仍然起着尖兵探路的作用。另一方面,从宇宙线发现之日起,这项研究一直推动着天体物理和地球物理的发展。例如,宇宙线地球纬度效应和东西方向效应,表明了地球磁场的影响;宇宙线强度的周期变化与太阳自转周期、太阳 11 年活动周期变化有直接关联。近年来,X 射线、 $\gamma$  射线暴、 $\gamma$  射线源的发现及甚高能和超高能  $\gamma$  射线源的成功观测,均丰富了人类对宇宙中天体演化现象的了解和认识。宇宙线带电粒子给人们带来了太阳系以外的物质样品,而对不同能区初级宇宙线带电粒子的成份(包括同位素)的观测,对于了解星体演化、物质的合成、宇宙线在宇宙空间的传播均有重要意义。

到目前为止,宇宙线的最基本特征可以归纳如下:(1) 测量到的宇宙线粒子能量已达  $10^{20}$  eV, 这比目前世界上最大的质子——反质子对撞机的能量仍高出 5 个数量级。(2) 初级宇宙线粒子成份包括了元素周期表上所有元素的原子核和长寿命同位素核,而且还发现了一些超铀元素的核。(3) 初级宇宙线成份中还包含少量  $\gamma$  射线(能量高达  $10^{15}$  eV 以上)和电子、正电子。 $\gamma$  射线的观察把天体观测推向电磁波的超高能波段。(4) 宇宙线在星际空间的能量密度与可见光、宇宙背景辐射、星际磁场等各种过程的能量密度大致相等,约为  $1\text{ eV}/\text{cm}^3$  左右。

这样高能量的各种初级宇宙线粒子是如何产生和加速的? 它们在广阔的宇宙空间如何传播? 在空间各种物理环境下其高能过程又如何? 它们在宇宙演化各个阶段起什么作用? 其现象的特征又是什么? 所有这些问题都涉及到宇宙线研究的微观和宇观现象。

## 一、微观和宇观世界研究的密切关联

对所有初级宇宙线成份的观测结果表明: 几乎没有观测到反物质核的存在(少量的反质子和正电子均可由宇宙线和星际物质产生的次级粒子来解释)。而物质的基本组成部份都是配对成双的: 每种粒子都有一种相应的反粒子,质量相同,而其它性质则相反。粒子和反粒子之间的这种对称性是统一 20 世纪物理学的两大理论——相对论和量子力学所要求的。这种对称性已被实验充分地证实。然而在实验室外的世界中,却几乎见不到反物质,整个宇宙似乎都是由正物质构成。粒子物理中的弱作用过程 CP 破坏和大统一理论预言的核子衰变以及宇宙学的大爆炸理论,对这些问题的解答给出了一些启示。在大爆炸形成宇宙过程的最初时刻,

宇宙比现在要炽热和稠密得多,当时物质和反物质是等量的。但是在宇宙的年龄到达  $10^{-35}$  秒之前,粒子之间的剧烈碰撞造成了这样一种环境,这种环境导致了物质和反物质之间突然产生微量的对称性破坏,从此正物质世界被保留在宇宙中。

各种测量表明:在宇宙空间  ${}^4\text{He}$  含量按质量计约占  $1/4$ 。尽管恒星内也产生  ${}^4\text{He}$ ,但它们产生的  ${}^4\text{He}$  仅占  $1\%$ ,因此观测  ${}^4\text{He}$  的含量应具有宇宙学的意义。按大爆炸理论, ${}^4\text{He}$  的合成主要是在宇宙膨胀降温到  $10^9\text{K}$  附近时完成的。 ${}^4\text{He}$  的产额是由合成时质子、中子、光子的含量决定的。这些粒子份额的相对比值依赖于中微子的品种数。根据  ${}^4\text{He}$  含量的观测数据,可以判断中微子品种不可能多于 4 种(这是宇宙学得出的结论,而粒子物理尚未给出如此明确的结论)。目前在粒子物理研究中,科学家们已承认存在  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$  和  $\nu_\tau$  3 种中微子。在宇宙线的地下实验方面,中微子天文观测占有重要地位。

天鹅座 X-3 是一个引人注目的高能  $\gamma$  源。它是位于银河系边缘距地球上万光年的天体,最早是通过 X 射线观测发现的,它的 X 射线辐射呈现 4.8 小时周期性变化。这个天体可能是一个双星系统,在伴星物质被中子星吸收的过程中辐射出 X 射线,强度的周期变化是伴星公转的掩食效应。1972 年 9 月 2 日它发生了一次强烈的射电爆发,同年 11 月发射的 SAS-2 卫星发现它是天空中最强烈的高能  $\gamma$  射线源之一。联邦德国的基尔大学分析了它们的空气簇射阵列在 1976—1980 年期间的簇射事例的方向,发现了由天鹅座 X-3 方向入射的周期性的超高能 ( $>10^{15}\text{eV}$ ) 事例。由于超高能带电粒子在星际磁场中要发生偏转以及距离遥远,这些簇射应该是超高能  $\gamma$  光子。它们可能是由在中子星表面某处得到加速的一束很窄的超高能质子产生的,超高能质子周期性地扫过伴星,产生超高能  $\pi^0$  介子, $\pi^0$  介子衰变发射出这些超高能  $\gamma$  光子。由记录到的事例率估计天鹅座 X-3 超高能  $\gamma$  辐射的功率约为  $10^{37}\text{erg/sec}$ ,这样产生  $\gamma$  光子的粒子束应当有更大的功率输出。如确实这样,那末只需要少数几个这种类型的天体就足以产生所有的银河系超高能宇宙线。最近,在位于地下 700 多米的实验报道了积累的单  $\mu$  子事例,在  $10^{-3}$  显著水平上发现了天鹅座 X-3 方向的  $\mu$  子,而能够产生  $\mu$  子的  $\gamma$  光子的能量必须比  $\text{TeV}$  能区高若干个数量级,流强也相应的比目前观测到的数值要高若干个数量级,因此这些  $\mu$  子不可能是由  $\gamma$  光子在大气中产生。作者解释为由天鹅座 X-3 发出的某种未知的中性粒子同大气原子核作用产生,所以天鹅座 X-3 已成为天体物理和高能物理共同感兴趣的研究对象。

从对以上几个现象的讨论,可以看出微观和宇观世界研究的密切关联,而对宇宙线的观测和研究是联接这两大方面的重要桥梁。

## 二、主要的研究方向和发展前景

利用宇宙线研究微观和宇观世界,从能区和现象的观测可分为以下几个方面:

### (一) 对初级宇宙线成份及其同位素的观测

宇宙线带来了太阳系以外的物质样品,但在传播途中,与星际物质发生碰撞反应,致使观测到的元素成份与发生源的成分有差异,从成份的变化可以推测出传播的情况。一般认为宇宙元素成份就是银河系的平均元素组成。所以,由宇宙元素成份和宇宙线元素成份的异同可给出有关宇宙线发生源的线索。

对宇宙线初级成份不同能区的观测,可以给出宇宙线的星际传播模型。宇宙线的成份中

的  $^{10}\text{Be}$  丰度比宇宙中的丰度高出 6—7 个数量级, 根据这个数值可以得到宇宙线的年令, 也可以解释星际物质与磁场分布的关系。对宇宙线重核成份的测量将对恒星内部元素合成提供重要信息。在测量各种重核成份的同时, 可以研究高于重粒子加速器能区的核-核作用, 这方面的研究是高能物理的一个重要领域。

在宇宙形成的极早期, 形成了加速器不可能产生的粒子, 如磁单极子, 这也是宇宙线研究中的重要课题。另外, 反物质的观测一直是宇宙线探测中的重要内容。

## (二) 对宇宙线超高能现象的研究

高于加速器最高能量的能区称为超高能区, 目前指的是  $10^{15}\text{eV}$  以上的能区。在这个能区, 超高能宇宙线与大气核作用的研究仍然是高能物理研究中一个重要方面。由于超高能宇宙线粒子流很弱, 研究超高能现象必须用很大的探测器, 其面积从千平方米到百平方公里。探测器吸收物质的厚度达到每平方米数吨的数量级, 因此, 这些设备通常置于地面的不同高度(有些实验在一定深度的地下进行, 地下设备的重量从千吨到万吨数量级)。

宇宙线超高能核作用的研究目的是探索新现象和寻找新粒子。宇宙线中的超高能粒子是一种极为宝贵的科学资源, 那些有大型高能加速器的国家, 仍十分重视这种资源的开发。因为人们相信, 在超高能核碰撞中, 会开放一些新的反应通道, 产生新的物理现象。人们还认为, 来自“宇宙超高能加速器”的宇宙线, 有可能包含着一些尚未被认识的粒子。

远的不说, 1981 年西欧核子中心 SPS 对撞机建成后, 这个加速器得到有关高能  $P\bar{P}$  作用的总截面、平均多重数和横动量等, 与先前宇宙线实验所报道的结果是一致的[相应于静止靶时的能量为  $(1.55-4.3) \times 10^{14}\text{eV}$ ]。另外, 宇宙线超高能作用还提供一些新的现象和奇特事例: 如高山乳胶室实验报道了 Centauro 型和 Chiron 型事例, 它们的特征是作用中无  $\pi^0$ , 有大横动量  $P_t$  次级粒子或包含反常次结构。我国甘巴拉山组的多心结构事例和赝快度分布的环状结构事例等也难于利用已有的知识来解释。

近年来, 关于由核物质到夸克-胶子等离子体相变的理论研究认为, 超高能核-核作用会提供相变所需要的高温高密条件。相变的结果, 表现为次级粒子高多重数、大  $P_t$ 、富光子成分等现象, 这些早已在超高能宇宙线核作用中有了反映。我国学者最近利用这个理论对甘巴拉山组环状结构事例的解释做出了成功的尝试。利用气球或航天器载运探测器, 在高空或空间直接探测高能核-核作用, 既是研究常规高能核物理, 也是直接观测相变的一种有效手段。

超高能现象研究的另一方向是探索  $10^{14}\text{eV}$  以上初级宇宙线的成份、 $\gamma$  射线源和初级宇宙线能谱, 实际上涉及宇宙线的起源、加速、传播等天体物理及天体演化方面的课题。广延大气簇射实验给出了由  $10^{14}\text{eV}$  到  $10^{20}\text{eV}$  的初级粒子总谱, 发现了在  $10^{15}\text{eV}$  附近和  $10^{19}\text{eV}$  附近有两次拐折, 使得这一幂谱型的谱指数发生了不同情况的变化。由于  $10^{19}\text{eV}$  以上实验事例数统计量太少, 在这个能量附近谱型的拐折形状还有争论。这两个拐折的物理机制是什么, 看法上也还有较大的差异。宇宙线高端能谱是否有截止? 这一与宇宙论有重要关系的问题, 现在还没有明确的看法。对于  $10^{14}\text{eV}$  以上宇宙线的成分和各成份的能谱, 由于该能区粒子的流强很弱还难于直接测量, 主要是靠它们在大气层中作用后的次级粒子来分析的。不要说各种核成份和能谱是如何分布和变化的, 就是以重核成分为主还是轻核为主的问题还有很大的争论。因此, 超高能核作用特征的研究与初级宇宙线成分的研究是密切相关的, 两个问题中任一个取得进展, 将同时导致另一个的进展。由于美国费米实验室最近建成的  $P\bar{P}$  对撞机最高能量可达

相应于打静止靶时的能量  $2 \times 10^{15} \text{ev}$ , 他们有关  $P\bar{P}$  相互作用特征的实验结果, 将有助于上述问题解决。由此也可以看出, 高能物理的发展也是推动宇宙线超高能现象研究的重要工具。

在上一节中, 我们已经讨论了天鹅座 X-3 是一个引人注目的超高能  $\gamma$  源。这一观测成功, 将推动对这一类型天体超高能  $\gamma$  源的观测和研究, 而且也将成为宇宙线超高能现象研究的最重要的内容之一。

### (三) 对宇宙高能过程的研究

高能宇宙线带电粒子和其跨度为十几个数量级的  $\gamma$  射线(包括硬 X 射线)是宇宙空间某些强烈活动天体在演化过程中的产物, 也包括这些粒子在空间传播过程中的产物。离开了高能物理学, 人们就不可能正确了解宇宙演化的历史。人们对极早期宇宙的认识, 也受到目前人们强相互作用知识不足的限制。微观物理理论中一些基本规律, 在宇宙演化的某个时期或在某天体现存的特殊条件下, 可能起着显著的作用。测定  $^4\text{He}$  在宇宙中的含量, 预言中微子的品种至多有四种, 就是很好的例证。因此, 天体物理的实验观测有可能再一次对基本粒子物理学的发展作出重要贡献。

早在 30 年代就有人提出宇宙线起源于超新星爆发的假设。由于它爆发时释放巨大的能量, 所产生的冲击波和变化着的磁场, 有可能加速大量粒子。超新星遗迹, 例如蟹状星云, 强烈地发射高度偏振的射电波 ( $\approx 1\text{GHz}$ ), 这表明星云中存在着大量的在星云磁场中作同步辐射的高能电子 ( $1\text{Gev}$ )。蟹状星云还发射 X 射线和  $\gamma$  射线, 这表明了还有超高能电子。在星云磁场中辐射约为  $100\text{Kev}$  硬 X 射线的电子的能量应为  $10^{17}\text{ev}$ , 由于辐射能量迅速的损失, 其寿命仅为一年左右。形成这个星云的超新星爆发距今已近千年, 因此蟹状星云中应当存在着另外的高能粒子源, 以使星云不断地获得高能和超高能电子。1968 年在蟹状星云中发现了一颗脉冲星, 它以 33 毫秒的周期发射强烈的射电脉冲和 X 射线、 $\gamma$  射线脉冲。脉冲星可能是超新星爆发所形成的中子星, 它具有很高的物质密度 ( $\approx 10^{15} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 和超强的表面磁场 ( $\approx 10^{12}$  高斯)。虽然没有直接的证据, 但人们设想脉冲星也同时加速和发射质子和其他原子核。

由于  $\gamma$  射线在宇宙空间传播不受星际、星系际磁场的偏转, 它能带来产生源的直接信息。因此, 对宇宙 X 射线、 $\gamma$  射线、 $\gamma$  射线暴以及弥漫 X、 $\gamma$  射线背景等的观测就特别重要。高能电磁辐射能谱总是近似幂律谱, 位于能谱低端也就是能量高于  $20\text{Kev}$  的天体硬 X 射线和低能  $\gamma$  射线, 通常有较高的流强, 通过测量宇宙硬 X 射线和低能  $\gamma$  射线有可能对天体高能过程在较短的时间内进行较细致的研究。因此, 这方面的工作就显得更重要。

自 70 年代以来, 陆续在宇宙高能  $\gamma$  源、高能 X 和  $\gamma$  能谱线、X 和  $\gamma$  射线爆发和超高能宇宙线等方面取得了若干重大的发现, 这是一个正处于“发现时期”的远未成熟的领域, 蕴含取得新发现和构成新的物理思想和理论模型的机会。

## 三、充分发挥我国优势, 为微观和宇观世界研究做出贡献

宇宙线来自广阔的宇宙深处, 在单位面积上接收到的高能宇宙线流强是相同的。对超高能宇宙线现象的研究和观测常常是在立体结构上进行的, 也就是在大气层不同深度和地下进行。由于我国幅员辽阔, 又拥有号称地球第三极的青藏高原, 这一自然条件是得天独厚的, 应充分利用。

从 50 年代起我国就在云南落雪 3,180 米高山开展了宇宙高能核作用的研究和宇宙线强



度的观测,取得了有科学价值的成果和观测数据,在国际宇宙线物理学界有一定影响,并培养了一定数量的优秀人材,形成了一支较好的科研队伍。70年代后期,国内五个单位合作在西藏海拔 5,500 米的甘巴拉山上建成了高山乳胶室,从 80 年代起又和日本 7 个单位开展了国际合作。利用这一设备开展了  $10^{15}\text{ev}$  至  $10^{17}\text{ev}$  能区的超高能强子与大气核作用现象的研究。甘巴拉山高山乳胶室在世界四个大型乳胶室中海拔最高,其规模和事例积累量已达到第二位。近年来,利用高山乳胶室研究超高能核作用取得了可喜进展。在最近北京国际宇宙线超高能作用讨论会上,我国宇宙线物理工作者系统地报告了这方面的研究成果。我国学者用自己发展起来的软过程-硬散射模型,以及近几年提出的邹-杨模型和 Zichichi 组的模型,在仔细考虑了衍射离解过程的贡献之后,对碎裂区标度不变性问题和初级宇宙线成分作出了自己的判断。他们采用的这些模型能较好拟合加速器非单衍过程的实验结果。目前国外学者所用模型与加速器的实验结果符合的并不很好,有的没有考虑衍射过程,而衍射过程对乳胶室观测的分析是很重要的。如果比较准确地按照目前加速器数据外推,超高能区初级宇宙线中质子的份额应该是 30% 左右。国际宇宙线学界对在超高能区初级宇宙线的成分份额问题是有明显的争论的。这个问题涉及宇宙线起源、加速、传播以至于宇宙演化等重要天体理论问题。

对超高能宇宙线现象观测的重要内容之一是发现新粒子和新现象。几年来,甘巴拉山组获得了超高能核作用的大横动量和多团结构事例,及一个具有高多重数的环状事例。我国学者用超高能核-核作用中由普通核物质到夸克-胶子等离子体相变的模型作大气级联模拟,得到了环状事例,表明相变是这种现象的一种可能解释。高能核-核作用和核子与核作用中由普通核物质到夸克-胶子等离子体相变的理论,是高能物理研究中的一个重要理论,至今还未得到实验上的明确证实。

研究宇宙高能过程的重要方法是进行宇宙线高能天体物理的实验观测,它的基本特点是核物理和高能物理实验技术应用于对宇宙空间和天体发射来的宇宙线带电粒子和宇宙硬 X 射线和  $\gamma$  射线的观测。另一特点是借助于空间运载工具,进行摆脱大气屏障的空间观测。我国的卫星上天以后,曾进行了宇宙线强度、卫星环境的宇宙线低能质子和电子的测量,以及利用小规模核乳胶叠进行了核作用的研究。

1977 年高能所建议并推动了我国高空科学气球系统的研制。在大气所、高能所、空间中心、广州电子所和上海天文台等单位的合作下,于 1984 年完成了高空科学气球第一期工程,使我国成为国际上少数独立研制和发放高空科学气球的国家之一。目前气球最大容积达 20 万立方米,最大载荷达 700 公斤,最高升限达 38—39 公里,最长飞行时间为 18 小时,成功地进行了多次科学观测。随着气球技术的发展,宇宙线高能天体物理的实测研究也逐步发展和活跃起来。1980 年以来,用球载径迹探测器测量了高能初级宇宙线成份的元素分布和重核与 C、Al、Fe 和 Pb 等核的作用截面。1982 年对高空硬 X 射线和  $\gamma$  射线背景进行了观测;1984 年用球载复合晶体硬 X 射线望远镜 HAPI-1,成功地观测了蟹状星云高能 X 射线并准确地测定了蟹状星云脉冲星的辐射周期,获得了清晰的脉冲周期相位结构图;1985 年用 10 万立方米球载硬 X 射线望远镜 HAPI-2 测得天鹅座 X-1 的硬 X 射线能谱。

在地面观测系统中,高能所宇宙线室正在建造一个探测超高能宇宙线大气簇射的中型阵列,1987 年将投入运行并开始观测工作。北京天文台、高能所和紫金山天文台已着手合作开展大气契伦科夫光的观测。天文台在观测基地、跟踪系统和光学天文技术方面的条件同高能

所实验技术互相配合,在 2—3 年内完全可能实现我国进行甚高能  $\gamma$  天文的观测。在填补了甚高能和超高能区天文观测的空白之后,我们就有条件实现空间和地面高能天文的联合观测和研究,在跨越 10 多个数量级的宽阔能区中实现对宇宙高能辐射的全面观测。

在不久前结束的北京国际宇宙线超高能作用讨论会上,曾组织了一次超高能  $\gamma$  天文观测的专题讨论会,报告了国外最新的实验结果和在我国西藏开展超高能  $\gamma$  射线及超高能宇宙线观测的设想。由于西藏的海拔高,地理纬度也较适合,水电、交通、气候等条件也较优越,因此,许多国外学者对这个计划表示了强烈的兴趣,纷纷表示愿意共同合作,把设想中的西藏观测站建成一个技术先进、功能完备的超高能宇宙线观测中心。如果此设想得以实现,不仅我国的超高能宇宙线现象的研究在世界上将占有相当的地位,对我国  $\gamma$  射线天文全波段观测也有重要影响,而且对利用高原环境进行其他学科的研究也会有好的影响。

宇宙空间存在着大规模的高能过程,对人类认识微观和宇观世界的整体性有着重要意义。宇宙线物理学的研究在这方面起着重要桥梁作用。

#### 四、走“联合、开放”的道路

近年来,在宇宙线研究中,国内外的合作已经有了一个良好的开端,并取得了一定成绩和经验。从 1977 年起,高能所先后同山东大学、云南大学、郑州大学和重庆建工学院合作,逐步建设了西藏甘巴拉山高山乳胶室,开展了  $10^{15}\text{eV}$ — $10^{17}\text{eV}$  超高能核作用的研究,取得了较好成绩。这方面的研究开始走向世界,并具有在国际上平等对话的水平。几年来,合作单位先后有 7 名研究生在高能所进修和撰写毕业论文。他们和高能所的研究生在北京国际讨论会上提交的论文和报告受到许多国内外同行的赞扬和好评。

甘巴拉山乳胶室于 1980 年和日本 7 所大学在平等互利的基础上开展了合作。日方提供了高灵敏度的 X 光片、核乳胶、先进的自动黑度测量仪等。这对我们高山乳胶室工作达到国际先进水平有相当作用。另外,国外人员的多次来访也带来国际上学术的最新消息。正在进行的中英高能天体物理的合作研究,在双方已有的技术基础上将研制具有高水平的硬 X 射线望远镜系统,并利用我国气球系统进行联合观测。另外,高能所和美国 MIT 大学合作参加在意大利地下宇宙线观测的多国合作项目。西藏高山超高能宇宙线现象观测站国际合作的设想,将是较高水平的合作。因此我们认为走向开放的国际合作是多层次的,有重点地建设合作基地应是主要措施之一,这对我国科学发展有重要意义。

宇宙线物理学是沟通对微观和宇观世界研究这两大基础科学的重要桥梁。我国有辽阔的国土、特别是有举世无双的青藏高原;在空间运载工具方面有大型科学气球和卫星。几十年来,在老一辈科学家开拓的宇宙线物理领域有一支不同层次的科技骨干队伍,近年来他们的研究工作有相当大的进展,在宇宙线超高能作用和宇宙线高能天体物理方面已经能在国际水平上同国外学者对话。另外,我国在粒子物理理论和高能天体物理理论方面有一支水平较高的队伍;在核探测器、粒子探测器以及电子学方面实力均相当雄厚。在高能天体物理实验数据分析处理方面有自己较成熟的方法,并逐渐被世界上许多实验组所采用。所有这些条件为我国在利用宇宙线研究微观和宇观世界做出国际较高水平的工作提供了有利条件。如果能在各方面得到一定条件的支持,在不太长的时间内,会取得世界先进水平的成就。