

契伦柯夫辐射及其在 高能物理中的应用

朱永生

一艘轮船在宽阔的河面上行驶，船头劈开平静的水面，掀起层层浪花。在船的左右两侧，可以看到两排阵面清晰的水波，随轮船一起前进。这种生活中常见的现象，与我们要讨论的契伦柯夫辐射却有某种相似之处呢！

(一) 什么是契伦柯夫辐射

迄今为止，人类知道的自然界中的最高速度是真空中光速 c ，经过精确测定，它的数值为 $c = 2.99792458 \times 10^{10}$ 厘米/秒，即将近每秒 30 万公里。无论多高能量的粒子，它的速度只能无限地接近 c ，但永远也不可能与 c 相等。但如果不是在真空中，而是在某种介质（例如某种气体或者水、玻璃）中，情况就不同了。在介质中光的速度减小到 c/n ， n 称为介质的折射率，它永远大于 1。例如一个大气压的任何一种气体的折射率都略大于 1（参见表 1），水的折射率 $n = 1.33$ 。这样光在水中的速度就比空气中慢得多。高能粒子在介质中飞行时，只要飞过的距离不很长，它的速度接近在真空中的速度。这样，在介质中，高能粒子的飞行速度就可能比光在该介质中的速度 c/n 要高。

表 1. 一些气体在 1 大气压、20°C 状况下对于波长 4400 Å 光子的折射率

气体	折射率 n
氦	1.00003267
氖	1.00006285
氢	1.0001320
氮	1.0002820
甲烷	1.0004197
二氧化碳	1.0004279

任何一种带电粒子，例如正、负电子 (e^+ , e^-)、正负 μ 介子、 π 介子、质子、反质子 (P , \bar{P}) 穿过透明介质（各种气体、水等透明液体，有机玻璃等）时，只要粒子速度 v 高于该介质中的光速 c/n ，就会辐射出光子。这种效应是俄国科学家契伦柯夫在 1934 年首先发现的，所以就称为契伦柯夫辐射。由于这种现象仅当粒子速度超过在该介质中的光速时才能发生，所以有人也称它为“超光速辐射”。

(二) 契伦柯夫辐射的特点

契伦柯夫辐射的特点之一是辐射光子有方向性，光子方向与粒子运动方向成一定的夹角 ϑ ，因此契伦柯夫辐射光子形成伞面一样的光锥（见图 1）。夹角 ϑ 仅仅与粒子速度 v 和介质折射率 n 有关：

$$\cos \vartheta = 1/\beta n, \quad (1)$$

这里 $\beta = v/c$ ，即粒子速度与真空中光速之比。

契伦柯夫辐射的另一个重要特点是在近红外区，可见光区和紫外区都可观测到，但光子频率越高，光子数越多。计算表明，紫外区的光子数大约是可见光区的四倍。

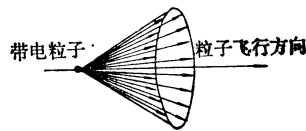


图 1 契伦柯夫辐射光锥

(三) 契伦柯夫辐射应用于高能物理实验

将高能加速器的粒子束打在靶上，会产生许多种次级粒子。它们经过磁场强度一定的磁分析器之后，只剩下动量一定的粒子。但物理实验往往只选用其中的一种粒子我们可以利用契伦柯夫辐射从有多种粒子的束流中将需要的粒子挑选出来。这种技术称为“粒子鉴别”，它是契伦柯夫辐射在高能物理实验中最主要的应用。

鉴别粒子的契伦柯夫计数器主要有两种：阈式和微分式。用气体作为契伦柯夫辐射介质的阈式、微分式计数器的示意图见图 2。

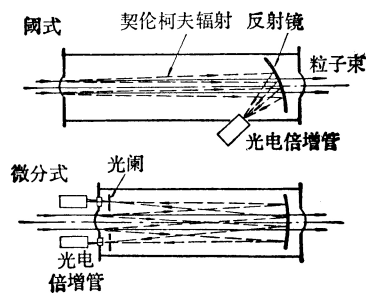


图 2 气体阈式和微分式契伦柯夫计数器结构示意图

(1) 阈式计数器
从 (1) 式可以看到，粒子速度 $\beta \geq 1/n$ 时才能产生契伦柯夫辐射。因此 $\beta_{\text{阈}} = 1/n$ 称为阈速度。带电粒子穿过

小窗进入容器内的气体介质中。假如粒子速度高于与这种气体对应的阈速度，那末就产生契伦柯夫辐射。此辐射被斜放的球面反射镜聚焦到光电倍增管中，产生一个脉冲信号，被电子仪器记录下来。低于阈速度的粒子不能产生辐射，光电倍增管就没有信号输出。这样把阈速度以上和以下的粒子互相区分开了，所以这种计数器称为阈式契伦柯夫计数器。

气体的折射率可通过调节压力来改变。固体和液体的折射率基本上不能改变，因而它们的应用受到很大限制。

(2) 微分式计数器

微分式计数器比阈式计数器前进一步，能够精确地测定粒子的速度。前面讲到，直线运动的带电粒子产生的辐射波面呈圆锥状，如果在粒子的前方放一个半径为 R 的球面反射镜，镜轴与粒子飞行方向重合，那么契伦柯夫辐射被镜面反射后在半径为 $R/2$ 的球面处形成一个光环，光环半径是

$$r = \frac{R}{2} \text{tg} \vartheta, \quad (2)$$

这种现象称为契伦柯夫辐射的环聚焦(参见图3)。如果测量出光环半径 r ，知道了介质折射率 n ，则由(1)、(2)两式可求得粒子速度 β 。

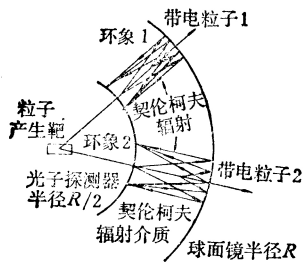


图3 契伦柯夫辐射的环聚焦和环象探测器

如果测量出光环半径 r ，知道了介质折射率 n ，则由(1)、(2)两式可求得粒子速度 β 。在图4所示的微分式计数器中，离球面 $R/2$ 距离处放着一个有环形孔的光阑，环半径为 r_0 ，孔宽 Δr_0 ，光阑后面放着几个光电倍增管。当粒子速度在 $\beta_0 - \frac{\Delta\beta_0}{2}$ 到 $\beta_0 + \frac{\Delta\beta_0}{2}$ 范围内时，光电倍增管才有信号输出。将 r_0 代

入(2)式可求出 β_0 ， $\Delta\beta_0$ 与孔宽 Δr_0 有关。 $\Delta\beta_0/\beta_0$ 这个量标志着速度测量的精度，称为速度分辨率。它的值越小，测量精度越高。一般气体微分式计数器的速度分辨率是 10^{-5} ，一种称为光学校正式的微分计数器，速度分辨率可达 $10^{-6} - 10^{-7}$ 。

物理实验中的另一种应用，即全吸收能谱仪。高能正、负电子或 γ 射线在大块介质中会产生电磁级联簇射。就是一个(正)电子在物质中由于韧致辐射而变成一个能量较低的电子和一个 γ 光子；或高能光子与物质作用后变成能量较低的一对正、负电子或一个光子，一个电子。这个过程一直进行下去直到光子或正、负电子能量低到被物质吸收为止(见图4)。所以一个

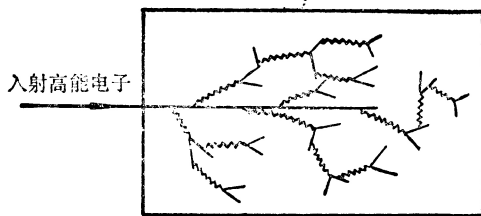


图4 高能电子在大块介质中的电磁级联簇射。实线表示正、负电子，波纹表示 γ 光子。高能 γ 光子的簇射行为与电子相同，除了第一次作用是产生 e^+ 、 e^- 之外

高能正、负电子或 γ 光子会在介质中产生大量 e^+ 、 e^- ，超过阈速度的正、负电子有契伦柯夫辐射，其总强度与粒子能量成正比。测量出辐射的强度，就可知道粒子的能量。

全吸收契伦柯夫谱仪的装置很简单。将一块一定尺寸的铅玻璃包上反光物质，如铝箔或氧化镁粉。在铅玻璃与光电倍增管之间涂上作为光学耦合用的硅油。高能 e^+ 、 e^- 、 γ 射入铅玻璃时产生的契伦柯夫辐射经过透射和反射后，被光电倍增管接收。信号的幅度就标志着入射粒子能量的高低。铅玻璃外表与普通玻璃一样，但密度为普通玻璃两倍左右，所以高能粒子在铅玻璃中走过的距离比在普通玻璃中短得多，体积小不大的铅玻璃就可用来测量能量很高的粒子。

(四) 七十年代契伦柯夫技术的发展

(1) 新型辐射体材料——二氧化硅微粒辐射体

自然界中的透明液、固体折射率在 1.25—2 之间，压力不高的气体折射率小于 1.01。因此折射率在 1.01 到 1.25 之间有一段空隙。它对应的阈速度 $\beta_{\text{阈}}$ 在 0.990099 到 0.8 之间。所以对速度在这个范围内的带电粒子，我们无法用契伦柯夫计数器测定。而动量在 1—10 GeV/c 左右的 μ 子、 π 介子、 K 介子、质子、反质子的速度正好在这一区域内。

1972 年，科学工作者制成了二氧化硅粉末辐射体，这是用直径为 70—1200 Å [注] 的二氧化硅粉末加以压缩而成的一种透明固态介质。它的折射率可通过改变制备样品时的条件来控制。已制出的样品的折射率在 1.1 到 1.3 之间。人们用 π 介子束测到了粒子在这种介质中的契伦柯夫辐射。1974 年又制成了一种多孔、疏松的透明固体介质，称为二氧化硅凝胶。其中的二氧化硅小颗粒直径大约为 30 Å。硅气凝胶的折射率可做到 1.01—1.10，同样可通过改变制备条件来控制。它的透光性能比粉末辐射体更好。

这两种二氧化硅微粒辐射体填补了 1.01—1.25 的折射率空隙，对于动量为 1—10 GeV/c 的粒子的速度选择起了很大作用。在西德佩特拉 (PETRA) 对撞机上进行实验研究的塔索 (TASSO) 实验组已能制作直径为 17 厘米、厚 8cm 的单块硅气凝胶，对带电粒子的探测效率接近 100%。在他们的 4π 磁探测器中，用硅气凝胶单元拼成的契伦柯夫辐射体面积达 12 平方米。

两个折射率略有差别的硅气凝胶辐射体串联在一起，可以构成一个“微分式”计数器，适用于速度分辨率要求不高的场合。

(2) 波长位移物质的应用

光电倍增管是最常用的契伦柯夫辐射的探测器，

[注] $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米。

但普通的光电倍增管只对可见光灵敏，而大部分契伦柯夫辐射是紫外光，这使得探测效率大为降低。

1973年，人们想到用波长位移物质可以提高光电倍增管探测紫外光子的效率。波长位移物质吸收一定波长范围内的光子后处于激发态，然后在很短时间内从激发态回到基态并发射出波长较长的光子。假如有一种合适的波长位移物质，能吸收紫外光而发射可见光，那么普通的光电倍增管与波长位移物质结合在一起便能有效地探测契伦柯夫光子。试验发现PT(对三联苯)和TPB(四苯丁二烯)是很合用的波长位移物质。用真空蒸发的方法在光电倍增管的玻璃入口窗上镀上一层约1微米厚的PT或者TPB薄膜，探测到的契伦柯夫光子数增加了将近两倍。最近(1979年)还发现，包含PT, PPO(二苯基噁唑)和Bis-MSB(双甲基苯乙烯基苯)三种波长位移物质的复合涂层能获得更良好的效果。

(3) 契伦柯夫环象探测器

前面提到的微分式计数器是利用了契伦柯夫辐射的环聚焦原理。它仅适用于平行粒子束的情形。并且当光阑环形孔半径 r_0 固定后，只能测量到固定速度值 β_0 。这种限制使它只能在经过动量分析的加速器次级束流中选择某种特定质量的粒子。在物理实验中，从粒子产生靶中飞出的粒子，无论质量，方向，速度都可以极其不同。我们可以用图3所示的环象探测器来测量这些粒子的速度。粒子产生靶位于半径为 R 的球面镜的曲率中心，契伦柯夫光子探测器位于半径为 $R/2$ 的球面上。为了测到带电粒子在探测器球面上形成的环象，光子探测器必须有定位能力，以从测到的许多个光子的位置来确定环象的半径，求出粒子速度。光电倍增管没有定位能力。多丝正比室虽有定位能力但对光子不灵敏。如果在多丝正比室中加入少量的光电气体，例如丙酮、三乙胺、苯，就提高了对光子的灵敏度，它们能吸收能量高于一定值的紫外光子，发射一个光电子，再被多丝正比室探测到并定位。1978年以来，又发展了一种称为多级雪崩室的新型探测器同样对紫外光子有定位能力。

图3所示的现象探测器可以覆盖很大的立体角，可测的速度范围很宽，从 β_{min} 到 $\beta = 1$ ，而且可以同时测量多个粒子的速度。所有这些特点使得它比微分式计数器有更广泛的应用范围。

(4) 多道契伦柯夫计数器

这种计数器的功能相当于一系列的微分式计数器，因此可以消除微分式计数器所受到的限制。多道计数器有多种不同的设计，一种比较好的设计是用图6所示的光电倍增管径向分布的阵列代替微分式计数器的光阑。它可测定速度不同、飞行方向不同的带电粒子形成的环象。图中的圆圈表示一个粒子的契伦柯夫环象，它使得八个光电倍增管被触发。从被触发的

光电倍增管的位置可以确定粒子的速度和方向。

这种多道计数器可以测量稍有发散(或会聚)的粒子束，可测的速度范围较宽。还可同时测量多个粒子的环象。

(5) 阈-微分式契伦柯夫谱仪

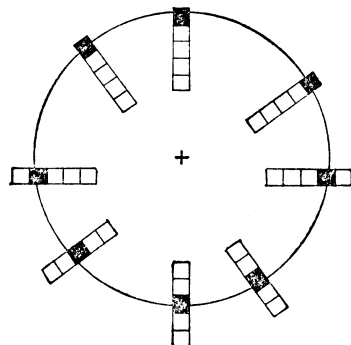


图5 一种多道契伦柯夫计数器的光电倍增管径向阵列，由40个光电倍增管组成；黑方格表示有信号输出的光电倍增管；圆圈表示契伦柯夫环象

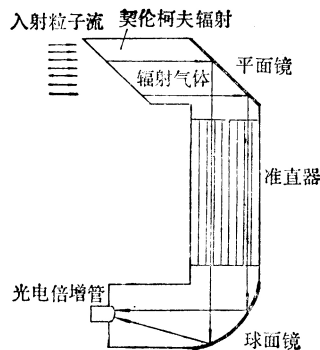


图6 阈-微分式契伦柯夫谱仪结构示意图

阈-微分式契伦柯夫谱仪的结构见图7。谱仪的入口窗和平面反射镜构成 45° 的角，它们之间充以气体辐射介质。改变气体的气压可调节契伦柯夫阈速度值，这使得谱仪具有“阈探测器”的性能。契伦柯夫辐射经平面镜反射后进入准直器。准直器由许多细长的平行管组成。管子内壁涂有光吸收物质。凡射到准直管内壁的辐射都被吸收，只有辐射角 ϑ 小于 φ 的契伦柯夫光能通过准直管， φ 角由下式确定：

$$\operatorname{tg} \varphi = d/l,$$

式中 d 和 l 是准直管的直径和长度。通过准直管的辐射被球面镜反射，聚焦到球面镜焦平面上的光电倍增管中被记录下来。此谱仪只探测速度为阈速度 $\beta_{min} = 1/n$ 到极大速度 $\beta_{max} \cong 1/n \cos \varphi$ 之间的粒子的契伦柯夫辐射，因此它又有“微分计数器”的性能。它的速度分辨率为 $\Delta\beta/\beta \cong 1 - \cos \varphi$ 。例如准直管 d 和 l 分别为4mm和1300mm时，速度分辨率约 2×10^{-6} 。

阈-微分谱仪的设计和建造简单，不需要高品质的光学反射镜面，只要一个光电倍增管，但却有很高的速度分辨率。与微分式计数器一样，它也仅适用于平行粒子束的情况。

* * *

七十年代发展起来的契伦柯夫技术还有点聚焦契伦柯夫计数器，利用多阳极微通道板光电倍增管测量契伦柯夫光环的技术等，这里不再一一介绍了。