

沟通微观和宏观世界的重要桥梁——宇宙线物理学

霍安祥

(中国科学院高能物理研究所)

自从宇宙线发现七十多年来，它为人认识微观和宏观世界作出了重大贡献。在加速器问世以前，宇宙线作为唯一的高能粒子源对微观世界的研究曾有过一系列的重大发现：如正电子、 μ 子、电磁级联过程、核级联过程、广延大气级联现象、 π 介子、K介子和超子等等，从而开辟了粒子物理这门重要的前沿学科。直到现在，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，一直推动着天体物理和地球物理的发展。由于它产生于宇宙空间，它的产生、加速和在广阔空间的传播，自然与空间环境和地球有着密切关系。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；福布什效应即是随着磁暴的出现引起全球宇宙线强度的减弱，而磁暴又与太阳黑子的活动密切相关着；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、 γ 射线暴、 γ 射线源的发现及甚高能和超高能 γ 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，不同能区初级宇宙线带电粒子成分的观测包括同位素的观测，对于了解星体演化模型、物质的合成模型、宇宙线在宇宙空间的传播模型均有重要意义。

到目前为止，宇宙线研究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-反质子对撞机相应于实验室系的能量仍高出五个数量级。(2) 初级宇宙线粒子成分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) 初级宇宙线成分中还包含少量 γ 射线（能量高达 10^{15} eV

以上)和电子、正电子。 γ 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中的微观和宏观现象。

一、微观和宏观世界研究的密切关联

在上述讨论中，已经涉及到宇宙线研究与粒子物理、宇宙学和天体物理之间的关系。图1给出了这种关系的描述。图1中的实线表明了宇宙线与其他三方面的关系，虚线表明了宇宙线沟通三者的重要桥梁作用。下边举几个例子来说明这些关系。

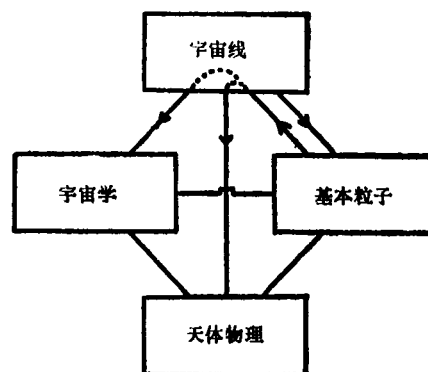


图 1

对所有初级宇宙线成分观测的结果表明，

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分都是配对成双的,每种粒子都有一种相应的反粒子,粒子和反粒子质量相同,而其它性质则相反。粒子和反粒子之间的这种对称性是统一二十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,整个宇宙似乎也是正物质构成。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 ^4He 含量按质量计约占 1/4。尽管恒星内也产生 ^4He ,但它们产生的 ^4He 仅占 1%,因此观测 ^4He 的含量应具有宇宙学的意义。按大爆炸理论, ^4He 的合成主要是在宇宙膨胀降温到 10^9K 附近时完成的。 ^4He 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 ^4He 的含量的观测数据,可以判断中微子品种不可能多于四种(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 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 三种中微子。在宇宙线的地下实验中,中微子天文的观测占有重要地位。

天鹅座 X-3 是一个引人注目的高能 γ 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 4.8h 周期性变化。这个天体可能是一个双星系统,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 γ 射线源之一。联邦德国基尔大学在分析了他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。超高能带电粒子在星际磁场中要发生偏转,这些簇射应该是超高能 γ 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 π^0 介子, π^0 介子衰变发射出这些超高能 γ 光子。由记录到的事例率估计天鹅座 X-3 超高能 γ 辐射的功率约为 10^{37}erg/s 。这样,产生 γ 光子的粒子束应当有更大的功率输出。如确实这样,那么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,报道了在位于地下 700 多米的实验中积累的单个 μ 子事例,在 10^{-3} 水平上发现了天鹅座 X-3 方向的 μ 子,而能够产生 μ 子的 γ 光子的能量必须比 TeV 能区高若干个数量级,流强也相应地比目前观测到的数值要高若干数量级。因此,这些 μ 子不可能由 γ 光子在大气中产生。该实验的作者解释为由天鹅座 X-3 发出了某种未知的中性粒子,这些未知的中性粒子同大气原子核作用产生了实验观测的 μ 子。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。

最近 CHILE 天文台宣布观测到一颗超新星爆发,它的方位在大麦哲星云处,距地球为 52kpc ($1\text{kpc} = 3.09 \times 10^{21}\text{cm}$)。之后,意大利和苏联合作组在意大利的 MONT, BLANC 地下实验室,日本在神冈的地下实验室和美国 IMB 组地下实验室,先后宣布观测到中微子爆发事例,后两个实验组观测到事例的时间比 MONT, BLANC 组晚四个小时。日本神冈组给出的中微子流强为 $I_\nu = 10^{10}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。这些观测将对粒子物理和天体演化的认识有重要影响。

从以上几个现象的讨论,可以看出微观世界和宏观世界的密切关联,而宇宙线的观测和研究是沟通两大基础科学的重要桥梁。

二、宇宙线物理研究的主要方向和发展前景

1. 初级宇宙线成分和其同位素的观测

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分与发生源的成分有差异。从成分的变化可以推测出传播的情况。宇宙的元素成分可从恒星和太阳的分光研究以及陨石元素的分析得到。一般认为宇宙元素成分就是银河系的平均元素组成。由宇宙元素成分和宇宙线成分比较,其差异可给出有关宇宙线发生源成分的线索。我们知道,在恒星演化过程中有许多星体有强烈的爆发,这些爆发将具有不同能量的粒子发射到空间。例如,有些质量超过三倍太阳质量的恒星,在演化的最后阶段,可能产生超新星爆发,这种爆发将恒星各自合成的重元素抛射到星际空间。观测超铀元素中寿命很长的元素(如 ^{239}Pu 等),并根据这些元素的强度可得知近期超新星对重核所作的贡献。

通过宇宙线初级成分不同能区的观测,可以给出宇宙线的星际传播模型。宇宙线的成分中的 ^{10}Be 丰度比宇宙中的丰度高出6—7数量级,根据这个数值可以得到宇宙线的年龄,也可以解释星际物质与磁场分布的关系。宇宙线重核成分的测量将对恒星内部元素合成提供重要信息。在测量各种重核成分的同时,特别是高能和甚高能的重核,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很重要的领域。

2. 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}eV 以上能区。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领域。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百万平方公里。如果要探测超高能宇宙线粒子,探测器的作用和吸收物质的厚度需每平方米约吨的数量级。

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),以大气作为超高能宇宙线作用的靶物质,可测量广延大气簇射(EAS)、大气切伦科夫光或大气荧光,还可以用大面积高山乳胶室研究能量为 10^{15} — 10^{17}eV 宇宙线与大气核作用现象。这些方法也有一个严重缺陷,即它们只能观测超高能粒子与上层大气作用后次级粒子的行为,再推出宇宙线初级粒子与大气初次作用的特征和性质。

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。

超高能现象研究的另一个方向,是探索 10^{14}eV 以上初级宇宙线的成分、 γ 射线源和初级宇宙线能谱。这实际上涉及了宇宙线的起源、加速、传播等天体物理及天体演化方面课题。广延大气簇射实验给出了由 10^{14}eV 到 10^{20}eV 的初级粒子总谱,发现了在 10^{15}eV 附近和 10^{19}eV 附近有两次拐折,使得这一谱型的谱指数发生了不同情况的变化。对 10^{19}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。宇宙线高能能谱是否有截止?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 10^{14}eV 以上宇宙线的成分和各成分的能谱,由于这个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进行分析。不要说对各种核成分和能谱是如何分布和变化有不同看法,就是对以重核成分为主还是轻核为主的问题也还有很大的争论。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,将推动另一个取得进展。美国费米实验室最近建成

的 $P\bar{P}$ 对撞机最高能可达 $2 \times 10^{15} \text{eV}$ (相应于打静止靶时的能量)。他们的有关 $P\bar{P}$ 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原因。

3. 宇宙高能过程的研究

高能宇宙线荷电粒子和其跨度为十几个数量级的 γ 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,科学家对极早期宇宙的认识,也受到他们对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。因此,天体物理的实验观测有可能再一次对基本物理学的发展作出重要贡献。

由于 γ 射线在宇宙空间传播不受星际磁场和星系际磁场的偏转,它能带来产生源的直接信息,因此,对宇宙 X 射线、 γ 射线、 γ 射线爆以及弥漫 X、 γ 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,位于能谱低端的也就是能量高于 20KeV 的天体硬 X 射线和低能 γ 射线,它们通常有较高的流强。通过测量宇宙硬 X 射线和低能 γ 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加重要。

宇宙高能过程的研究处于其发展的初期阶段。自七十年代以来,陆续在宇宙高能 γ 源、高能 X 和 γ 能谱线、X 和 γ 射线爆发和超高能宇宙线等方面取得了若干重大的进展。这一研究领域正处在发现时期,也是富于构成新的物理思想和理论模型的时期。

三、充分发挥我国优势,为微观和宏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。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。我国幅员辽阔,又拥有号称地球的第三极地的青藏高原,这一自然条件是得天独厚的,应充分利用。

从五十年代起我国就在云南落雪的 3180m 高山开展了宇宙线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。这些研究成果在当时国际宇宙线物理学界有一定影响。通过这些科研工作,培养了一定数量的优秀人才,形成了一支较好的科研队伍。在七十年代后期,国内五个单位合作在西藏海拔 5500m 甘巴拉山上建成了高山乳胶室。从八十年代起又和日本七个单位开展了国际合作,利用这一设备开展了 10^{15}eV 至 10^{17}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,特别是厚型铁乳胶室的实验结果。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地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得并不很好,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成分的份额问题有明显争论。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。

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,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 γ 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,以及利用小规模乳胶叠进行了核作用的研究。

1977 年中国科学院高能物理研究所建议并推动了我国高空科学气球系统的研制。在中国科学院大气研究所、中国科学院高能物理研究所、中国科学院空间技术中心、广州电子学研究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国家之一。目前气球最大容积达 20万 m^3 ,最大载荷达 700kg ,最高升限达 $38-39 \text{km}$,最长飞行时间为 18h ,已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分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 γ 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 m^3 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,中国科学院高能物理研究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。中国科学院北京天文台、中国科学院高能物理研究所和中国科学院紫金山天文台已着手合作开展大气切伦科夫光的观测。中国科学院北京天文台在观测基地、跟踪系统和光学天文技术方面的条件同中国科学院高能物理研究所实验技术互相配合,在 2—3 年内完全可能实现在我国进行甚高能 γ 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,在跨越十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 γ 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 γ 射线及超高能宇宙线观测的设想。由于西藏的海拔高,地理纬度也适合于较多数量 γ 源天体的观测;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,而且对我国 γ 射线天文全波段观测也有重要影响,对利用高原环境进行其他学科的研究也会有促进作用。

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,中国科学院高能物理研究所先后和山东大学、云南大学、郑州大学和重庆建筑工程学院合作,逐步建成了西藏甘巴拉山高山乳胶室,开展了 $10^{15}-10^{17} \text{eV}$ 超高能核作用的研究,取得了较好成绩。这方面的研究工作开始走向世界,并具有在国际上平等对话的水平。几年来,合作单位先后有七名研究生在中国科学院高能物理研究所进修和撰写毕业论文。他们和中国科学院高能物理研究所的研究生在北京国际讨论会上提交的论文和报告受到

(下转第 570 页)