

宇宙中的标准烛光

黄芳

(北京师范大学天文系 100875)

在天文上，标准烛光是固有光度具有一定规律，可以通过比较视亮度和绝对亮度得到其距离的天体。它的显著特点为光度高且基本恒定。常用的标准烛光有：造父变星，天琴座 RR 型变星，超新星，行星状星云，红巨星，球状星团，旋涡星系的塔利-费舍尔 (Tully-Fisher) 关系等。



图1 用于天文测距的标准烛光。每个烛光都有相同的内秉光度，区别在于到观测者的距离 (图片来源: 劳伦斯利福摩尔国家实验室-宇宙探索系列)

为了更好地理解什么是标准烛光，我们先简单了解下天文上是怎么测距的。在地球上的任意两点之间的距离，可以根据一些几何学和三角函数的知识进行测定。对于太阳系及其较近的天体 (小于 110 秒差距，简写 pc, $1\text{pc}=3.26$ 光年)，比如地月距离，可以向月球发射一束激光，根据它反射回来的时间，来定出两者的距离。远到水星、金星和火星，可以用雷达测距。对太阳系外的邻近恒星，可以用周年视差测定 (图2)，即测量恒星对日地平均距离的张角。在 500 秒差距以外，可以借助空间探测设备 (例如哈勃空间望远镜，伊巴谷卫星等) 测量三角视差。这些通常认为是直接

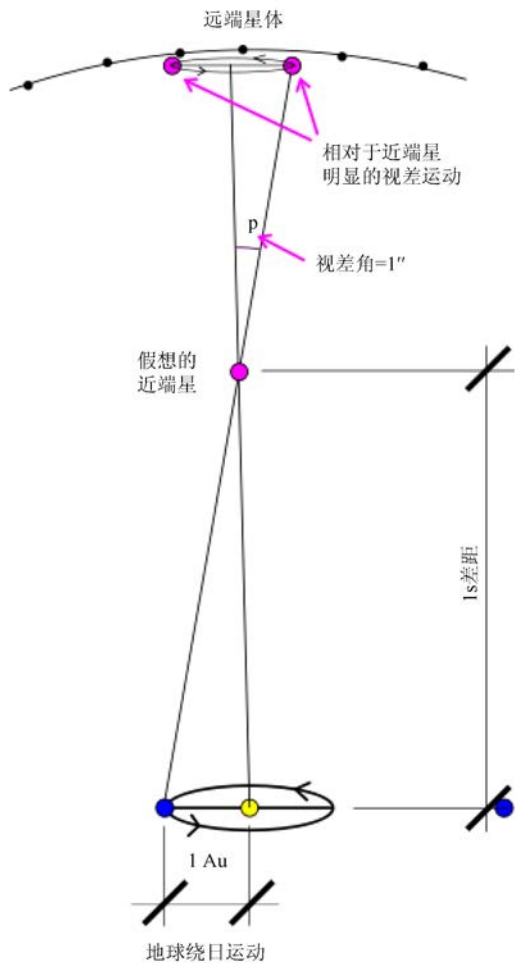


图2 恒星周年视差 (图片来源: 维基百科)

测量方法。当距离超过 500 秒差距，视差测量的误差太大，这一方法不再适用。这时候，标准烛光派上用场。

如图3，天体发出的光向四面八方传播，只有部分光能到达地球被我们接收到。球的表面积为 $4\pi r^2$ ，观测者每单位面积接收到的能量为天体的总亮度除以这个面积 (r 为天体到我们的距离)。如果知道真实亮度的大小，结合用望远镜测量得到的能量 (通常用星等表征)，就可以推算出距离 r 。下面我们简单介绍下不同类型的标准烛光。

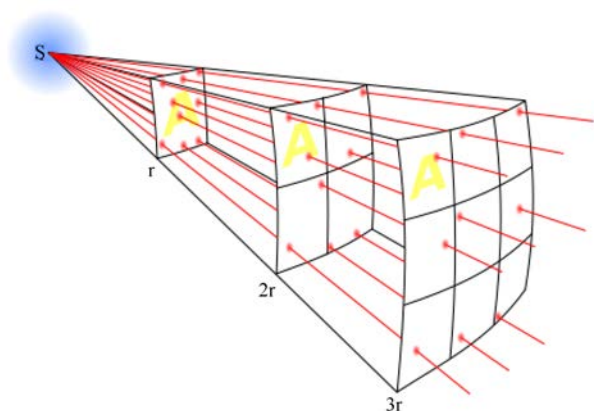


图3 天体辐射的平方反比律

1. 造父变星 (Cepheid Variables)

有一类大质量（3 ~ 20 倍太阳质量）的恒星，当它演化到晚期的时候，会发生不稳定的脉动现象，称为脉动变星。在这些脉动变星中，有一类脉动周期非常规则，它的典型星是仙王座 δ ，中文名为“造父一”，因而也得名造父变星。造父变星的固有光度大致为 -2 ~ -6 星等，这一特征使得它们成为银河系内外的非常理想地距离指示器。

1908 年，美国哈佛大学天文台的女天文学家亨丽埃塔莱维·特 (Henrietta Leavitt) 在对该天文台从 1893 ~ 1906 年对小麦哲伦云拍摄的照相底片进行检查后，得到了一个包含 1777 颗变星的星表。其中，16 颗可以明显地看到存在 1.25 ~ 127 天不等的周期，而且周期越长，变星越亮。4 年后，这个数目增加到

25 颗。从图 4 可以看到，视星等（从地球上所看到的天体的亮度）和光变周期的对数之间存在很强的线性关系。假设同一星团内的变星到地球的距离一样，这就意味着绝对光度和光变周期线性相关。这一关系后来被称为造父变星的周期 - 光度关系，简称周光关系。

研究表明，造父变星分属于两类星族。对于属于星族 I 的经典造父变星，绝对星等（从距离天体 10 秒差距处所看到的目视亮度） M 与光变周期 P 的关系为： $M = -1.80 - 1.74 \times \lg P$ 。对于属于星族 II 的短周期造父变星（又称室女 W 型变星），绝对星等 M 与光变周期 P 的关系为： $M = -0.35 - 1.74 \times \lg P$ 。相对 I 型造父变星，II 型年龄更老，更暗（相差大约 1.5 星等）。

利用造父变星测距的关键点是“零点问题”，即如何确定周光关系中的常数项。有两个星系通过直接的几何学方法测到了距离：大麦哲伦云（通过 SN 1987A 的回光测量）和 NGC 4258（脉泽的运动）。前者可以确定造父视差的零点，后者可以对其进行独立检验。然而，费里德曼 (Freedman) 等人^①给出的 NGC 4258 的造父距离比星系的几何学距离大 1.2 倍。这也说明了确定零点的难题。另外一个问题是星族 II 测距的局限性。

目前在银河系内已经发现了 700 多颗造父变星，利用造父变星能估计银河系的大小。此外，造父变星也能够在外星系中找到，这使得人类的视野从银河系延伸到了河外星系。同时还可以利用造父变星计算

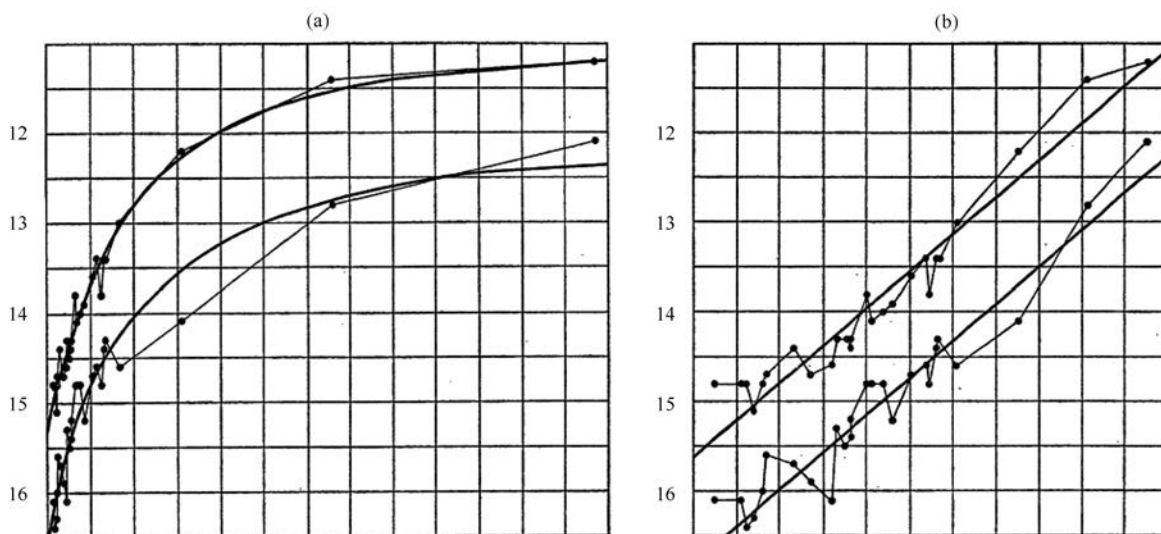


图4 造父变星的周期 - 光度关系。(a) 图横坐标为周期，(b) 图横坐标是周期的对数，上下两条线分别对应极大时刻和极小时刻星等

哈勃常数，对我们了解宇宙膨胀的快慢有很大帮助。利用造父变星最远能测到 20 Mpc。鉴于其在测距方面的重要性，造父变星也被誉为宇宙的“量天尺”。

2. 天琴座 RR 型星 (RR Lyrae)

天琴座 RR 型星是一类短周期的脉动变星。它们属于星族 II，金属丰度（恒星中铁与氢的原子数目比）较低，年龄较老，通常能在球状星团中能观测到。这类变星的光变周期为 0.05 ~ 1.2 天，变幅通常为 0.3 ~ 2 星等，最亮的是天琴座 RR，因而得名。它们的光变曲线和造父变星极其相似，也被称为星团造父或短周期造父，而且也存在一定的周光关系（图 5），也可以当作标准烛光。它们比造父变星要年老些，而且质量更小，光度更暗（典型光度在 45 倍太阳光度左右）。

1893 年，哈佛大学天文台的贝利 (Solon I. Bailey) 发起一项球状星团观测的项目。同年 8 月，威廉明娜·费莱明 (Williamina Fleming) 检查了拍摄的照相底片，在半人马座 ω 这个球状星团内发现了一颗变星，几天后皮克林 (Pickering) 又发现了一颗，与此同时贝利自己在杜鹃座 47 内发现了 3 颗变星。1895 年 2 月，皮克林在半人马 ω 又发现了 6 颗变星。这掀起了寻找球状星团变星的浪潮。在 1895 年到 1898 年间，贝利对 23 个球状星团的照相底片进行了搜寻，共发现了超过 500 颗的变星，并对这些变星的光变曲线和周期进行了分析，发现大部分变星属于一个类型，就是今天所称的天琴座 RR 型星。

天琴座 RR 型星的特征是绝对星等基本恒定 (0.5 ± 0.2 星等)。因此，只要观测到其视星等，就能确定它的距离。但是由于天琴座 RR 型星的绝对亮度太小，一般只能用于测量银河系内的距离，适用范围在 0.76 Mpc。目前在银河系中已经发现了 4000 多颗这类变星，多数分布在球状星团中。

3. 超新星

超新星是恒星演化到晚期突然爆发的一类极端现象，光度甚至可以和整个星系相当。根据光极大时光谱中有无氢线，可以分为两类：有氢的为 II 型超新星，没有氢的为 I 型超新星。根据谱线特征和光变特征可以再细分为很多子类，图 6 展示了不同类型超新星的光变曲线。

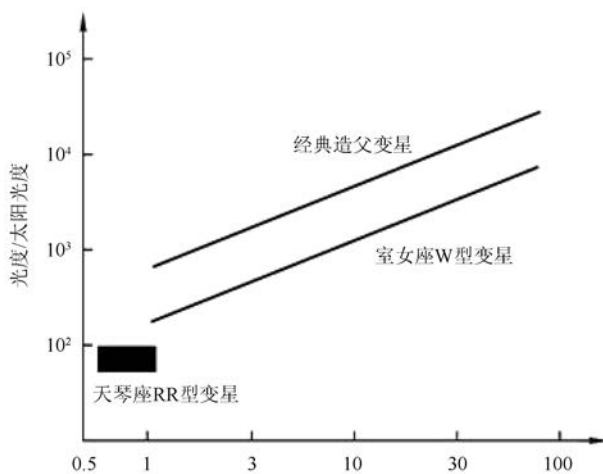


图 5 造父变星与天琴座 RR 型星的周光关系

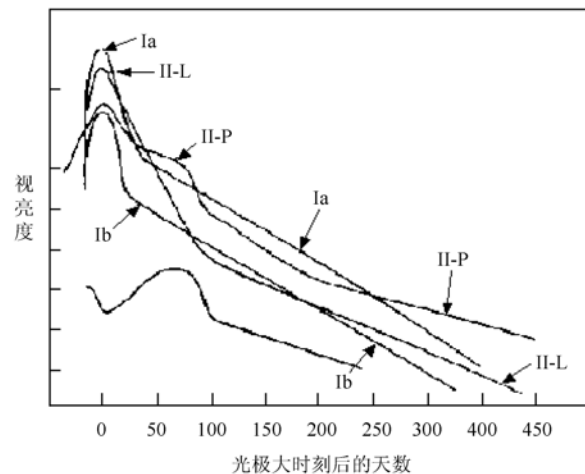


图 6 不同类型超新星的光变曲线 (图片来源: 菲利普科 (Filippenko) 1997 年论文^②)

Ia 型超新星是处于双系统中的白矮星从它的伴星吸积物质，当它的质量达到钱德拉赛卡质量极限 (1.4 倍太阳质量) 的时候，电子简并压不足以支撑引力平衡，导致白矮星中心发生不稳定的热核发生爆炸过程。

由于 Ia 型超新星爆炸时的质量大致相等，Ia 型超新星在极大时光度基本相同 (Mv 约 -19.6 mag)，可以用作标准烛光。实测结果表明，Ia 型超新星在光极大时的绝对星等存在一定的弥散。这表明，Ia 型超新星并不是绝对的标准烛光，需要对其进行修正。通常修正的方法有以下几种：(1) 菲利普关系，利用极大时刻星等与极大后 15 天内的星等变化之间的线性关系进行修正。(2) 多色光变曲线形状方法 (Multicolor Light-Curve Shape method, MLCS) 和伸展因子方法 (Stretching Method)，主要是利用光变曲线的形状

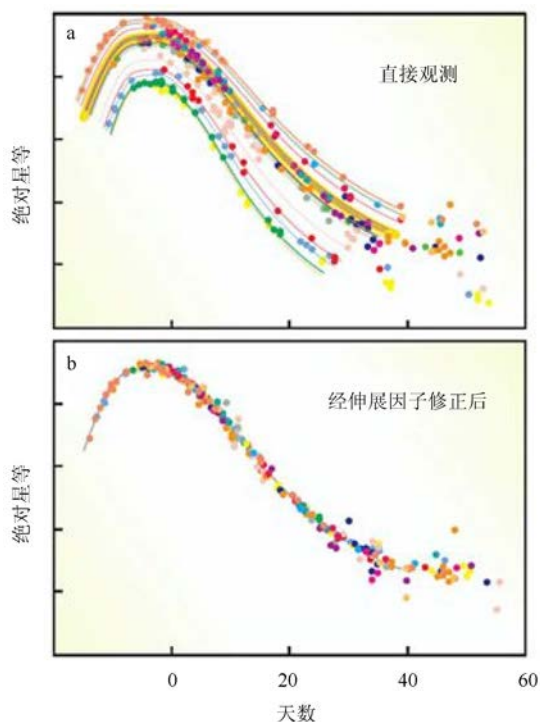


图7 Ia型超新星的光度改正

和极大光度的相关性来修正极大光度的弥散(图7)。

(3) SALT方法,主要是利用光变曲线的形状和颜色参数来修正光度弥散。

使用Ia型超新星作标准烛光,除了要考虑Ia型超新星极大光度的修正问题外,还需要排除特殊的Ia型超新星。这些特殊的超新星主要分为两类:低光度(以SN 1991bg为代表)和高光度(以SN 1991T为代表)超新星。

此外,IIP型超新星也可以被当作标准烛光。IIP型超新星的主要特征为光变曲线上光极大后有一个50~100天不等的平台期,谱线中有氢元素。2002年,智利大学的马里奥阿穆伊(Mario Hamuy)发现IIP型超新星在平台期的绝对星等与谱线中波长为5169Å处的铁线的膨胀速度存在很强的线性关系。这样,通过望远镜测量到的视星等和光谱中铁线的膨胀速度,就可以推算出距离。不过这种方法受限于高信噪比的光谱,以及寄主星系的消光(星光通过星际物质或大气时,因为受到星际物质或大气分子的吸收或散射,亮度因此减弱的现象)问题,测距精度可以达到9%。

4. 行星状星云

行星状星云(Planetary Nebular,缩写为PNe)是

中小质量(大约为1~8倍太阳质量)恒星演化到晚期的产物,持续的时间大约为10,000年。它是研究星系化学元素合成和星系动力学演化的重要工具。

行星状星云最早是由威廉·赫歇尔在1777年的一次观测中发现的。受当时观测设备的限制,行星状星云与天王星等气体大行星很像,行星状星云的名字便由此而来。行星状星云处于星系的非尘埃区,易于观测,目前在银河系内发现了3000多个。在本超星系团的各大星系中,也有大量行星状星云被发现。

统计发现,行星状星云有一个普适的光度函数(图8),而且在光度函数的亮端会出现一个很陡的截断。利用这一重要特征可以测定河外天体的距离。具体做法是,首先对待测星系进行发射线巡天(目前主要开展的是[OIII]5007的巡天),找到足够多数量的行星状星云。之后求出它们在[OIII]5007处的流量。最后将所得到的光度函数与普适光度函数进行比较,就可以得到距离模数,从而计算出目标星系的距离(最远

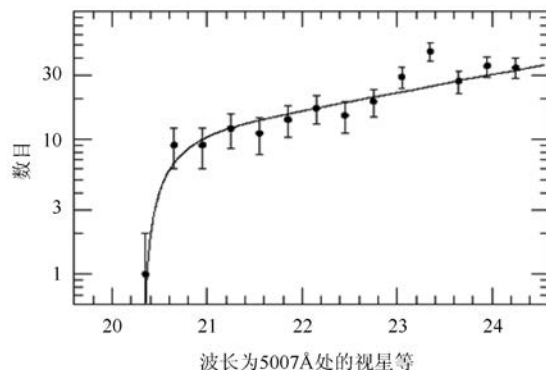


图8 M31中的行星状星云给出的普适光度函数

可以达到15 Mpc)。

5. 红巨星

1944年,德国天文学家巴德利用红端灵敏的照相底片,发现仙女座星云M31可以分解为一个中心区域和两个椭圆星系M32、NGC 205。他发现这3个系统中的最亮红色恒星有相同的视亮度和颜色,这可能是因为这3个星系形成于同一天区的3星系统(暗示这3个星系距离相同)。1971年,美国天文学家桑德奇在M33, M31, IC 1613中也发现了这类超亮星,并且这些亮星都处于巨星支的顶端,具有相同的绝对星等(M_V 约 -3.0 ± 0.2 星等),称为红巨星。

在赫罗图上,低于临界质量(对星族I为1.6倍

太阳质量，星族 II 为 1 倍太阳质量）的小质量恒星演化到红巨星阶段，内部氦核是简并的，当温度达到 10^8K 时，会发生非稳定的爆炸式燃烧，即氦闪，这时红巨星分支会出现一个拐点，随即光度骤降，进入水平分支（图 9）。1983 年，埃本（Iben）和伦齐尼（Renzini）研究发现，金属丰度相同的小质量年老恒星在发生氦闪时，热光度只相差 0.1 星等。红巨星分支拐点方法就是依据星族 II 恒星（金属丰度 <-0.7 ）演化到红巨星分支拐点处 I 波段绝对星等相等（ M_I 约 -4.0 星等）这一特性，通过比较视星等和绝对星等来进行测距的（图 10）。

6. 球状星团

球状星团是致密的恒星系统，通常由成千上百万颗恒星组成，最暗的为 -2 星等，最亮可达 -11 星等，

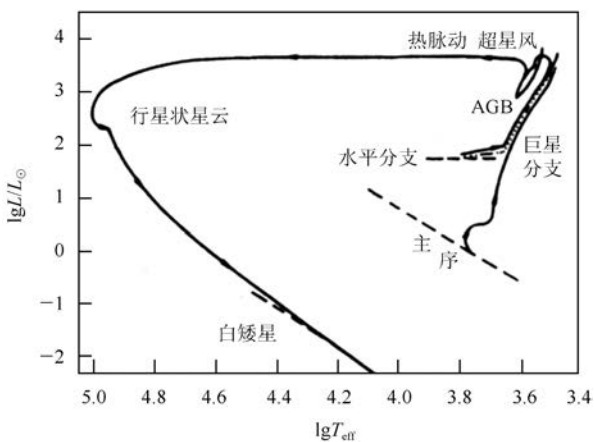


图 9 小质量恒星在赫罗图上的演化轨迹

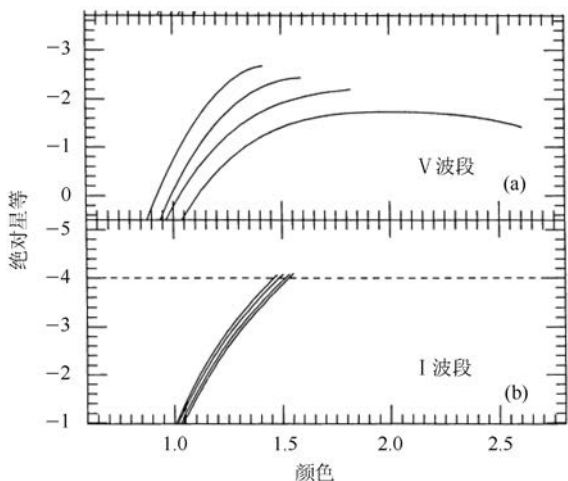


图 10 不同星系不同金属丰度的 V 和 I 波段的颜色 - 星等图。I 波段存在一个星等极值（-4 星等）

几乎能在所有大型星系中找到。

20 世纪 70 年代，加拿大天文学家拉辛（Racine）提出，相对只用星系中的少数最亮星团，统计出一批球状星团的光度函数信息得到的距离会更准确。1977 年，汉斯（Hanes）首次提出利用球状星团作为标准烛光。随着观测技术的提高及电荷耦合元件（CCD）的使用，越来越多的星系团被发现，距离的测量也得到很大的扩展。

如果观测一批球状星团，可以发现类似行星状星云，球状星团也存在一个普适的光度函数（图 11）。这样，我们可以先对银河系内的球状星团进行观测，得到一个标准的球状星团光度函数。再观测河外星系的球状星团，用视星等构造光度函数，与标准的光度函数一比较，就可以得到它的距离。

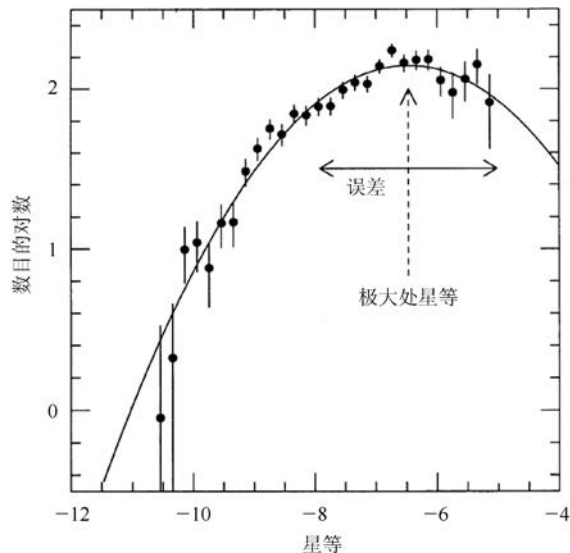


图 11 室女星团的普适光度函数

7. 塔利 - 费舍尔关系

1977 年，法国马赛天文台的塔利和美国国家射电天文台的费舍尔发现，旋涡星系的绝对星等和其 21cm 中性氢谱线宽度相关（图 12），这也被称为塔利 - 费舍尔关系。

对于一个旋涡星系，若谱线是由于多普勒效应致宽，则谱线宽度是和自转速度成正比的。一方面，质量越大的星系，成员星的数目越多，它的光度越大。另一方面，质量越大的星系，根据万有引力定律可以推出成员星的自转速度越快。这样就建立起一个光度 -

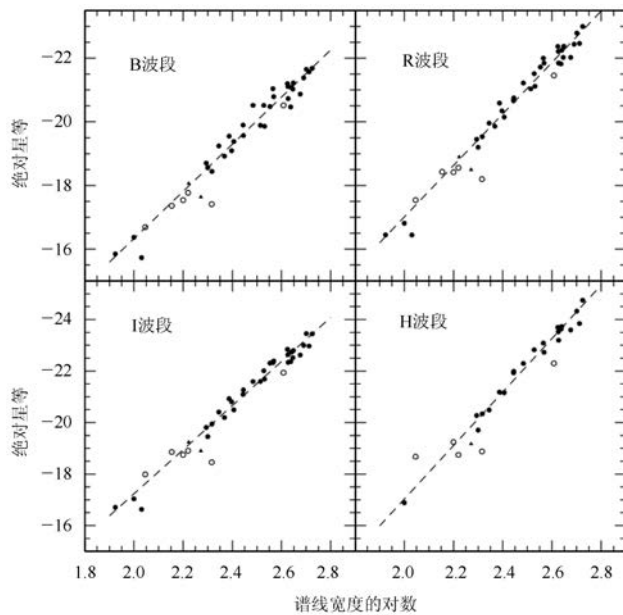


图 12 BRIH 四个不同波段的塔利 - 费舍尔关系
质量 - 自转速度 - 谱线宽度的关系，可以很好的解释塔利 - 费舍尔关系。

可观测到的旋涡星系数量非常多，只要测到视星

等和谱线（通常用 21 cm 中性氢线）宽度，就能得到旋涡星系的距离，测量范围可以达到 100 Mpc。由于红外技术的发展，现在更多的是采用红外星等，以减少照相星等受星际消光的影响（尤其是侧面朝向我们的星系）。

最后，我们用一张宇宙中的距离阶梯图（图 13）做结。图中列举了常用的天文测距方法，就像一级一级的阶梯一样。每一个梯级表示一种特殊的距离指示器可以达到的最大距离，且每一梯级依赖下一个较低梯级的指示器来进行定标和检验它的精确性和可靠性。随着大型地面和空间望远镜等先进设备的投入使用，更多的标准烛光样本被扩充及深入研究，测距的精度将大幅度提高，我们有理由相信，人类的视野必将会达到一个史无前例的高度！

① Freedman et al. 2001, The Astrophysical Journal, Volume 553, Issue 1, pp. 47-72.

② Filippenko Alexei V. 1997, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 35, pp. 309-355.

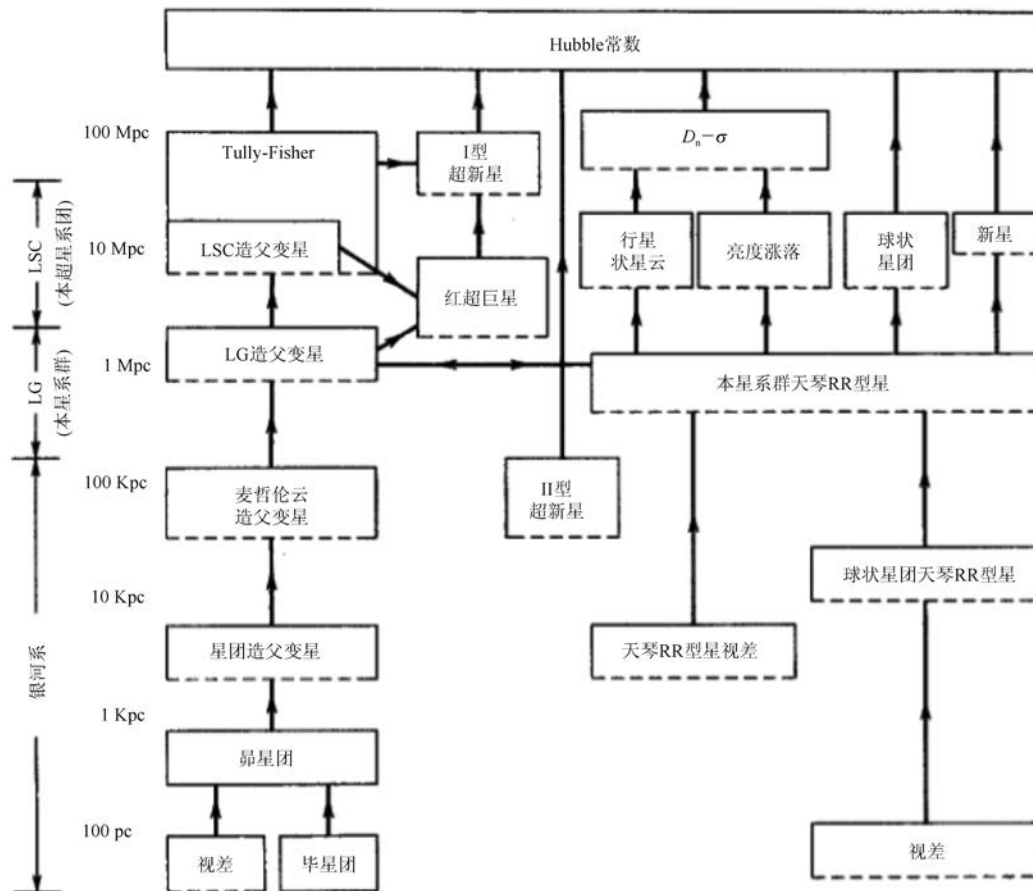


图 13 宇宙距离阶梯。图的左边为银河系、本星系群以及本超星系团的距离范围（图片来源：《引力与时空》，科学出版社，2006 年