

立足高原雪域，登攀科学高峰

——为西藏计划二十年而作

谭有恒

一、云南站后的思考



图1 头顶青天脚踏云海的云南宇宙线观测站

上世纪50年代，在肖健先生带领下，我国的宇宙线研究以云南落雪山实验室为基地，以多板云室和小磁云室为手段，在“奇异粒子”和10GeV能区高能核作用研究上取得过辉煌的成就。60年代云南站大云雾室组建成，不幸遭遇文革蹉跎；到了70年代后期，手工操作、效率低下的云雾室，已很难在西欧中心交叉储存环（ISR）已经出世的情况下在亚TeV(1TeV=1000GeV)能区的粒子物理研究中找到自己的位置和适应现代的竞争。面临国门的开放，我国的宇宙线研究之路该怎么走，是当时中国的宇宙线研究者必须面对的问题。

其实，宇宙线这种来自天外的高能粒子流，同时具有宇观、微观和环境三大属性。我们无须把自己局限于高能核作用研究和新粒子寻找，去与加速器争夺能区；宇宙线的特性决定了它有更广泛的信息可供萃取，也有更高能的粒子在加速器能区的上头。因此，跨进到100TeV（超高能）以上去探索粒子物理中的新现象和着重开发宇宙线的天文学信息，是70年代末的大思考中我们得出的朴素的结论。

考虑到当时我国有限的国力和技术条件，明确认识到在宇宙线观测的空间、地面和地下（或水下）三种方式中，我国的优势只存在于地面。而在地面观测中，高山乳胶室虽正在势头上，然其被动式的性质、手工化的处理、有限的面积和事例统计量不足等根本性弱点，在自动化大生产的现代实验面前已难看到光明前景，而其天然的极端有偏（bias）的事例选择特性，又使之失去了用于宇宙线天文观测的价值。对形势的这种认识使我们的目光自然地落到了EAS（Extensive Air Shower，广延大气簇射）头上。

在日本明野EAS阵列上的实习中，认识到当前EAS实验存在两大问题：对付EAS在发展中的涨落的无能和EAS探测阵列的粗放，这普遍使得EAS对天文信息的灵敏度为簇射发展的涨落所掩盖，在结果的解释上陷入原初成分与作用模型互为因果的纠缠而不能解脱。上高山和阵列精细化，应是解开此死结的方向之一。

进入地球大气层的任一个高能宇宙线粒子都不可避免地会与空气原子核相碰撞，并通过

一系列的级联过程以大气为舞台衍生出地球上最为壮观的多粒子事件——EAS。EAS 在大气层中有其发生、发展、极大和衰亡的过程。在其极大处，EAS 的粒子数最多、本征涨落最小、模型依赖最弱，是精细测量宇宙线膝区能谱和研究膝区物理（指宇宙线能谱在 $10^{15} \sim 10^{16} \text{eV}$ 的膝样拐折及其所联结的宇宙线起源、加速、存储、传播及在 EAS 的核作用中可能的粒子物理新问题）的最佳位置。因此，观测最好是在四、五千米的高山上进行。同时因为那儿空气稀薄，可看到在海平面看不到的小 EAS，从而可降低阈能做宇宙线天文。然而云南站海拔（3200m）太低，地形又不好，进军“世界屋脊”西藏高原就成了心中的梦想。

二、 得天独厚的地利

地球上不乏高山，可是并非任何高山都适合做常年性的 EAS 实验基地。理想的高山站址应有开阔平坦的地形、相对温和的气候、就近充足的能源、常年畅通的交通。还最好有现代化的通讯及可为依托的友邻单位和不远的城市，才能大幅降低建站和维护的成本，保障运行的质量及观测站的长存。那时，国际上还没有一个高山站能全面满足这些条件，它们几乎都有地势险峻、气候恶劣、孤立山头乃至半年大雪封山的缺憾。而西藏羊八井是个例外：此地海拔高达 4300 米，然而十分平坦开阔。它位于拉萨市西北 90 公里的念青唐古拉山脚下，受藏北群山的护卫和雅鲁藏布江输送来的印度洋暖流的影响，冬无积雪，宜牧宜耕也宜居。难得的是有羊八井地热电厂（当时还是试验电厂）供电，有邮局、医务室、小学、羊八井兵站等单位及上千居民为邻，有青藏公路连通拉萨和内地。虽然那时尚无通往拉萨的民用电话线路，但通过邮局能以电报、信件与外界联络。如今，随着国家的日益强盛和西藏建设的突飞猛进，兰青拉通讯光缆和青藏铁路相继开通，这里的工作条件已不逊内地，足可承担任何大规模、高技术的现代化实验在此安家落户，分享高海拔蕴涵的物理潜能。可以认为，羊八井是世界难寻的最佳高山站址，是我国的一项独特的科学资源，充分认识它、设法利用它，将会带动我国宇宙线研究走向新的辉煌。

三、 艰苦奋斗的历程

最佳站址的存在并不等于实验基地的建立。为了实现这个目标，我们经历了二十多年的艰苦历程。1984 年的西藏选点、1986 年的西藏计划研讨会、1990 年的羊八井观测站问世和 2006 年的羊八井全覆盖阵列建成，是这条长征路上的几个重要里程和时标；这些时标间的连接线，是一群人二十多年艰辛跋涉的长路。20 世纪 80 年代初，当我就在国内开展高山 EAS 实验的想法请教萧健先生时，他问了几个问题：技术上有没有把握？当地有没有人协助？队伍有没有铁杆？并坦陈了他早年想搞 EAS 的苦衷。我才知道，老一代科学家早已想到需以现代化的计数器实验取代古老的云雾室，只是当时的政治气氛和技术条件不允许。如今，政治上已无后顾之忧，技术上已进入集成电路时代；只是队伍、经费全无，与当年云南站建设（二机部 311 工程）的国家项目、军工旗号、全员编制无法相比。此大缺陷属于小环境，是可通过人的努力加以弥补的。这首先要从为我国 EAS 研究培植人才、储备技术、搭建平台开始。



图 2 怀柔 EAS 阵列

怀柔练兵 在张文裕、萧健先生的推荐下，我们得到了第一份自然科学基金，开始了 1983~1988 的全自力更生的怀柔 EAS 阵列建造，即“西藏计划”的技术和人才准备阶段。除关键的集成电路块和两个高压电源而外，所有东西都是从国产材料、元件做起的。在当时的条件下，这对一个从零开始的自由选题项目而言，自然要有许多今天所难以想象的额外付出。然而，它的多方位、全过程的历练，它首次在本国土地上展示的单个 EAS 的结构和超高能宇宙线能谱，的确为西藏计划的推进建立了信心、积累了经验、培训了人员。它也同时让我们认识到，在当时的国内经济、技术、信息条件下，要靠这种方式及时启动西藏计划并挺进国际前沿几乎是不可能的。以高山地利和怀柔队伍为筹码组织国际合作，是解决我们的资金、设备、信息问题和保持国际联系的有效途径。

西藏选址 于是，在怀柔练兵刚刚进入轨道的 1984 年 4 月，就实施了西藏选址考察计划。在预定的几个候选地（羊八井、那曲、当雄、浪卡子）中，一到羊八井就为那里得天独厚的自然条件所吸引，欣喜之情难于言表。当我们乘车自拉萨沿青藏公路西行，眼前是清澈的堆龙曲河水及其滋养的片片农地，旁边是蓝天白云映衬下的两行远山，哪里有以往熟悉的那种“上山”的感觉？汽车一过“老虎嘴”，前方豁然开朗。点缀着雪峰、冰斗的一行山体，自东向西连绵于念青唐古拉主峰（7162 米）与穷母岗峰（7048 米）之间，像一堵高大的北墙护卫着一片约 10km 宽、70km 长的平坦草地。散落在谷地里的藏村及青藏农场的旧址，见证着这里的温和气候；小河边升腾着热汽的地热井口和试验电厂，预示着那里的发展前景；公路旁的干打垒和棉帐篷，散发着地热先驱们的开拓精神。在当地的考察我们受到了地热研究所和地热电厂亲人似的接待，放射本底测量和藏语翻译也有西藏防疫站人员的热情帮忙。这让我们真切地感受到了羊八井大地和西藏人民热情的拥抱。至于 1988 年 5 月的羊八井站址定点考察，更得到西藏自治区政府和西藏大学的协助，地利、人和之外又得了天时。在这圣洁的天、神奇的地和淳朴的人们面前，容不得我们犹豫不决，只有勇往直前。

计划出台 1986 年，怀柔阵列建造已进入探测器和电子学插件批量制作的阶段，楼顶的小阵列试验业已开始。其间，因 1983 年西德 Kiel 大学 EAS 实验组宣布发现 Cygnus X-3 为超高能 γ 源（虽然后来被证明为误）而引发的寻找超高能 γ 源的国际热潮也加剧了我们的紧迫感。因应这种形势，我们的“西藏计划”也在“膝区物理”之外加上了 γ 天文作为重点内容。

趁 1986 年 10 月（国际宇宙线研究乳胶室社团的）“国际超高能相互作用研讨会”在北京举行之机，我们有针对性地邀请了一些 EAS 方面的专家及可能的合作者，组织了一个“西藏计划研讨会”（Tibet Project Workshop）。在会上，羊八井的地理优势和物理好处引起了与

会者广泛的共鸣；参观中，高能所楼顶的 EAS 练兵展示也获得了专家们的认同；在会下，与以汤田利典（时为中日甘巴拉乳胶室实验日方负责人）为首的日本学者，以 B. D' Ettore Piazzoli（现中意羊八井 ARGO 实验意方负责人）为首的意大利学者以及美国 CYGNUS 实验负责人 G. B. Yodh（也是现在的 MILAGRO 实验的创始人）达成了合作在羊八井实施西藏计划的口头协议，虽然日方有人表示了只愿与中方双边合作的意愿。

高原立足 此后，大家都在等着看中方的行动，我们也在积极游说主管部门和学界元老，以寻求经费和支持。当时，在上海养病的我国宇宙线学界元老霍秉泉先生和天文界元老王绶琯先生都曾来信热情鼓励；然而，“云南站都办不下去，去西藏能呆得住吗？”等普遍疑虑使事情陷入了僵局。在难耐的等待中我们看到，CYGNUS 组在 Los Alamos 搞起了阵列扩建，意大利人在 Gran Sasso 山顶启动了 EAS-TOP 计划。好在 1988 年 4 月日本宇宙线所乳胶室组获得了一小笔科研基金，5 月我们即赴羊八井选定站址，并分别与西藏地热开发公司、西藏大学和西南交通大学签订了协助和合作意向书。接着，日方板田先生访问已投入观测的 EAS 怀柔站，敲定了羊八井阵列的初步设计；当时高能所所长叶铭汉所定将 20 万元所长基金拨为启动经费，西藏计划又获生机。

双方热情高涨，筹建进展神速。1989 年 5 月，我们去东京测试设备并商量秋天的羊八井建阵安排事宜。正当兴高采烈之际，突然发生的“六四”事件无异于冷水浇头。怀着挽救西藏计划的一线希望，我们毅然于 6 月 9 日回到北京，9 月赶赴羊八井现场。终于，我们以真诚和执着在 11 月底、12 月初等来了日方设备和人员，在高山雪域的料峭寒风中开始了我们的野外作业，并于 1990 年的元月 10 日宣告了世界第二高度的羊八井观测站出世。

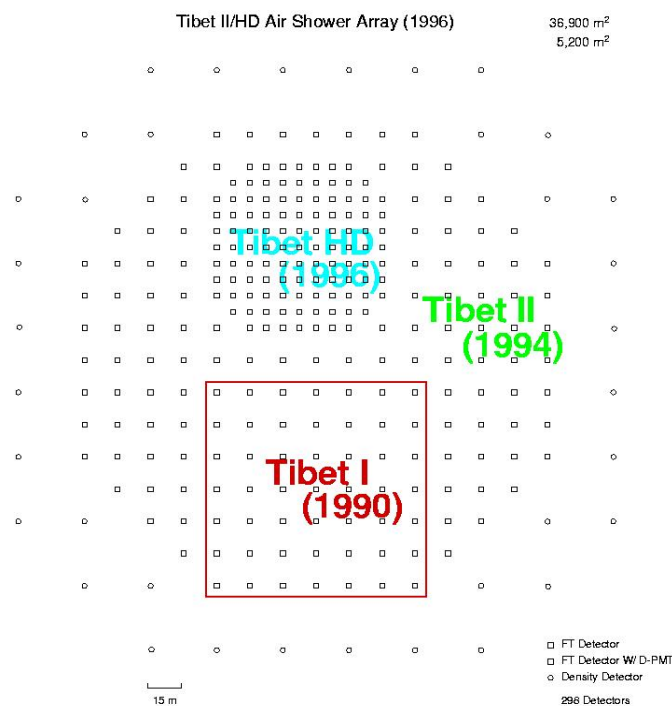


图 3 羊八井观测站 ASy 阵列的前期发展

45 个闪烁探测器的 ASy-I 阵列当时在国际上只能算是小兄弟，然而，它国际最低的探测阈能和首次在 10TeV 能区测出的蟹状星云 γ 流强上限却彰显了羊八井的高海拔优势，替我们赢得了领导的支持、国际的承认和立足西藏继续发展的时间。阵列的每次扩大或加密所带来的新成果又为我们赢来新的发展机遇，从而构成了滚动发展的良性循环。以致美国《科学》杂志 1995 年就预见到了这种趋势，把羊八井列为我国科学地理图上 25 个科学实验基地之一。

能立足西藏并逐年发展，也要归功于灵活的组织管理和核心成员的奉献精神。为了轻装

上阵和不致留下个难以善后的大摊子，我们放弃了云南站或苏联的管理方式（数十人、全工种配备），而代之以课题组加中方合作委的民间管理；为了集中财力于基地建设，大家忍受了长至半年或三个月的轮换制度和长期无车辆、无室内厕所的非现代生活；为了事业不断、队伍不散，我们顶住了一波又一波出国大潮的冲击。终于，大家看到了一个充满活力的、拥有现代化大规模设备的羊八井观测站，悄然地出现在念青唐古拉山脚下，伴随着小镇的繁荣，迎来了铁路的通车，成为了羊八井不可或缺的一大风景。

四、与时俱进的目标

1994年，我们将阵列扩大了4倍成为AS γ -II阵列， γ 源观测仍然是负结果。这说明它们不是什么超高能 γ 源，或者能谱太软。要想有所发现就需要设法进一步降低阵列的探测阈能。然而当时我方经费不足，日方又坚持要上乳胶室（鉴于其乳胶室背景），于是在加密阵列和在阵内建造大面积乳胶室上发生了分歧。在1996年4月中日合作杭州会议上双方达成了一个务实的妥协：只建80平米的乳胶室且只工作3年，同时在AS γ -II阵中以77个新探测器将5200平米区域加密一倍（间距自15米缩至7.5米，取样比自0.4%提高到1%），称之为HD即高密阵列。此加密的阵中之阵一经问世，立即将探测阈能降到了3TeV，使我们很快就实现了对蟹状星云的正观测。这促进了AS γ 阵列的继续扩大，并使我们有幸看到了1997年活动星系核Mrk501及2000~2001年Mrk421的爆发式 γ 射线发射。

上世纪九十年代早期，空间实验（CGRO卫星载高能 γ 射线望远镜EGRET）以271个 γ 源的发现使得地面 γ 天文相形见绌。一时间，八十年代中后期形成热潮的国际上十几个 γ 天文阵列纷纷淡出，转向空间实验、转向IACT（大气切仑可夫光成像望远镜），坚持下来的只有美国Los Alamos的MILAGRO（改用水池水作EAS粒子探测器）和我们羊八井。那时我们强烈地预感到，今后 γ 天文的竞争定会在当时空间和地面实验都还无法到达的空白能区（20GeV~300GeV）激烈展开。羊八井要进入此空白能区，就必须在“降低探测阈能、分辨原初成分”上实现突破。我们不必一定要跟随MILAGRO只顾低能端 γ 天文的路线，羊八井的高度优势加EAS粒子探测阵列的地毯化可帮助我们实现这个突破，并同时保留和优化粒子阵列的基础性和多课题优点。地毯式的全收集将传统的多点取样阵列（其取样比不过1%）漏掉的EAS粒子捡拾起来，一方面能进一步降低探测阈能去作 γ 天文，另一方面能让较大的EAS的粒子时空分布图像得以完整的呈现，从而为逐事例分辨原初成分和发现未知的稀有事例提供良机。然而，要作万平米级的地毯式阵列，在经费和技术上对我们都是极大的挑战。性能优越且具有成本低、形状规则、信号引出灵活等特点的RPC（Resistive Plate Chamber，高阻平板室），是“地毯”的理想构件；1986年就有意参加西藏计划的意大利学者，是理想的合作伙伴。我们1993年在意大利达成了共识，1994年8月在拉萨国际宇宙线物理研讨会期间签订了中意合作意向书，1997冬~1998春在羊八井成功地进行了50平米RPC地毯的现场试验，最终导致了2000年底ARGO（Astroparticle physics Research with Ground based Observatory at Yangbajing，同时，RAGO又是西希腊神话中的一个周身长满着眼睛从不休息的巨怪，以之象征‘地毯’的宽视场和全日制特征。）项目的立项和建设工程的启动。又经6年的努力，2006年，由5600平方米的中心“地毯”和约1000平方米RPC的外围“保护圈”组成的ARGO一期阵列在羊八井全部建成，这预示着针对此前EAS实验两大弱点的努力已快见效果，精细EAS实验的时代帷幕就此拉开。

其间，由于预感到第三代IACT与下一代空间 γ 探测器GLAST（约在2007上天，预计可在小于100GeV能区找到3000多个 γ 源）的结合将会带来的挑战，早在2000年我们就与德国海德堡核研所（IACT HESS组的牵头单位）几位资深学者达成民间协议，共同在羊八井建造第四代IACT（高山，约25m口径，4台成阵），以数GeV的超低阈能和约0.005个蟹状星云 γ 流的

空前灵敏度细致研究新发现的北天 γ 源和宇宙 γ 暴（在空间广播 1 分钟后完成指向跟踪），特别是源的短时标变化。然而羊八井天空云量的现场观测和德方对该地区卫星云图的分析都显示，羊八井的晴朗天数已较以前大为减少，年均可观测夜晚只有 35%（比较于西喜马拉雅地区的 65%）。面对羊八井不适合光学观测这一令人失望的结论，只得尊重事实放弃了这个计划。

五、 国际一流的设备

挖掘高海拔的物理潜力需要有上规模、够水平的实验设备；大规模的高精设备又须有现代技术和专业人员保障其高效运行。看看近 800 个闪烁探测器整齐排列的 AS γ 阵列以及 ARGO 实验厅中壮观的 RPC “地毯”，不由人不为它们的气势所感动；再看看它们天涯咫尺的运行功能，又不由人不惊叹这穷山僻壤竟能与时代发展有如此超前的同步。



图 4 羊八井观测站 AS γ -III 阵列

当前羊八井观测站的主要设备有三部分：由近 800 个 0.5m^2 闪烁探测器组成的传统的多点取样阵列 AS γ -III；由 1848 个 RPC（每个 4.3m^2 ，分成 10 个时间信息和 80 个粒子数读出单元）紧密排列构成的 ARGO “地毯”；由太阳中子监测器、中子望远镜及气象、云量、雷电自动记录仪等组成的太阳活动及地球环境监测设备。这些自动化、数字化的计数器型设备，（除了停电和检修）都是风雨无阻、经年不停、持续运行的，时时刻刻在产生着原始观测数据。AS γ -III 每天的数据产额有约 20GB，ARGO 则将高至每天 300GB（每秒钟可记录近两万个 EAS，比较于云雾室每小时只能记录几个事例），足以与大型加速器实验相比。大数据产量是羊八井实验的突出优势，也为数据的传输和存储设下了难题。随着兰青拉通讯光缆的建成，随着观测站与北京高能所间的 155M 宽带网的开通，不仅原始数据的网上在线传输成为可能，而且 ARGO 的远程运行和监控也得以实现。此前，中子监测器数据也已实现了实时自动处理、实时远程传输，可供国家空间天气预报和地球空间环境监测单位实时取用。加上正在建设中的中欧格点网（China-Euro-Grid），我们有足够的自信认为，羊八井实验的国际化和信息化前景是一片光明。

中日合作 AS γ 阵列已经历三个发展阶段，共有效运行十五、六年，在蟹状星云稳定 γ 发射、活动星系核 γ 射线爆发、宇宙线太阳阴影、超高能宇宙线能谱、银河宇宙线非各向同性和宇宙线等离子体绕银心共转等方面取得了重要成果。新近，一个致力于在 100TeV 能区寻找 γ 源的、称为“AS γ -III+MUON”的计划已酝酿成熟。为此，计划在 AS γ -III 的边缘四周修建总面积约 8000 平方米的地下水池，以探测 EAS 中的 μ 子作为选取 γ 引起的 EAS 的判别标准。

新建成的中意合作 ARGO “地毯”，不久即可投入正式观测。待完成对北天已知 γ 源的检测性观测之后，预定的多项物理工作即可同时展开，如 Multi-10GeV γ 暴、Sub-TeV γ 源、宇宙线太阳阴影和太阳活动变化、宇宙线月亮阴影和宇宙反质子流、弥散 γ 及暗物质存在证据，小

EAS 结构及膝前区宇宙线能谱等。不过，所有这些都暂时局限于 50TeV 以下能区（也是国际上别的地面阵列所达不到的低能区）。实际上，“地毯”的另一重大优点是对 50TeV 以上的较大的 EAS 才能表现出来的精细测量。这时，“地毯”面对的是由成万个乃至百万个荷电粒子所组成的 EAS 粒子群，从而可能以其个性化的时空分布图像揭露其祖先粒子的重要信息。为此，一个名为“基于 ARGONIE 地毯的羊八井超级复合阵列”（YSCA）的计划已经提出。它将要求为每个 RPC 装备一个大动态的模拟读出，把 RPC “地毯”扩大到整个万平米大厅，在厅内以不破坏地毯连续性的方式均匀分布 5 个 170 平米 RPC μ 子探测器，在厅外以 264 个大型闪烁探测器环绕大厅布成一个 200 米见方的复合阵列，并以 4 个 432 平米的流光管 μ 子探测器分列于阵列的四角，形成 YSCA 的基本框架。这将不仅能以更好的性能支持原先计划的所有工作，而且能最好地利用 γ -EAS 与 P-EAS 在 μ 子密度上（1: 60 级）的大差距去寻找超高能 γ 源（它不可能是电子源只能是质子源），亦即迄今仍未被任何实验看到的宇宙线产生的源头和故乡。它还可能充分利用“地毯”所呈现的 EAS 粒子盘的详尽图像的个体特征差异，在 μ 子信息等的协助下，找到逐事例地区分 EAS 祖先粒子的元素成分的有效方法，成为打开“膝区物理”老大难之门的一把钥匙，解开宇宙线研究“成分/模型纠缠”的一柄快刀，发现稀有事例、未知现象的一种利器，并成为功能全面而强大、能覆盖广阔能区、能支持多个课题、能为多种学科长期服务的羊八井当家设备。



图 5 羊八井观测站的 ARGONIE 地毯式阵列

除了纯基础的研究而外，羊八井也开始关注宇宙线的环境属性。为了长期监测宇宙线的变化并捕捉突发的太阳粒子事件，除 1988 年引进的一套由 28 支超级中子管组成的太阳中子监测器和一套由 9 平方米闪烁体组成的太阳中子望远镜外，又正在自制一套 6 平米的闪烁体 μ 子望远镜，并尝试利用 ARGONIE “地毯”的单粒子计数资源。来自大气所、寒旱所以及德国的气象、雷电、云量监测仪器也已在站上投入观测，打算以寻找宇宙线强度与中低空云量变化（因而地面温度变化）间的联系以及大 EAS 与雷云的生成、闪电的触发之间的联系为切入点开始太阳活动及地球环境变化的监测研究。只是所涉及的系统十分庞大复杂，需要多种学科的交叉和长期的合作。因此，正如路甬祥院长所曾指出的那样，建造羊八井多学科研究平台，成为了我们的又一任务。

六、 天地人和的杰作

为什么 40 年前肖健先生想为而不能为？为什么羊八井能 16 年长盛而不衰？是因为我们有幸遇上了天时、占得了地利、构建了人和。羊八井的高山地利归功于喜马拉雅隆起中的奇遇，是自然的造物，近乎永恒的存在。改革开放、中华崛起的天时是人类文明的近代佳话，历史发展的必然，还会有多年的好运。它们都是业已存在、且将继续存在的外部大环境；而

人和是动态的小环境，会随行为者的行为而变化，需要用心经营。正因为我们找到了羊八井，遇上了好时代，育成了奋发的科研团队和有效的国际合作，才成就了今天羊八井的繁荣。要走好前方的路，重点是要经营好这个人**和**。



图6 羊八井宇宙线观测站 4300m, 90.53^oE, 30.11^oN

队伍的团结是人和的核心，好的国际合作是人和的重要内容。要使一项科研活跃于国际前沿，就必须让人流、物流、信息流在国际层次上有效流动起来；而好的国际合作正是促进此种流动的有效渠道。早期的羊八井国际合作虽曾招致过许多非议，的确也并不完美，但总体而言，它毕竟帮我们渡过了经费和物资困难期，完成了从无到有、从小到大的发展；也帮我们免费派出过约60人次的访问学者和一批博士后。虽然这也为人才流失开了方便之门，但毕竟利用了当时只有外方才有的计算设备和灵通的信息，使我方的多数人员得到了训练，密切了双方具体工作人员间的直接交流。在全球化的现代，只有整合国际优质资源才能成长出具有国际竞争力的大科研项目。共同的创意，互补的优势和良好的个人关系是达成和维持良好的国际合作的三大要素；我方的主导则是顺利运作和国家利益的要求。在中方条件大为改善的今天（与外方的经费投入比，已自早年的1:8提高到了1:1），我们有能力把国际合作搞得更好，把队伍建设得更加和谐。

“西藏计划”20年，打下了一个坚实的基础，建成了一个登顶的营地。人生有尽，科海无涯，前面还有很长的路。正是：廿年奋斗打基础，万里长征攀高峰。愿这20年风雨炼就的羊八井精神能继续滋养人们的心灵，陪伴顽强攀登的人们。

（北京中国科学院高能物理研究所 100049）

原文载于2007年第2期《现代物理知识》。