

从照相底片到CCD

赵永恒

(中国科学院国家天文台 100101)

天文学是古老而又生机勃勃的科学。在历史上,从人类有文字记录开始,天文学就诞生了,各个古老文明都为之做出了贡献。在400多年前的第一次天文学革命中,伽利略用望远镜代替人眼来观测天空,这场革命直接导致牛顿发现万有引力定律并建立力学理论,由此诞生了现代天文学,并且促进了整个现代科学体系的建立。在170年前的第二次天文学革命中,用照相底片和光谱仪这样的探测器代替了人眼来记录观测现象,使得人类第一次能够认识天体的物理性质和化学组成,由此诞生了天体物理学,并发展成为当代天文学的主流。在70年前的第三次天文学革命中,诞生了射电天文学和空间天文学,为人类打开了认识宇宙的“新窗口”,天文学从地面发展到了空间,从光学波段发展到了射电、红外、紫外、X射线和伽马射线等全部电磁波段。

当代天文学是一门观测手段与理论研究紧密联系的科学,也是现代科学与高新技术完美结合的典范,在更广和更深地认识宇宙的过程中,在对观测手段更加经济而实用的追求中,天文学把科学技术应用到了“极限”,成为高新技术发明创新的重要源泉,极大地推进了它所需要的宇航技术、空间技术、探测技术、信息技术和现代工业技术的发展。当代天文学也成为“大科学”和国家经济实力的标志。

这里,以光学波段的天文探测为例,来看看在天文学中是如何从使用“胶卷相机”到使用“数码相机”的。

天文探测器是能够将天体传来的能量转化为可研究信号的器件。为探测到天体的辐射能量,常用的能量转化方式有下列几种:1) 辐射能转化为化学能,由辐射引起物质的化学变化,如照相底片。

2) 辐射能转化为电能,辐射作用使电子从物质中释放出来,产生光电流或光电压。这类器件称为光电器件,如光电倍增管。3) 辐射能转化为热能,在辐射作用下,物质变热,温度升高,称为热探测器,如热电偶。4) 一种波长的辐射转化为另一种波长的辐射,如闪烁体。

在伽利略发明天文望远镜以后的200多年的时间里,人们都是直接用眼睛通过望远镜来观测天空的。观测者一边看着望远镜,一边将看到的東西用笔画下来。可以想见,即使是同一个天体,不同的人观测后画下的东西是不一样的,这就是所谓的“人差”,因人而异所造成的误差。

在1839年达盖尔发明照相乳胶之后,照相术迅速发展成了一门成熟的技术。在19世纪中叶,照相术被应用到了天文学研究中。从此以后,用人眼作为望远镜的探测器的时代结束了,照相底片代替了人眼来记录望远镜观测到的东西。

照相的基本原理是利用某些物质在辐射照射下发生化学变化这一特性。常用的这类物质是卤族元素和银的化合物,即卤化银,当它们受到光的照射时会分离出银来。现代照相材料的感光层是由大量卤化银小晶体和明胶组成的,称为照相乳胶。最敏感的感光层往往是在溴化银内加入碘化银的杂质。把照相乳胶均匀地涂布在玻璃底板(硬片)或赛璐璐薄片(软片)上就成了照相底片。照相底片在曝光后,像中心包含的银比较少,还不足以形成底片上可见的像,只有经过显影和定影后,才能得到所需要物体的像。

天文照相底片不是我们熟知的那种照相胶卷(软片),它是一种玻璃干板(硬片),也就是将照相感



1898 Pleiades negative, drying rack, and darkroom tray

图1 昴星团的天文底片(拍摄于1893年)

光材料涂在玻璃板上而制成的。玻璃干板的好处是不会变形,从而能够保证测量的精度。人们还发明了一种“底片敏化”技术,使得照相底片的感光度大为提高。这样,原来需要曝光几个小时才能拍到的天体,使用敏化过的底片就只要曝光半小时就行了。

与人的眼睛相比,照相底片具有很多优势。使用照相底片可以真实而客观地记录下观测结果,可以对天体的位置和天体的亮度进行精密的测量。也就是在照相术应用到天文学后,测量天体亮度的科学——天体测光术才真正建立了起来。

更重要的是,使用照相底片可以拍到暗得多的天体。照相底片可以曝光几十分钟甚至几个小时,人眼却只有0.1秒的曝光时间。同样的探测器,曝光时间越长,所接受的光线就越多,因而就能“看到”更暗的天体。

照相底片可以具有与望远镜大视场相匹配的尺寸。美国帕洛玛天文台的施密特望远镜所采用的底片尺寸是365毫米×365毫米。最大的天文底片是美国里克天文台所使用的,其底片尺寸为500毫米×500毫米。底片颗粒非常细,如柯达IIIa系列底片,其分辨率可达200lp/mm,即像素尺寸为5微米,这样就使得照相底片有着巨大的信息容量。

虽然照相底片的信息量很大,但对它所记录的信息进行处理则很麻烦。在百年前,美国哈佛天文台为了分析拍摄的恒星光谱照片,招募了十多个不



图2 哈佛天文台的数据处理小组

同年龄背景教育程度的妇女,专们进行照相底片的数据处理。一般是两人一组,一个人用放大镜或显微镜仔细观察玻璃底片,一边测量一边口授数字,而另一人则在旁边用笔做记录。

在中国,第一张天文照相底片于1901年在上海佘山天文台诞生。1998年中国各天文台站相继结束了照相天文时代,前后拍摄并保存了约3万张。为了充分利用天文照相底片的观测资料,2016年中日合作团队联手研发成功世界顶级天文底片扫描仪,建成继美国哈佛大学和比利时王家天文台之后世

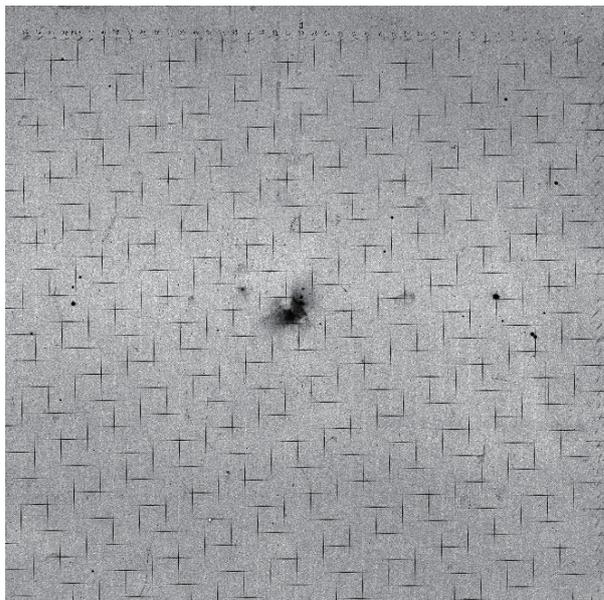


图3 1902年猎户座大星云
(此张底片为上海天文台40 cm 折射望远镜拍摄)

界第三个具备同级水准的天文底片数字化实验室，2017年完成了全国天文照相底片的数字化工作。

在百年前，照相底片是人眼以外唯一有效的探测器。20世纪以后，由于电子技术的发展，人们开始研究光电转换技术，寻求把光信号转变为电信号的探测器。

最初在1910年开始用一些光电器件来进行光电测光的工作。到第二次世界大战以后，光电倍增管在天文观测中得到了广泛的应用。在天体的光度测量方面，使用光电倍增管可以比用照相底片达到高得多的精度。光电倍增管虽然有很多优点，但可惜的是用它每次只能测量一个天体，而无法得到如照相底片那样的有很多天体的图像。于是，人们又在研究各种各样的光电成像器件，例如像增强器、电子照相机、电视型探测器和固体二极管阵等等，期望能够以之代替照相底片。

1969年韦拉德·博伊尔和乔治·史密斯在美国贝尔电话实验室利用半导体光导效应发明了CCD。CCD的全称是“电荷耦合器件”(Charge Coupled Device)。20世纪70年代后期，CCD第一次作为探测器用于天文观测，很快成为在光学波段占统治地位的探测器。而CCD在问世后的短短几十年后发展成近乎完美的探测器件。故而，韦拉德·博伊尔和乔治·史密斯因“发明了成像半导体电路——电荷耦合器件图像传感器CCD”而获得了2009年诺贝尔物理学奖。

CCD原理是利用半导体中的光电效应来探测光信号。在硅衬底表面生成一层绝缘层 SiO_2 ，然后用光刻技术在 SiO_2 上制造一系列间隔很小的电极，形成“金属-氧化物-半导体”电容(即MOS电容)阵列，通过金属化布线，形成三相结构。当在器件表面的某一个电极加上电压，则在该电极下面形成势阱，而在该势阱内可以容纳一百万个电子。对于一个未致冷的MOS电容，由热所致的自由电子将很快充满势阱。但对致冷的器件则不然，除非因光子轰击而产生光致电离，否则它将不被充满。该电容可以积累由光致电离而产生的电子，并且电子的数

目与入射光子数成正比。因此电容中电子的多少反映了光的强弱，进而反映了天体像的明暗程度，这样就实现了光辐射信息和电信息之间的转换。

将很多MOS电容制作在一个很小的面积上，即组成一个成像阵列。每个电容就是一个“像元”。把这种电容阵列曝光于要观测的天体像，像上照度强的地方电容储存的电荷就多些，照度低的地方储存的电荷就少些，因此形成了相应的电潜像。最后把阵列中的电潜像逐行依次输出，最后一行的像元和放大器连接，以测量出这些电潜像各部分的强弱，就测得了待观测天体的光学像。而为了抑制电子器件中的热电子(暗流)，需要对CCD进行致冷，通常使用液氮的杜瓦瓶或半导体制冷器，以使其冷却到零下90~100度的温度。

到20世纪80年代，CCD开始在天文学中得到了广泛的应用。与照相底片相比，CCD要更加灵敏，因而能探测到更暗的天体。CCD的测光精度也比照相底片的精度高得多。而更重要的是，CCD所得到的图像就是数字化的，因而可以很方便地利用计算机来进行处理、分析和测量。这样，到20世纪90年代，世界上几乎没有天文学家使用照相底片了，而完全由CCD探测器替代了。90年代末，美国柯达公司宣布不再生产天文照相底片，从此天文照相底片退出了它曾辉煌过一百多年的历史舞台。

为了克服CCD的大小一般不能覆盖望远镜视场的缺点，人们采用拼接方法，将多片CCD拼接在一起使用。例如，在欧洲南方天文台，用12个

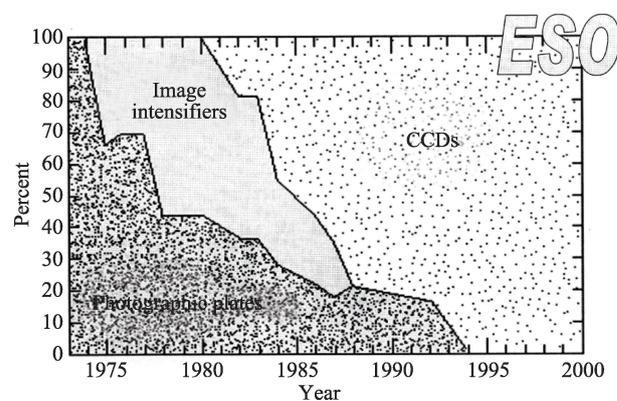


图4 欧洲南方天文台的照相底片、像增强器和CCD的使用比例

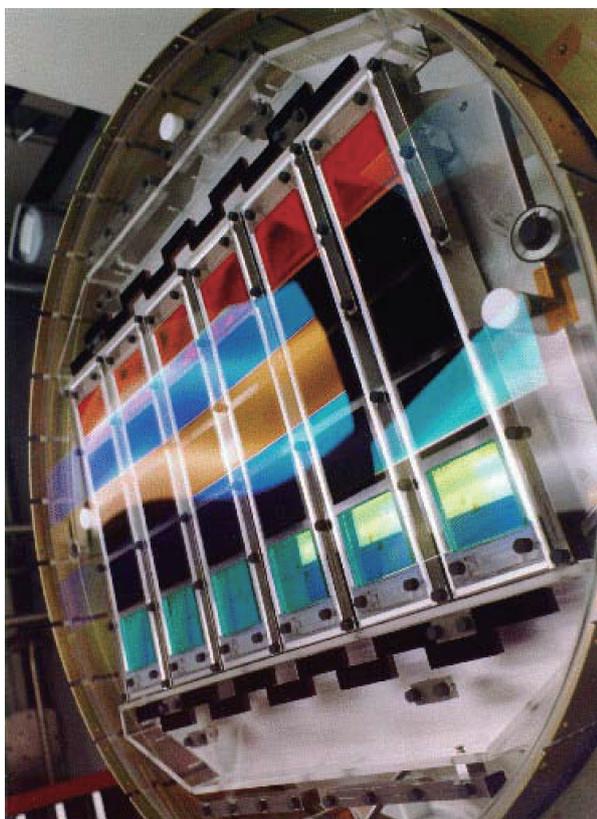


图5 SDSS项目的拼接CCD

2048×4096的CCD,拼成了8192×12288的CCD阵,其OmegaCAM项目使用了32个2048×4096 CCD进行拼接。美国的斯隆数字化巡天(SDSS)则使用了30个2048×2048 CCD组成的相机。

CCD是大规模集成电路制造的产物。按照摩尔定律,集成电路上可容纳的元器件的数目,约每隔18个月便会增加一倍。而在天文学领域中,全世界天文望远镜所使用的CCD的像元总数也基本上遵循摩尔定律,所获取的天文数据的数据量几乎每年增长一倍。在过去的十几年间,国际上多个天文巡天项目积累的数据已经从GB量级跨越到了TB量级,并进而跨入PB量级。

量变带来质变。在数据量从GB跃升到PB后,科学研究就需要全新方法和全新模式。在CCD的

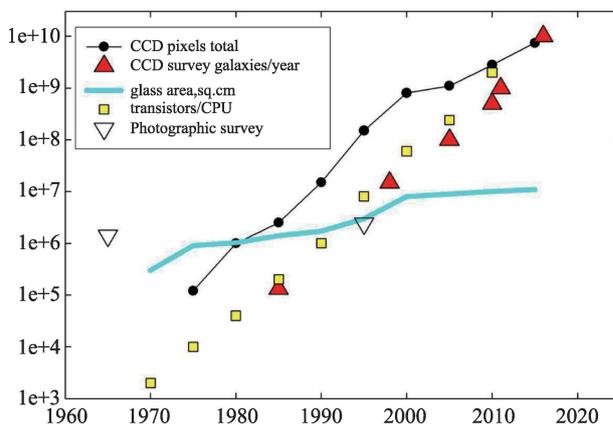


图6 天文学中CCD总像元数的增长

广泛使用中,天文学研究的模式也从以往的小样本向着大数据模式转变,从而进入了大数据时代。

在大数据时代,随着数据和计算资源的增长,诞生了新的知识发现模式。数据已经成为继观测与实验、理论、计算之后科学发现的第四范式。要全面应对大数据时代天文学研究的挑战,需要开发和应用更强大的新的分析方法,需要在数据驱动的天文学研究时代培养新一代的科学家和技术专家,以使现有和未来大型天文巡天项目、观测设施等天文数据生产项目的科学产出最大化。

