

# 我与粒子宇宙学研究

张新民

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 一、引言

我研究粒子宇宙学,始于跟随 Roberto Peccei 教授的读书学习期间。1987年,我到德国 DESY 理论组跟随 Roberto 学习(图1)。他给我的研究题目是推广核物理领域的有效场论到夸克和轻子层次,构造粒子物理电弱对称性非线性实现的有效拉氏量。大约半年后,我把我的结果告诉 Peccei 教授,他听后很高兴,说“你以后什么都能做。”这篇论文是我博士论文的主体,也是国际上电弱有效理论方面的重要文献。说实话,有效理论让我受益终生。1993年,在马里兰大学做博士后期间,我把自己关在办公室,一个月后,完成了一篇论文,提出了电弱一级相变的有效理论模型<sup>[1]</sup>。几十年后的今天,大家认识到电弱相变是下一代大型对撞机,如 CEPC 等的一个重要科学目标,由此我当年的那篇文章也成了该领域的一篇重要文献。

1989年初, Peccei 教授调动工作到了美国 UCLA,一同带去了二个学生,我和德国师弟 Boris Kastening。在 UCLA 读书期间,我开始了粒子宇宙学的学习和研究,当时主要是探讨电弱标度的正反物质不对称的产生机制。毕业之后到马里兰做博士后,跟随中微子理论大师 J. Pati 和 R. Mohapatra 研究中微子宇宙学。与 Mohapatra 一起我们提出了左右对称理论的 Leptogenesis 机制。Leptogenesis 是当今国际上最时髦的解释反物质为什么丢失的理论。这个理论最早是由我的师兄日本科学家 Yanagida 提出的。Mohapatra 和我的文章也是早期这一领域的几篇文献之一。1996年回国后,作为百人计划,给我的定位是非加速器物理,从此我全力在理论室开始建立自己的粒子宇宙学研究小组,同时也与高能所、理论所、北大和国台等单位的老师们一起推动我国的粒子宇宙学发展。作为刚回国的年轻人,当时我在所里给实验物理的同行们讲宇



图1 Roberto Peccei 教授(左)和张新民(右)

宙学报告,与实验物理学家一起召开了一系列的研讨会,探讨了在BES上寻找新物理的可能性。在过去这几十年,BES合作组的同事一直不停的在进行这方面的努力。2022年,他们取得了一个重要的成果,在《nature》上发表了一篇很有意义的文章。我回国不久,1998年,国际科学界发生了两件事:大气中微子丢失与宇宙加速膨胀。当时我帮助组织了两个专门的研讨会,一个在高能所,一个在CCAST。接下来那几年,我的工作主要是这两个方面的。在中微子实验方面,高能所先是考虑了从日本到中国的长基线中微子振荡实验<sup>[2]</sup>,记得1999年的一天,大约傍晚的时候,时任高能所所长陈和生院士和我一起从老报告厅去主楼,他推着一辆不太新的自行车,跟我谈起研究由日本到北京中微子振荡的事情。两周后,我去美国访问,与依阿华州立大学的杨炳麟教授和Kerry Whisnant教授开了一个电话会议。主要介绍陈和生所长交待给我的中微子振荡的事并邀请他们二位参加。之后,在高能所我组织召开了多次研讨会,高能所、理论所等单位的理论家和实验家们共同探讨在中国开展长基线中微子振荡实验的可能性。几年的长基线中微子实验探讨,虽没有做成,但凝练了队伍,为中微子实验研究奠定了基础。2003年,我国科学家提出了大亚湾中微子实验,取得了巨大的成功。大亚湾之后,我国科学家又提出了大亚湾二期。2012年的一个下午,陈和生院士希望我对二期实验的科学也能做些理论研究。当时我带领研究组的二位外籍同事随即开展大亚湾二期的相关科学研究。通过大量的理论和数值模拟,我们提出了台址的建议,与大亚湾组的结论一致,独立地证实了江门台址选取的合理性和科学性。当前,JUNO实验即将建成,预计将取得重要的成果。在暗能量研究方面,我国的理论工作者,可以说没有丢失这次机会。在天文观测方面,我带领团队首先研究了LAMOST探测暗能量的可能性,之后与崔向群院士、王力帆等研究了DOME A建设大型光学/红外望远镜来研究暗能

量的可能性,但都没有成功。在唯象研究方面,我带领学生研究了探测暗能量、测定暗能量状态方程的新方法并研发了所使用的新程序。近年,我的博士生、现任国台副台长赵公博带领国际研究组在探测暗能量方面取得了重大的进展。

在过去这二十余年间,我带领团队在粒子宇宙学领域做出了一些有意义的成果,现就两个很有特色的研究工作做点历史性的回顾。

## 二、暗能量研究

1998年,天文观测发现宇宙加速膨胀,引起了国际科学界一个大的轰动,之后暗能量研究十分热烈。当时一个主流的理论是诺奖得主普林斯顿大学教授Peebles等人提出的Quintessence。2002年,美国科学家Caldwell提出一个新的理论,叫作Phantom。他的理论预言,暗能量的状态方程 $w$ 小于 $-1$ 。这一点是完全不同于Quintessence的。我本人很喜欢动力学暗能量理论。1987年,我刚到DESY时,Peccei正带领他的博士后Sola和一个青年研究人员Wetterich利用他的Axion物理思想去解决宇宙学常数问题。在Axion理论中,强CP破坏参数Theta变成了动力学风。他们也希望宇宙学常数能成为类似的动力学风,以此来解决灾难性的宇宙学常数问题。后来,Wetterich做了进一步的研究,发表了一篇文章。他的文章也成了早期的Quintessence方面的一个重要的文献。Quintessence理论很类似Inflation理论,其预言的状态方程 $W$ 大于或等于 $-1$ ,所以不难理解。但是, $W$ 小于 $-1$ 的动力学理论让人们非常困惑。尽管理论上有很多困难,但天文观测是支持这一类模型的。当时我认为这应是理论家施展才能的地方。从那之后,我就开始思考。我认为还是要从宇宙学里来理解这个 $W$ 小于 $-1$ 的现象。我想到了宇宙相变,猜想 $W$ 小于 $-1$ 可能只存在一会儿,不是一个永久效应。这个想法是在大约2003年上半年就成形了。记得,2003年

中我的学生王秀莲博士毕业答辩的时候,北京大学教授宇宙学家俞允强老师,作为答辩主席,问我  $w < -1$  怎么来理解。我说通过相变,在一个标单场的动力学项前面引进一个与温度相关的函数。让这个温度因子在宇宙演化过程中变号,quintessence 就转换成了 phantom。这个思想出来以后,我让我的两个学生,王秀莲和冯波,去计算验证我的这个物理思想。结果他们做了很长时间,将近小一年的时间,用尽了各种解析和数值的办法,都是不能越过  $-1$ 。这说明,实现暗能量状态方程越过  $-1$ ,传统的理论是行不通的,要求必须引进新的自由度。之后,我们把这一点完善综合成了一个 No-Go 定理。理论上,引入新的自由度有很多办法。最简单的方法是用两个标量场来描述暗能量。在我的小组讨论会上,我在黑板上写下了 Quintessence 和 Phantom 场组合成的双场模型,并把它命名为 Quintom。2004 年 4 月份,我们完成了文章的写作,放到了网上<sup>[1]</sup>,同时,我让我的学生冯波 email 投稿到 PLB。过了三个月,没见到 referee 的审稿意见,后来就直接问了主编。主编说那个编辑去度假了,让我们重新再投。又过了一段时间,新的 referee 意见来了,主要有二点,一是让我们加一些参考文献。4 月份我们文章放到网上后,有几篇沿着  $w$  越过  $-1$  的后续文章也放到了网上。Referee 要求我们在参考文献中加入这几篇文章。严格讲,不应该在原始的参考文献中加入这些后续的工作,但为了我们的文章不再耽误发表,我同意了。有幸的是,Arxiv 网上保留着所有的版本,而且国内外学术界基本上还都是尊重事实的。第二点是 referee 叫我们把中间的一段阐述 Quintom 理论的语言拿掉,但我没有答应。这篇文章发表后,在国际上掀起了研究  $w$  越过  $-1$  的暗能量研究新高潮。对于三大类动力学暗能量来说,诺奖得主 Peebles 等人的 Quintessence 理论给出  $w$  大于或等于  $-1$ ,Caldwell 的 Phantom 给出  $w$  小于  $-1$ ,我们的 Quintom 的特征是  $w$  越过  $-1$ 。这篇文章得到了大家的高度肯定和较高的引用,SLAC IN-

SPIRE-HEP 检索为 1109 次。2008 年 Quintom 论文获得了首届中国卓越研究奖(Thomson Scientific Research Fronts Award 2008)。Quintom 文章发表之后,我带领研究组系统地研究了 Quintom 的性质。当时我在想,如果 Quintom 想法对的话,在其他地方也应该表现出来。沿着这条思路,2007 年,我带领团队提出了 Quintom 反弹理论。2010 年我的两个学生蔡一夫和夏俊卿等写了篇 Quintom 宇宙学综述文章,发表在国际权威期刊《Physics Reports》上。2017 年,国际大型星系巡天 SDSS-III(BOSS)合作组在《自然·天文》上发表论文,指出目前的天文观测数据在 3.5 个标准差水平支持 Quintom 理论。

### 三、阿里原初引力波探测计划

大家知道,宇宙微波背景辐射(CMB)观测是大爆炸宇宙模型的基石。我国科学家在理论上已开展多年的研究,同时也考虑着在我国开展相关实验的可能性。2005—2008 年,在科学院基础局支持下,我带领团队规划我国暗物质暗能量探测路线图时,也讨论过开展 CMB 实验的可能性。2008 年,我给院领导汇报了“上天、入地到南极”的暗物质暗能量探测路线图,但没有明确关于 CMB 实验的建议。

在院创新工程三期时,我与邹冰松一起负责一项方向性重点项目“依托国内大科学装置的粒子物理、核物理和宇宙学的前沿理论研究”。我负责其中的宇宙学部分,主要的任务是探讨我国开展暗物质暗能量实验的可行性。项目给的钱不多,但我把国内的物理和天文界的实验、理论家们都包括了进来,另外还有一些国外的华人科学家。记得在项目答辩时,我对当时的院基础局局长张杰院士说,我不敢保证能做出来,但是敢保证如果我做不出来,没有其他人能做出来。这里的“我”指的是我带领的团队。实际上,我想表达的意思是,我的团队已经包括了国内这方面最好的科学家。的确,经过几年的努力,2008 年,我们团队提出了在我国开展暗物质暗能量探测的“上天入地到南极”的路线图<sup>[2,4]</sup>





图2 我国开展暗物质暗能量探测的“上天入地到南极”的路线图(图2)。“上天”指暗物质探测卫星，“入地”指四川锦屏山地下暗物质探测，“到南极”指在南极昆仑站DOME A放个大型光学/红外望远镜来探测暗能量。2008年11月26日下午,在院机关,我给时任中科院副院长詹文龙以及基础局领导汇报了这个路线图(图2为我当时汇报的PPT)。这些项目后来都进展的不错,“悟空”卫星和地下暗物质探测实验都获得了重要的物理成果。

2012年,法国的QUBIC实验来中国找合作者,我带着QUBIC的负责人一起到南京紫金山天文台讨论这个可能性。杨戟、史生才、陆垓和我听了QUBIC的报告,然后开了个会,决定与QUBIC合作并由我来负责协调。之后的二年间,与QUBIC开了多次研讨会,合作的范围也开始拓宽,但没有成功,2014年初停止了合作。同年,我带领团队提出

了在中国开展CMB实验的阿里计划。在2014年之前,我本人没有去过阿里。但多年前,我就知道了阿里天文观测基地。刚回国不久,我参加了陈建生老师领导的天文界的第一个973项目并与武向平一起负责宇宙学研究课题组。这给了我一个绝佳的机会深入了解和参与我国天文界的工作。阿里计划一出来,就得到了大家的认可。特别是,2014年那年,国际上BICEP2出了个乌龙事件。国内的宇宙学家看到了希望,对阿里计划给予了肯定和期待,并都积极地推动。国际上CMB领域的同行们也开始意识到了在北天开展CMB观测的重要性。2015年我在所战略研讨会上报告了阿里计划,得到了高度的肯定。但当时遇到的一个大的困难是经费问题。幸运的是2016年美国LIGO宣布发现了黑洞并合产生的引力波,这给了阿里项目一个巨大的推动。高能所成立了阿里原初引力波探测实验经理部。科学院、基金委和科技部都给予了阿里项目经费上的支持。在国内,各级领导人非常关注阿里计划。国际上,诺奖得主Weiss和Smoot教授以及CMB领域的同行们高度赞扬阿里计划。2017年,在Weiss访问北京师范大学期间,应邀请,我前往北师大给Weiss教授详细介绍了阿里实验的整体情况,包括台址高度、水汽、观测频段、天区、探测器数目、项目进展等,见图3(左)。Weiss表示将给予这一项目大力的支持。诺奖得主Smoot教授在美



图3

国开的标准模型 50 年庆祝会上的大会报告中专门介绍了阿里计划,见图 3(右)。后来,我们见面时,他给我讲了这件事。自 2016 年,我作为阿里项目的首席科学家,也逐渐开始实现自己从理论研究到实验以及项目管理的角色转换。

#### 四、结束语

在过去这几十年,我培养了一批研究生和博士后,他们都已成为我国粒子宇宙学研究领域的中坚力量。当然,我也曾想过,若 1996 年回国时,我选择了北京大学而不是高能所,可能培养的学生数量会比现在多很多。但高能所这个独特的科研环境,使我在理论、实验、粒子物理、宇宙学各方面都学到了很多知识。从 1996 年加入高能所,我先做粒子物理、后做宇宙学,先做理论、后做实验,先是建议项目、后自己也做项目,逐步实现自己的学术人生中一个又一个新目标,成为一个理论和实验宇宙学科技工作者。2019 年,诺贝尔物理学奖授予了 Peebles 教授,以表彰他在物理宇宙学方面的理论贡献和发现。我带领 7 位我的学生和博士后做了解读<sup>[5]</sup>,并对宇宙大爆炸及起源、CMB 与原初引力波、暗物质、暗能量、宇宙大尺度结构和统计方法、精确宇宙学与基础对称性、弱电对称性破缺、正反物质不对称与宇宙相变引力波等前沿进展做了介绍。其中,在引言中我写到:“在基础科学研究领域,迄今我们已建立了描述基本粒子的标准模型和描述宇宙演化的大爆炸宇宙学模型,但是相对于粒子物理的研究,宇宙学研究的科学性,直到上世纪九十年代中叶,一直不被看好,并时常被质疑。这一点,在我(张新民)1996 年夏从美国回国后在高能所开始组建宇宙学团队时深有感触。皮布尔斯教授的工作使宇宙学从哲学思考,定性讨论,饭后茶余的闲谈,变成基于物理规律的具有理论和实验两方面的定量学科。自 1998 年,超新星发现宇宙加速膨胀,特别是本世纪 WMAP, Planck 卫星实验对微波背景辐射(CMB)温度和偏振谱的精确测量极大地推动了

宇宙学进入到一个精确的时代,同时也极大地促进了高能物理与宇宙学的交叉研究。”我将继续在粒子宇宙学领域努力学习和工作,同时也十分坚信在观测和实验方面,越来越多的,在过去几十年中只被理论探讨的研究内容,将会变成现实,展现在世人面前。

粒子宇宙学是一门交叉学科,将极大与极小结合起来,研究宇宙起源和演化的物理规律。广义上讲,它属于物理宇宙学或物理天文。在当前我国的科技评价体系下,交叉学科常常被视为城乡结合部一样而被忽视。然而,不同学科背景科学家间的交流,的确能产生新的火花和新的思想。这方面的例子很多。结束本文前再举下面一个例子。

十年前我在高能所组织召开一个南极项目科学讨论会,参会者包括时任高能所所长陈和生,高能所张双南,王建民,时任国台副台长薛随建,王力帆和法籍华人科学家陶嘉琳。会后在高能所专招的餐桌上,在座的粒子物理学家和天文学家一起讨论如何用简短的语言来概述高能物理和天文学的前沿科学问题。大家你一言我一句,凑出了今天广为(特别是在天文界)谈论的“二暗、一黑、三起源”,二暗即暗物质暗能量,一黑即黑洞,三起源为宇宙起源、天体起源和(宇宙)生命起源。

#### 参考文献

- [1] Operators analysis for Higgs potential and cosmological bound on Higgs mass, Xinmin Zhang, Phys.Rev.D 47 (1993) 3065-3067, e-Print: hep-ph/9301277 [hep-ph].
- [2] 部分材料和文字摘自:张新民:纪念‘百人计划’实施 20 周年——我的科学人生《阔野无疆 群贤毕至——中国科学院“百人计划”二十载回望》
- [3] Dark energy constraints from the cosmic age and supernova, Bo Feng, Xiu-Lian Wang, Xin-Min Zhang, Phys.Lett.B 607 (2005) 35-41, e-Print: astro-ph/0404224 [astro-ph].
- [4] 张新民,陈学雷,暗物质暗能量研究进展和中国的机遇,《中国科学院院刊》,2011 年,26 卷第六期,496 页。
- [5] 2019 年诺奖解读:物理宇宙学,张新民,毕效军,李明哲,李虹,赵公博,夏俊卿,蔡一夫,黄发朋,《现代物理知识》2019 年 06 期。