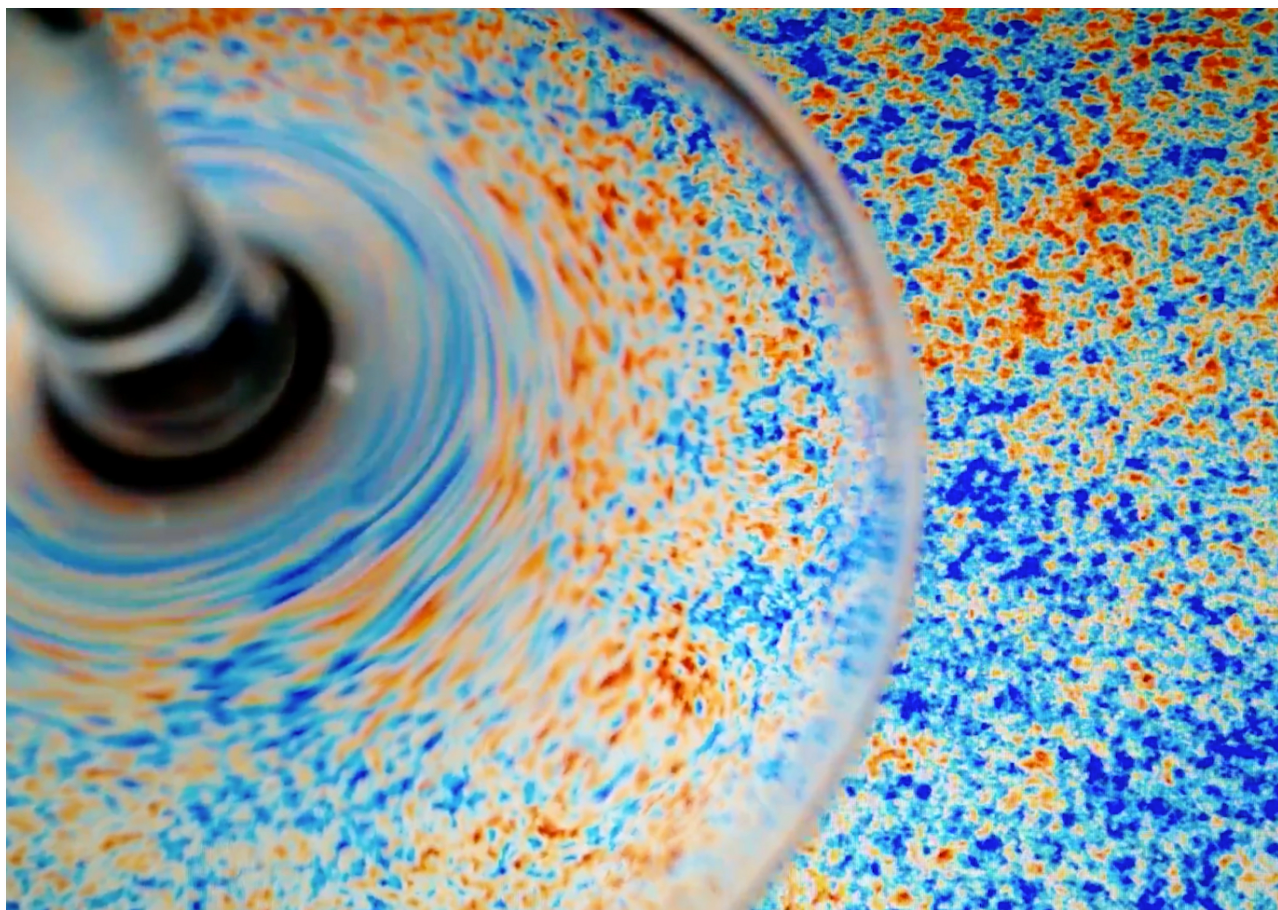

是天使还是魔鬼？

宇宙微波背景辐射的引力透镜效应

胡彬（北京师范大学天文系）



宇宙微波背景辐射物理是一门十分美丽的天文学科。说其美丽，一方面是因为她是人类至今为止能够观测到的来自宇宙深处最为微弱的光，借用已故的南京大学陆埏院士的一句话来讲“她是我们能够用光学手段看到的宇宙自诞生之日起的第一张baby face”；另一方面，真正去研究宇宙微波背景辐射（简称CMB）物理的人大都会被其机制以及现象的简洁、纯净的美而折服。下面，请允许我利用几分钟的时间带您领略一下CMB物理的美丽以及其中一种兼具天使和魔鬼双重身份的效应——CMB透镜。

CMB光子产生于宇宙刚诞生38万年时的一个被称为“再复合”的瞬间。相比于宇宙现在的状态，彼时的宇宙依旧处在“襁褓”之中，宇宙的平均热动能比氢原子的第一电离能还要高，呈现出一种充满着自由电子和自由质子的等离子态，光子在带电粒子之间穿梭。由于彼时光子的平均自由程比远远小于哈勃视界，这些光子被囚禁在其弥散半径范围之内，不会飞到我们的天线之上引发电子的振动。而当电子和质子发生“再复合”之后【注：这里其实是电子和质子第一次复合成中性氢原子，之所以被称之为“再复合”是由于该机制的发现科学发现史上是晚于恒星电离氢的复合过程。而后者在宇宙形成历史上是晚于前者的。】，形成了大量的中性氢原子，此时宇宙开始变得透明。绝大多数的CMB光子从此刻开始不再与任何物质发生相互作用，仅在引力作用下发生波长的红移，因此CMB光子保留了相当丰富的极早期宇宙的信息。而这些信息中有一部分是极其珍贵的，那就是携带了原初引力波信息的CMB的B模偏振信号。

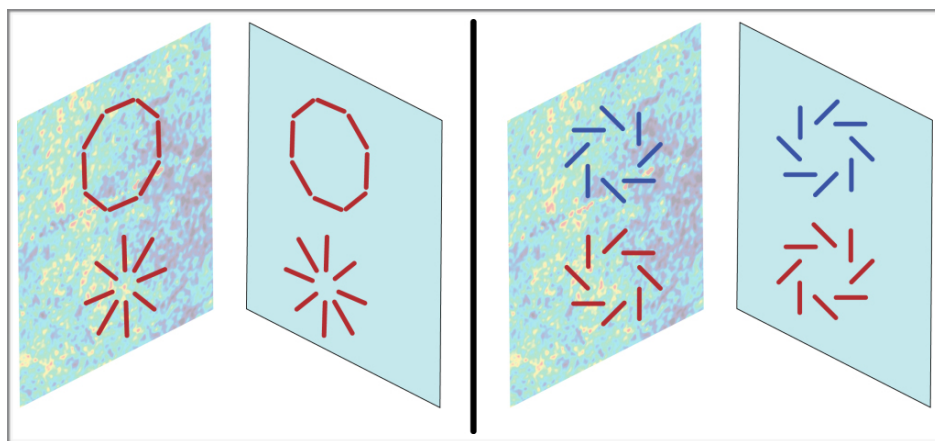


图1: CMB的E模偏振（左）和B模偏振（右）。E模偏振信号具有镜像对称的偶宇称；B模偏振具有镜像反对称的奇宇称。局域上，E模和B模相互相差45度转动。【图片来自网络】

现代宇宙学认为宇宙开始于一场热大爆炸，而在大约在刚诞生 10^{-44} 到 10^{-36} 秒的时候，宇宙发生过一次极速膨胀过程，被称为宇宙暴涨。这个时期宇宙的平均能标介于 10^{19} 到 10^{15} GeV之间。而现代高能物理理论认为，这段能标是量子引力效应十分显著的能量区间。张量形式的时空扰动（即引力波）在这个能量区间可以无中生有，从量子化的时空中产生出来，并被快速拉出视界并凝固下来，形成原初引力波。

原初引力波会造成局域时空的扭曲，产生物质和光子分布的局域四极矩不对称性。这一现象结合局域的汤普森散射过程（该过程保持偶宇称）会产生光子的E模线偏振（如图1所示）。散射后的光子在自由传播过程中，会按照角动量守恒原理将这种局域E模偏振几乎平均分配给处于14Gpc之外的观测者所测量到的E模偏振信号和B模偏振信号。而后者就是我们所经常谈论的原初引力波的信使。通过对CMB的B模偏振信号的测量，我们可以直接的反推出宇宙发生暴涨时所处的能标，即引力量子化的能量标度。

尽管上述逻辑如此清晰，但我们实际测量到的CMB的B模偏振数据中除了一系列的系统误差之外，还有另外一种来自于天上的、不可避免的噪声或信号——透镜B模式偏振。说她是噪声是因为她可以对原初引力波测量产生强烈的污染；说她是信号是因为她自身携带了丰富的关于宇宙大尺度结构形成的信息。

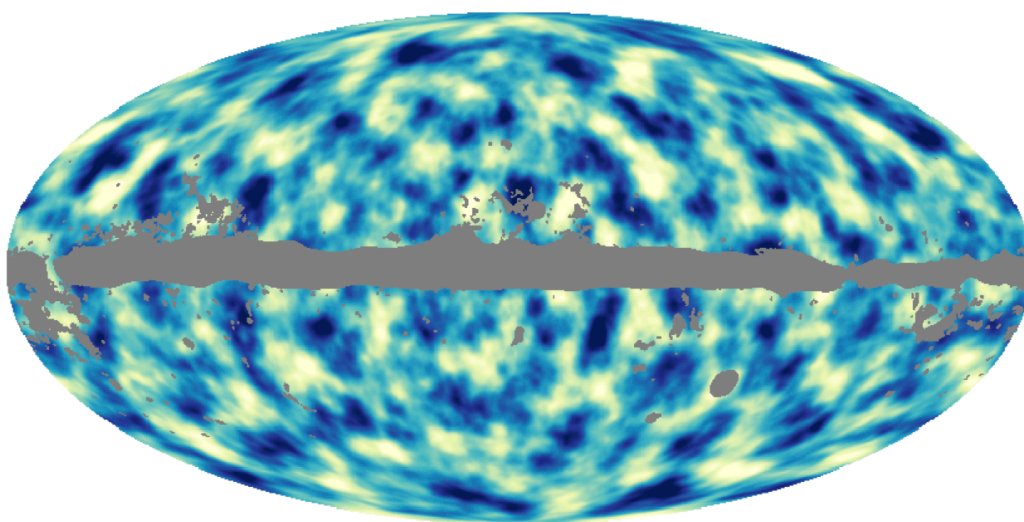


图2: 人类首次绘制的全天的CMB透镜势。【图片来自Planck科学团队】

首先，我们介绍一下什么是CMB透镜效应。光子在“再复合”发生后的近138亿年的旅程中，除了受到前面介绍的引力红移效应之外，还会穿越大大小小的引力势阱或者势垒。这些势阱或势垒是由于宇宙中的诸如星系、星系团以及暗物质晕这些大尺度结构产生出来的。CMB光子在其前进方向上遇到这些势阱或势垒后，光线会发生偏折，特征的偏折角度大约为几十角秒。在漫长的138亿年的孤独旅途上，每束光子大约会产生 $\sqrt{50}$ 次这样的方向偏折，因此其总体的特征偏折角度大约为2角分，对于现代的射电天文技术而言这不算一件太难的事。比方说，欧空局的Planck卫星项目，在2013年首次绘制了全天的CMB透镜势的分布（图2）。由于宇宙中的大尺度结构在空间中是随机分布的，因此我们可以将每个方向射过来的CMB光束所对应的偏折角也看作是随机分布的场。读者们可以从图2中，直观地感受到这些蓝黄斑片的特征尺度大约为几度的数量级（作为参考：满月的视线张角大约为半度）。而这个尺度恰好代表了宇宙中重子声学振荡效应所对应的基频波长。这其中包含了丰富的关于暗物质、暗能量以及中微子等的信息。从这个意义上来讲，CMB透镜效应是一位将宇宙的奥秘带到人间的天使。

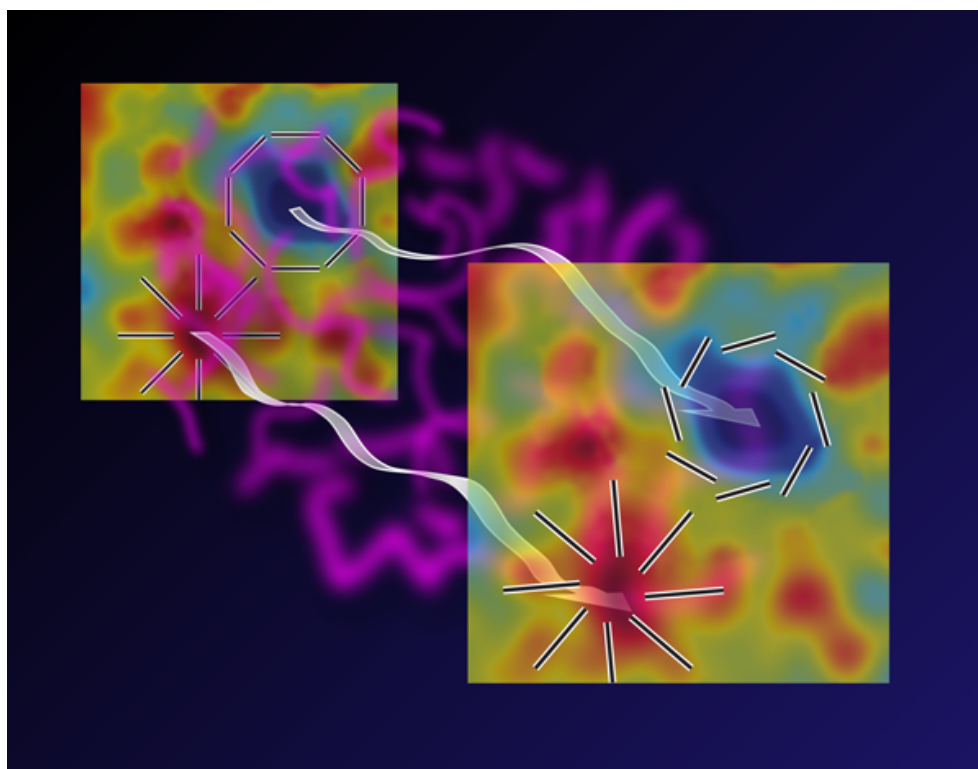


图3：由大尺度结构产生的透镜效应将背景的E模式偏振信号旋转出前景的一部分B模式偏振信号。【图片来自：APS/Alan Stonebraker】

然而，在暴涨时期除了会产生张量形式的引力波之外，更多的是由于暴涨场的空间分布不均匀所产生的原初密度扰动。原初密度场的空间分布也是随机的，也会造成光子空间分布的局域四极矩和E模式偏振。但是不同于引力波，密度波是自旋为0的场，由它所产生的局域E模式偏振在向外传播过程中不会转化为B模式偏振。这种光子是CMB偏振的主要部分。如图3所示，背景的E模式偏振光子具有图1的左图中的镜像对称性。但是，由于前景引力势场的空间分布往往也会呈现椭球分布，且其主轴方向未必会平行于背景光子的偏振方向。从而，背景光子在穿越前景引力势阱之后，其分布会按照偏折角的指向被重新排列，从而产生出了B模偏振（如图3的前景图片所示）。该效应被称为CMB的透镜B模。她的存在如同魔鬼一般，对于精确测量原初引力波是灾难性的。好在，人们已经发展出一些“驱鬼”的算法，其大体思路是：对于同一天区，如果我们能够精确绘制背景E模式偏振和前景引力势的分布的话，根据宇宙学模型，我们可以“预言”出具体某个位置处的透镜B模的大小；最后，再将其从观测到的B模天图中扣除。

作为一门美丽的学问，CMB物理在过去的半个世纪里毫无疑问地向世人们展现了她的魅力。“天生丽质难自弃”——作为未来几十年内CMB研究的两大主要科学目标的“原初引力波探测”和“CMB透镜测量”，必定会再次用她纯净的美震撼人们的心灵。

本文作者：胡彬，北京师范大学天文系教授，是我国“阿里原初引力波探测项目”核心项目组成员，负责CMB透镜数据分析。