

# 超导“小时代”之七

## 冻冻更健康

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-02-03 收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160310

至于有法无法，有相无相，如鱼饮水，冷暖自知。

——岳珂（宋）《程史·记龙眠海会图》

地球绕着太阳公转一圈又一圈，我们的世界度过一年又一年，四季轮回和寒暑交替反映出地球距离太阳的远近，赤道热和两极冷告诉我们阳光直射角度的差异(图1)。由于人类是恒温动物，在酷暑炎夏里，就要穿着简单清凉，而在寒冬腊月里，则要裹上毛衣棉绒——这就是人们对冷和热的最直接感受。欲准确描述多冷多热，我们需要一个客观的物理概念——温度，用于描述物体的冷热程度。一般来说，

人体的温度在37℃(摄氏度)左右。烈日炙烤下的美国加州死亡谷，可以达到56.7℃，而伊朗卢特沙漠的地表温度竟然可高达71℃，真是热死人不偿命。相比高温，地球上的低温更是吓人。寒潮来袭的时候，-30℃以下的气温足以让一盆刚洒出去的热水瞬间结成冰凌，也可以把一座灯塔整个用冰柱封住(图2)。确实，凛冬将至，哆罗罗，哆罗罗，寒风冻死我，不是开玩笑的。比如史上最冷的温度记录发生在南极最高峰文

生峰顶<sup>[1]</sup>，足足有-89.2℃，比体温低了百度还多。话说回来，科学史上第一个温度标准，并不是摄氏度。对于大部分物体来说，如果它保持在同一种状态下(例如固体、气体、液体)，那么一般都遵循热胀冷缩的普遍规律。因为微观上组成物质的原子或分子也不太安分，喜欢跑来跑去做热运动，热了就要散开乘凉，冷了就会抱团取暖。“近代科学之父”伽利略早在16世纪就发现了这个秘密，他根据气体热胀冷缩的原理制作了第一个空气温度计。可惜这个温度计太粗糙，伽利略祖师爷甚至懒得去定义一个温标来刻画温度的大小。直到100多年后，酒精温度计被罗默发明，并在一个叫做华伦海特的玻璃商手下得以改进。华伦海特觉得光知道温度变大还是变小远远不够，应该准确定义一个温度的数值。于是他取氯化铵和冰水混合物的温度为0度，人体温度为100度，把水银的膨胀体积在此之间分成100等份，每一份就是1华氏度，符号为°F。但是人人都有感冒发烧的时候，体温有时不大靠谱。经过数次斟酌修改，华伦海特最终将水的沸点定为212°F，冰点定为32°F，这样人体体温约为98.6°F<sup>[2]</sup>。华氏度一推出，不少科学家并不是很喜欢，反而纷纷推出了自己的温标，于是诸如兰氏度、列氏度、摄氏温度等相继出炉<sup>[3]</sup>。最终被广泛接受的还是摄氏温度：取一个标准大气压下的冰水混合物为0度，水的沸点为100度，这样人体体温约为37℃。然而，至今在不少欧美国家，华

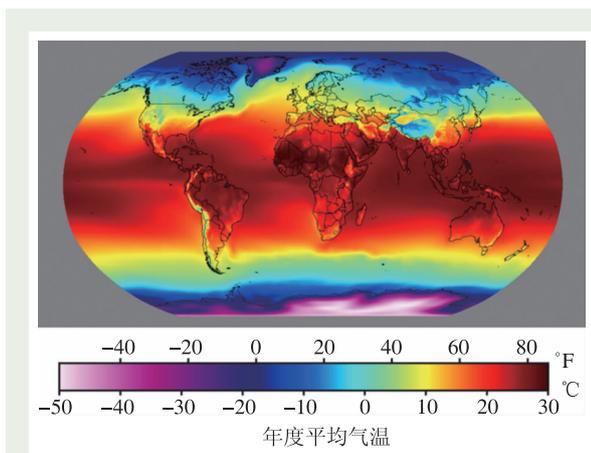


图1 全球年度平均气温分布(引自英文维基百科)



图2 极寒天气下洒水成冰与冰凌封塔(引自新华网 www.news.cn)

氏度仍然普遍使用。所以当你听说某人高烧 100 多度的时候，千万别以为他是被开水烫熟了脑袋，因为人家说的是华氏度。

之所以有那么一堆奇奇怪怪的温标，主要还是因为采用的测温物质不同。水银、酒精、石油可以作为液体温度计，空气可以作为气体温度计，金属和电偶等可以作为固体电阻温度计。各种各样的温度计五花八门，令人眼花缭乱。如此定义的各种温度也严重依赖于测温物质的物理属性。

有没有那么一种温标，它完全可以不依赖于测温物质，只由物理基本规律决定？

答案是肯定的。威廉·汤姆孙，著名的开尔文勋爵从热力学第二定律出发，提出以热量作为测定温度的工具，即把热量作为温度的唯一量度，就可以建立不依赖于任何测温物质的温标——开氏温标，亦称热力学温标，符号为 K(开尔文，简称开)<sup>[4]</sup>。1954 年，国际计量大会正式规定，一个标准大气压下，水的固液气三相点热力学温度为 273.16 K<sup>[5]</sup>。如此，冰水混合物的温度就是 273.15 K(注意差了 0.01 K)，对应于 0℃。摄氏度和热力学温度之间换算只需要简单加上 273.15 这个数字就可以了(三个温标之间的对应关系见图 3)。为什么，又是这么奇怪的一个数字!？回去看 18—19 世纪关于气体热胀冷缩的研究就明白了。1787 年法国的查理发现气体每升高 1℃，定量气体膨胀出的体积约为 0℃下体积的 1/269。后来 1802 年法国的盖·吕萨克精确测定这个膨胀率为 1/273.15。做个简单的线性外推的数学，物理学家干脆就把 0℃定义为 273.15 K 了。在热力学温标下，温度是采用物理学基

本定律严格定义的，存在那么一个温度的绝对零点，即 0 K，称之为绝对零度，也因此，热力学温度又称为绝对温度。在严谨的科学研究当中，一般都采用热力学温标来表征温度大小。

以零为起点，温度往上是无上限的。地球的平均温度是人类适宜生存的，约在 20℃—30℃之间。科学上，一般定义 300 K(约 27℃)为室温(Room Temperature)，也正是我们喜欢的温度环境。要是到太阳表面就热得不得了，高达 6000℃以上，至于牛郎星和织女星，更是热情超火，接近一万摄氏度！最最最火热的年代，是我们宇宙诞生之初，冲到十亿多度不是问题。历经 138 亿年到了今天，我们的宇宙已经“冷静”到了 2.7 K，只残余一些微波背景辐射。暴露在如此低温的太空，人类是肯定被秒杀的，目前只发现有一种叫做水熊虫的小生物可以生存数小时<sup>[6]</sup>。

有没有一种可能，让我们实现绝对零度？

答案当然是，否定的。既然都说是“绝对的”零度，就永远不可能实现。但是莫着急，人类还是可以在实验室无限逼近绝对零度的。换言之，绝对零度只是一个低温极限，不可能实现，但可以逼近。

如何实现低温？还是来看看我们生活里最常用的物质——水，就可以得到灵感。一杯热气腾腾的开水放不久就变成凉白开，除了因为空气导热之外，水蒸发成汽也带走了不少热

量。冬天里下雪之后即使出太阳，也会感到更加寒冷，是因为冰雪融化成水吸收了环境大量热量(图 4)。这告诉我们两个事实：环境温度导致了物体状态的变化，反之，物体状态的变化也可以改变环境的温度。除了温度之外，还有什么能改变物体状态？那就是压强。你可听说过 100℃的固态冰或 200℃的液态水？没错，这完全是可能的！主要是因为我们习惯了一个大气压的环境，以致于上青藏高原都忘了带高压锅煮米饭。水的温度一压强相图明确告诉我们，水有多种物质形态，只是在一个标准大气压下，冰点为 0℃罢了(图 4)。只要压强足够高，水蒸气完全可以在 200℃下就转化为液态水<sup>[7]</sup>。推而广之，只要压强足够高，许多常压下的气体都可以被液化，如果再回到标准大气压(常压)，那么这些液化气的温度就比室温要低。常压下各种气体的

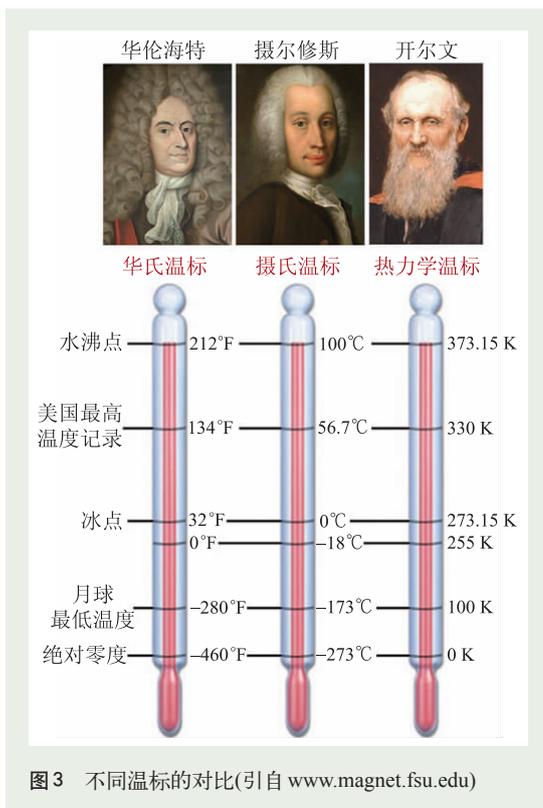


图 3 不同温标的对比(引自 www.magnet.fsu.edu)

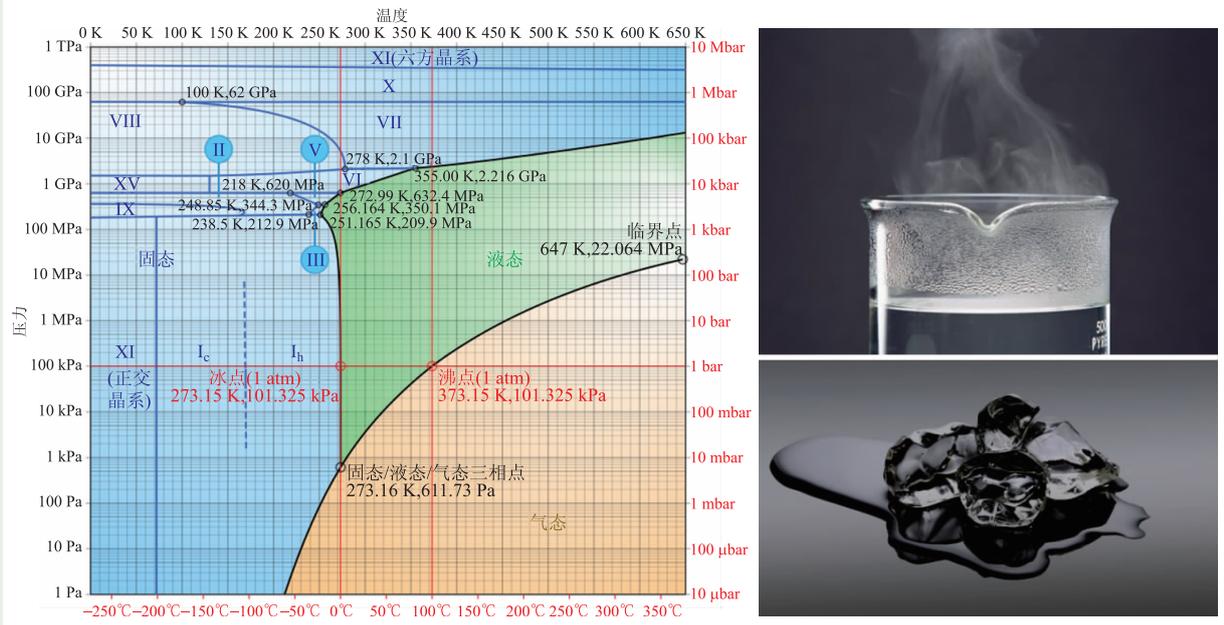


图4 (左)水的温度—压强相图；(右)水变水蒸气与冰融化成水(引自 zh.wap.wikipedia.org 和 www.3lian.com)

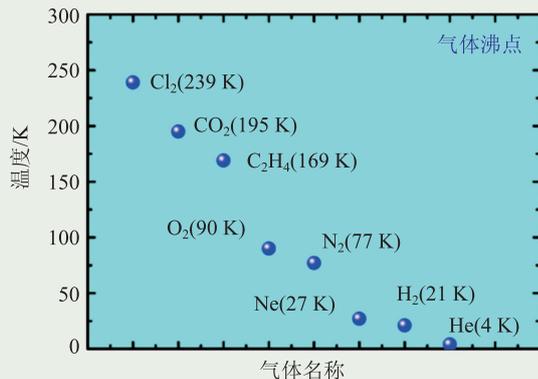


图5 常压下各种气体的沸点

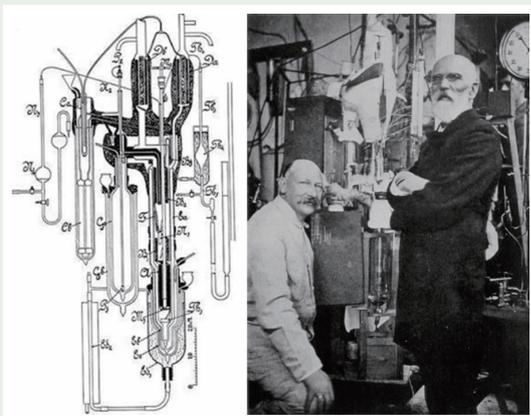


图6 (左)氦液化装置；(右)卡末林·昂尼斯与范德瓦尔斯在实验室(引自英文维基百科)

沸点是很不一样的(图5)，二氧化碳约为195 K，液化石油气的主要成分乙烷是169 K，氧气是90 K，氮气是77 K。分离空气中各种气体的最佳办法就是利用各种气体沸点和压强依赖关系不同，工业上用到大量的氮气和氧气就是这么制备的。如果把这些液化的气体进一步减压或迅速气化，就可以得到比其常压沸点更低的温度<sup>[8]</sup>。

增大压强来液化气体的方法虽然简单粗暴，但还算快速高效。然而，当人们试图进一步液化其他气体如氖气、氢气和氦气的时候，遇到了前

所未有的困难。原来，先前的气体理论认为的都是“理想气体”，即气体分子间距是分子直径的1000倍以上，分子大小和相互作用可以忽略不计，所以气体压强和体积、温度都成简单的正比关系。但是，如果气体分子被压缩到一定程度靠得太近的时候，分子本身的大小和分子之间的相互作用就不得不考虑了。1873年，荷兰莱顿大学的一篇博士毕业论文解决了这个关键物理问题，论文作者叫做范德瓦尔斯(常被译成范德华，但人家真不姓范，而是个如假包换的洋人)。论文里提出了一个新的“状态方程”，考虑到分子体积和相互作用，把气体和液体当作一个可连续变化的共同体<sup>[9]</sup>。如此简洁优美的方程被另一位理论物理大师——麦克斯韦用一条论文注解所证明，范德瓦尔斯也因此声名鹊起，并于1877年担任阿姆斯特丹市立大学的物理系第一教授。

如果大家还记得的话，是的，



图7 (上)昂尼斯和同行在实验室讨论；(下)莱顿大学的液氦纪念碑(引自英文维基百科)

范德华同学毕业的莱顿大学就是莫森布鲁克发明莱顿瓶的地方！

优秀的高校总是能不断涌现重大的科学发现。1882年，实验物理学家卡末林·昂尼斯进驻莱顿大学，并创建了历史上最重要的低温研究中心——莱顿实验室。他的首要目标，就是把最后未被液化的两个气体——氢气和氦气给液化，得到更低的温度环境。昂尼斯很幸运，实验上，他改进了英国人詹姆斯·杜瓦于1880年成功液化氧时发明的真空保温装置——杜瓦瓶；理论上，他有校友范德瓦尔斯大教授的指导(图6)。昂尼斯花了十余年时间在莱顿实验室建成了大型的液化氧、氮和空气的工厂，十年磨一剑，终于通过低温下把高压氢气迅速膨胀，他于1898年获得了液态氢，同年杜瓦也成功制备了液氢。液氢在常压下沸点是21 K，如此低的温度下，连氧都成了淡蓝色的固体。但还有最后一个“懒惰”的气体还“顽固不化”，那就是氦气。氦气是最轻的惰性气体，它似乎有些清高孤傲了点，硬是不和别的元素发生相互作用，也难以被液化。但昂尼斯有信

心，因为他掌握了液氢这个尖端武器。利用液氢，他首先把氦气冷却到了20 K左右的低温环境，然后让加压的低温氦气流通过他设计的一系列复杂的管道“隧道”，每过一个节点就让它体积迅速膨胀，温度就低了一点。终于，1908年7月10日那一天，昂尼斯在莱顿实验室观察到了第一股透明的液氦<sup>[10]</sup>。液氦在常压下沸点仅为4.2 K，创下了所有气体沸点的低温记录(图7)。昂尼斯十分兴奋地把消息分享给了范德瓦尔斯，实验最终证明他的理论是十分成功的。这促使范德瓦尔斯于1910年获得了诺贝尔物理学奖，物理学上也把分子之间相互作用力命名为范德华力，以纪念他的杰出贡献。

液氢的发明让低温物理学进入了新篇章。液氢在常压下4.2 K沸腾，如果进一步节流制冷，可以达到1.5 K左右的低温。在如此低的温度下，液氢还会展现出一种非常神奇的现象——超流。这时氦虽然处于液态，但其中的氦原子之间几乎不存在范德华力，于是液氢就完全失去了黏性，它会借助容器壁的吸附力自行往上爬，再从容器外表面慢慢流到容器的底部，变成液滴，然后像眼泪那样一滴一滴地落下(图8)<sup>[11]</sup>。

低温的世界，就是如此有趣！

低温物理的研究，激发了人们对未知现象的强烈好奇。为此，科学家们先后努力尝试各种办法获得更低的温度。把<sup>3</sup>He和<sup>4</sup>He同位素混在一起，改变<sup>3</sup>He的浓度，可以做到所谓“稀释制冷”技术，将实现10 mK(1 mK等于千分之一开)左右的低温。利用六束激光把原子束束缚在“陷阱”里，就像用无数个乒乓球从四面八方去轰击振动的铅球一样，热运动中的原子会逐渐“冷静”下来，最终达到nK(十亿分之一开)的极低温。实验室创造的低温记录由核绝热去磁的技术所实现，即把原子核磁化，然后在绝热环境下再退磁，原子核都要被“冻住”，这时原子核的温度只有0.1 nK(百亿分之一开)左右(图9)<sup>[12]</sup>。

在不断逼近绝对零度的进程

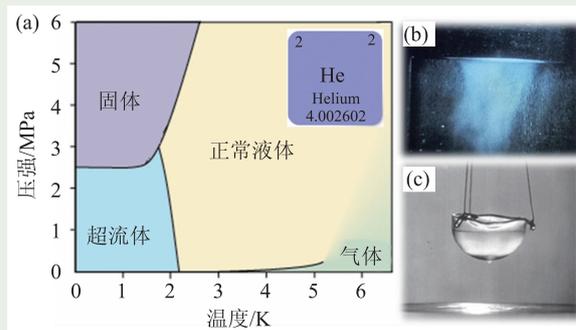


图8 (a)He的温度—压强相图；(b)常压下液氦在4.2 K沸腾；(c)低温下超流的液氦(引自英文维基百科)

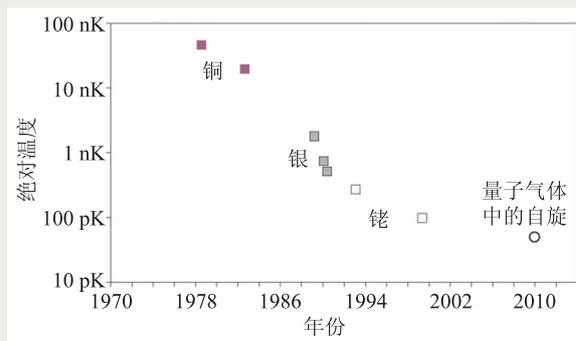


图9 实验室创造的低温记录<sup>[12]</sup>(引自 www.nature.com/nature-physics)

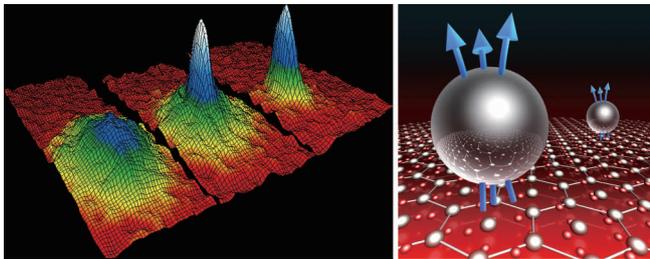


图10 (左)超冷原子的玻色—爱因斯坦凝聚图(引自英文维基百科);(右)分数量子霍尔效应(引自www.qpec.t.u-tokyo.ac.jp)

中,人们除了发现超流这类神奇的物理现象外,还发现了许多新物质态。比如玻色—爱因斯坦凝聚态和分数量子霍尔效应等

(图10)。前者指的是一些原子在极低温下会“集体冻僵”到低能组态<sup>[13]</sup>,后者指的是电子在极低温强磁场下会“精神分裂”成分数化的量子态<sup>[14]</sup>。可见,极度低温下“冻一冻”会让原本热衷于东奔西跑的微观粒子恢复本来的“健康”面目——展现出极其复杂的量子行为。

低温的世界,真就这么神奇!

## 参考文献

- [1] Lyons W A. The Handy Weather Answer Book. Michigan, 1997
- [2] Fahrenheit D G. Phi. Trans. Roy. Soc., 1724, 33: 1
- [3] Bolton H C. Evolution of the Thermometer. Pennsylvania, 1900
- [4] Lord Kelvin. On an Absolute Thermometric Scale. Phil. Mag., 1848
- [5] Resolutions of the 10th CGPM, Bureau International des Poids et Mesures, 1954
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature>
- [7] Chaplin M. Water Phase Diagram. London South Bank University, 2015
- [8] Reif-Acherman S. Rev. Bras. Ensino Fis., 2011, 33(2): 2601
- [9] van der Waals. Over de Continuïteit van den Gas-en Vloeistofoestand. PhD thesis, Leiden, The Netherlands. 1873
- [10] Onnes H K. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 1908, 108: 3
- [11] Grimm R. Nature, 2005, 435: 1035
- [12] Tuoriniemi J. Nat. Phys., 2016, 12: 11
- [13] Glanz J. 3 Researchers Based in U.S. Win Nobel Prize in Physics. The New York Times, 2001
- [14] Tsukazaki A *et al.* Nat. Mat., 2010, 9: 889

## 巴比伦天文学家使用抽象的几何学追踪木星

古代巴比伦天文学家可能已经使用几何学计算空中木星的运动,这意味着他们对应用数学的理解比历史学家此前所想象的要复杂得多。这是柏林洪堡特大学天文学—历史学家 Mathieu Ossendrijver 的结论。他对5块巴比伦石碑的分析表明,巴比伦人能够在抽象的意义上应用几何学,而不是仅仅用它来测量物理空间。Ossendrijver 已破译的一块楔形文字石碑保存在大英博物馆,并且和已知相关的其他4块石碑链接到一起被分析;这其他4块,以一种数学的表达描述木星沿黄道的运动。Ossendrijver 说,碑文表明:巴比伦司天书记吏可以使用数据表示角速度随时间的变化。就像用图形方法解二次方程,曲线下的面积可以分成一块块梯形;求和梯形的面积,然后给出在一个特定的时间段,木星穿越天空所走过的角距离。“这块碑包含木星运动的完整描述,在不同的时间段以每天扫过的角度描述角速度大小,” Ossendrijver 解释说。

如果 Ossendrijver 的破译是正确的,巴比伦人抽象运用几何知识便可以被认为是概念上的飞跃。这是第

## 物理新闻和动态

一次也是我们知道的仅有的一次,巴比伦人将几何应用于天文学。年代大约是公元前350至50年间。没有其他的证据表明,他们在天文学以外领域使用几何;事实上,也没有证据表明,他们曾应用几何学追踪木星以外的其他行星。

同行学者评议说,这是令人振奋的,已经能看到,涉及梯形块的这些程序之间的连接;进而看到,木星通过它的会合周期,其位置沿黄道前移。然而并不是所有人都全面认可 Ossendrijver 的结论。其他数学石碑,在叙述土地尺寸测量时,往往伴随有图作附带说明;但用几何学追踪木星,没有看到相关的图。迟至公元第14世纪,欧洲学者 Nicole Oresme 才描述了行星轨道之图形方法。公平地说,巴比伦人本能地把握了平均速度的概念,可以认定是这次研究获得的进展。所有被研究的石碑块都有某种程度的受损,或许包含图的部分缺失了。我们期待某些带有图的碑块被发现。令人困惑的是:为什么梯形法似乎仅限于少数描述木星运动的碑块?为什么知识传承后来会丢失,直到中世纪才在欧洲被重新发现?

(戴 闻 编译自 *Physics World News*, 28 January 2016)