

气体粒子探测器回顾

谢一冈



辐射粒子探测器是粒子物理、核物理、放射性测量等领域研究的重要

手段,且广泛应用于国民经济和国防等多种领域。气体、闪烁和半导体探测器是近几十年来先后发展起来的三类主要探测器。20世纪70年代末,欧洲核子研究中心(CERN)的夏帕克(G. Charpak)因发明了多丝正比室获得了1992年诺贝尔物理学奖,促使气体探测器得到了充分发展,在高能物理等领域中起到了重要作用,其他两类探测器也得到飞速发展。本文将对历史上的气体探测器进行简单回顾。

一、探测对象

粒子探测器用于探测自然界天然或人工产生的各种辐射粒子,主要是带电粒子和中性粒子。这些粒子从宇宙天体的形成到我们的日常生活以及在国民经济的各种应用中无处不在。

带电粒子包括重粒子,如各种原子核,从重到轻如氧、氦(即 α 粒子)、氘,氦,氢(即质子)等,大家熟悉的最轻的粒子是电子(它的质量是 9.11×10^{-31} 千克),它比质子轻1850倍,当然还有我们不熟悉的穿透力极强的更轻的中微子。质量在电子和质子之间的有多种介子,它们带正电或带负电荷(也有中性的),例如 π 介子和 k 介子。 μ 子与电子都属于轻子,只有带正负电荷的。早在二十世纪三四十年代发现这些粒子都是从地球外射到地面的,故被称为宇宙线。其中射到地面的 μ 子的比例最大,相当于每平方厘米每分钟接收到1个。若人体表面积按一平方米考虑,那每分钟每人受到约上万个 μ 子的照射。上面说到的这些粒子也可以人工方法产生,如利用粒子加速器轰击靶就可以得到。

对辐射粒子,常用的能量单位称为电子伏特(eV)。即一个电子(电量为 1.602×10^{-19} 库仑)在1伏特电压下所作的功。其实这个能量单位是非常小的,相当于我们家庭通用的一度电(1千瓦时)的 4.4×10^{-26} 倍,也就是在小数点后26个零后才有数。常用的单位还有千电子伏(keV)和兆电子伏

(MeV)。天体宇宙线粒子的能量一般都非常高,从 10^9 eV(GeV)、 10^{12} eV(TeV),直到 10^{16} eV以上。

电中性的粒子最基本的是中子,它的质量和质子相同。从能量考虑可分为:小于1keV为慢中子,与物质原子达到热平衡,即能量达到0.025eV的中子为热中子,能量再低到0.002eV的就称为冷中子;0.5~10MeV为快中子。在原子能利用和研究物质的各种性质中,中子扮演很重要的角色。电中性粒子当然还有上面谈到的中性介子。各种光子中我们最熟悉的的就是可见光,它的波长范围为约300纳米(紫)到780纳米(红)左右,向短波方向延伸为紫外区、X射线直到 γ 射线区,向长波方向延伸则到红外区,直到我们人身发热的远红外区和电视手机接收的电磁波。这里要强调的一点是在1921年,爱因斯坦因发现了光电效应的规律而获得了该年的诺贝尔物理学奖。这样,人们知道光既有电磁波的波动性又有量子性。光量子的能量用 $h\nu$ 表示, h 称为普朗克常数, ν 就是光波的频率。大家知道,任何波的波长同频率都有反比关系,也就是波长同光子能量成反比。这里介绍一个很有用的图表,它表明不同电磁波波长与光子能量同物体尺度的关系(图1)。

波长(λ)和能量(E)的反比关系式可表示为 $E=12.4/\lambda$ 。其中 E 的单位为keV, λ 的单位为埃(1埃= 10^{-8} 厘米)。埃这个单位常在原子物理中使用。因为1埃恰是原子的尺度,大家从图1中就可以看出,相当于12.4keV。另外当光子能量小到万分之一电子伏(10^{-4} eV)时它的波长相当于人体的尺度。也就是我们通常用的无线电通信波长。波长越长,其波动性越突出,而量子性越不显著;反之波长越短,其量子性越强,波动性越淡出。例如医学上用的X射线在10keV量级, γ 射线CT在MeV量级,人们就常说后者比前者硬得多,也就是说光子的能量高得多。

最后,人们经常说到天然或人工放射性辐射 α 、 β 、 γ 射线,其实 α 就是能量为MeV量级的氦原子核, β 是能量连续分布的电子, γ 是能量大于约0.1MeV的光子。

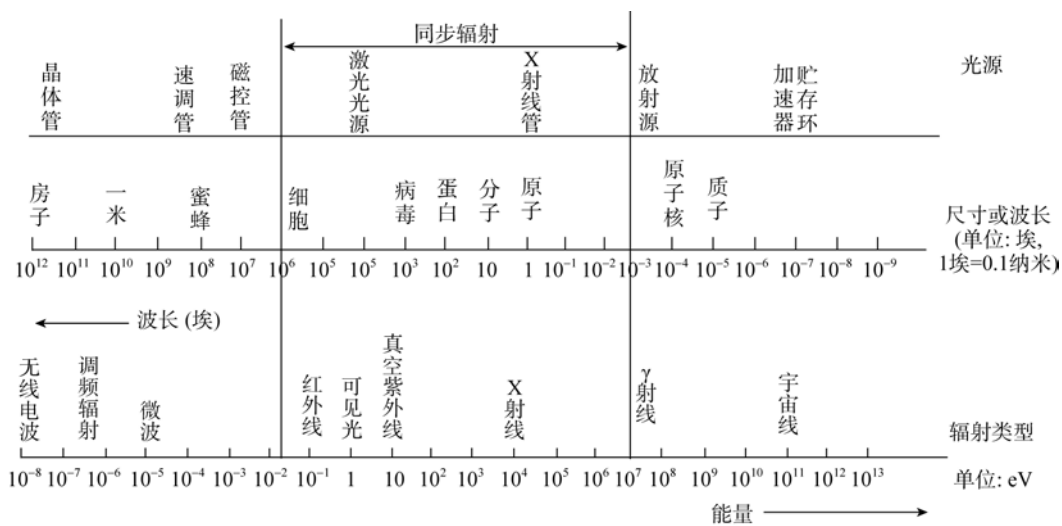


图 1

二、气体探测器回顾与简介

各种射线（包括各种辐射粒子）是如何被探测器探测到的呢？这要借助它们与物质的相互作用，这里只进行最简单的介绍。

带电粒子通过气体介质时，会把介质原子外围的电子拉出，也就是介质原子被电离了。这种电离作用就产生了电子离子对，这是气体探测的最基本的效应。中性粒子如光子、中子、中微子等则是通过直接、间接的次级产物而探测的。光子与物质作用时，根据其能量通过三种效应产生带电粒子，即光子把原子的核外电子打出来的光电效应（光子能量小于 100keV，例如能量小于 50 keV 的 X 射线）；光子同原子中的电子按自由电子作用机制的康普顿-吴有训效应（光子能量 1~5MeV）；以及光子能量大于两个电子静止质量（大于 1.02 MeV）时出现的电子对产生效应。相应地中子的探测根据其能量又有多种次级效应，如能量较低的慢中子同硼和锂等的核反应产生很重的 α 粒子，能量较高的快中子会与轻原子核（如碳氢化合物的氢核，即质子和碳核）产生弹性碰撞。通过探测这些高速运动带电核的电离即可探测中子。当然还有一些效应如韧致辐射和高能粒子的级联簇射等，这里就不再介绍了。

1. 气体电离和电离室

要探测上面说到的那些辐射粒子，主要有三类探测器，即气体探测器、闪烁探测器和半导体探测器。历史上最早使用的是利用电离效应的气体探测器。让我们先回忆一下电子发现前后的历史。1898 年汤姆孙发现电子时使用的实验装置与我们现在用

的电视显像管和示波管的原理很相似。当时发现在实验装置的真空室中，由阴极发射的一种微粒在电场和磁场中偏转很严重，这种微粒的质量非常轻，取名为电子。汤姆孙测定出它的电荷与质量的比值。不久，他们加入气体后发现在阳极和阴极间的空间内出现放电甚至发光。这使科学家回忆起 1833 年，法拉第注意到在电极板间加电压的液体中测量出电流，就称这种液体为电解液，提出了电解定律。其中向阴极运动最后被阴极吸收的称为阳离子，向阳极运动被吸收的称为阴离子，由此形成的电流称为电离电流。但是，科学家注意到，在发现电子的装置的电场下，气体中不会自然地形成电离电流，而只有当某种射线穿过时才能出现。由于 1895 年伦琴已经发现了 X 射线，1896 年汤姆孙利用 X 射线发现了气体电离现象。电子发现后很快又证明，飘向阳极的是很轻的电子，而飘向阴极的是气体分子被剥离出电子后的重离子。这样探测辐射粒子的电离室就应运而生。例如，1912 年赫斯（Victor Hess）在升空的气球上，利用气体电离的验电器发现随高度增加气体电离越厉害，于是证明这是天外来射线，取名为宇宙线。这可以说是人类第一次探索到太空粒子，之后的两年内人们用电离室进一步研究了宇宙线。

20 世纪初期出现的测量辐射粒子的电离室是简单地在两个平板电极上加电压，其间充以特定气体，利用辐射粒子的电离效应测定其外电路中的电流，这就是电流电离室。当很稀少的粒子射入电极空间时，在阳极上就可以观察到负信号，同时在阴

极产生正信号。在电极的外电路上加一个电阻就可在电阻两端得到输出脉冲的电压信号。这就称为脉冲电离室。1932年中子的发现和1939年核裂变的发现都用了脉冲电离室。

根据需求可做成不同的电极形状，主要是平板型和圆柱型。平板型电极间隙中电场强度是均匀的，这很容易理解。我们将从圆柱型电极（图2）上所收集的电荷和两电极间所加电压的关系曲线（图3）出发，一步一步地讨论图3中的4个区域，即电离室区，正比区，有限正比区和盖革-米勒区。

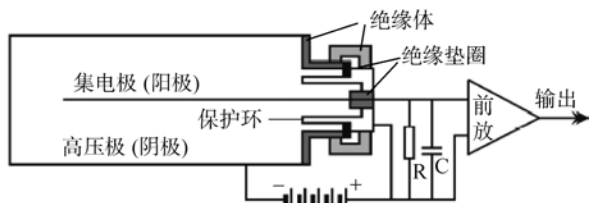


图2

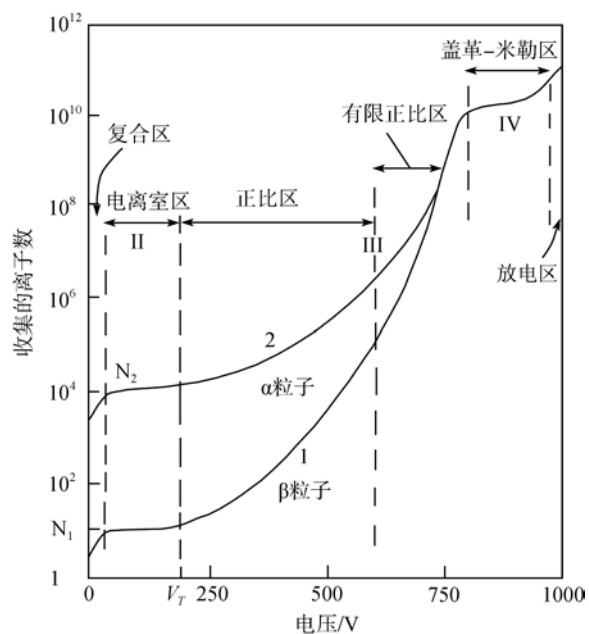


图3

圆柱型电离室中间的圆棒一般为阳极，称为集电极，在外电路的负载上读取信号。外圆筒为阴极。重要的是作为电离室，圆棒的半径一般不能太细，以便在它周围空间的电场不太大而且比较均匀，其理由在下面立刻就会理解。

气体电离的一个重要参数是电离能损，也就是入射带电粒子在单位长度的路径上损失的自身能量，这个能量用于单位长度气体中产生的总电子-

离子对（以下皆简称离子对）的个数 n ，以及产生这一电子-离子对所需要做的功，这个功称为电离功用 w 来表示，显然电离能损就是二者的乘积 nw 。这些参数取决于粒子和气体（气体常用电离功小且稳定的惰性气体，如氩气及其混合气），这些粒子进入电离室在径迹旁引起的直接电离称为原电离，加上次生效应产生的离子对称为总电离。 n 就是总电离相应的离子对数。这几个物理量是理解电离室原理很重要的基础。

从图3可见，当两极上的电压很低时，由于电离的离子对向两极运动的速度都很低，很容易有复合，电极上产生的电流较小。当电压继续增大（如图中200伏左右），复合效应大大减少，达到饱和（参见图中的复合区和电离室区），可见图中纵轴即收集的离子对数（即电离电流）只同入射粒子的种类有关。如图3所示， α 和 β 粒子的饱和电流差别很大（附带说一句，记录累积电量的电离室称为电流电离室，对记录大通量粒子流，在剂量学和束流监测等领域有广泛应用，当记录的是陆续到来的单个粒子时，得到的就是分离的电脉冲的幅度）。随着电压继续增高，即出现正比区和盖革-米勒区等。

这里强调一下，脉冲的形状取决于室内的电离产生的离子对向两侧电极漂移的速度。由电磁学的基本原理可知：在电场内任何电荷的运动都“同时”在电极的阴、阳极上感应出相应的正负信号，并不是当电子到达阳极和正离子到阴极被收集时才产生电流。因此，阳极上负极性脉冲和阴极上的正脉冲的幅度随时间增加（当然若阴极接地，就看不出正信号了，反之亦然）。这幅度上升到最大值（精确说由10%上升到90%）的时间称为上升时间，它和脉冲形状都与电子漂移速度（约为1厘米/微秒）与正离子的漂移速度（约为1厘米/毫秒）有密切关系，因为电子漂移速度比正离子漂移速度快约三个数量级。这样，脉冲幅度上升的快成分主要由电子漂移贡献，慢成分主要由离子漂移贡献。总的说来最后的脉冲幅度 ΔV 和充到图2中电容C上的电量有简单关系 $\Delta V=Q/C$ 。因负载电阻R同时在放电，因此实际波形和时间常数RC以及粒子入射位置都有密切关系。

2. 正比管和雪崩效应

1928年盖格从圆柱型电离室发展出了正比管。圆柱形正比管的横截面如图4所示。当中间的阳极

圆棒采用极细的金属丝时，从圆柱形电场的径向分布的 $1/r$ 曲线可以看出丝附近的电场很强（可以大到几万伏/厘米）。注意这里丝必须很细（小于 50 微米），而且是阳极。因为入射粒子产生的电离电子漂移到阳极附近的高电场区时，有机会继续与气体原子碰撞使原子电离产生新的离子对。这些新产生的电子在渡越到阳极的过程中又有机会产生离子对，这就是级联雪崩过程。这个碰撞几率同所谓的第一汤森系数有关。一个电子经过多次级联碰撞产生到达阳极的总电子数，称为气体倍增系数，这个过程称为电子雪崩过程。因为产生的总电荷量同入射粒子在管子中沉积的能量（即能损和离子对个数）成正比，因此称为正比管计数器，即工作在图 3 中的正比区。它常用来计数，也能用来测量粒子沉积能量。注意，产生的脉冲信号只能是负极性，其形状与丝附近的电子渡越到阳极，和形成的正离子鞘从阳极附近渡越到阴极并在阳极上共同感应到的过程有密切关系。一般脉冲上升时间就相当于这个渡越时间，为几十到几百纳秒。注意，脉冲的快成分中主要是正离子鞘在丝高场区渡越做功的贡献，等量的电子因为都在阳极附近，只渡越很短的距离就被阳极收集了，做的功很小，因而对信号脉冲的贡献也就很小，这是同脉冲电离室很不相同之处。和脉冲电离室一样，阳极电路上的负载电阻越小，放电越快，脉冲就越窄。一般负载电阻 R 为 $1\sim 10\text{ k}\Omega$ 。相应的脉冲宽度为几微秒到几十微秒。正比管直到现在还在一些领域大量使用。

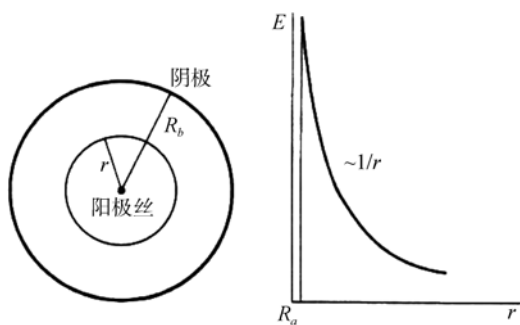


图 4

3. 盖格-米勒计数管

也是在 1928 年，在正比管计数器基础上发明了盖格-米勒 (Geiger-Müller) 计数管，也常称 G-M 计数管。它形状上和正比管计数器相同，但管内所充气体更有特点。当电压加到更高时，在电子雪崩

过程中被激发的气体原子会产生出许多光子，这些光子又会产生光生电子。这样就额外地增加了许多电子。总信号不再和原初电离成正比，这就相当于工作在图 3 中的有限正比区。当电压继续增加时，因为只在丝附近（如小于 $0.1\sim 0.2$ 毫米）才有强电场。由此，放电持续沿着阳极丝进行，而由于工作气体具有更多的多原子分子气体（如甲烷、二氧化碳、异丁烷等），容易吸收光子，使放电“猝灭”而自然终止。或者在管子的阳极与高压电源间加一个很大的电阻，这样持续电流使电阻上产生电压降，管子电极间的电场随之减小也可使放电停止，称为“外猝灭”。人们称这种沿轴丝的放电为“盖格放电”。显然盖格管的优点是有很大的信号，可以省略前级放大器，但是它既不能测量粒子能量，也不能用来沿轴丝方向定位。另外，因为在阳极丝附近的正离子漂移比电子慢数千倍，在丝附近形成一个正离子鞘，使丝附近电场降低。当正离子鞘渡越到阴极后，丝附近电场才恢复，因此出现一段不灵敏的死时间，这使最大计数率受到限制。在应用方面，因为它的信号很大，至今在各种放射性测量领域仍然有广泛的用途。

4. 多丝正比室和漂移室

20 世纪 70 年代，由于高能物理实验迫切要求有大尺度位置灵敏探测器多路定位，但是用大量独立的正比管组合起来，机械组装和位置精度都受到限制。由此欧洲核子中心的恰帕克发明了多丝正比室（图 5）。中间一排阳极丝平行置于两个阴极平面中间，阴极可以由丝组成，也可以用印制板上的金属条组成，并使它们与阳极丝方向垂直。这样由阳极丝和阴极丝（或条）上的信号就可以确定入射粒子的二维位置了。在这个研究过程中有一个困扰但又是关键性的问题，即正比管之间有阴极壁才使各管独立，互不影响；但在多丝正比室中无电屏蔽的阳极丝之间怎样才能没有互相干扰呢？经过多次试验证明，若粒子入射时，有某一根丝着火，当正离子鞘从阳极向阴极渡越的过程中，开始阶段在阳极该丝及其邻近丝都感应负信号，但到达丝附近时该被击中的丝上感应出负信号，但相邻丝则是正信号。可是又由于丝间的耦合电容会使相邻丝感应出同极性的负信号。二者在相邻丝上的效应互相抵消。因此这些平行阳极丝可看成是相互独立的。

后来将丝间距离拉长到几个厘米甚至更远就发明了漂移室。利用电子由原初粒子位置向阳极丝漂

移的时间 t 和已知的电子漂移速度 v , 就得到了粒子的入射位置 $s=tv$ 。需提出的是开始的时间零点一般要由其他的探测器 (如快闪烁计数器) 或加速器的信号提供。

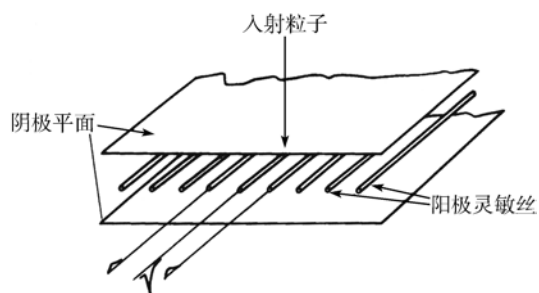


图 5

多丝正比室和漂移室经过十余年的发展和应用, 对高能物理发展做出了巨大的贡献。以后在此基础上又开发出多种以丝室为基础的气体探测器, 如阴极条室、时间投影室、稻草管等。我国为北京谱仪工程 BES 和国际合作都研制出性能很好的漂移室、漂移管、阴极条室和小间隙多丝室等。

5. 流光管和阻性板室

谈到流光, 先说一说闪电。雷雨中的闪电在 20 世纪 30 年代研究很多, 证明它是一种强烈的带阴阳电的两物体之间的贯穿性放电, 并伴有强烈的光。那时已定性地发现: 虽然发光但并不彻底短路击穿, 而只有较弱的束状光斑, 就称为流光。应用到粒子探测器方面, 直到 1977 年才被夏恰帕克注意到。他们利用多丝室观察到流光模式。20 世纪 70 年代国外也研制成用双平面间充氩-氖气并在两极板间加高脉冲电压, 使流光和入射粒子同步产生, 这样就能将粒子入射径迹旁产生的米粒般的流光拍照下来, 这称为流光室。我国也制成了 70 厘米的大面积流光室。1980 年前后 Iarocci 发明了约 1 厘米的方型槽塑料内壁上涂敷石墨, 形成阴极, 在槽中心拉上直径较粗 (100 微米) 的金属丝形成阳极。阳极丝因为较粗, 对照前述的图 4 就可以看出来, 粗丝外的电场沿半径方向有较长的一段高场区。当电压加很高时, 光子起重要雪崩增殖作用, 但是它不再像盖革管那样沿轴丝放电了, 而是沿半径方向发展出米粒似的流光。因为加了较多的多原子分子气体以利于吸收光子, 可使放电“猝灭”。这样产生的信号的电荷量很大, 比正比管 (~ 0.5 皮库仑, 库仑是电荷单位, 皮= 10^{-12}) 大几十倍 (~ 10 皮库仑以

上, 或在 50 欧姆电阻上可以得到几百毫伏)。20 世纪 80 年代国外和国内都在许多大型实验中采用了这种探测器。它的特点是信号大, 从阳极丝上可得到很大的负信号, 利用石墨电极外与电极隔离的金属 X-Y 条又可以读出二维正信号, 那一时期在许多大型实验上得到广泛应用, 我国也曾批量制造, 提供给国际大型实验。

1982 年意大利的 R.Santonico 在两块体电阻值很高 ($10^{11} \sim 10^{12} \Omega \text{cm}$), 且其外敷以石墨电极的平行电木板 (也可用玻璃) 间充以类似流光管的气体 (图 6)。粒子入射时产生流光, 当其电流通过两侧高体电阻时, 在板内产生的电压降突然使间隙内的电场急剧降低, 而使放电停止。其信号大而快。这种探测器被称为阻性板室 (RPC)。图 6 下方为多层结构, 因既有多层, 且各层之间的间隙很小, 因此可提高探测粒子的效率和改进信号响应速度。从 20 世纪 90 年代至今, 在国内外高能界已广泛应用。国内在北京谱仪、西藏羊八井和大亚湾中微子工程中的 μ 探测器都用到。

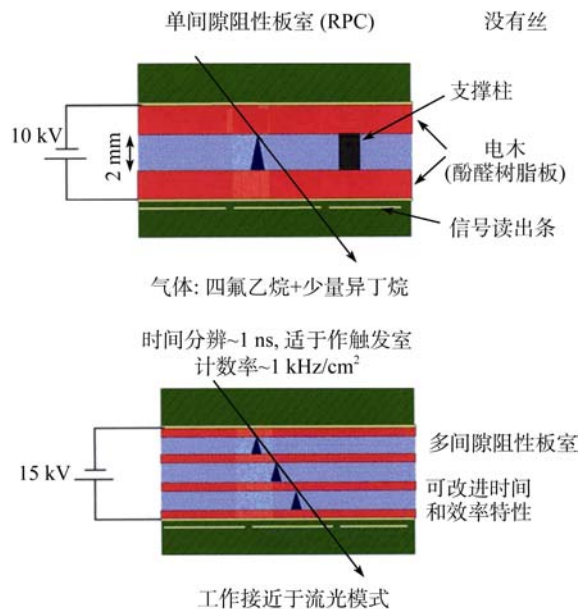


图 6

20 世纪末 21 世纪初, 夏帕克的两位重要助手 F. Sauli 和 Y. Giometaris 分别于 1997 和 1996 年发明了以电子在多孔内雪崩放大和在丝网附近雪崩放大的气体电子倍增器 (Gas Electron Multiplier) —— GEM 和 MicroMegas; 另一位重要助手 Amos Breskin 于 2004 年发明了厚型气体电子倍增器 (THGEM)。以这三类为主的新一代气体探测器称为微结构

WIMPs 暗物质

李明哲 毕效军 张新民

暗物质是 21 世纪宇宙学和粒子物理研究的热点问题。WIMPs 是一种流行的暗物质粒子候选者，即 weakly interacting massive particles 的缩写，译为“弱作用重粒子”。目前我国计划中的暗物质粒子探测实验项目都是围绕着 WIMPs 暗物质开展的。本文将详细地阐述与 WIMPs 暗物质相关的基本问题，并力图澄清一些易于误解的概念。



早在七十多年前，天文学家通过天文观测已经推测到暗物质的存在。之后，大量的天文观测不断积累的数据证实了暗物质的存在。那么什么是暗物质呢？简单来说，暗物质是通过天文观测发现的、不发光的一种物质，它有显著的引力效应。

从粒子物理的观点出发，有质量的中微子是一种暗物质粒子，但它是热暗物质。威尔金森微波各向异性探测器（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe，简称 WMAP）和斯隆数字巡天（SDSS）等天文观测的结果说明，有质量的中微子的质量应当非常小，在暗物质中只能占微小的比例，绝大部分应是所谓的冷的或温的暗物质。那么这些暗物质粒子究竟是什么呢？目前还不清楚。理论物理学家有多种猜测，例如，惰性中微子（Sterile neutrino）温暗物质，引力微子（Gravitino）温暗物质，轴子（Axion）冷暗物质等。文献中，一种比较流行的是 WIMPs，例如，超对称理论中最轻的超对称伴子——中性伴随子（Neutralino）。取决于产生机制，WIMPs

可以为冷的也可以为温的暗物质。目前世界各国科学家，正在进行各种加速器和非加速器实验，试图找到这种 WIMPs 暗物质粒子。在国内，近几年对暗物质暗能量问题大家表现了非常高涨的热情，我国科学家经过多年的研究和探讨，并通过认真调研国际上相关领域的研究现状和发展趋势，特别是结合我国的具体情况已初步绘制了我国

开展暗物质暗能量探测的“地面，地下，空间，极地”的路线图。就暗物质而言，计划中的实验项目包括羊八井暗物质粒子间接探测实验，空间小卫星，空间站暗物质粒子间接探测实验以及在四川锦屏山隧道建设的世界上埋深最大的地下实验室的暗物质直接探测实验。值得指出的是这些实验项目都是针对 WIMPs 而言的，因此本文将重点阐述与 WIMPs 暗物质相关的基本问题，例如：冷的 WIMPs 暗物质；温的 WIMPs 暗物质；超 WIMPs 暗物质；衰变的 WIMPs 暗物质以及正反不对称 WIMPs 暗物质。文章的最后将简单地介绍国际上 WIMPs 暗物质的实验研究状况以及我国开展 WIMPs 暗物质探测的计划。

冷 WIMPs 暗物质

为什么相信 WIMPs 是暗物质呢？其原因有下面几点。（1）就粒子物理而言，WIMPs 是一些流行的新理论（如超对称、额外维空间等理论模型）中一个自然的预言。大家知道，在过去的几十年内我

（MicroPattern）气体探测器（Gas Detector），简称 MPGD。与 20 世纪七八十年代发展的丝室相比，具有极快的时间响应、高计数率（可达 $\sim 10^6/\text{mm}^2$ ）、抗辐射、抗磁场、极限空间分辨率小至亚毫米级，多路读出方便且价格相对低廉，较易于自制等优点，因此近十几年来发展很快，并各有其特点。例如 GEM 和极小的阳极条（X-Y strip）或片（pad）配

合，可做到最小 ~ 40 微米的位置分辨率；MicroMegas 的输出信号可达到很好的时间性能，脉冲上升时间和宽度可分别小于 1 纳秒和 10 纳秒。这三类探测器都在向大面积、高精度（包括能量分辨率和位置分辨率好）、高探测效率等方面发展，目前已应用到许多方面，我们在以后将有专文介绍。

（中国科学院高能物理研究所 100049）