

【基础科研】天文物理的尖端

2015-02-09 21:05:00

原文网址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/108908701>

我在清华只念了三年，就把物理系大学部和硕士班的课程都修完了。这当然是太急了，尤其在数学方面，我就是因此没时间去修数学系大三以上的课程，而其中最重要的是微分几何。没有扎实的微分几何基础，广义相对论就学不深，再加上大学最后一年共有七门重课，还要考托福（TOEFL），又交了女朋友，有地方要掉链是必然的，而我那年基本上放弃的环节就是那堂相对论的课。虽然成绩过了关，却没有真正吃透，至今还对教授心怀歉意。

入伍后签运不佳，被派到金门服役，休假极为不易，大部分想出国念书的人都必须在退伍后在台湾多待一年才能完成申请，我却非常幸运地遇到一个尊重学术的师长。当我的GRE考试和师演习撞期的时候，他居然破例特准我的请假单。其实他根本就不认识我，我也只知道这人在对部队训话时，满脸精干、谈吐不俗，在国军军官中，颇有鹤立鸡群的态势，应该会有前途。这位师长的名字台湾的读者大概会耳熟，叫丁渝州，十几年后做到国安会秘书长。

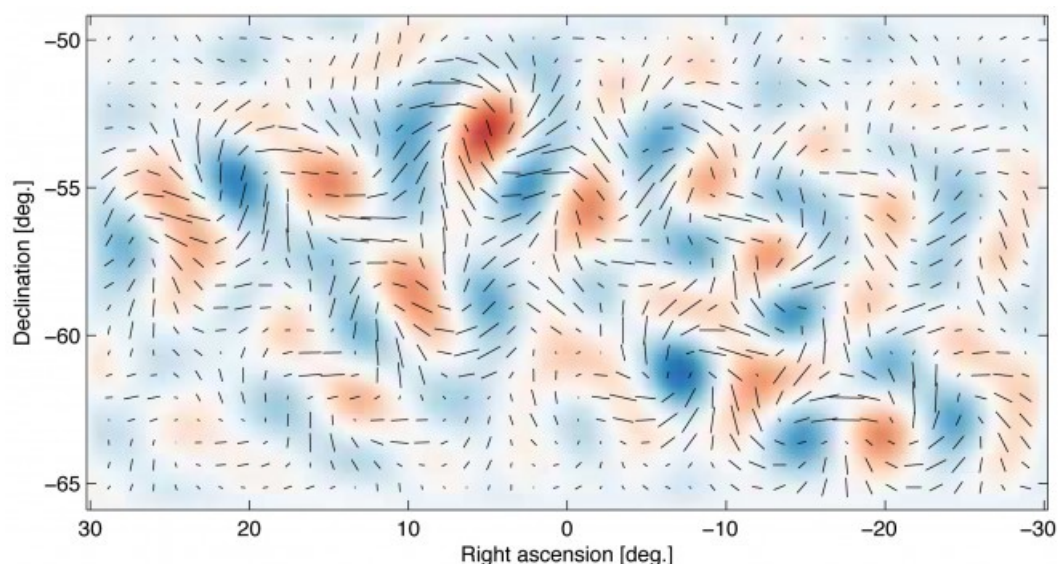
我到哈佛念书的第一年，就特别去重修相对论。不过在离岛当兵两年，学术上荒废得很严重，英文又跟不上，还必须同时打两个工，结果比大学最后一年还忙，最后仍是必须对一门课敷衍了事，相对论就又被牺牲了。当时觉得既然已经决定要做高能物理，量子场论才是最重要的，精通相对论可有可无。不过现在回头看，高能物理其实在1970年代建立了标准模型之后，40年来基本上是在原地转圈（详见前文《高能物理的绝唱》）。我在博士班的后几年已经感觉苗头不对：超对称（SUSY，SUperSYmmetry）强加了几百个想像中的新粒子来解释标准模型的几十个参数，很明显地不是条正路，但却是当时整个高能物理界生产论文的主要方向。但是想要转固态物理，鸿沟太深。那时如果我熟悉相对论，就可以轻松地转到天文物理，那么我将会刚好赶上近年来天文物理方面的突飞猛进。而且哈佛的天文物理比高能物理还要强，随便找那个指导教授，后来都会有重要的贡献。不过人生只能过一次，对大多数人来说，事后有遗憾是难免的。

前面提到天文物理在近年有连续好几个大突破，其中最重要的是1999年发现的暗物质和暗能量，其次是对宇宙微波背景辐射（Cosmic Microwave Background，CMB）的精确测量。而支撑这两项实验测量结果的理论骨架，则是1980年开始的宇宙暴胀论（Cosmic Inflation）。宇宙暴胀论主要由美国的Alan Guth和俄国的Andrei Linde及Alexei Starobinsky三人发明，主要的目的是要解决宇宙大爆炸理论（Big Bang Theory）里的两个很大的毛病，亦即宇宙视界问题（Horizon Problem）和平坦性问题（Flatness Problem）。前者来自宇宙微波背景辐射的均匀性：从四面八方照到地球的CMB都有同样的温度，互相符合的程度达到 10^{-5} ，亦即十万分之一的精度，也就是基本上处于热平衡状态。这很不可思议，因为CMB是在宇宙还非常年轻的时候（38万年）产生的，在其后的138亿年里基本上以直线前进，所以从相反的两个方向射来的CMB，其实起源自相距276亿光年的宇宙视界两端，在那CMB诞生之前的短短38万年里，光子顶多也只能旅行38万光年，而相对论告诉我们没有任何物理讯息能超过光速，那么宇宙视界两端是怎么达到热平衡的？至于平坦性问题则来自于对宇宙质量密度（根据相对论，能量与质量可以互相转换，所以质量密度也可以说是能量密度）的精确测量，天文物理学家发现重子（Baryon，即所有由三个夸克组成的粒子，主要是质子和中子，也就是一般人熟悉的各种物质；所有的发光天体都是由重子构成的）只占宇宙总质量密度的4.6%，另有至今只能用重力测量到的一种物质（即暗物质，Dark

Matter，占总质量密度22%）和一种能量（即暗能量，Dark Energy，占有总质量密度的剩余部分；物质和能量产生的重力，有些许不同，可以在观测中分辨出来）；做成这个测量的三个人因此而获颁2011年的诺贝尔物理奖。但是重力、暗物质和暗能量三者的重力作用加起来，却刚好使宇宙遵守欧式几何（Euclidean Geometry，即两条平行线永不相交），用天文物理的词汇来说，就是我们的宇宙是完全平坦的（Flat）。相对论并不要求宇宙有平坦性，任何曲率（Curvature）都有可能，所以这个结果未免太巧了些，这就是所谓的平坦性问题。

宇宙暴胀论假设在宇宙大爆炸的极早期（宇宙年龄 $<10^{-32}$ 秒），有一个暴胀子场（Inflaton Field）累积了极高密度的暗能量，使时空（Spacetime）扭曲为双曲几何，因而空间很快地尺寸暴胀。如此一来，现在的276亿光年在暴胀早期只有不到一纳米宽（276亿光年和一纳米相差约35个数量级，所有的宇宙暴胀论模型都至少有30个数量级的暴涨，绝大多数远超 10^{35} ），达到热平衡是理所当然的。暴胀的过程中，总扭曲度是固定的，但是原本一纳米内空间的总曲率，现在平均分配给276亿光年，所以就看起来像是完全平坦的了。因此宇宙视界问题和平坦性问题就可以一举解决。

宇宙暴胀论的主要问题在于它是一个量子重力（Quantum Gravity）现象，所以能阶比加速器所能达到的范围高很多。虽然经过30多年的努力，天文物理学家仍然只能间接地从CMB来测量两个暴胀理论的参数，它们通常写为 n 和 r ：前者描述CMB的温度扰动（即前面提到的那十万分之一的温度差）对距离的函数（详细的定义是温度差正比于距离的 $1-n$ 次方），后者则代表CMB的偏光方向箭头会绕成漩涡的趋势（详细的定义是 r =绕成漩涡的强度/不绕漩涡的强度）。2014年三月14日，一个在南极进行了好几年、由哈佛主导的观测项目，叫做BICEP2（Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2）发表了新的结果，宣称 $r=0.2$ ，这远高于一般暴胀论模型的预测值，因此震惊全球物理界，连主要的大众传媒都普遍报导。不过不到一个月，质疑之声四起，最后反对者把注意力集中到杂讯上，尤其是银河系中星尘散射出的偏光效应。BICEP2团队假设星尘散射很弱可以忽略，可是欧洲太空总署所发射的Planck卫星在过去这一年对星尘散射做了仔细的测量，在2015年二月5日正式宣布BICEP2的观测结果基本上完全是星尘散射出的偏光，从而击破了几个哈佛教授的诺贝尔梦。



BICEP2所测到的CMB温差和偏光图。红色代表温度稍高于平均，蓝色则稍低。短线代表偏光的方向，短线的长度代表偏光的强度。图中可以找到好几个漩涡，不幸的是它们其实是星尘散射的结果。不过星尘散射只对特定波长最强，而暴胀产生的偏光漩涡是不受波长影响的，所以下一代的观测项目都是多波段的，包括BICEP3在内。

Planck卫星的新结论限制 $0.961 < n < 0.972$ 以及 $r < 0.06$ ，而一般暴胀论模型预测 $r \sim 0.1$ 。但是有一个模型的预测值（ $n=0.965$ ， $r=0.032$ ）恰处于观测结果的中心峰值，连它预测的Higgs粒子的质量

$M > \sim 116 \text{ GeV}$ 都和最新的LHC实验结果 125 GeV 吻合，这就是前面提到的俄国物理学家Starobinsky在1980年提出的 R^2 模型。它恰巧是最初始的暴胀论模型，也是极少数完全不须假设新粒子的模型之一。在 R^2 模型里，暴胀子 R 就是广义相对论里的度量张量（Metric Tensor）十个自由度中的一个，对应着尺度变化（Scaling），所以又叫Scalaron（尺度子？）。我是Occam's Razor的信徒，能不用新粒子，只须假设一个二次方 R^2 的位能，就能解释所有的实验结果，对我来说是个非常优雅而有吸引力的模型。读过前文《什么是科学？》的人或许还记得，不论是Popper还是Lakatos，都会称许这是真科学。

天文物理学界也了解到以进一步的实验观测来证明或证伪 R^2 模型是当务之急，所以现在大家正疯抢（Mad Scramble）着改进 r 的测量精度，在3-5年内应该可以到达 $r \sim 0.01$ 的水平，那么 R^2 模型是否成立就可以基本上确定了。这个模型还有一个特别的预测，就是它的特征能阶（Characteristic Energy Scale）异常地低，只有 10^9 GeV ，而LHC已经达到了 $13 \text{ TeV} \sim 10^4 \text{ GeV}$ ，所以相差只有五个数量级。或许22世纪的物理学家能有幸对 10^9 GeV 的新物理做精细的实验吧。

【后注】我到2016年，才明白宇宙暴胀论和超弦一样，是一个完全失败的理论，而行内人同样地拒绝承认，继续忽悠大众。这不是我的专业，所以没有即时看到相关的论文，以致人云亦云，帮助散布假话，在此向大家致歉。

4 条留言

非常容易滑倒

2015-02-11 00:00:00

BICEP2 是不是里面有一未来自台湾的郭兆林?版主说的是这件事吗?

“

是的。

KELLY

2016-03-05 00:00:00

虽然看不太懂
但感觉很厉害的样子~

Jimmy Ling

2016-08-20 00:00:00

王师兄的很多文章我都拜读过，但是这里面的276亿光年看上去很别扭。大家现在都说可观测宇宙直径930亿光年，很少说276亿光年，毕竟宇宙膨胀会导致光子走过更多的距离。

“

这祇是估算。这种数据对宇宙成长过程的诸般细节十分敏感，未来必然会继续上上下下地修正。现在把数量级搞对就可以了。

乌鹊南飞

2021-03-01 07:41:00

最近有人问过您暴胀为什么是伪科学，您因为不是最重要的问题而略过了，再重读您这篇文章，还是忍不住好奇为什么暴胀理论是伪科学，您能否这相关文章下略述一二呢？

“你還是繼續等等吧。現在我先澄清，大爆炸（Big Bang）是已經被無數觀測所證實的科學結論；暴漲（Cosmic Inflation）是發生在大爆炸之前的假想過程，用來解決大爆炸理論的兩個未解問題（亦即視界問題和平坦性問題），不過後來被發現邏輯不自洽，所以應該作廢，另尋解答。

[返回索引页](#)