

# 关于物质-反物质对称性 破缺的发现

陈缮真

(意大利核物理研究院)

2019年3月,欧洲核子研究中心(CERN)的物理学家宣布,他们在粲夸克系统中也找到物质和反物质不完全对称的证据。“物质和反物质”、“对称与不对称”,这究竟是怎么一回事呢?让我们从头说起。

1900年,物理学家开尔文男爵在英国皇家学会上发表演讲,他在展望20世纪物理学前景时,敏锐的指出了当时物理学的两个最重要的问题,并形象的把这两个问题比喻为物理学天空上的两朵乌云。后来,对于这两朵“乌云”的研究,终于酿成了一场颠覆传统物理学大风暴,并由此分别建立了20世纪物理学领域最伟大的两个分支:相对论和量子理论。相对论描述了一种全新的时空观,而描述那些如原子一般非常小的尺度的世界的规律的理论则是量子理论。

1928年,年轻的英国物理学家保罗·狄拉克(Paul Dirac)写下了电子量子理论的方程式,这个方程成功的描述了电子在微观世界的行为,并不带矛盾地同时遵守了狭义相对论与量子力学两者的原

640个耦合器。

另外,LAL已经开始建造全新的X射线光源,ThomX。这一领先的装置隶属于法国国家科研中心2011年布署的先进设备计划,它有很多应用,如艺术品的非破坏性诊断。因为尺寸小,造价低,会有很多实验室和私立公司对它感兴趣。很多基础性的研究活动也在继续,比如参与日本KEK的ATF2的束流运行,实验打破了束流最小发射度的记录。LAL还参与CERN的UA9实验,研究在SPS

理。然而这个方程有一个奇怪的属性:它有两个解,其中的一个解对应了电子的运动。而另一个解,则明显在描述一种带有负能量的粒子。当时的人们认为,狄拉克方程的第二个解实际上是在描述一种普通的带有正能量的电子的反粒子,也就是所谓的正电子。

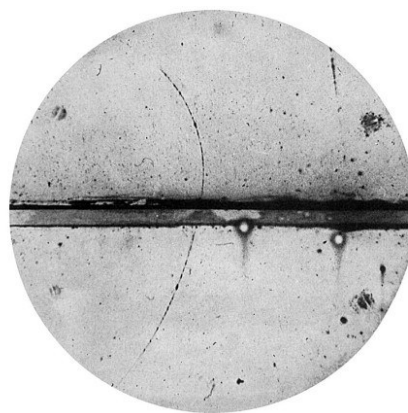


图1 安德森观测到的正电子在云室中留下的轨迹的照片。正电子从下往上运动,在磁场中穿过一层薄薄的铅板之后,改变了轨迹弯曲的曲率。轨迹弯曲的方向表明,正电子与正常电子所带的电荷相反

和LHC上的束晕的准直方法。

关于作者雅克·海森斯肯

这篇文章是基于BTML 2013特别活动的宣传册写成的,可以在网络上阅读(英语、法语和意大利语)。访问<http://events.lal.in2p3.fr/BTML2013/index-en.html>。

(本文译自雅克·海森斯肯, CERN Courier Volume 54, Number 1)

四年之后的1932年,美国物理学家卡尔·安德森(Carl Anderson)在实验中利用云室第一次观测到了正电子的轨迹。也正是此发现,使得人类第一次揭开了反物质的面纱。反粒子是相对于正常的粒子而言的,它们的质量、寿命等都与正常的粒子相同,但是所有的内部相加性量子数,比如电荷等,却都与正常粒子大小相同、符号相反。除了与正粒子相对的反粒子之外,还有一些所有内部相加性量子数都为0的纯中性粒子,这种粒子反粒子就是它本身,比如光子。而自从正电子被发现以后,人类就没有停下过探索反物质的脚步。

与狄拉克和安德森同一个时代,天文学家们正在寻求用另一种方式来理解我们的宇宙。在20世纪20年代,美国的天文学家埃德温·哈勃(Edwin Hubble)通过对星空的观测发现,远处的星系的光谱出现了波长增加、频率降低的现象。由于这种现象在可见光波段,表现为光谱的谱线朝红色的一端移动了一段距离,因而被人们称之为红移。光的红移是由多普勒效应引起的。就像当警车经过时,多普勒效应会导致警车警笛声改变音高。当警车向观察者移动时,声音的波长会被压缩,但是当警车离开时波长则会被拉长,光的波长也会因与观察者之间的相对运动而变化。哈勃发现,从地球到达这些远处的星系的距离正比于这些星系的红移,由于出现了

光的红移现象,说明宇宙中星系间的距离正在不断的成比例增大,进而我们可以推断在遥远的过去,宇宙中星系间的距离曾经很近。物理学家进一步大胆推测,在其诞生之初,宇宙曾经处于一个极高温密度极高密度的状态,这就是宇宙大爆炸理论的雏形。

根据宇宙大爆炸的理论,我们的宇宙开始于一个密度和温度都无限高,均匀并且各向同性的纯能量状态,这个状态被称为奇点。在如今大多数常见的宇宙大爆炸的模型中,早期的宇宙曾经历了一次暴胀的过程,在这个暴胀的过程中,基本粒子被创造了出来,纯能量转化成了大量高速运动的粒子-反粒子对,而粒子-反粒子对在此期间也通过碰撞不断地创生和湮灭,因此宇宙中此时的粒子和反粒子的数量相等。这时的宇宙就像是一锅充满了夸克和胶子以及其他基本粒子的汤。此时某一种机制导致了夸克和反夸克的数量出现了细微的差异,随着宇宙进一步的膨胀和冷却,夸克和胶子逐渐组成了像是质子和中子这样的粒子。由于此时宇宙的温度已经降低到不足以产生新的质子-反质子对或中子-反中子对,原先产生的正反粒子对大量的湮灭,只有大约占原先数量十亿分之一的正物质质子和中子被留了下来,而对应的反物质粒子则全部湮灭殆尽。电子和正电子稍后经历了类似的过程,同样,只有那细微差异下多出来的那部分电子被留

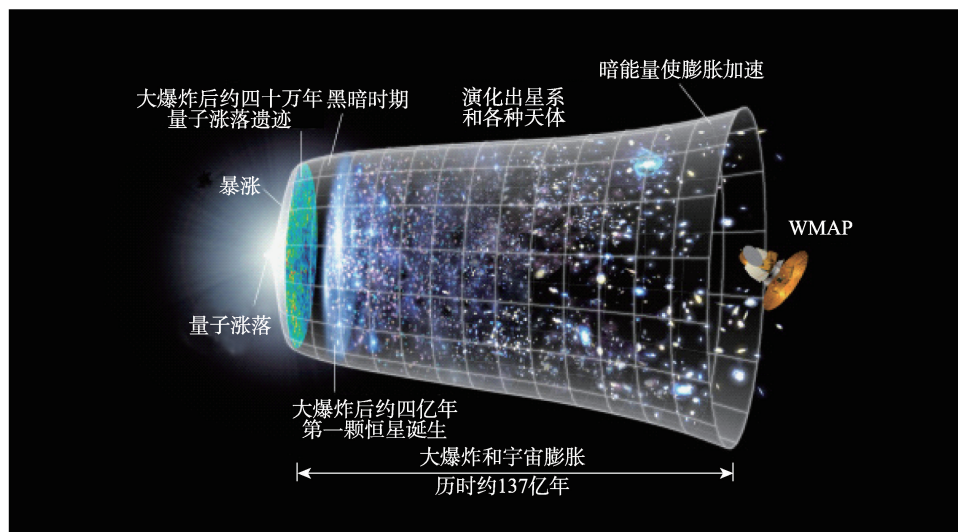


图2 描述宇宙大爆炸及之后演化过程的艺术构想图。其中横坐标表示宇宙演化的时间,而对应的空间尺寸用相应的圆横截面表示

了下来。后来的宇宙经过了漫长的演化,合成了原子,诞生了恒星,星系,乃至生命。而这一切的一切,都只不过是那十亿分之一残留的正物质。

然而,究竟是什么导致了正粒子和反粒子之间最初的那细微的差异?对此,人类从未停止过探索。而这探索,要从人类对于对称性的探索开始讲起。

20世纪50年代之前,人类从未怀疑过物理学中“对称性”这一简朴而又古老的观念。向左旋转的小球和向右旋转的小球遵循着相同的物理规律,带有正电荷的物体和带有负电荷的物体同样遵循着相同的物理规律,甚至,如果让时间倒流,运动的物体依然会遵循和我们真实世界相同的物理规律。近代的物理学家则进一步证明了各种对称性和各种物理守恒定律之间的关系。

然而在1956年,为了解释为何两种质量和寿命相同,看起来像是同一种的粒子的 $\theta^+$ 粒子和 $\tau^+$ 粒子(后来被证实其实就是同一种粒子,现在叫做 $K^+$ 介子),却有着不同的宇称量子数和不同的衰变产物,李政道和杨振宁提出,在弱相互作用(自然界中的四种基本相互作用力之一)中,微观的粒子的行为可能不存在宇称量子数的守恒。宇称的守恒对应的对称性是“左”和“右”的对称,李政道和杨振宁的推测也就是说在微观世界中,“左”和“右”的物理规律并不完全相同。

这个推测在当时的年代颇具震撼力,打破了被千百年来人类视为金科玉律的观念。第二年,华裔科学家吴健雄女士等科学家在对钴60( $^{60}\text{Co}$ )衰变的观测中证实了这项推测,她利用两套装置中互为镜像的钴60设计了一个实验,一套装置中的钴60原子核自旋方向转向左旋,另一套装置中的钴60原子核自旋方向转向右旋,结果发现在极低温的情况下两套装置中放射出来的电子数有很大差异,进而证实了李政道和杨振宁的假说。同年,李政道和杨振宁因为这一项划时代的假说,获得了当年的诺贝尔物理学奖。

巧合的是,几乎同一时期,荷兰的画家埃舍尔(M. C. Escher),也在热衷于用艺术表达对于对称性的理解。在埃舍尔的作品《白天与黑夜》中,画面的左右几乎反色对称,然而细节却有微小的差异,这似乎和粒子物理学中“左”“右”的对称性及其破缺不谋而合。

在弱相互作用下的宇称的对称性破缺被发现后不久,物理学家发现在弱相互作用下,电荷共轭的对称性也是破缺的。此时,列夫·朗道(Lev Landau)以及李政道和杨振宁认为,电荷-宇称(CP)两个量子数的联合,应该保持着良好的对称性。电荷-宇称对称性的守恒可以使得粒子和反粒子遵循着相同的物理规律。

在20世纪50年代,科学家们在对于K介子等粒子的研究中发现了很多奇异的现象,因而K介子等

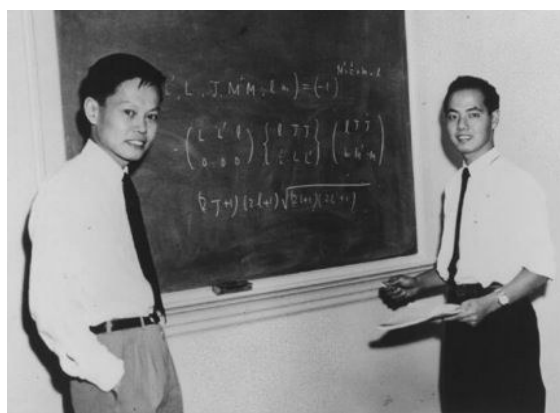


图3 李政道(右)与杨振宁(左)



图4 吴健雄女士



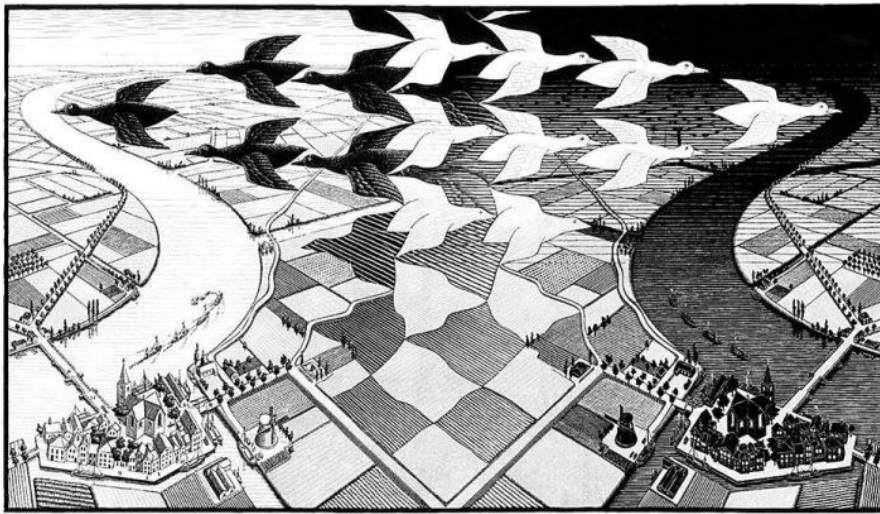


图5 埃舍尔作品《白天与黑夜》，画面中隐喻的信息和李政道与杨振宁的宇称不守恒理论不谋而合

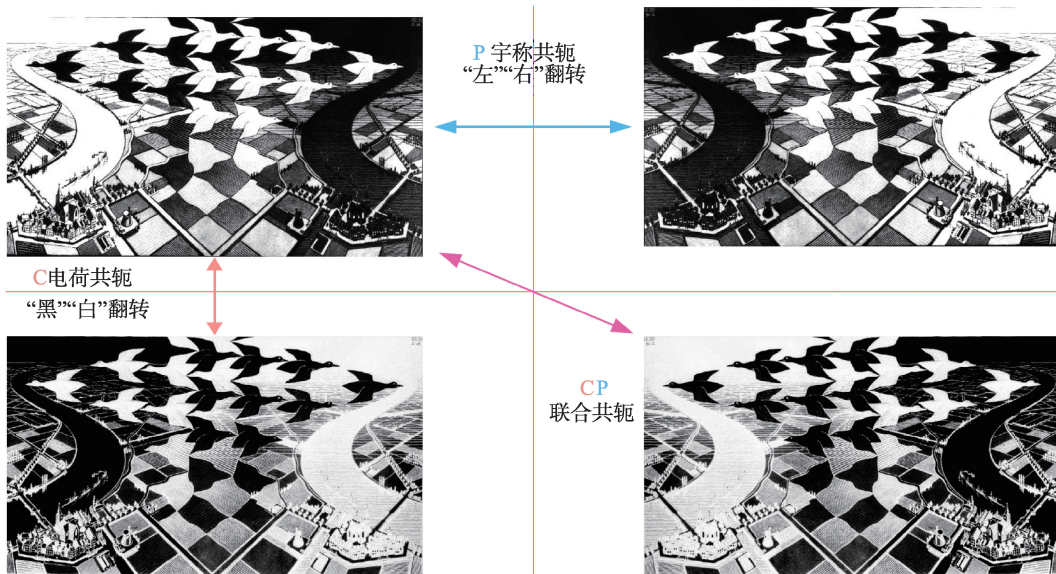


图6 利用埃舍尔的作品来理解宇称共轭与电荷共轭。宇称共轭导致图像左右翻转，而电荷共轭则使图像黑白颠倒，二者共同作用时，图像与原始图像类似

粒子所带有的夸克也被命名为“奇异夸克”。在1964年，科学家们在奇异夸克的介子衰变中，发现了另一个更加“奇异”更加难以让人接受的事实：电荷-宇称联合的对称性似乎也不守恒。在电中性K介子的衰变中，詹姆斯·克罗宁(Jim Cronin)和瓦尔·菲奇(Val Fitch)发现，本应衰变成三个 $\pi$ 介子的长寿命K介子，却有一些衰变成了两个 $\pi$ 介子。这种衰变模式是电荷-宇称对称性的守恒所不允许的。克罗宁和菲奇的研究结果给理论界带来了巨大的

冲击，也为他们带来了1980年的诺贝尔物理学奖。

为了解释电荷-宇称对称性的破缺，1973年，在意大利物理学家尼古拉·卡比博(Nicola Cabibbo)的研究的基础上，日本科学家小林诚和益川敏英建立了卡比博-小林-益川矩阵，给出了电荷-宇称对称性的破缺存在的必要条件，并在当时只发现了三个夸克的情况下预言了六个夸克的存在。1974年，伯顿·里克特(Burton Richter)和丁肇中的团队分别同时发现了第四种夸克——粲夸克，并因此获得



粒子物理标准模型

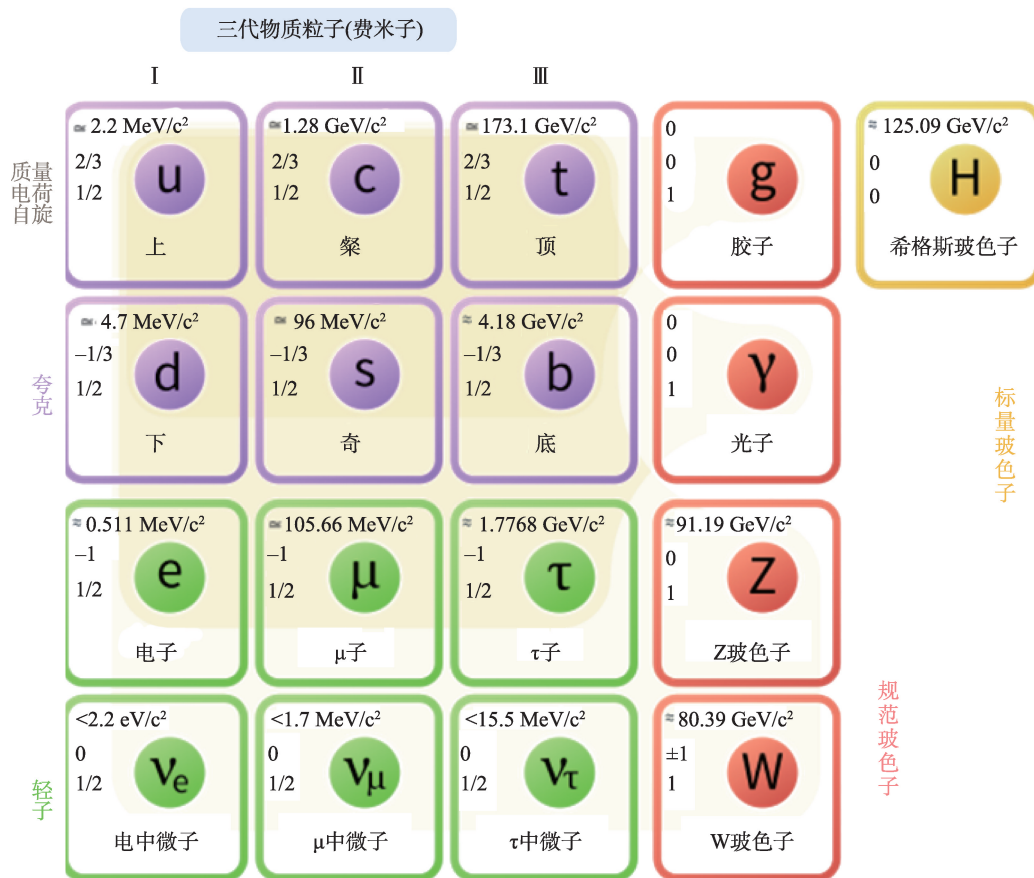


图7 粒子物理的标准模型

了两年后的诺贝尔物理学奖。之后,底夸克与顶夸克分别于1977年和1995年在加速器中被发现。至此,夸克的六种“味道”被全部发现。六种夸克,以及轻子和相互作用的传播媒介一起,组成了如今粒子物理学的标准模型。

电荷-宇称对称性破缺的发现为解释宇宙中为何只有正物质残留了下来这一粒子物理学和宇宙学的核心问题开拓了一条大道。为了更准确的研究这一问题,人类搭建了一些伟大的实验。从20世纪末开始,位于美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的BaBar实验,和位于日本筑波高能加速器研究机构(KEK)的Belle实验成为了研究电荷-宇称对称性破缺的主力。这两个探测器实验因为研究目标都是与含有底夸克的B介子相关的物理问题,并且运行于有利于B介子产生的能量区间,因而被人们称之为B介子工厂。BaBar实验和Belle

实验在2001年分别发现了B介子的电荷-宇称对称性的破缺现象,并为小林诚和益川敏英带来了2008年的诺贝尔物理学奖。

2009年,人类有史以来建设的最大的科学装置,位于欧洲核子研究中心的,横跨瑞士法国边界,周长27千米的大型强子对撞机(LHC)正式开始取数运行。在LHC上,有一个专门研究含有粲夸克和底夸克的粒子以及电荷-宇称对称性的破缺的实验——LHCb实验。在过去的10年里,LHC以及LHCb经历了两个阶段的数据获取过程,并积累了空前大量的粲介子衰变数据。2019年3月21日,LHCb实验合作组宣布,他们在有着数千万个中性粲介子衰变的样本中找到了粲夸克系统的电荷-宇称对称性破缺的证据。至此,标准模型中所有可以观测到电荷-宇称对称性破缺的夸克系统中都观测到的相应的证据,卡比博-小林-益川机制得

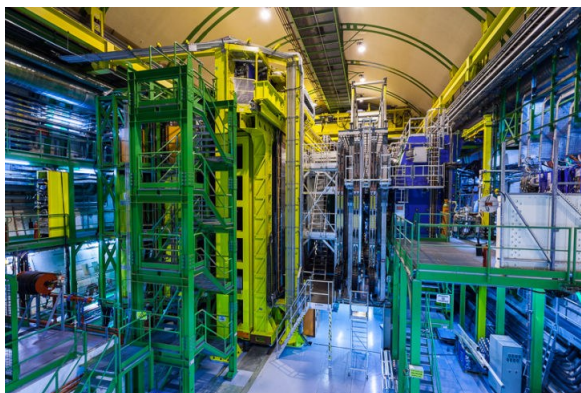


图8 LHCb实验探测器

到了进一步的证实。

3月21日的发现为利用粲夸克研究电荷-宇称对称性破缺打开了一扇门,然而,这只是开始的结束,科学探索永远是一个进行时,摆在物理学家面前的未知还有很多很多。粲夸克系统电荷-宇称对称性破缺的程度是否与标准模型预期相一致?宇宙中正反物质的不对称是否还有其他根源?电荷-宇称-时间(CPT)三者的联合是否才具有完美的对称性?这一切仍然都是留给物理学家们的待探索的谜题。

在LHCb实验宣布发现粲夸克系统的电荷-宇称对称性破缺的四天之后,2019年3月25日,日本

的 Belle 实验经过了将近十年的停机升级调试,终于以一个全新的姿态回到了粒子物理研究数据获取的第一线。全新的 Belle-II 实验经过了升级,数据获取能力提升了 50 倍,并在 3 月 25 日完成了升级之后的第一次物理对撞数据的获取。

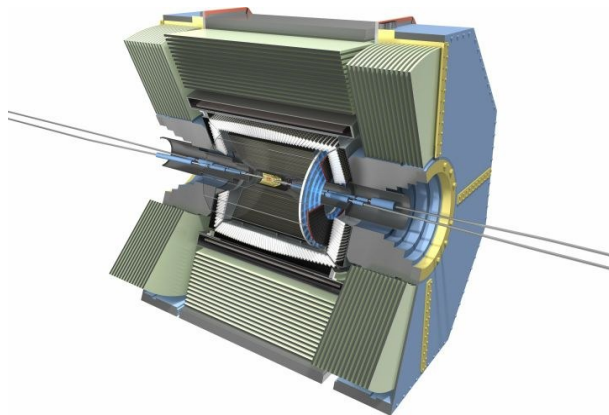


图9 Belle-II实验探测器的3D截面图

而 LHCb 实验的探测器则于 2018 年年底开始了一次为期两年半的升级过程。新的 LHCb 探测器将在 2021 年重新加入与 Belle-II 实验的竞争中来。未来的许多年, LHCb 实验与 Belle-II 实验将在电荷-宇称对称性的破缺的探索道路上继续砥砺前行,共同探索更多关于反物质的谜题。



### 科苑快讯

## 大象通过嗅觉“计数”

我们大多数人看到两个餐盘时,很容易看出哪个盘子中的食物更多。但是,如果有人关了灯,我们就倒霉了。亚洲象可不是这样的。一个新的研究项目揭示,厚皮动物能够仅仅通过嗅觉判断食物的数量,这是首次发现动物有这种行为。

为了进行研究,科学家在泰国的一个大象驯化基地,给6头亚洲象提供了两桶数量不同的葵花籽,这是深受大象喜爱的零食,桶带有大象打不开的锁扣。大象不能看到桶里装了多少葵花籽,但是他们能通过盖子上的小孔闻到里面的内容。

大象选择装有更多葵花籽的塑料桶的次数占选

择总次数的 59%~82%,研究组在《美国科学院院刊》(Proceedings of the National Academy of Sciences)上做了报告。其他研究项目表明,即使是以嗅觉敏锐著称的狗也无法做到。



(高凌云编译自 2019 年 6 月 3 日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))