

等离子

体家族

杜 钧 福

古代中国人把宇宙万物归结为金、木、水、火、土五种基本元素——五行。而古代希腊人则把世界看成是由土、水、气、火四种基本物质构成。从现代科学的观点来看，古代希腊人的观点更接近实际一些。因为他们所归纳的四种基本物质恰恰对应于现代物理学中的四种物态——固体、液体、气体与等离子体。

随着温度升高，物质逐渐由固体变为液体，以至于气体。当温度升至几千度到几万度时，气体的分子或原子就会失去电子成为带正电的离子，失去的电子成为自由电子。这个过程称为电离。当气体中的离子和电子充分多时，这些带电粒子之间，以及带电粒子与环境之间的电磁相互作用将成为主要的作用。这种电离气体称为等离子体，又称为物质的第四态。

百分之九十九以上的宇宙是由等离子体组成的。但人类对于物质的第四态认识得最晚。这是因为：虽然等离子体在宇宙间到处都有，然而在我们生活的环境中却很稀少。在地球的生物圈中，唯一自然产生的等离子体可能就是转瞬即逝，因而很难研究的闪电。可以这样认为：人类恰恰生活在那不到百分之非等离子体物态之中。

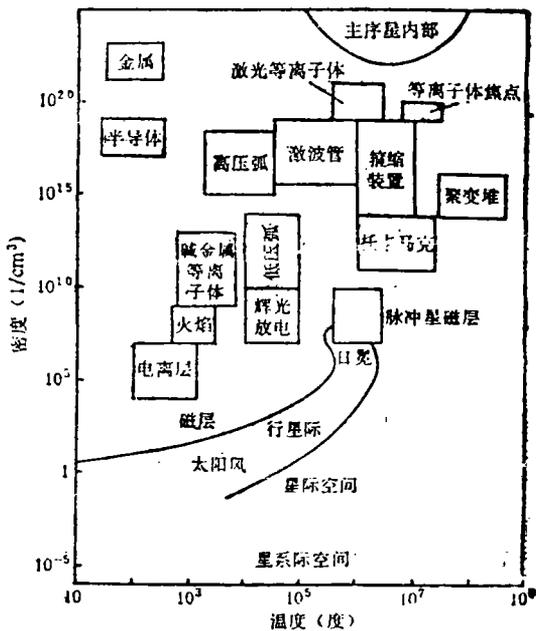
虽然人类对于等离子体认识得最晚，只有不到一百年的时间。但在这一段时间内，人类发现并且创造出了形形色色的等离子体。为了介绍这些等离子体，并指出它们各自在整个等离子体家族中处于什么地位，我们用参数范围图来表示它们。这个图的横轴表示温度，单位为摄氏度；纵轴表示密度，单位为每立方厘米内的粒子数。不同类型的等离子体按这两个参数表示在图的相应位置上。

我们从古代希腊人所说的第四种基本物质——火，或者说火焰开始。一般的火焰只有几百度到一、二千度的温度，其中的带电粒子所占比例很小，只能勉强算是等离子体。较火焰温度稍高的为碱金属等离子体。这是在钠、钾等金属蒸汽中产生的等离子体。它较易得到，而且比较稳定。使用这样的等离子体所作的物理研究在等离子体物理发展史上曾起过十分重要的作用。

辉光放电是在气压较低的环境下放电产生的等离子体，在历史上很早就经过充分研究。近年来，利用不同气体中的辉光放电作用发展了一种称为气相沉积的技术，在制造各种薄膜等重要应用中，取得了很大进展。

如果在较高的气压，直至大气压下放电，放电就会变为电弧。它们依气压高低区分为高压弧和低压弧。这类型的等离子体在工业上获得较多的应用。它们包括等离子体焊接，等离子体冶金，等离子体喷涂等。自然界的闪电也是一种电弧。

另一种产生等离子体的装置称为激波管。这种装置用激波加热的方法得到几万度以上的等离子体，非常适合研究一些物质在高温下的物理化学性质。



图

波段的电磁波发射，许多国家为此专门发射卫星、气球和在南半球建立新的广延大气簇射阵列。

60年代以来利用高山大面积乳胶室研究 10^{11} — 10^{17} eV 的核作用取得了重要成果并取得相当大的进展；如 10^{11} eV 能区碳靶中超高能核作用主要特性均被西欧中心 SPS 对撞上的实验所证实。1970年以来我国

开展了利用高山乳胶室研究超高能核作用的课题，从1980年开始中日两国合作扩大了甘巴拉山乳胶室的规模，目前甘巴拉山乳胶室在世界四个组中高度最高（5500米），超高能核作用事例积累率居第二位。这方面的研究工作取得了可喜成果并为国际同行所重视。

气球载乳胶室在研究 10^{14} eV 能区的核-核作用和

以上这几种等离子体在参数范围图中处于左上方。虽然从日常生活的标准来看,它们的温度相当高。但从整个等离子体家族来看,它们只能称为低温等离子体。由于它们的温度相对地较低,以目前的技术水平容易得到它,故在很多方面得到广泛应用。

在参数范围图上,处于低温等离子体右方,即图的右上方,是温度在几十万度到几十亿度的高温等离子体。如果温度达到几十亿度,一些轻原子核如氢的同位素氘、氚的核,或锂核,便会反应生成重核并放出大量的能量。这个过程称为聚变。氢弹爆炸时,聚变反应的能量在瞬间释放出来。而我们的希望则是使这一反应缓慢进行,实现受控聚变,并进一步在聚变堆中把这一能量转化为电能。这样的聚变堆目前尚未建成。图示的几种人造的高温等离子体装置,如托卡马克等,都是为实现受控聚变而研制的。在这样一些设备以及未来的聚变堆上产生的高温等离子体,可称为聚变等离子体。

聚变等离子体可分为两类。第一类以激光产生的等离子体为代表。这样的等离子体密度较高,不用磁场约束,称为惯性约束等离子体。第二类聚变等离子体的主要类型有托卡马克、箍缩装置、等离子体焦点等。在這樣的装置中,都用磁场来约束带电粒子,所以这一类等离子体称为磁约束等离子体。

上述低温等离子体和聚变等离子体中,绝大部分是人造等离子体。处于参数范围图下方的各种等离子体,则完全是在自然界存在的,称为空间等离子体及天体等离子体。这些等离子体处于天体周围及天体之间。其中,距离我们最近的是地球的电离层。它是地球的上层大气因太阳辐射而部分电离所引起的。它距地面的高度为从几十公里到几百公里的范围。在电离层以上,等离子体密度逐渐减少,这个区域称为磁层。

磁层以外的空间称为行星际空间。在行星际空间中,充满着来自太阳的带电粒子辐射。这一辐射称为太阳风。随着与太阳距离的不断增大,太阳风的参数不断变化。因此,它在参数范围图上划出了一个弧形区域。太阳风起源于太阳大气的最外层。这个区域称为日冕。日冕是一种较稀薄而完全电离的等离子体。

和地球一样,其它一些行星周围也存在着磁层。和太阳一样,其它一些恒星,以及其它天体附近,也存在着各种等离子体。例如,有一种称为脉冲星的天体,它因发射周期性的脉冲电磁波而得名。经研究得知它

测量宇宙线重核成份方面取得了初步但很好的结果。应该提到1972年在宇宙线中发现了 D^+ 粒子,它是人们首次得到的粲介子。

从上面我们可以看出:宇宙线的研究既涉及微观现象也涉及到宏观现象,并沟通了两者之间的关联。宇宙线物理研究主要是要探索下面一些问题:高能氢核

是一种主要由中子组成而体积很小,密度极大的中子星。中子星磁层中的磁场可达 10^{12} 高斯以上。然而地球磁场还不到1高斯,由此我们不难想象,处于脉冲星磁层中的等离子体的性质是极其特殊的。

在恒星际空间和星系际空间,等离子体是极其稀薄的,平均每立方厘米还不到一个粒子。

位于参数范围图下方的这些空间等离子体和天体等离子体占据了百分之九十九以上的宇宙空间。但是,如果从质量来说,这些等离子体只占已知宇宙的不到百分之一。另外百分之九十九以上的质量哪里去了呢?产生这个疑问的原因是我们尚未谈到一种最重要的天体等离子体。也就是恒星这样的天体内部的等离子体。

大多数恒星内部进行着激烈的聚变反应,因而维持了很高的温度,物质呈完全电离的等离子体态。作为一个例子,我们在参数范围图上标出了主序星内部等离子体所处的位置。银河系大部分恒星属于这个范围。

恒星内部等离子体的参数如温度和密度与我们所要达到的聚变堆等离子体相近。所以,我们进行聚变等离子体研究,正是模仿恒星内部的聚变反应,以便将来能制造出一个个小太阳——用之不竭的能源。但是,处于恒星内部的等离子体,由于恒星有巨大的质量,并承受了巨大压力,其特性必然与人造的聚变等离子体有很大区别。因此,目前对这种等离子体主要进行理论上的研究,尚无法进行直接观测。它仍然是一个未知的世界。

除去上述的低温等离子体、聚变等离子体和空间及天体等离子体这三个分支以外,在等离子体家族的参数范围图上还有一类等离子体。这就是居于图左上角的金属和半导体。这样的一些物质形态本应属于固体,但由于其中存在着自由电子,因而某些性质类似于等离子体,故通称固体等离子体。

以上我们主要从温度和密度这两个参数来划分和介绍了庞大的等离子体家族的主要成员。还应补充一点的是它还应包括仅由电子或正离子组成的非中性等离子体。

据说,原始生命起源于地球上原始大气的闪电之中。生命赖以存在和繁衍的能量也来源于太阳。而人类未来可能使用的能源也是发生于高温等离子体的聚变反应。故等离子体这一物质第四态虽然最晚为人们所认识,但对人类是极重要的。

(质子)到铀核(甚至超铀元素)这些初级宇宙线粒子是如何产生和加速的?它们在漫漫宇宙空间里如何传播?在空间各种物理环境下其高能物理变化过程又如何?各个电磁波段的发射机制及其关联和星体演化中的物理过程是如何形成的?为了逐步探索上述问题,需从以下一些方面来进行观测和研究。在方法上分