

从“嫦娥”到“HXMT”

——写在 HXMT 发射之前

曹学蕾

(中国科学院高能物理研究所 100049)

离 HXMT 发射的日子越来越近。心里有许多期待，又有说不出的忐忑。虽然历经多次试验、测试，状态确认了再确认，操作谨慎了再谨慎，在等待的日子里，仍然过的提心吊胆，用航天人常用的说法叫“如履薄冰”。心里也总还是会想以前出现过哪些问题？那些解决了的问题还是不是问题？

总在文字中看到这样的说法，成功道路上所历经的坎坷，都是我们人生词典中所不可或缺的因素，也是我们每个人生活经历中，不想遇到又不得不面对的。只有经历风雨，方能见到彩虹。多年以后，成功往往都是过眼云烟，而在我们心里刻下深深印记的，却是那些挫折与磨难。

从参加探月到加入 HXMT，从一无所知的入门者，到历经磨炼却开始看淡的修行者，不是历史的跨越，而更像是习惯与文化的传承与发展。

(一) 初入探月

自 2001 年来高能所读研，我便跟着导师王焕玉老师学习与工作，并在此后的不久参与了探月工程 CE-1 卫星 X 射线谱仪的研究。

初次接触半导体探测器，低噪声电荷灵敏前置放大器，对我来说，几乎一片空白，没有任何经验。在 2002 年下半年开始，我便跟梁晓华（比我早一年入学的师兄，是张承模老师的学生，后在 HXMT 项目中在总体组负责软件管理）在王老师的指导下，开始了电荷灵敏前置放大器的学习与研究。在工作的开始，王老师曾请孟烈老师给我和晓华进行 10 天左右的指导。从最简单的电路原理，电路设计，protel 电路原理设计，PCB（印制电路板）布板设计，再到 PCB 的焊接与调试，事情琐碎而繁忙。

王老师自 2001 年开始，在所里担任了党委书记和副所长职务。平时多数的时间是在处理所里的相关事情。但几乎每天，也都会抽出时间来实验室，关注我和梁晓华的调试进展，并给予指导，是那种直接在实验室坐下来与我们一起调试、讨论那样的指导。

在研究中，我和梁晓华分别采用了不同的技术路线。我选择的技术路线，因为器件集成度高，调试相对容易，而晓华的技术路线相对复杂。在大约半年之后，我的电路调试便有了些眉目，能看到半导体探测器经过电荷灵敏前放输出的信号，而晓华所调试的电路仍然看不到正确的信号输出。于是，便在那个时间节点，虽然 CE-1 尚未正式立项，而已经有相应粗略的计划节点情况下，我和晓华开始有了工作的分工，他转向数据采集电路的研究，我则继续研究与优化探测器前放 / 成形电路。并且在其后的不久，同时学习 Geant4 模拟软件，进行相关探测器模拟研究的工作。

(二) 进入工程

根据王老师的建议，我到高能所的时间，比正常研究生入学时间提前了约两个月。而我也有幸与我的师兄瞿若飞有了不到一个月左右时间的交集。

张俊逸，是课题组里负责行政事务的老师。她经常会跟我们说起实验室里的一些事情。有次她开玩笑的说，“不管王老师来不来，瞿若飞每天到实验室地第一件事就是把王老师的实验桌擦得干干净净，现在他要离开了，你来了，这件事也算有接班人了”。对于瞿若飞即将毕业离开，张俊逸老师有很多不舍，在那几年里，很多时候天体楼 312 实验室都是一老一小他们两个在。张俊逸老师也多次的跟我说起王老师的事情，王老师说话很慢，但是仔细体会，他说的每句

话都是经过深思熟虑的。后来的经历，也领会了王老师这种严谨细实的品质。而这也正是工程项目尤其是航天工程项目所必须具备的个人素质。

探月工程一期在反复多轮的方案与可行性论证后，终于立项。X射线谱仪项目也正式进入工程研制。参与工程研制的队伍，也在项目立项论证的过程中逐渐完善。

X射线谱仪的主要功能是月面元素的探测，其理想化的目标是完成 Al/Si 元素的全月面分布。而紫金山天文台研制的 γ 射线谱仪虽然其探测技术和观测能段不同，但其功能也为月面元素探测分析，因此在立项过程中，两台仪器合并为一个分系统，并共用一台电控箱，称为“ γ /X 射线谱仪分系统”。由紫金山天文台的常进研究员担任主任设计师，王老师担任副主任设计师，并实际完全负责 X 射线谱仪的研制工作。

X 射线谱仪其他的参与人员，也包括主管设计师张承模老师（负责探测器、质量管理以及调度），主管设计师陈勇（负责物理设计与数据分析，后来也是 HXMT 项目 LE（低能 X 射线望远镜）的负责人），梁晓华（负责数据采集电路），汪锦州（负责 X 射线谱仪数据管理与通讯），杨家卫（负责二次电源），高旻（负责元器件及事务性工作），而我主要负责探测器与前端电子学成形电路的研制，物理设计中的探测器响应模拟和标定与标定数据的分析。除王老师和张老师参加过载人航天神舟二号伽玛暴监测仪的研制之外，全是刚参加工作的新人。

（三）正样两年

探月工程，对科学院来说是一颗科学探测的卫星。对于我们研究月面元素的组成与分布，月球的起源，形成与演化，都具有重要的科学研究意义。而对于航天技术的发展来说，我国第一次到达月球轨道，在航天技术发展的历史中具有里程碑式的意义。而探月工程也是我国深空探测迈出去的第一步。

毫无疑问，探月工程所引起的公众关注度和各个单位与层面的重视度都是极高的。而正样研制的时间也在立项之初便早早确立了，两年完成正样！对于一个新的型号，新的仪器，新的技术，一群新人，用现

在的“九新”分析来说，全是新的，这也为仪器的研制带来了非常多的困难。

CE-1 卫星系统总师——叶培建，是我非常敬佩的航天前辈，在 CE-1 任务研制期间，经常提到说，“研制计划后墙不倒，除主载荷 CCD 立体相机与干涉成像光谱仪，谁跟不上进度，谁出局”！而像 X 射线谱仪这样一个九新齐备的分系统，困难重重，压力可想而知。直到几年后，我担任了中能望远镜的主任设计师，才深切的体会到了王老师、张老师在当时所承受的是何等压力。

（四）常态加班

张承模老师在 CE-1 成功完成探测任务后偶尔会提到说，探月组在两年正样研制期间只休息了一天！探月 X 射线谱仪组在那两年（2004 年到 2006 年），加班是一种常态。

对尚处在做研究生时代的我来说，由相对自由的状态进入紧张的工程研制阶段，是不适应的。在刚开始常态加班的日子，周末的早上，有时候会起床很晚。而王老师却没有批评我，也没有跟我说一些工程任务紧张必须加班之类的大道理。而只是在大约上午 10 点钟以后会给我打电话说，“小曹，给你订了工作餐，中午过来吃饭。”而我也会很惭愧地说，“王老师，我马上过去。”

在那些加班的日子里，王老师白天是党委书记，晚上是研究员，跟我们一起工作，几乎每天都是晚上 11 点之后才回家。而这个时间也只能从单位车队约车才能回家。而通常王老师在约车之后，还在讨论问题，也就很难在约定的时间乘车。而车队值班的师傅，在开始时觉得不适应，而慢慢习惯了解后，也便理解了王老师的辛苦，也从来没有听到过哪个师傅对此有过抱怨。

而张承模老师，接近 60 岁的年龄，身体也不太好，有高血压，常年吃降压药，却也跟我们一样加班。一周七天，每天晚上加班到 11 点以后，而早上却通常都比我们到实验室更早一些，让我非常的敬佩！

我也慢慢适应了这种节奏，并且我是个心里有事，就着急想要马上解决的性格。也因此熬过许多通宵，尤其在电路调试遇到干扰时，不解决问题，根本没法睡觉。

(五) 春节难忘

即便是每周七天，每天夜里 11 点，这样的加班强度，X 射线谱仪的进度却仍然几乎就是整个有效载荷研制部分的最后环节。在 2005~2006 年春节前夕，X 射线谱仪正样产品终于完成研制和相应的环模试验。离正样交付的节点只有不到 40 天，却要完成全部的标定工作。

仪器标定是我负责，我师弟彭文溪（研究生在读）和张家宇（研究生在读），以及崔兴柱（在研博士后）参与共同完成的。在标定开始之前，我们已经很多次的讨论和修订标定的流程和计划。按照最顺利的估计，“五加二”并且“白加黑”，也要 35 天左右才能完成标定的工作，也就是刚刚能赶上交付的节点。于是我们四个人分工，每半天一轮换，每两天一次值班，开启了我们最紧张的加班模式。

春节假期显然已经是不可能了。王老师的生日是在腊月二十九，而除夕的晚上按照计划是要休息的。于是我们几个也便与王老师约好一起去王老师家里去吃年夜饭，并给王老师庆祝生日。于是在除夕的那天下午六点，我们停下了试验，与王老师一起去了中关村他的家里。

肖老师（王老师的爱人）早早准备了一桌好菜。大家难得在这样的日子坐在一起，包饺子，看春晚。虽然工作很辛苦，但这些难忘的瞬间，总是特别感动。在 12 点之后，与王老师一起到楼下，放鞭炮，看烟花。很惭愧，我们几个学生这么齐整的状态第一次到王老师家，竟然是空手去的。

第二天，大年初一的早上，试验便又开始了。到了晚上，是我的夜班。也很感激我的爱人对我工作的支持，在我工作紧张且充满压力，而无法顾得上家里时，她一直没有任何怨言，而只是默默的支持着我。当然那年的春节，我爱人也是陪我一起留在了所里在加班中度过的。

(六) 不是挫折

CE-1 X 射线谱仪的研制过程中，经历过很多困难。主要的压力在王老师和张承模老师，当然我们每个人都有压力，但毕竟不是对整体负责。在自己负责的部分

不出问题的时候，即使着急，也不会有他们那种感受。

这些困难，对我们性格的养成，都是难得的磨练。所以，我不把这些看成是挫折，而是生活赠与我们的历练。

磨练之探测器的能量分辨

十几年技术的累积，现在的我们对于 Si-PIN 探测器技术，已经全面掌握。Si-PIN 探测器产品本身，我们也是自行设计与生产，其性能指标已经达到国际先进水平。而十五年前的我们，对 Si 探测器，对低噪声电路系统技术，几乎没有任何经验。

我们知道这样的探测技术，是可以达到很好的能量分辨，那个时候我们却始终无法达到这样的水平。这期间，包括王老师，张承模老师，孟烈老师，陈勇等都想了很多的方法，我们也作了很多的尝试。有段时间吴枚老师也直接指导我做了一些试验，包括在 PCB 布板设计，PCB 板材料的选取，接地，低温测试等。

在后来 CE-1 任务顺利完成之后，我整理了当时设计过的 PCB 板，大大小小的不下几十个版本。当时没有想太多，就只知道想到了方法就要去试。

多年后在中能望远镜立项之前，在 ASIC RENA-3 应用开发阶段，只逻辑调试我们就花了半年的时间，而清华同方更是在逻辑调试方面花了一年半的时间，都没有调通。才深切体会作为探路者，在新技术开发之始，任何细小的问题都可能是巨大的困难。而后续接手延续的人是不会有这种体会的。

磨练之进度与节点

X 射线谱仪与 γ 谱仪同属一个分系统， γ 谱仪继承的是神舟二号的相关技术，有很好的研究基础，总能顺利的赶上研制节点，多数情况下更是提前完成，调度会时总是受到表扬。而 X 射线谱仪，因为九新齐备，困难重重，在大多数时间总是处在有效载荷研制进度较为靠后的位置，所以在调度会便总是会受到各种督促。

电性件交付前的最后一天，所有产品的部件才刚刚齐备。在开始机箱装配时，才发现结构设计在接插件位置存在偏差，电装好带接插件的 PCB 板根本无法安装。于是王老师召集大家，紧急组织了讨论，最后

决定对机箱结构进行锉修。在那个电性件交付前的晚上，杨家卫老师拿着锉刀，修了几个小时，完成了机箱结构的锉修。在完成机箱装配后，天已经亮了，王老师，张承模老师也陪着我们度过了一个难忘的失眠之夜。

磨练之 Si-PIN 探测器的电装

X 射线谱仪所选用的大面积 Si-PIN 探测器是从芬兰地太公司购买的。为非密封，贴片式陶瓷外壳封装。非常容易受到外界环境影响而损坏。

Si-PIN 探测器的焊接本来是由空间中心电装车间完成。但是在焊接过程中总是出现探测器污染，焊接温度过高等问题而发生损坏。后电装车间人员拒绝承接 Si-PIN 探测器的焊接任务。最后没有其他选择办法的情况下，电装的工作由张承模老师亲自完成，我在一边配合。

还记得 Si-PIN 探测器电装测试时的情景：在高能所天体楼 306 实验室，实验桌上开着台灯，张老师在焊接，我在一边辅助。张老师焊接完成后，我便开始测试，测试结果不满足，便解焊后重新焊接。探测器机箱 16 路探测器，通过需要反复焊接几次，当然按照现在的质量管理要求，是不符合规范的。这样的工作有时候是真的考验一个人耐心的。

磨练之归零

航天项目对于技术问题的归零管理，是质量管理中非常重要且有效的方法。但是做过空间项目的人，都害怕归零。一旦遇到归零，基本都要做好被各级领导天天紧盯、密集汇报、极限加班的准备。

而在 CE-1 研制过程中我们便经历了这样一次难忘的归零。在后来 HXMT 研制过程中，这样一件事情经常被作为例子提起，而卢方军老师在提到时，很多次都说是汪锦州值班过程中发现的一次问题，但其实那天晚上值班的人是我。

整星热真空试验，是经常被说到的，最容易暴露问题，也是所有研制人员都胆战心惊特别怕出问题的一次考验，而我们恰好就在这次试验中出问题了。直到今天为止我都记得那个时间，凌晨 3 点 55 分~3 点 56 分左右。

在 X 射线谱仪热控验证试验时，几路遥测电压突然从正常值 (2~3V)，发生了跳变，降到了 1V 左右。显然出现问题了！5 分钟之内没有恢复。我马上给张承模老师打电话，汇报了相关情况。在电话里简单沟通，我问他怎么办，要不要马上给载荷总体汇报，他说，“肯定是出问题了，报吧”。并且商量了下说，先关机，过 15 分钟再开上电，看一下能不能恢复。

载荷带队的是空间中心载荷副总师代树武，代总马上便把情况给卫星总体作了汇报。卫星总体同意 X 射线谱仪单独断电再重新上电。于是断电，再次重新上电，发现遥测电压监测值进一步降低到了 0.5V 左右，仪器确定是出问题了。从问题的出现到上报到重新上电验证不超过 1 个小时。问题什么时间上报到探月中心，我不得而知。但是，得到的通知是早上 7 点在值班大厅会议室开会讨论。

早上 7 点，包括探月中心的主任胡浩，卫星总师叶培建等各级管理便全部赶到了。

后续问题的定位，机理分析，采取的措施，相应的验证试验和举一反三花了三个多月的时间才最终完成。这期间，还有一家研制单位的仪器也在归零过程中。听他讲只是在一次通讯中出现过一次信号发出，而没有接收到的情况。但后续的验证中，问题始终不能复现。按照他们的想法，是想把这个问题归到小概率事件上。但叶总坚持让他们必须找到问题。在我们出现问题时，他们的问题出现已经几个月了。到我们归零完成后，他们还是没有完成。直到后来才听其他人说起来，最终他们确实找到了问题所在，最终按照归零五条要求完成了问题的归零。这既让我们了解了归零问题的严谨性，也让我们认识到了叶培建总师这种严格的管理和严谨的工作作风。

在卫星发射上天之前，任何发现的问题都是值得庆幸的。事后想想真是非常的幸运，如果不是这次整星热真空试验，问题带上天，在轨出现问题那将是什么样的损失。

(七) 一些趣事

探月一期工程自 CE-1 立项开始直到 CE-2 任务完成，历时五年。中间有很多困难，很多坎坷，也有很

多开心，很多感动，更有许多有趣的瞬间。

趣事之老特的真空罐

老特，全名叫特木热，是中科院空间中心环境试验室负责热真空试验装置的工作人员。人很热心，对试验的管理非常认真严格，对自己管理的热真空设备更是非常珍惜。

CE-2 卫星 X 射线谱仪，由于在轨标定的需要在准直器上镶嵌了标定用的放射源，属于豁免等级的密封放射源。在选择热真空试验设备时，出现了很多困难，五院的设备根本没有试验时间，只能挤空间中心老特管理的热真空装置。而老特在了解到 X 射线谱仪上带有放射源后，尽管张承模老师给他解释过多次，镶嵌源属于豁免等级的密封源没有任何风险，他仍然死活不同意我们的仪器做试验。

后来，没有办法，在求助空间中心载荷总体后，经过协调，老特很不情愿的接受了我们的仪器将在他的设备上做试验的事实。

在张承模老师和我们带着试验仪器去到北京北郊的唐家岭——老特设备所在地，见到老特时，他的脸几乎变成了黑色。“你们自己安装设备”，他一脸恼怒的说完就离开了。老特这里通常会准备一些方便面，饼干，水果，饮料等零食，以备值夜班的人可以补充一些体力。这次值班人员休息的地方，却没有发现有这些食品在。

仪器我们自行安装完成后，张老师去老特的休息室沟通具体的试验事项。出来时拎了一包食品出来放在了试验值班人员休息室，笑着说，“老特全放到自己屋子里，自己享用了。”

整个过程，张老师始终保持微笑，语气平和，内容务实。几回合下来，老特发作也不是，不发作也不是，表情看起来很尴尬，又无奈。真的很佩服张老师的与人沟通能力。

后来，HXMT 项目标定设备的改造，以及定标专线的建设，老特也都给了很多有益的建议。

趣事之小汪的呼噜

如果要问在 CE-1 卫星有效载荷，X 射线谱仪团队，

除了王老师、张老师之外谁最有名？立即会有一群人告诉你，是小汪汪——汪锦州。按照张老师的说法，小汪汪是能吃能干，盒饭基本都是两盒，同时整星联试及发射场测试，小汪汪也是值班时间最长，并且毫无抱怨的一个。但在整个载荷团队，最让小汪汪出名的却不是这些，而是他的“大杀器”——呼噜。

在小汪汪之前，高能所与紫金山天文台合作团队，呼噜最厉害的是唐和森老师，合作组里大家都亲切的称呼他“老唐”。而在小汪汪出现后，按照紫台的说法是：老唐直接被小汪秒杀。紫台的张南老师有次开玩笑说，“老唐的呼噜是响一会停一会，小汪汪的呼噜声却是自始至终。”有次开会，住小汪斜对面房间的一个人，被小汪的呼噜声吵的凌晨两三点还在走廊走来走去。

CE-1 卫星是在西昌卫星发射中心完成的最后测试与发射升空。卫星是通过火车专列运达的，小汪是随专列一起去的发射场。整个行程历时七天，与小汪在同一卧铺车厢的是一位航天部一院的老先生。小汪的呼噜完胜火车噪音，专列启程后的前两天老先生则几乎很难入睡。第三天老先生快要崩溃了，搬起行李去了专列值班的车厢。不过半天后又搬了回来，说值班人员每两小时换一次岗，也没法睡。后面的几天小汪汪很不好意思，每次睡觉都是等老先生睡了后自己再睡。

趣事之“绑定”

在 CE-1 研制过程中，包括环模试验，跟紫台的工作协调，试验值班等，经常会有出差。出于对小汪汪大杀器的忌惮，每次出差住宿的安排都颇费周折。

后在一次出差住宿安排中，张家宇跟杨家卫老师住在了一个房间。张家宇开玩笑说，“杨老师，以后咱俩绑定！”杨老师回应，好！以后咱俩绑定。于是在那以后，他们经常互称“绑定”。

杨家卫老师，在 CE-1/CE-2 卫星 X 射线谱仪研制中负责二次电源的研制，后在 HXMT 项目中又再次负责中能望远镜二次电源的研制。杨老师的心理素质特别好，人很聪明，对工作认真负责。乒乓球也玩的很好，在高能所属于前五的水平，而且是难得的比赛型选手，每次比赛总能正常的发挥自己的水平甚至有

超水平的发挥。以前听王老师提到过,天体中心高空气球试验时,气球的二次释放是关系到整个过程成败的关键环节,时机又不好把握,很多人不敢操作,最后杨老师上手操作完成,再以后的多次高空气球试验这一步的操作都是杨老师负责完成的。

张家宇,是比我晚到两年的师弟。在 X 射线谱仪项目中参与磁场屏蔽的计算与分析,并参加了标定试验,后在 CE-3 粒子激发 X 射线谱仪项目中负责了热分析与热设计以及相应的热实施等工作。家宇属于那种自带幽默感的人,跟家宇一起时,总有很多快乐。但生在贵州的他,在北京水土不服,身体一直不太好。CE-3 研制结束后,很多时候他只能上半天班,有时候身体不舒服时也会几天无法上班。后我在 CE-3 研制进入初样阶段后,开始把主要精力转向 HXMT 中能望远镜的研制,这中间又颇多挫折,也就很少去关注探月这边的事情。直到后来才知道,他已经离职离开了高能所。

(八) 嫦娥奔月

在 2007 年,我已开始参加 HXMT 中能望远镜的预先研究,而我们的“嫦娥一号”也在那一年开启了她的奔月之旅。

西昌,一个很美丽的西南边陲城市。在那一年,因为嫦娥,因为那个传说,那个梦想,让很多人第一次了解和熟悉了她。而我也有幸亲眼亲历了那个令人激动的历史瞬间。跟李惕碛院士,陈和生院士,王老师,杨家卫老师一起,随着有效载荷研制团队的其他成员,在 2007 年的 10 月,见证了我国“嫦娥飞天”的辉煌时刻。在看到火箭升空的那一瞬间,原本设置有分区的观摩人群,欢呼着涌在一起,尽情地宣泄着这样一个令人激动的历史时刻!

(九) 写点后记

自加入探月团队,到送嫦娥一号/嫦娥二号上天,前前后后六年多。遇到过很多困难,也遇到过很多真心帮助过我的人。有快乐,有烦恼,有激动,也有煎熬。最终卫星成功发射,X 射线谱仪的观测结果有惊喜也有遗憾,其在半导体、低噪声电子学等技术方面的推

动,空间科学技术人才的培养等方面有着非常重要的意义。而高能所探月团队也获得了国家科技进步奖特等奖(集体)一次,北京市科技奖二等奖一次。

X 射线谱仪,在 2007 年 10 月随着嫦娥一号卫星奔向了三十八万千米之外的月球轨道,并在轨运行一年。国际同类仪器包括了欧洲 2003 年发射的 Smart-1 卫星搭载的 D-CIXS(压缩成像 X 射线分光计)(采用 SCD(扫式电荷器件)技术),以及比嫦娥早一个月发射的日本 SELENE 卫星搭载的 XRS(X 射线谱仪)(采用 X-CDD 技术)。Smart-1 卫星有一个重要的研究目的就是验证推进技术,所以在卫星到达月球轨道之前,在地球轨道运行过很长时间,导致其搭载的 SCD 探测器(其地面标定时能量分辨率远好于 CE-1 所搭载的 Si-PIN 探测器结果)受到辐照损伤,在月球轨道的能量分辨率只有 FWHM(半高宽)500eV@5.9keV。而日本 SELENE 卫星的 XRS 由于仪器故障,没能正常工作。嫦娥一号卫星抓住了一次太阳 C 级耀斑的月面数据,其能量分辨率在 FWHM 270eV@5.9keV,在当时得到了能量分辨率最高的月面 X 射线谱。

而很遗憾的是从欧洲 Smart-1 到中国的嫦娥一号卫星,包括后续印度发射的月船一号,其发射运行时间全部处在太阳活动的宁静期,而月面 X 射线荧光观测强烈依赖于太阳活动的强度。因此 CE-1 卫星 X 射线谱仪虽然得到了能量分辨率最好的月面 X 射线荧光谱,但却并没有完成其预定的科学目标,给出 Al/Si 元素的全月面分布。直到嫦娥二号卫星在 2010 年 10 月发射之后这个遗憾才得以补偿。嫦娥二号发射时,太阳已经处于活跃期,X 射线谱仪只用 3 个月的观测数据便完成了 Al/Si 元素的全月面分布的探测。

绕月探测工程 X 射线谱仪的研制,整个过程,除了仪器的研制,取得在轨观测的结果,还极大的促进推动了高能所粒子天体物理中心新技术的开发。现在的天体中心对半导体探测器的技术储备,对低噪声读出电子学的理解,已经接近国际前沿水平。而探月立项之初,在技术上距离国际前沿却是有非常大差距的。整个研制过程,包括了整个团队的努力,而王老师、张承模老师更是在其中起到了核心关键的作用。