

近年的宇宙线物理研究

丁林恺

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

本文在介绍宇宙线物理研究的一般情况之后,侧重介绍近年来对超高能粒子物理、甚高能和超高能的宇宙 γ 源、宇宙中微子和宇宙暗物质的研究情况。

宇宙线是来自宇宙空间的微观粒子,诸如质子、原子核、电子、光子、中微子,以及其他目前尚未被探测到的未知粒子。它们或者来自宇宙里的宇宙线源,或者是宇宙线与空间物质相互作用的产物。它们在传播中受到空间(包括河外的、银河的、太阳的和地球的)物理条件的影响,因而广泛携带着粒子物理、核物理、宇宙学、天体物理、太阳物理以及日地空间物理的信息。实际上,宇宙线物理已成为一座桥梁,把微观世界的现象和规律与宇观世界的现象和规律联系起来,是许多学科前沿的一门交叉学科。宇宙线观测所得到的微观粒子的种类、强度、能谱、方向、时间性质和作用特征等等资料,为各有关学科的研究提供依据或约束,已经并将继续推动这些学科的发展。

早期的宇宙线研究,集中于“宇宙线是什么粒子?具有什么性质?”即侧重在粒子物理方面。从30年代到50年代初,在宇宙线研究中曾有过一系列重大的发现,推动人们对物质世界的认识由原子核深入到下一个层次,对早期粒子物理学的发展起了重要的作用。50年代以后,一方面,由于高能加速器的建造,粒子物理研究不再主要依靠宇宙线了,另一方面,由于空间运载工具的发展,开辟了在大气层外观测宇宙X射线、 γ 射线和荷电粒子的时代,宇宙线研究的侧重点转移到“宇宙线从哪里来?怎样产生?怎样加速和传播?”即侧重在天体物理方面。30多年来,探测到了一系列的X, γ 射线源,发现了许多重要的X, γ 天文现象,开拓了人们观察自然的视野,推动了天体物理学的发展。

在同一个时期,宇宙学和天体演变理论有了迅速的发展,对它们的检验也离不开宇宙线观测。进入80年代,宇宙线研究的前沿又不断地扩展和演进,广度和深度进一步发展,学科内容也更加丰富了。超高能宇宙线源的探测、宇宙中微子的探测和宇宙暗物质的探测,就是几个新的重要的分支。

和自然科学其他学科的发展一样,宇宙线物理的发展依靠实验。宇宙线实验依托于粒子和核的探测技术以及空间运载手段。对于能量较低、作用截面较大的宇宙线粒子,宜在空间进行探测,以避免大气层对它们的吸收,宇宙X射线,直到GeV级的 γ 射线,初级宇宙线核的同位素成分,宇宙线正电子、反质子和反核等的探测,都属于这一类;对于能量很高(因而强度很低)的宇宙 γ 射线、质子和原子核等,要在地面(包括高山和高原)放置大面积的探测器作长时间的观测,这时大气层被有效地用作高能电磁簇射和核簇射的产生体,提高了对这类粒子的探测效率;对于能量不高、强度不低、但作用截面很小的宇宙线粒子(例如中微子),则要在深层地下、天然放射性本底很低的地方设置体积很大的探测器进行长时间的探测。近年来,一些先进的空间或地面宇宙线探测装置,往往耗资数千万美元以上,由数十人的实验组来承担,由多边国际合作来推动实施,已具有大科学的特点了。以地面探测设备为例,90年代将建造五万吨探测介质的地下探测器和展布在1000km²范围内的广延大气簇射阵列。人们对探索新的宇宙线现象的高涨热情和投入的巨大

财力物力正反映了对这个学科的重视。

在本文中,将对近年来的超高能粒子物理、甚高能和超高能的宇宙 γ 源、宇宙中微子和宇宙暗物质等方面的研究进行一些评述。显然,这并没有包括宇宙线研究的全面状况。

一、超高能粒子物理

从50年代初高能加速器诞生之后,粒子物理的研究即主要在加速器上进行,并已经取得了巨大的进展。宇宙线在亮度上无法与加速器竞争,但它具有能量的优势。为了发挥能量的优势,人们继续在高于加速器当时所能达到的能区,利用宇宙线进行粒子物理的研究,我们称之为宇宙线超高能粒子物理研究。例如,在70年代,加速器强子的最高能量达到 $2 \times 10^{12} \text{eV}$,80年代中期达到 $4 \times 10^{14} \text{eV}$ (均指折算到静止靶情况),而我国在70年代后半期建立并在80年代持续运行的西藏甘巴拉山乳胶室,已在记录和研究所 $10^{15} \sim 10^{16} \text{eV}$ 的作用现象了。由于超高能宇宙线十分稀少,已不能期望它对粒子相互作用的细节提供有足够统计性的资料,但它可以揭示超高能粒子作用的一般特征,揭示那些产生截面比较大的新现象新过程,从而为粒子物理的发展发挥一定的探路作用。近20年,在宇宙线研究中首先作出结论,随后得到加速器实验证实的例子有:70年代初发现 X 粒子(粲粒子的一种),比 J/ψ 粒子的发现早两年;80年代初给出 10^{14}eV 能区强子作用截面随 $\ln^2 S$ 增长,高多重事例增加,多重数分布变宽,平均横动量增加以及高多重数和大横动量关联等。所有这些发现都被随后的加速器实验所证实。

在80年代,宇宙线广延大气簇射实验测出了 $10^{17} \sim 10^{18} \text{eV}$ 的质子和空气核作用的截面,由此推导出该能区的质子-质子截面,为SSC的建造提供了依据。

在近年的粒子物理研究中,标准模型(即电弱统一理论和量子色动力学)取得极大的成功。许多理论家预言,理论的下一个飞跃,将发生在

极高的能域($\sim 10^{16} \text{GeV}$);从目前的加速器能域到这个能域,中间有一个很宽的“沙漠”地带,不再有新的物理。这一理论观点,首先要受到宇宙线超高能研究的检验。高山乳胶室实验记录 $10^{15} \sim 10^{17} \text{eV}$ 的超高能现象,它对超高能粒子有很好的空间分辨和能量分辨,适于显示大横动量现象。我们在超高能级联簇射的计算机模拟中,放进QCD描写的超高能层子(夸克)和胶子的相互作用,来对高山乳胶室的族事例特征进行统计分析。结果发现,大多数乳胶室事例可以用已知的物理机制描写,但有几个特殊事例远离QCD所描写的区域,需要更大横动量的物理机制。这一研究表明,可能在 $10^{15} \sim 10^{17} \text{eV}$ 能区存在一定截面的物理过程,其中层子不再能被看作点粒子,而是显现了某种次结构和更深层次成分的碰撞。不断积累和深入分析高山乳胶室的超高能作用资料,有可能沿这一方向进行进一步的研究。

超高能宇宙线研究中报道的另一些新奇现象,例如Centauro型事例、Chiron型事例等,至今仍是一个谜。有的实验组不断报道此类事例,有的实验组则根本没看到。这就要首先从实验方面寻找原因了。

在超高能宇宙线研究中另一个具有粒子物理意义的课题,是观测 10^{20}eV 附近的初级宇宙线能谱是否有截断。理论计算表明, 10^{20}eV 以上的质子将与2.7K的微波背景光子发生相互作用而导致能谱截断。这是在实验室达不到的条件下,对能量极高的强子与能量极低的光子之间的相互作用进行研究,对理论进行更全面的检验。

按照QCD计算,超高能光子将体现更多的强子性质。在超高能 γ 引起的大气簇射中发现反常多的次级 μ 子,可能与此机制有关。

宇宙线实验还提供了超高能核-核作用研究的机会。近几年人们普遍关心的夸克-胶子等离子体现象,从宇宙线核-核作用实验中得到了一些线索。甘巴拉山乳胶室实验获得的环状事例,已被证明可以用一种夸克-胶子等离子体模型加以解释。

二、甚高能和超高能宇宙 γ 源

高能宇宙线的起源问题，从来就是宇宙线物理的一个主要的和基本的问题。较早的宇宙线起源模型假定宇宙中存在一些分立的点源，由于宇宙线的能量特征，推测它们应该是剧烈活动的天体，例如超新星。随后，为解释宇宙线能谱的幂谱形式，提出了宇宙线在星际介质中与运动磁团随机碰撞的统计加速模型。进一步的研究表明，这一加速机制对能量很高的宇宙线并不十分有效。由于后来观察到太阳宇宙线的冲击波加速，人们又返回到分立源宇宙线加速的研究。但是，这样的宇宙线源究竟在哪里？

由于宇宙线荷电粒子受到银河磁场的偏转，能量低于 10^{18}eV 的粒子已不能直接显示其源的方向，因此需要探测中性粒子。最容易探测的中性粒子是光子。在气球和卫星的实验中，已经测到了一系列的 X 射线和 γ 射线源。人们自然会提出这样的问题：这些发射低能 γ 射线的天体，是否也能发射更高能量的 γ 射线？

70 年代，在地面上用大气切连科夫光技术首次观测到来自天鹅座 X-3 的甚高能 ($\sim 10^{12}\text{eV}$) γ 射线，接着报道了一系列有一定显著水平的甚高能 γ 发射源。80 年代初，又观测到来自天鹅座 X-3 的 10^{15} — 10^{16}eV 的 γ 射线，而且具有 4.8 小时的周期结构。这说明，天鹅座 X-3 可能就是一个能把质子加速到 10^{17}eV 的宇宙线源(附带指出，美国的宇宙线实验装置 Fly's eye 还报道观察到来自天鹅座 X-3 方向的 10^{18}eV 能区的宇宙射线)。如果这些报道得到进一步的证实，则将证明在宇宙间确实存在着一些超高能加速器，即在一些分立的区域，正在进行着能量极高、输出功率极大的过程。同时也说明，高能宇宙线的起源这一基本问题，有可能用地面设置的大气切连科夫光望远镜和广延大气簇射阵这样的实验手段进行研究，求得解决。

观测来自点源的甚高能和超高能 γ 射线的强度、能谱、周期结构以及强度随时间的变化，

对所获得的资料进行综合的分析，我们就有可能回答一系列重要的问题。例如，宇宙高能加速器的原理是什么？高能光子的产生机制是什么？是由电子产生或由质子或核产生还是由其他奇异物质产生？如果高能 γ 由电子产生，是韧致辐射还是逆康普顿散射或是同步辐射？如果高能 γ 由强子作用产生，则束是什么粒子？靶是什么物质？是双星系的伴星物质还是吸积盘或星际物质？高能 γ 的强度随时间变化说明什么？是束的变化还是靶物质的运动和变化？高能 γ 如果有周期，则是什么机制产生的？周期的某些细微变动（如果得到证实）又说明什么？为什么从点源方向来的簇射事例具有较高的 μ 子含量？是高能光生截面增强？是存在未知的中性粒子还是其他原因？……

80 年代中期以后，国际上掀起了一个甚高能和超高能 γ 源研究的热潮。我国在最近几年建造了四套观测装置，即河北兴隆的大气切连科夫光望远镜、昆明梁王山的广延大气簇射粒子阵和切连科夫光阵、北京怀柔 and 西藏羊八井的广延大气簇射粒子阵。它们分别在 10^{14}eV 到 10^{16}eV 能区内，稳定地提供 γ 天文观测数据。

在这个领域，近两年的观测结果似乎不如预期的理想。除了蟹状星云的甚高能发射已足够高(10 倍标准偏差以上)的统计显著性，其他源的候选者都还有待进一步的观测来增加统计性。为了增加统计，人们都希望降低观测的能阈。在各国的粒子阵列中，西藏羊八井的阵列具有地理上的优势，已把能阈降到约 30TeV ，正以 20Hz 的速率记录宇宙线事例。除此，人们正更多地注意来自宇宙线源的 γ 射线强度随时间变化的现象，特别是几套装置对同一爆发现象的同时观测，具有重要的意义。

最近，我国学者报道了 10^{13}eV 附近的宇宙线事例与太阳质子耀斑事件之间可能存在的关联现象。如果这一现象得到证实，将对甚高能宇宙线的起源或加速提供重要的根据。目前，正准备用我国的地面大气簇射阵列在第 22 个太阳活动峰年期对此进行进一步的检验。

三、宇宙中微子

80年代宇宙线研究中的另一个重大事件,是观察到来自超新星爆发(SN 1987A)的强中微子束。起源于地球以外的中微子,过去只观测过太阳中微子,这一次成功的观测,是人们首次看到来自太阳系外而且是银河系外的宇宙中微子。

由于中微子与物质的相互作用很弱,它产生后几乎可以在宇宙中畅通无阻地穿行,极少出现损失能量和改变方向的情况,因而宇宙中微子携带着发源地的最直接的信息。特别是,宇宙中微子可以提供天体内部演化的消息,在这方面,光子是不能与之相比的。

探测宇宙线中微子,当前有两个突出的目标:一个是对太阳中微子的进一步研究,另一个是对恒星塌缩所产生的中微子爆发现象的观测和研究。

太阳是最靠近我们并与人类关系无比密切的一颗恒星,对太阳物理现象的研究,包括对它的核反应的了解,既具有重要的实用意义,也是建立恒星演化模型的基础。对太阳中微子的测量,有助于了解太阳中核反应的类型、太阳的化学成分以及太阳中心的温度等,以建立更加完善的恒星演化模型。美国 Davis 组持续了约 20 年的用 ^{37}Cl 探测太阳中微子的实验,报道了实测太阳中微子的强度比“标准太阳模型”的计算值短少约三分之二。这就是著名的“太阳中微子短缺”问题。同一实验还报道了太阳中微子强度与太阳黑子数量反关联的现象。最近几年,对太阳中微子的研究进入了一个新的活跃时期。日本 Kamioka 组用探测质子衰变的水切连科夫探测器探测 7.5 MeV 以上的太阳中微子,这是第一个能观察中微子方向的实验。结果表明,太阳中微子的强度仍然比标准太阳模型的预期值小,但只小一半。这一实验组的研究者认为,太阳中微子强度与太阳黑子数量没有关联。以上两个实验主要是探测太阳中 ^8B 的 β^+ 衰变产生的能量较高的中微子,这是太阳

热核反应链中一个比较次要的过程。最近有两个新建成的实验装置, SAGE 和 GALLEX, 它们都是用 ^{71}Ga 来探测太阳产生的电子中微子。 ^{71}Ga 与电子中微子反应的阈能比 ^{37}Cl 低, 可以部分地探测太阳热核反应的主要过程(pp 过程)所产生的中微子。半年以前, SAGE 组报道了十分初步的结果:“最可能是没看到太阳中微子”。现在,人们都在注视着今年内这两个组可能报道的新结果。

最近几年,在意大利的 GRAN SASSO 实验室,正在建造几个巨大的地下实验装置,它们都以观测太阳中微子作为主要的或附带的任务。加拿大正在建造一个一千吨重水的切连科夫探测器。日本则准备把 Kamioka 的探测器扩大到五万吨。我国虽然没有建造大型地下实验装置,但参加了某些国际合作。我国学者正在研究如何提高对太阳中微子的探测效率,提出了积极的建议。在国际范围内如此空前规模的努力下,“太阳中微子短缺”问题有望在不久的将来得到澄清,从而增加人们对太阳热核过程或中微子物理性质的了解。

根据现行的恒星演化理论,在恒星热核反应的后期生成愈来愈多的重元素。如果恒星的质量较大,演变到一定阶段就会在引力作用下发生恒星塌缩,接着发生爆发,产生强大的冲击波,放出大量的中微子。理论预言,在秒的量级内可放出 10^{58} 量级的中微子,这些中微子的能量在几个 MeV 到几十 MeV 之间,可带走超新星爆发的 90% 以上的能量。在 1987 年 2 月 23 日的 SN 1987A 超新星爆发期间,在宇宙时 7:35,在大约 10 秒的时间间隔内, Kamioka 组和 IMB 组的地下实验装置就分别探测到 11 个和 8 个中微子引起的事例。这两个实验记录到的中微子强度与能量都与 II 型超新星爆发的理论预期值相符。这是一个突出的成就,第一次由宇宙线实验观测验证了超新星爆发和生成中子星的天体物理理论。

随着今后几年几个新的更大规模的地下宇宙线实验装置的建成,预期将能记录到更多的恒星塌缩事件,或在每个事件中得到更高的统

计,为超新星爆发过程的研究提供更多的资料。

四、宇宙暗物质

宇宙中存在暗物质的重要证据,来自对旋臂星系的研究。按照开普勒定律,星系中星体旋转运动的速度应随星体与星系中心距离的增加而下降。但是,采用多普勒红移方法测量一些旋臂星系中星体的运动速度,却表明:到了一定的距离,这个速度成为常数,不再随星体到星系中心的距离而改变。由此推论,在星系中除去可见物质外,还存在一个由不可见物质组成的晕,其总质量为可见质量的3到10倍。

对球状星团、椭圆星系以及星系团的分析,也导致类似的结论。

宇宙学研究中有一个密度参量 Q ,它的取值小于1,等于1或大于1,对应于宇宙是开的、平的或闭的。理论家认为 Q 应该是1,而按照大爆炸核合成理论,重子物质对 Q 的贡献不到0.1。这也要求存在约90%的非重子暗物质。

以上情况也适合于银河系。由银河系内可见物质的分布及其围绕银心运动的速度,可决定在太阳系附近,暗物质密度大约为 $0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$ 。

现在流行的看法,认为大部分暗物质应非重子暗物质,即粒子。非重子暗物质中,又可分为热暗物质和冷暗物质。如果暗物质都是热的,则所导致的星系结构与观测不符。所以现行

的一般看法是:大部分非重子暗物质应为冷暗物质,它们应该是弱作用的有质量的粒子(WIMP)。中微子、某些超对称粒子、轴子等都是可能的候选者。它们可能分布在星系的周围,形成一个球形的晕。

在宇宙线中寻找暗物质粒子,主要从两个方面努力。一是探测陷落在太阳中心的正反暗物质粒子湮没后产生的中微子。理论上估计暗物质粒子的质量最可能是几个GeV,因此待探测的中微子的能量也是几个GeV级。另一个是直接探测暗物质粒子与探测器靶物质的原子核发生弹性碰撞的反冲核。由太阳系围绕银心的运动速度,推算暗物质粒子相对于地球的平均速度约为 300km/s ,这种低速粒子与靶核弹性散射产生的反冲核的动量约为keV量级。某些预言的暗物质粒子与普通核发生弱作用碰撞的截面约在 10^{-38}cm^2 到 10^{-34}cm^2 之间。因此,需要研制对keV级的反冲核灵敏的、靶物质含量较大的新型探测器。这方面的工作在国际上刚刚起步,但很快趋于活跃,我国也已开始着手。

事实可能是:人们研究了几十年的宇宙线,仅只是认识了其中较小的一部分;来自无限空间的宇宙线内涵丰富,一大部分尚未被知晓,有待人们去探索,宇宙暗物质即为一例。就象早年宇宙线正电子、 μ 子、 π 介子和奇异粒子的发现对粒子物理学所起的作用一样,新的未知宇宙线粒子的探测成功,将会推动物理学一整个新学科的发展。

(上接第443页)

中子。他把1000个中子装入这个磁瓶,存储了一个半小时。在预定时间插入中子探测器,计数残存的中子。改变不同的存储时间,求得一条曲线,从而测得中子寿命为 $(877 \pm 10)\text{s}$ 。他们正在改进实验的精度。

苏联列宁格勒有一个研究组用了一个40cm直径的中空球作为储存瓶。球可以绕水平轴转动,球上有一个洞,充气时在最低位置,储

存时在最高位置。让球一点一点转动,可以控制储存时间。不久他们会给出更精确的结果。

到目前为止,中子寿命的世界平均值为 $(888.6 \pm 2.6)\text{s}$ 。随着中子储存技术以及极冷中子源的发展,不久的将来,这个值的不确定性很可能降到1s以下,从而将对于诸如弱电标准模型等有关的理论,给出更精确的检验。

(丁亦兵根据 Physics World 1990年
第4期第41页编译)