
哈勃常数——世纪之谜

胡彬（北京师范大学天文系） -2018年8月



膨胀宇宙的发现

对于距离的测量，历来是天文学的重要课题之一。随着照相技术的发展，上世纪初天文学家已经可以观测到大量分布很迷散、亮度很低的云团状物体，并称之为星云

(Nebulae)。但由于当时的知识所限，天文学家并不能确认这些云团状物体，是来自我们银河系自身的恒星集团，还是河外星系。当时天文学界的主流看法是，这些星云大部分应该位于银河系内部。

1919年，Edwin Hubble作为一个年轻的学者加入到威尔逊山天文台。幸运的是，当时的100英寸反射式望远镜刚刚完成建造并投入使用。作为一个严谨又勤奋的天文学家，Edwin Hubble对一些盘状星云 (sprial nabulae，现在看来应该是河外的盘状星系)，在不同时段进行了反复的拍照。他将注意力集中到了这些盘状星云中的一些被称为新星 (nova) 的亮星观测上去。新星是天文观测中的一些暂现源，也就是说本来空无

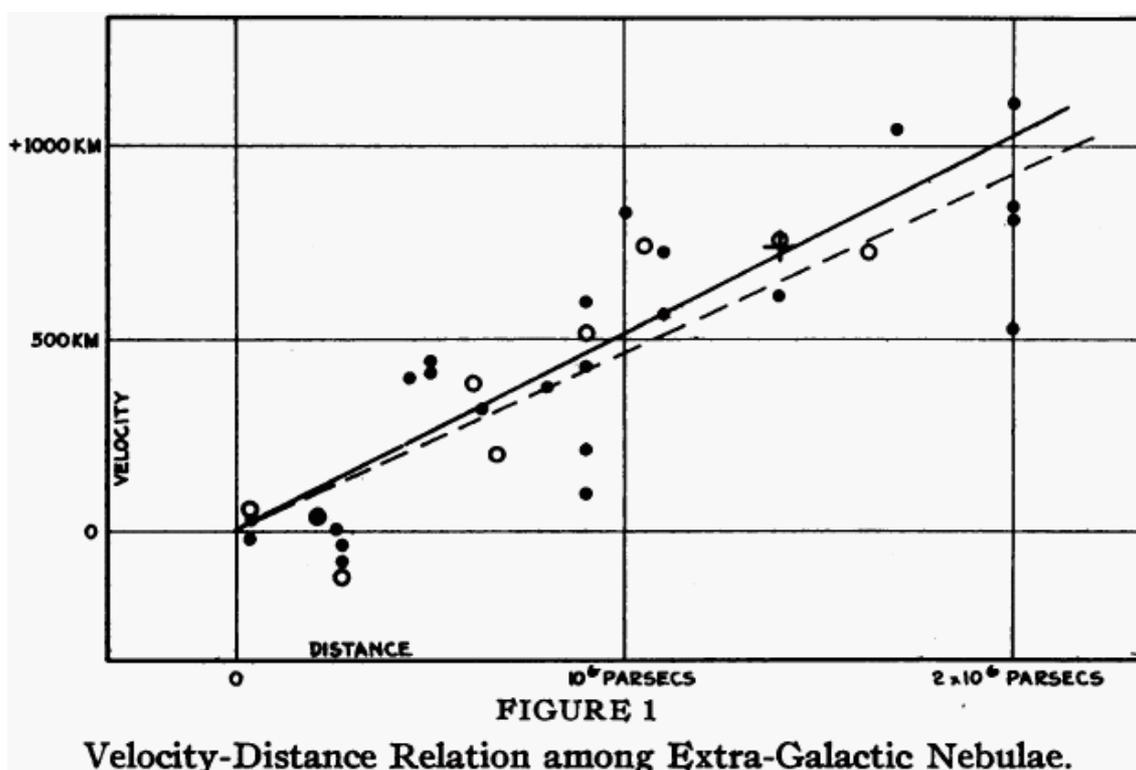


图1: 1929年，Hubble绘制的星云的“距离-速度”关系¹。

一物的天空中的某点，突然发出很强的可见光辐射后，又慢慢消退。这个消退的时标从几周到几个月不等。Hubble仔细地标记了，每颗新星的位置、亮度随时间的变化等信息。随着时间的推移，神奇的事情发生了！在之前标记的某颗新星衰减到完全看不到后的一个月，天空中相同的位置处又再次闪现了一颗新星！Hubble扎实的天文功底告诉他，相同星云中

两颗临近新星接连爆发的概率太小了，这极有可能是当时已经研究得十分成熟的造父变星。这是一类性质极为优良的天体，主要体现在这类天体的光变周期与其亮度（单位时间内辐射的总能量）有着极强的相关性。因而通过观测光变曲线，我们就可以确定出造父变星的亮度。具有这类性质的天体，我们将其称为标准烛光。而我们实际观测到的视亮度与绝对亮度之间，与距离的平方成反比。视亮度越暗的标准烛光距离我们越远。因此标准烛光成为天文测距的利器。除此之外，Hubble还对每一个具有造父变星的星云测量了其多普勒红移，从而计算出该星云的运行速度。

随着数据量的积累，时间来到1929年。上世纪天文学最大的发现之一，浮现在Hubble的算稿纸上（图1）！这张图分明地显示，距离我们越远的星云，其在离开我们视线方向上的速度越大。就像吹气球一样，相对距离越远的两点之间，其相互之间的逃离速度也越大。至此，Hubble发现了宇宙膨胀的现象，并基于此提出来我们称之为Hubble定律的数学公式：

$$v = H(t)d$$

公式1: Hubble定律

其中， v 是星体的退行速度， d 是距离， $H(t)$ 标志着 t 时刻宇宙膨胀速率的大小。一般的，我们将当前时刻 H 函数的数值记为 H_0 ，称为Hubble常数。在图1中， H_0 就是图中直线的斜率，通常的我们将Hubble常数的单位固定为 $[\text{km}/\text{s}/\text{Mpc}]$ ，其中Mpc是天文测量中常用的距离单位，即百万秒差距，1Mpc大约为三百三十万光年。

细心的读者，也许会发现，Hubble在1929年所测量的当前宇宙的Hubble常数为500 $[\text{km}/\text{s}/\text{Mpc}]$ 。这与我们现在的更为精确的测量结果（大约70 $[\text{km}/\text{s}/\text{Mpc}]$ ）相距甚远。笔者的一位引力波研究同行曾半开玩笑式地说过“伟大的发现不需要细节”！这个描述在这里可以说是很贴切了。尽管Hubble自己测量的Hubble常数出现了重大偏差，但是，宇宙膨胀的客观现实没有因为这个具体数字的错误而被否认掉。像公式1这样的线性关系，在以现代数学为基础的科学研究中，已经是简单的不能再简单的了。但自从1929年至今，在接近一个世纪的时光里，Hubble常数的具体数值依然是一个谜，原因是我们对距离测量的误差始终不能够有效地降低。而这个谜团背后，不仅仅是一个具体数字的问题，而是其有可能颠覆我们已有的、对现代宇宙学的认识。而这正是本文想讲述的故事。要说清楚事情的来龙去脉，首先要说明天文上的几种测距方法。

三角视差法测距

对于近邻恒星（主要是河内的恒星）距离的测量，天文学家往往采用纯几何的三角视差法（trigonometric parallax）。基于简单的欧几里德时空的三角关系，我们可以发现，随着地球的绕日运动，相同一颗恒星在近日点和远日点，在天空中出现的位置不同，如图2所示。

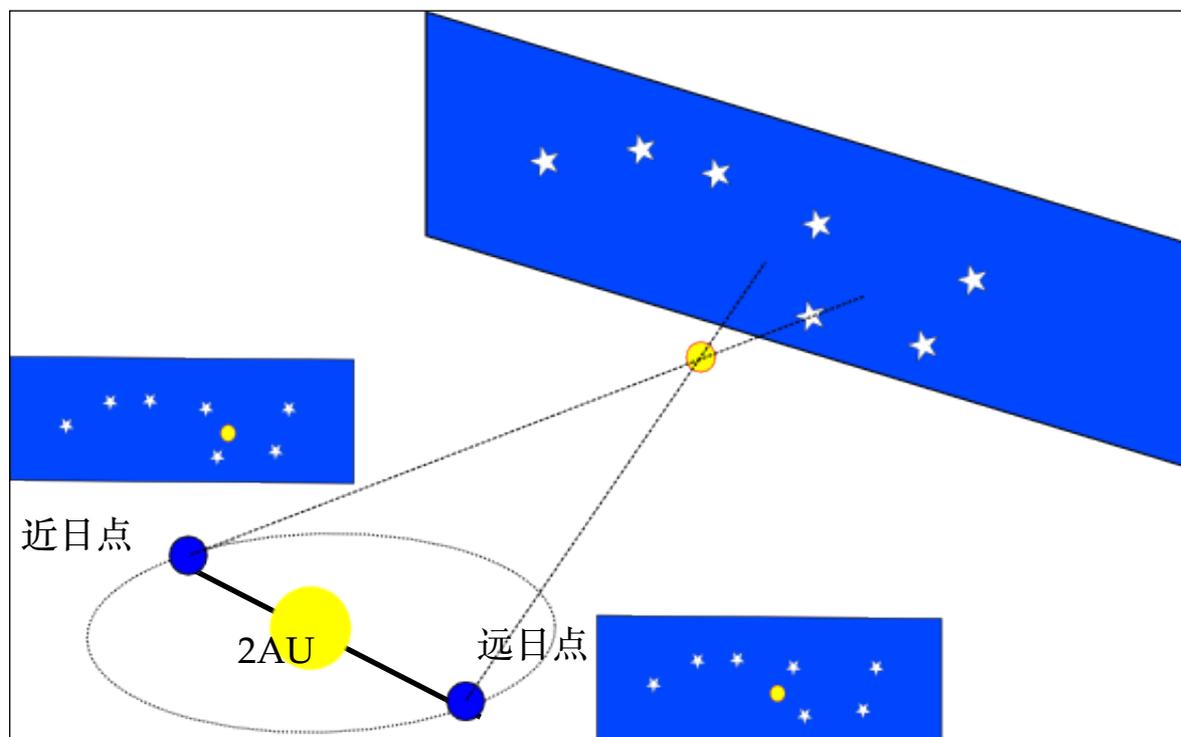


图2: 相对于参考星（北斗七星）位置，同一颗恒星在近日点（中左），与远日点（下右）分别出现在不同的位置。图中日地轨道的直径为2倍的日地距离（2倍的天文单位，即2AU）。

加之，我们对于日地距离（Astronomical Unit，简称AU）的精确测量，天文学家利用三角视差法所进行的距离测量具有极高的置信度。但该方法只适用于近邻恒星的距离测量，因为利用传统的天体测量方法，我们对于这个张角的测量只能精确到几毫角秒。好消息是，利用欧空局在2013年底发射的GAIA卫星，我们有可能将对于15等以上的亮星的空间定位提高到几十微角秒，这几乎是几百倍甚至上千倍的精度提高！

标准烛光法测距

那么我们又该如何对于宇宙学尺度（远远大于银河系自身半径）上的距离进行测量呢？首先，由于距离更远我们需要更亮的星；其次，正如讲述宇宙膨胀的发现时所提到的，这类亮星需要有统一的绝对光度，也就是标准烛光。这里我们主要介绍两类标准烛光，造父变星与Ia型超新星。

造父变星是一种几倍太阳质量的年轻恒星，其光度的峰值可以达到几千甚至上万倍的太阳光度。更重要的是其峰值光度与其光变周期具有很强的相关性。这就使我们可以将距离的测量延伸到银河系之外，到达比较近邻的星系中去，如大小麦哲伦云等。

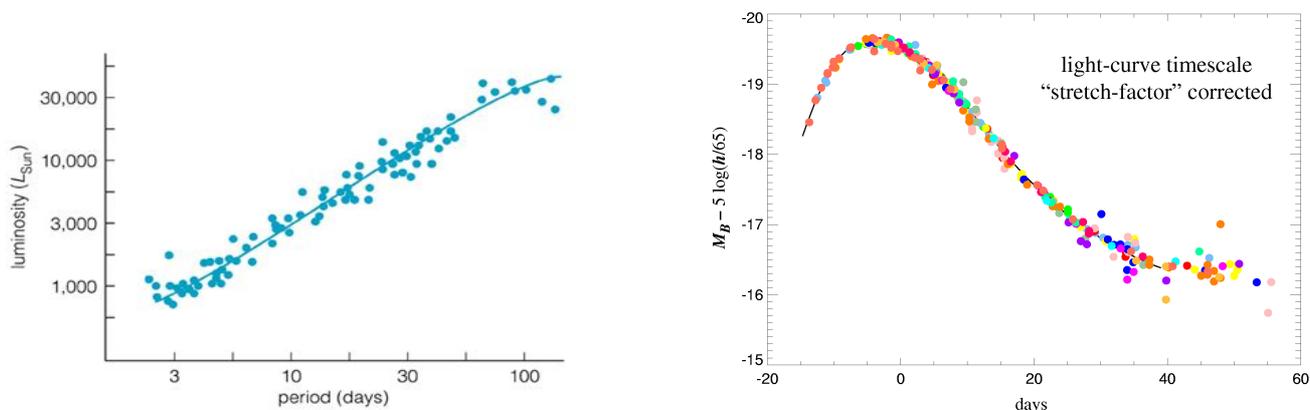


图3: (左) 造父变星的“周(期)-光(度)”关系; (右) Ia型超新星的光变曲线。图中的点代表不同观测事例, 线代表统一的理论曲线。

Ia型超新星是一种比造父变星更为明亮的天体，其峰值光度可以达到十亿甚至上百亿的太阳光度。因此，我们可以观测到可见宇宙边缘处的Ia型超新星。与新星一样，超新星也是一类暂现源天体，其特征光变时标大约为15至20天。这里的形容词“Ia型”是指某类特殊的超新星。其前身星（白矮星）的燃烧方式是通过碳-氧热核聚变。而维持这种热核聚变的能量来源则是通过该白矮星不断吸积周围的红巨伴星。当该白矮星的总质量达到1.44倍太阳质量的时候（钱德拉赛卡极限），此时的白矮星内部原子的电子简并压不能够抵抗巨大的、向内的引力，从而将电子挤压到原子核内部形成极为致密的中子星，最终引发Ia型超新星爆炸事件。由于其爆炸质量具有一个特征的标度（1.44倍太阳质量），因此我们有理由相信Ia型超新星爆炸具有一个普适的光度。

有了可信的光度（Luminosity）值，下面我们只需要测量到达单位面积的观测仪器中的视亮度（apparent brightness），就可以根据下面的公式2，对距离（d）进行估计了。

$$\text{Brightness} = \frac{\text{Luminosity}}{4\pi d^2}$$

公式2: 亮度（Brightness）、光度（Luminosity）与距离（d）的关系。

标准尺法测距

除了标准烛光之外，宇宙学上我们还可以借助标准尺来进行测距。与之前介绍的三角视差以及标准烛光法所不同，这里用到的观测量具有相当大的内禀展宽，也就是一把长度相当长，且长短一定的尺子。空间透视的直觉告诉我们，看到尺子两端的视线张角越小，尺子离我们越远。那么，一个自然的问题是宇宙中什么样的天体具有如此大的展宽呢？要回答这个问题，首先要从什么是宇宙学尺度谈起。直观地说，宇宙学尺度就是空间尺度大到连像银河系这样的星系都只能作为一个没有展宽的点来处理。所以说，宇宙学尺度是如此之大，传统天文学上所研究的单个客体，都无法作为宇宙学测距的标准尺。



图4: (左) 天空中星系的随机分布; (右) 通过图片叠加的方式, 显示星系在共动距离大约为150 Mpc (150 百万秒差距) 的空间尺度上具有着较强的关联性。

感谢统计分析的巨大威力，他告诉我们天空中看上去随机分布的星系（如图4左）和宇宙微波背景辐射，实际上在某个特定尺度上具有明显的相关性（如图4右）。其背后的物理是被称为重子声学震荡（Baryon Acoustic Oscillation, 简称BAO）的机制。简单说来，就是宇宙在早期，由于温度很高，其呈现出的物质形态是一种光子-电子的等离子体形态。在这段时期内，宇宙中的物质主要受到向内的引力挤压和向外的等离子体光压两种力。就像一个碗里用一个软弹簧所连接的两个小球。引力使小球向碗底靠拢，而弹簧（类比于光压）受到挤压后，又会将其向外弹。两种力交替主导该系统，从而使小球在平衡点往复震荡。这种震荡在宇宙早期往复发生，直至宇宙的温度降低到不足以电离氢原子，自由电子和质子复合成为中性的氢原子。此时，宇宙中不再有可以拖拽住光子的带电粒子，因而光子以光速脱离氢原子向我们飞来。这件事情发生在宇宙诞生38万年的时候，该时刻被称为再复合时期。而图4右，所示的150 Mpc (150 百万秒差距) 就是该时刻声学视界大小。这是正是作为标准尺所需要的具有固定内禀长度的量！

那么，如何在看上去十分杂乱的星系空间分布（如图4左所示）中，发现这把量天尺呢？我们只需要：第一，以某个星系为中心，以150 Mpc为半径画一个圈；第二，把这张图

在照片上裁剪下来；第三，再选另外一个星系为中心，重复前两步；第四，把所有的图片叠加到一起，这个圆环就会随着照片数目的增加，慢慢浮现在你的眼前。

通往宇宙更深处的阶梯

前面介绍了三种不同的测距方法，其中：三角视差法是纯几何的方法，可靠性最高，但是所能测量的距离也最短；标准烛光法，是利用的宇宙晚期的恒星演化过程中出现的一些物理规律来测量距离的，其可靠性依赖于我们对这些规律的理解深度；而标准尺法，则是利用宇宙早期的重子声学震荡机制来测距，其测量的距离最远。但相比于前两种方法，它需要我们假定产生于宇宙诞生38万年时刻的光子，在此后138亿年的旅程中的演化方式。当前，天文学家普遍接受的演化方式是一个被称作 Λ CDM的协和宇宙学模型。这个模型主要由被称作 Λ 的宇宙学常数，和被称作CDM的暗物质组成。

从上面的分析，我们不难看出，无论是标准烛光还是标准尺法，都依赖模型假定。前者是恒星演化规律，后者是宇宙大尺度结构演化规律。但是由于所能测量的距离跨度的不同，我们不难看出，标准尺法的测距范围无法与最可靠的三角视差法重叠。但造父变星的三角视差测距，与造父变星的周-光关系测距可以有一定的重叠区域。造父变星的周-光关系测距，与Ia型超新星的光变曲线测距也可以有一定的重叠区域。在这两个重叠区域，我们就可以用高精度的方法（近距离的测距）去校准低精度的方法（远距离的测距）。这逐层的距离校准方法，被天文学家称为距离阶梯。

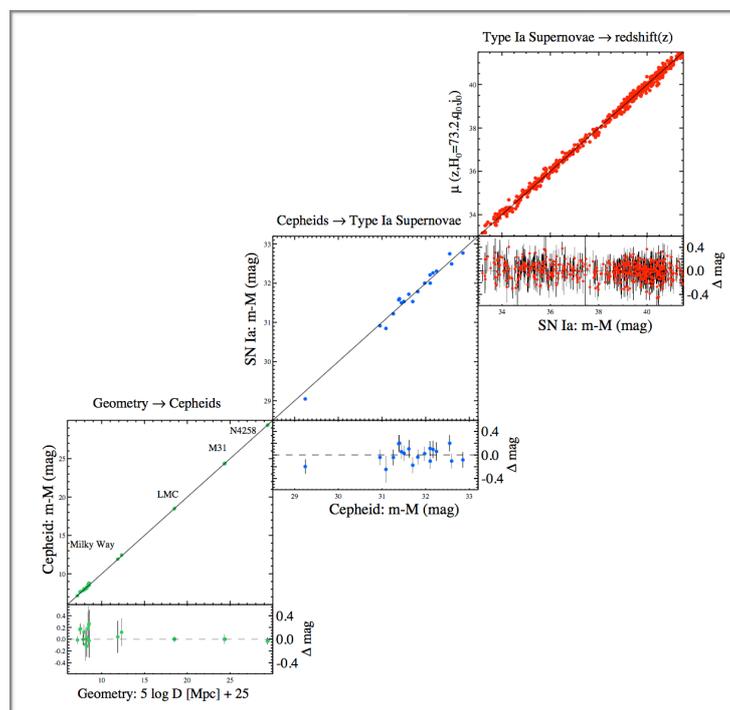


图5: 距离阶梯的逐层校准，摘自 A. Riess et al., arxiv:1604.01424².

这个距离阶梯的具体搭建方式如下：第一，先找出银河系内部的造父变星，同时用三角视差法和周-光关系法测距，由于三角视差法精度更高，更为可信，因此用其来校准河内造父变星的周-光关系；第二，将距离延伸到河外，找到同时具有造父变星和Ia型超新星的近邻星系，用已校准好的周-光关系来校准Ia型超新星的光变曲线；第三，将距离继续延伸到宇宙学尺度，找寻遥远星系中的Ia型超新星，用在第二级阶梯中已校准完毕的光变曲线去测距。至此，宇宙阶梯搭建完毕。

世纪之谜

从上世纪初的Edwin Hubble到如今，一代又一代的天文学家不断地尝试采用新的方法去测量Hubble常数，以期得到一个更为精确的结果，从而了解更多宇宙膨胀的机制。这其中最为意外的结果莫过于，1998年两个独立的观测团队通过测量高红移的Ia型超新星的距离，发现宇宙的晚期加速膨胀现象。

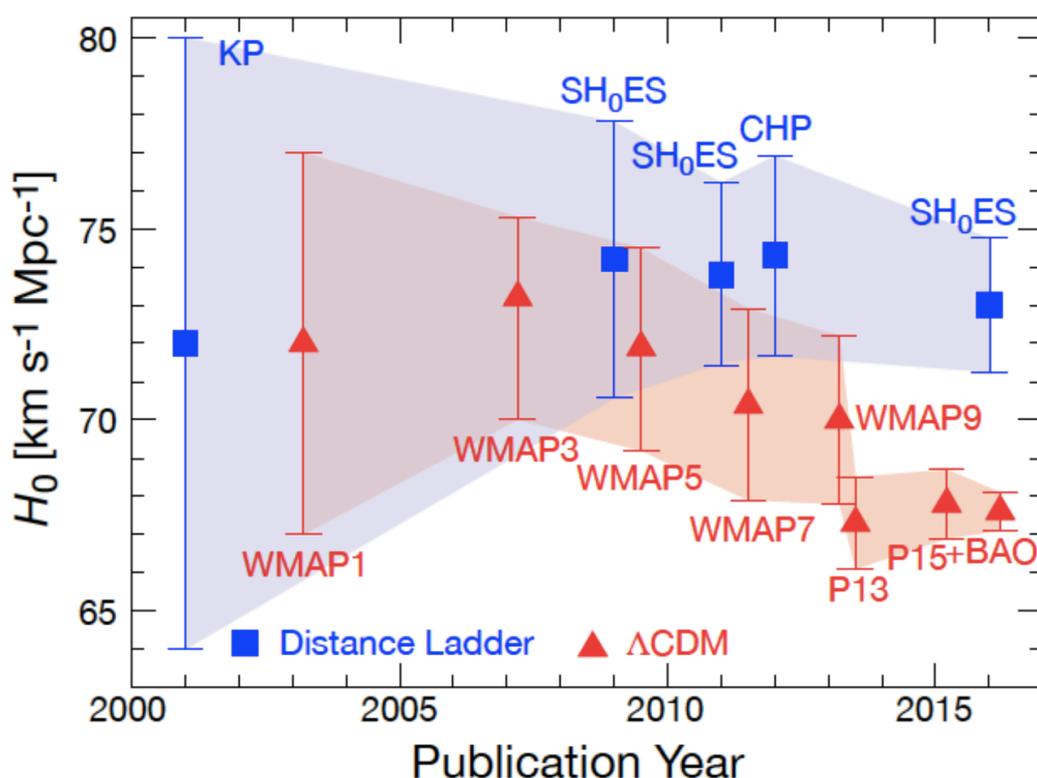


图6: 采用距离阶梯方法校准后的Ia型超新星对于Hubble常数的测量（蓝点），与用宇宙微波背景辐射和重子声学震荡方法所测量的Hubble常数（红点），虽各自都已达到接近1%的精度。但其二者的差异是十分巨大的，难以用统计误差来解释。摘自Freedman, arxiv: 1706.02739³。

一波未平，一波又起。担任哈勃太空望远镜（Hubble Space Telescope，简称HST）重大项目（Key Project）负责人十多年之久的、美国芝加哥大学天文系教授Freedman，2017年在《科学》期刊上综述了，过去十多年不同的研究团队，利用不同的方法对于Hubble常

数的测量结果。图6的蓝点表示用距离阶梯方法校准后的Ia型超新星对于Hubble常数的测量；红点表示用宇宙微波背景辐射和重子声学震荡方法所测量的Hubble常数。不难看出，在本世纪初的时候，由于二者的数据误差都较大所以可以统计地认为二者结果一致。然而在最近几年，随着欧空局发射的观测宇宙微波背景辐射的Planck卫星数据的释放，以及利用更为准确的距离阶梯的校正方法，标准尺以及标准烛光法各自对于Hubble常数的测量精度都向着1%的目标精度迈进。但二者的测量结果之间却显示出巨大的差异，以至于难以用数据的统计误差去解释。

Freedman拿这两组数据作对比是十分有讲究的。因为它们分别代表了我們利用宇宙早期和晚期不同时期的数据对于Hubble常数进行的、端到端（End-to-End）的估计。如果这两组结果都没有问题，那么一定意味着我们对于协和宇宙学模型的认知出现了重大问题！举一个不太恰当的例子，这正如：我们根据一个孩子刚出生几个月的身高，加上我们所掌握的儿童生长曲线去预测这个孩子成年后的身高应为正常人的身高。但十八年后，发现这个孩子却长成了个巨人。

新玩家入场

为了判断上面分析中所做的论述，目前我们亟需要更多的新玩家（独立的测量手段），对Hubble常数进行高精度的测量。在诸多备选方案当中，目前看上去最有希望的一个是来自于强引力透镜系统的时间延迟测量方案，另一个是来自于引力波的标准汽笛（Standard Sirens）方案。

对于前者，所谓强引力透镜现象，就是指由于引力效应造成的光线偏折效应强大到可以由单个源产生多个像（如万花筒一样）。这种效应往往发生在背景星系与质量巨大的透镜体在视线方向上几乎共线的情况之下。相同源发出的光经过不同传播路径到达观测者，使得后者看到多像。由于光沿不同路径到达地球，其路程（光程）长短不一，这就使得：如果背景源发生短时标的光度变化，那么多个像之间的光变曲线应当形状一致，但相互之间稍有时间差。这个时差越大，标志着不同光路的光程差越大。而后者与透镜体的性质与Hubble常数相关。利用强引力透镜系统的多像的位置信息，我们可以很好地把透镜体的性质重构出来。这样，这个时差就只跟Hubble常数相关了。利用这种多像之间的时间延迟现象，我们可以估计Hubble常数的数值。最近的，H0LiCOW项目团队⁴，利用3个这样的类星体强引力透镜系统，成功地将对于Hubble常数的测量误差提高到了4%左右。但是，相比于前两种方案，目前该方法的精度还不够给出决定性的判断。

对于标准汽笛，最成功的案例来自于前不久发现的双中子星并合事例GW170817⁵。通过引力波的波形原则上我们可以很好地估计出波源距离我们的距离，而通过对于引力波源所在的宿主星系的光度以及光谱的测量我们可以确定红移以及速度信息。进而，利用Hubble定律（公式1）我们便可以测量Hubble常数了。但由于当前测量精度不足的原因，目前的测量精度还远在10%以上，同样地难以给出确定性的判据。但该方法相比于其他方案的优势在于其距离的确定来自于完全独立于电磁信号的引力波窗口，其物理性质极为清晰，是未来极具有希望的方法。

本文简要地回顾了，在过去近一个世纪的时间里，人类对于Hubble常数的测量历程。可以负责任地说，目前我们已经来到了一个测量该量的一个关键时间节点。未来的五到十

年间，我们有可能将对Hubble常数的测量推进到1%的精度以内。这对于人类了解宇宙演化规律具有十分重要的意义。

【参考文献】

1. Hubble, Edwin (1929) *PNAS*. **15** (3): 168–173.
2. Riess et al. *The Astrophysical Journal* 826(1) · April 2016
3. Freedman, *Nat.Astron.* 1 (2017) 0121
4. Bonvin et al. *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* 465 (2017) no.4, 4914-4930
5. LIGO-VIRGO COLLABORATION et al. *Nature* 551 (2017) no.7678, 85-88