

关于宇宙线研究的一些问题

霍安祥

一、什么是宇宙线

宇宙线是从宇宙空间射到地球上来的各种高能原子核和少量的电子及 γ 射线,其中氢原子核(即质子)约占93%。氦核(即 α 粒子)约占6%左右,其他原子核约占1%。电子和 γ 射线也约占1%。间接测得的宇宙线粒子的最大能量已达 10^{21} 电子伏。

但是,宇宙线粒子的流强是非常弱的,在一个平方米的面积上,能量为百万亿电子伏的粒子,每小时大约也只有一个从宇宙空间射向地球大气层表面。粗略地说,粒子的能量每升高十倍,流强要下降50倍以上。另外由于宇宙线粒子(除了中微子外)与大气层中的原子核有很强的碰撞作用,到了地球表面,都是平均碰撞作用过十几次以后的宇宙线粒子。没有与大气层作用以前的粒子叫初级宇宙线。碰撞作用后的粒子叫次级宇宙线。次级宇宙线中绝大多数粒子是在大气中产生或衰变的粒子,可以说,在加速器上能产生的粒子,次级宇宙线中都有。但是,由于有些粒子流强太弱,几乎无法用实验观察。

从上述情况可以看出:一方面,由于宇宙线是高能粒子的天然源,因而可用它来研究“基本”粒子物理;另一方面,由于它产生于宇宙空间,它的产生、加速和传播自然与天体和地球有密切关系,因此,又可利用它来研究天体物理。前者我们叫它是宇宙线高能物理学,后者我们叫它是宇宙线天体物理学,总称为宇宙线物理学。

二、宇宙线的发现

宇宙线的发现许许多多其他新现象的发现一样,在研究别的过程中,意外地发现了它。在1900年研究空气导电性时,注意到了对一个未知的对空气进行电离的放射源。在这同时,用电离室也观察到这一现象。在排除了所有可能的情况之后,残余的电离仍然存在,甚至在电离室被屏蔽之后,他们仍然还观察到电离。因此可以推测,有比 α 射线和放射性辐射穿透本领更大的射线存在。

1911年用气球将电离室带至高空,发现开始时电离略微有下降,而后随着气球上升电离迅速上升,一直到当时能够达到的5公里的高度。这个实验明显地指出:这个有电离本领的射线来自上空,于是就叫它宇

宙射线。后来用更精密的仪器继续研究,一直到9公里高度,电离仍再上升,其吸收系数远远小于 γ 射线。这可以作为宇宙线存在的证据。

1927年利用磁云室,获得带电粒子径迹的照片。另外一些用计数管的实验能够说明宇宙线是由带电粒子组成的,它的穿透本领远远大于 γ 射线。

同一年,还进行了一个有趣的实验,那就是在从阿姆斯特丹到爪哇的航行中,发现了纬度效应。由于这一效应,在赤道附近,宇宙线强度较低,磁场的水平分量较强,这个结果表明初级宇宙线是带电粒子。

三、研究宇宙线所获得的重大成果

为了能简明扼要加以说明,我们列一表如下:

- | | |
|-------------|---|
| 1911年 | 发现了宇宙线。 |
| 1927年 | 宇宙线的纬度效应的发现。 |
| 1930年 | 发明了用G-M计数管的符合方法。 |
| 1932年 | 发现了正电子。 |
| 1933年 | 用G-M计数管符合方法发现了簇射现象。 |
| 1933年 | 发现了东西效应,说明了初级宇宙线是带正电的粒子。 |
| 1933年 | 用G-M计数管控制云室膨胀。 |
| 1937年 | μ 介子的发现。 |
| 1937年 | 研究发现了1937年4月伴随磁暴出现了全世界性的宇宙线减少,称此为福布什减少。 |
| 1938年 | 发现了广延大气簇射。 |
| 1939年 | 发现宇宙线27天的强度周期变化。 |
| 1942年 | 1942年2月28日太阳耀斑的发生伴随着宇宙线强度的反常增加。 |
| 1947年 | 发现了奇异粒子——K介子。 |
| 1947年 | 用改进和发展了的核乳胶发现了 π 介子。 |
| 1949年 | 发现了 μ 介原子 α 射线,较系统和定量地用实验证明 μ 介子是非强作用粒子。 |
| 1950年—1951年 | 在奇异粒子研究中,发现了 Δ^0 超子,随后继续发现了 $\Sigma^{\pm}$ 等超子。 |
| 1958年 | 在人造卫星上发现了范阿伦辐射带。 |
| 1962年 | 用火箭载薄窗G-M计数管发现了 α 射线星(SCO-1天蝎座)。 |
| 1971年 | α 粒子的发现。 |
| 1973年 | 在卫星上发现了 γ 射线爆丛。 |

四、在宇宙线领域中,重大技术上的发展 带来物理上的重要发现

宇宙线研究的重要发现与探测技术和手段的重大突破及改进有密切关系。1927 年用磁云室观察到带电粒子的径迹。1930 年发明了用多个计数管组成的符合法,测得了著名的罗西曲线,后来又用于穿透簇射和广延大气簇射,至今这个方法的基本原理仍在广泛地使用。1933 年用 G-M 计数管控制云室膨胀的方法,使云室能选择所需范围的事例,导致了正电子、 μ 介子、 K^0 介子、 Λ^0 超子、 Σ 超子等等的发现。核乳胶的改进和发展很快地发现了 π 介子,至今核乳胶仍为高能物理研究中有力的探测器。气球、火箭、人造卫星的发展,推动宇宙线天体物理的迅速发展。如 1958 年范阿伦带的发现,它对于发射人造卫星和空间航行时,绕过辐射带,使所带仪器免受损伤等都有重要意义。 X 射线星、 r 射线爆丛等等都是利用上述三个手段发现的。这些发现开辟了天文学研究的新领域。

五、早期宇宙线研究与理论发展的互相推动

1911 年宇宙线的发现及随后 40 年的研究工作开创了“基本”粒子物理学。在正电子发现之后,使理论物理学界大为震惊,他们把很大的注意力放在宇宙线的研究上。

宇宙线大量实验结果,直接推动了量子电动力学的发展。例如:在量子力学基础上发展了电离损失的理论,因而解释了宇宙线硬成分 Z/A 的吸收规律;在软成分的处理中,进一步揭露了量子电动力学的用途。对各种辐射过程,包括电子对产生过程进行研究,把韧致辐射与对产生截面表示为 Bethe-Heitler 公式。这项理论计算,后来分别为 G-M 计数管组成的符合装置观察到的簇射现象和在云室中获得的簇射照片所证实。

众所周知,日本物理学家汤川秀树引入的介子理论,对 μ 介子的发现有直接关系。进一步研究表明:这一发现与汤川理论第三特性相矛盾——核的强相互作用。而对于 μ 介子性质的研究,知道它穿过很厚的物质时,相互作用很弱。但是,后来在很厚的吸收物下,又能观察到爆丛的现象即穿透簇射。在 1938 年有人就主张把这个现象归结为多重介子的产生,而多重介子产生还难于用量子场论体系的理论很好地解释。

从 μ 介子发现到 π 介子发现,经历了十年之久。在这期间,虽然理论物理工作者做了大量工作,实验工作者也付出了许多的辛勤劳动,理论和实验都有很大的发展,但由于第二次世界大战的关系,研究工作也受到了相当大的影响。直到 π 介子发现后,才较好地解决了这个问题。但在穿透簇射研究方面,介子的多重产生还是多次产生仍然在争论。这中间一个重要问题是:宇宙线的实验由于它流强弱,靶物质多用重元素,不

容易评判这个争论。直到 3Gev 加速器建成,在氢气扩散云室中的核作用照片上,才很快地解决了这个问题。

在研究穿透簇射过程中,出乎意外地发现了奇异粒子(即重介子和各种超子),这一发现在理论上遇到了很大的困难。直到 3Gev 加速器建成后,获得了 Λ^0 超子和 K^0 介子的协同产生事例。因而出现了盖尔曼西岛法则才得到解释。

六、宇宙线高能的研究仍然对高能物理 起尖兵的作用

在五十年代以前,宇宙线的研究的中心课题是高能物理。而高能物理唯一的手段是宇宙线高能粒子。之后由于高能加速器的发展,打破了宇宙线作为高能粒子流唯一提供者的局面,但是仍不能忽视在宇宙线领域更高能量范围的研究工作。宇宙线的能量高,但成份复杂,粒子流太弱,适合于做定性的工作,也就是说起侦察兵的作用,它对建造多大能量的加速器,自然会起应有的作用。例如:在广延大气簇射研究中,曾发现了大横动量的现象,多重介子产生中多重数随初能的关系近似 $E^{1/4}$ 或对数关系,超高能作用截面随能量增长的迹象等等,都被高能加速器方面的工作所证实。

最近提出要建造 (400+400) Gev 的对撞机,其实实验根据就有用大面积乳胶室所获得的二个新现象。一个是在实验装置上空 50 米处的大气中产生的核作用事例,这是一个产生了 50 多个核作用粒子而没有看见 π^0 介子的事例,它可能是 N 、 $\bar{N}$ 对的多重产生,能量 $\geq 10,000\text{TeV}$ 。而另一个例子是广延大气簇射早期状态,它由上百个小簇射构成粒子云。初步分析表明:事例由 $\sim 10^3$ 个粒子组成,它的分布与能谱和单个小簇射是不一致的,这个事例的总能量约为 16000TeV 。在广延大气簇射的纵向发展比理论预言的快,推算多重数符合 $E^{1/2}$ 的规律,这比重数正比于 $E^{1/4}$ 或 $\ln E$ 要快。其他新苗头不在此一一列举。

七、宇宙线天文物理是宇宙线物理学 的重点

宇宙线发现之后,一直推动着天体物理和地球物理的发展。例如:宇宙线纬度效应、东西方向效应,表明了地球磁场的效应。福布什的减少,说明了随着磁暴出现了全世界宇宙线强度的减弱,而磁暴是与太阳黑子的活动有密切关系。宇宙线 27 天的周期性强度变化是太阳自转 27 天周期的反应,宇宙线 11.2 年周期性变化是太阳黑子活动周期所造成的。

据一项统计,世界上每隔 6 年左右一小旱,11 年一大旱。气象工作者还发现大范围的水、旱、寒的年份也有明显的十一年左右的周期,这些年份往往出现在太阳黑子极值年附近。在太阳活动的年代,旱涝灾害多,弱的年代就相对地少一些,当然这些规律也不太清

楚。宇宙线与太阳活动的 11.2 年周期性,很可能与全世界的大气候有一定联系。

太阳活动的研究,也可以进一步说:太阳宇宙线的研究,用气球、火箭、人造卫星来观察,是最重要的手段。但是,地面台站长期的记录和观察仍有重要作用。目前世界上已有一百多个宇宙线强度记录站,除少数在高山上,多数分布在世界各种地面高度。这方面的工作曾为 1957 年国际地球物理年的观测项目之一。在这之后,又形成了国际数据中心。另外,太阳耀斑发射大量太阳宇宙线粒子(能量不大高),太阳风直接影响大气外层的磁场分布等等。因此,这方面的工作对于研究太阳物理和地球物理有重要作用。因为太阳对于地球上的人类有着极密切的关系,地球的能源主要来自太阳的光辐射,因此太阳宇宙线的研究有着重要意义。

天体的研究,早年主要是光学观察,而后发展到射电观察。在 1962 年,利用火箭装置三个薄云母窗 G-M 计数管,在研究太阳辐射引起的月面荧光 X 射线时,意外地发现在太阳系外位于天蝎座有一个很强的 X 射线源(SCOX-1) X 射线星。它的 X 射线的功率是太阳总辐射功率的一千倍至一万倍。目前已发现几百个这样的天体,这些 X 射线源有的发射区很小,有的又象是弥散源,分布在一定范围内。这方面的工作又叫做 X 射线天文学。 γ 射线的研究也有大量的工作,它的观察比较困难一些。这方面又发展成为 γ 射线天文学。

美国用于监视地面核爆炸的人造卫星偶然观察到有 γ 射线暴丛,到现在已发现有 42 个。其中约有 20—25 个的方向粗略知道,4 个在天鹅座 CygX-1。 γ 射线暴的特点是持续时间短(总持续时间是 0.1 秒—100 秒,单个脉冲的持续时间为 0.02 秒至 10 秒,上升时间为 0.02 秒至 1 秒),而能流很强(总能量是 3×10^{-6} — 5×10^{-4} 尔格/厘米²),到目前为止,这是直接能够观测到的最快的和可能最强大的能量释放的现象。虽然对它的起源还很不了解,但是已引起人们的极大兴趣。

宇宙线带电粒子受到宇宙空间磁场的调制,不太可能观察到它们的对应天体。但是能量大于 10^{16} 电子伏以上时,银河系磁场不能贮存它,所以银河系内起源的极高能的粒子,应该呈显各向异性,但是至少到 10^{19} 电子伏的粒子,未发现明显的方向性。可是这样高能量的粒子,都是由广延大气簇射装置来间接观察的,因此很难说明这方面的情况。如果有更好的方法,可能会出现新的局面。

综上所述,可以看出:进行宇宙线天文学的研究,包括 X 射线、 γ 射线, γ 射线暴丛和极高能宇宙线天文学,已为并将再为天文学开辟新的更广阔的领域。

宇宙线物理学是研究“一尺之捶,日取其半,万世不竭”的无限小,到“坐地日行八万里,巡天遥看一千河”的无限大的广阔领域。也就是说:这门边缘学科将把微观世界和宏观世界联系起来!