

引言

宇宙奥德赛之旅的第三段旅程，我们将从银河系出发，一直飞到可观测宇宙的尽头^①。

但是在开始这段旅程之前，我想先用类比的方式，让你对可观测宇宙的大小，有一个直观的印象。

如果把太阳系当成一栋独门独院的“别墅”，那么地球就是这栋“别墅”里的一颗“玻璃珠”。

4000 亿栋和太阳系差不多大小的“别墅”聚在一起，就构成了一个直径 10 万光年的“中心城区”。这个“中心城区”叫银河系。

在离银河系 250 万光年远的地方，还有另一个“中心城区”，叫仙女星系。这两个“中心城区”，再加上方圆 1000 万光年内的 50 多个矮星系，就构成了一座“城市”。这座“城市”叫本星系群。

本星系群只是一座“小城市”。在离它 5000 万光年远的地方还有一座拥有 2000 个星系的“大城市”，叫室女座星系团。以室女座星系团为“省会”，再加上方圆 1 亿光年内的 100 多个“城市”，就构成了一个“省”。这个“省”叫室女座超星系团。

室女座超星系团的周围还有 3 个“省”，分别是长蛇 - 半人马座超星系团、孔雀 - 印第安超星系团和南方超星系团。这 4 个“省”像群山一样，环绕着一个位于中心的“首都”。这个“首都”叫巨引源，与地球相距 2.2 亿光年，其质量能达到太阳质量的 5×10^{16} 倍。在“首都”周围、长度为 5 亿光年的范围内，有一个形如巨大山谷的“国家”。这个“国家”叫拉尼亚凯亚超星系团。

拉尼亚凯亚超星系团并不算一个大国。它连同周边的 4 个“国家”，组成了

^① 可观测宇宙是指以地球为中心、用望远镜能够看到的最大空间范围。它仅仅是整个宇宙的一小部分。



宇宙奥德赛：飞向宇宙尽头

一个“国家联盟”，叫作双鱼 - 鲸鱼座超星系团复合体。这个“国家联盟”有 10 亿光年长、1.5 亿光年宽。

比“国家联盟”更大的是“大洲”，也就是所谓的星系长城。其中最著名的“大洲”包括人类最早发现的 CFA2 长城、横跨 14 亿光年的斯隆长城、横跨 40 亿光年的巨型超大类星体群，以及横跨 100 亿光年的武仙 - 北冕座长城。这个与地球相距 100 亿光年的武仙 - 北冕座长城，就是人类目前发现的最大天体结构。

而众多“大洲”又构成了一个直径 930 亿光年的“星球”。这个“星球”就是可观测宇宙。

现在你应该对可观测宇宙的大小有一个直观的印象了。它是一个直径 930 亿光年、拥有成千上万亿个星系的巨大“星球”。其外观很像一个俄罗斯套娃，由星系群（小城市）、星系团（大城市）、超星系团（省或国家）、超星系团复合体（国家联盟）、星系长城（大洲）等各种天体结构嵌套而成。

接下来，我们将按照由近及远、由小到大的顺序，依次游览我们居住的“城市”（本星系群）、“省”（本超星系团）、“国家”（拉尼亚凯亚超星系团）和“星球”（可观测宇宙）。



01 本星系群

1.1

倒数第一的“学渣”如何开启中微子天文学的新时代？

我们先来逛逛银河系次群。之前说过，除了银河系这个“中心城区”外，银河系次群还拥有 30 多个“小弟”，也就是所谓的矮星系。在这些矮星系中，知名度最高的无疑是大、小麦哲伦云（图 1.2）。



图 1.2 大、小麦哲伦云

大、小麦哲伦云是在地球南半球才能看到的两个不规则矮星系。它们之所以有名，是因为有两项与它们相关的科研工作，在整个天文学史上都留下了不可磨灭的印记。

其中一项科研工作，我们在之前的银河系之旅中已经做过详细的介绍。1908—1912 年间，美国大天文学家亨丽爱塔·勒维特通过对大、小麦哲伦云的持续观测，证明了造父变星是一种可以用来测量遥远宇宙学距离的标准烛光，从而开创了一门全新的学科，即现代宇宙学。

而另一项研究工作，则与 1987 年 2 月 23 日的一个天文学大事件有关。



那天，在离地球 16 万光年的大麦哲伦云中，出现了一颗耀眼的超新星。那就是超新星 1987A（图 1.3）。



图 1.3 超新星 1987A

超新星 1987A，是过去 400 多年内爆发的离地球最近的超新星。它的出现，为全世界的天文学家提供了一场饕餮盛宴。到目前为止，科学家们已经发表了上万篇关于超新星 1987A 的科研论文。其中有一篇论文，还摘下了诺贝尔物理学奖的桂冠。



图 1.4 小柴昌俊

这篇论文的作者是日本物理学界一位传奇人物，名叫小柴昌俊（图 1.4）。他传奇故事的起点，是一个高中的澡堂。

高中时期的小柴昌俊是一个毫不出彩的男生。他曾经中考落榜，复读一年后才考上自己心仪的学校。在高中就读期间，由于家庭经济条件不好，他不得不在校外兼职打工，所以学习成绩一直在中下游。

1947 年，在临近高考前的一天，住校的小柴昌俊去自己高中的澡堂洗澡。澡堂内水汽弥漫，根

本看不清身边的人。进去没多久，小柴昌俊就听到有人在水汽对面议论自己。

有人问：“小柴昌俊打算报考什么专业？”

一个熟悉的声音回答道：“他肯定学不了物理。”

说这话的，正是小柴昌俊的物理老师。此人向来很讨厌小柴昌俊，因为小柴昌俊经常以打工为由，翘他的物理课。

听到自己物理老师的声音，小柴昌俊顿时竖起了耳朵。只听此人非常不屑地说道：“虽然我不清楚他会不会选印度哲学或者德国文学，但是可以肯定他完全不是学物理的料。”

这个物理老师恐怕做梦也不会想到，就是他这不经意的一句话，改变了整个日本的科学史。

在此之前，小柴昌俊确实没想过要学物理。因为在当时的日本，物理是最热门也最难考的专业。一般来说，只有全校排名前10%的尖子生，才有机会被重点大学物理系录取。而当时的小柴昌俊，只是一个中下游的学生。

但这个物理老师的轻蔑，还是极大地刺激了小柴昌俊的自尊心。正所谓“不蒸馒头争口气”。他当时就暗下决心，一定要考上重点大学的物理系，然后狠狠地打这个看不起自己的物理老师的脸。

离开澡堂后，小柴昌俊立刻跑去找自己宿舍学习成绩最好的同学，恳求他辅导自己功课。结果，只用了短短一个月的时间，小柴昌俊的学习成绩就突飞猛进，最后奇迹般地考上了东京大学物理系。

但在人才济济的东京大学物理系，因为经济原因被迫继续打工的小柴昌俊，很快就现了原形。毕业时，他的学习成绩排在全年级倒数第一。幸好有位叫山内恭彦的东京大学教授愿意收留，小柴昌俊才成了东京大学的研究生。

搞笑的是，山内恭彦当时并不了解小柴昌俊的学习成绩。所以，当他为小柴昌俊申请东京大学研究生奖学金的时候，遭到了自己同事的群嘲。没有奖学金，小柴昌俊不得不继续一边打工一边上学，这让他感到心力交瘁。

但没过多久，小柴昌俊就迎来了人生的转机。

1953年，美国罗彻斯特大学物理系想招一批优秀的外国留学生来攻读博士学位，所以就委托日本物理学会推荐一些合适的日本学生。罗彻斯特大学会为这些留学生提供全额奖学金。



小柴昌俊很希望抓住这个出国留学的机会，但由于他的本科成绩非常差，按理说，他根本就没什么竞争力。

幸好，小柴昌俊有一个贵人。

之前说过，小柴昌俊利用高考前最后一个月的时间实现了逆袭，考上了最难考的东京大学物理系，这让他的高中校长特别有面子。

所以，这个高中校长就把小柴昌俊引荐给了一个在东京从事物理学研究的熟人。他希望这个熟人将来可以提携一下自己的学生。



图 1.5 朝永振一郎

申请去美国留学的时候，小柴昌俊想到了这个校长的熟人，所以他就请此人为自己写了封推荐信。正是这份推荐信，彻底改变了小柴昌俊的命运。

因为写这封推荐信的校长熟人，就是后来成为日本第二个诺贝尔物理学奖得主的朝永振一郎（图 1.5）。

拿着世界级学术大佬的推荐信，小柴昌俊再次实现逆袭，得到了去罗彻斯特大学攻读物理学博士学位的机会。

而且罗彻斯特大学的全额奖学金，让小柴昌俊摆脱了多年来一直半工半读的窘境。

不再为钱所困的小柴昌俊，潜力终于如火山爆发。只用了短短 1 年 8 个月的时间，他就拿到了罗彻斯特大学的博士学位（一般人要想拿到美国大学博士学位，至少要花 6~7 年的时间）。这个最快拿到博士学位的纪录，直到今天依然无人能破。

在美国工作了几年后，小柴昌俊于 1958 年回到了日本，任教于自己的母校。1970 年，他晋升为东京大学的教授。

到了 20 世纪 80 年代，小柴昌俊决定干一件大事：他计划做一个大型实验，来寻找质子衰变。

在此先科普一下什么是质子衰变。

在 20 世纪初，物理学家发现原子由带正电的原子核及带负电的电子构成，而原子核又由带正电的质子及不带电的中子构成。此外，人们还发现一些不稳定的原子核会自发地变成另一种质量较轻、比较稳定的原子核，这就是所谓的原子

核衰变。

后来人们意识到，几乎所有的原子核都会衰变。换句话说，几乎所有的原子核都有自己的寿命。一旦寿终正寝，这些原子核就会衰亡。这意味着，在宇宙中，几乎没有什么东西能永垂不朽。

但按照粒子物理的传统观点，还有一种不会发生衰变的原子核，那就是氢原子核，也就是质子。这是因为，原子核衰变后会变成质量更轻的原子核，而质子本身就是质量最轻的原子核。这意味着，质子是抵御宇宙衰亡的最后堡垒。

但这种传统观点，在 20 世纪下半叶受到了巨大的冲击。

自然界存在 4 种最基本的力，分别是引力、电磁力、弱核力和强核力。在 20 世纪 60 年代，3 位物理学家（格拉肖、温伯格、萨拉姆）发现，只要温度足够高，电磁力和弱核力就会变成同一种力，这就是著名的弱电统一理论。它让格拉肖、温伯格和萨拉姆拿到了 1979 年的诺贝尔物理学奖。

20 世纪 70 年代，格拉肖又提出了大统一理论，其核心观点是，只要温度足够高，电磁力、弱核力和强核力就会变成同一种力。这个理论有一个最重要的预言：质子可以继续衰变。

这意味着，如果能探测到质子衰变，就可以验证格拉肖的大统一理论。这显然是一个诺贝尔奖级的工作。

为了探测质子衰变，小柴昌俊领导的研究团队在日本中部的一个叫神冈町（Kamioka）的山区小镇，找到了一个位于地下 1000 米处的废弃矿井^①。他们在这个矿井里挖了一个深为 16 米、直径为 15.6 米的圆柱形水池，并往里面灌了 3000 吨的纯水（图 1.6）。最后，他们又在这个水池边放了 1000 多个直径 20 英寸^②的光电倍增管（图 1.7）。

这个于 1983 年完工的大型实验项目，被称为神冈核子衰变实验（Kamioka neutrino detection experiment, KamiokaNDE）。它的核心思想是：概率不够，数量来凑。

大统一理论认为，质子的寿命约为 10^{31} 年，这已经远远超过整个宇宙的年龄。不过，KamiokaNDE 的这一池水中，大概有 10^{33} 个氢原子核（即质子）。所以在正常情况下，这一大池水中肯定有质子发生衰变。质子一旦衰变，就会产生高速

① 之所以选在这么深的地下，是为了用上方的岩石层屏蔽高能宇宙线的干扰。

② 1 英寸 = 2.54 厘米。



图 1.6 实验用圆柱形水池



图 1.7 20 英寸光电倍增管

运动的带电粒子（其速度能超过光在水中的速度），进而产生所谓的切伦科夫辐射（一种蓝色辉光，图 1.8）。而只要产生了切伦科夫辐射，就逃不过那 1000 多个直径 20 英寸的光电倍增管的“法眼”。

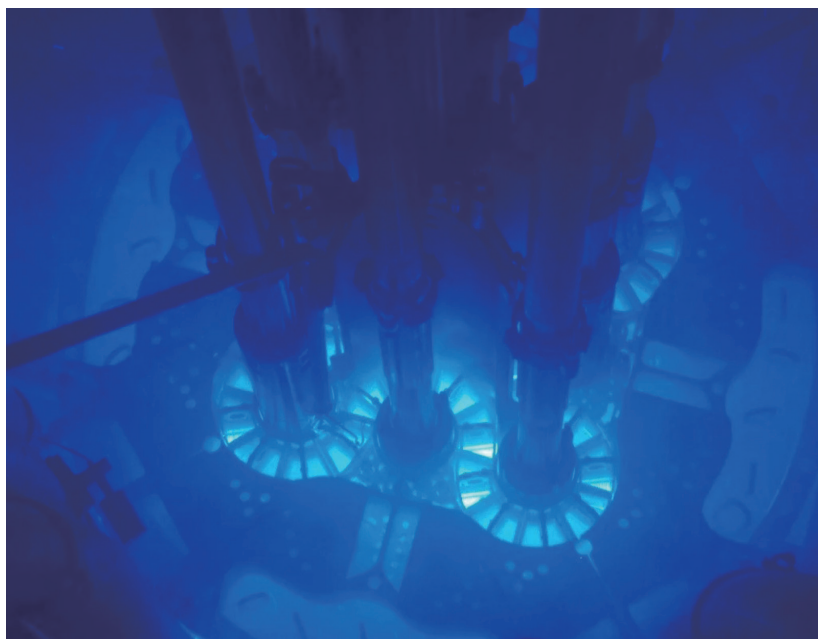


图 1.8 切伦科夫辐射

值得一提的是，这种直径 20 英寸的光电倍增管，就是 KamiokaNDE 的“撒手锏”。在此之前，世界上最大、最先进的光电倍增管的直径，只有区区 5 英寸。但如果使用这种 5 英寸的光电倍增管，KamiokaNDE 就无法与它最大的竞争对手，也就是美国的尔湾 - 密歇根 - 布鲁克海文 (Irvine-Michigan-Brookhaven, IMB) 探测器，相抗衡。因为后者更有钱，造了一个更大的水池，里面有 7000 吨水。

所以，小柴昌俊就找到日本浜松公司，让他们研发了一种直径 20 英寸的光电倍增管。光电倍增管直径放大至 4 倍，其探测敏感度就会放大至 16 倍。这让 KamiokaNDE 一举超越 IMB，成为全世界最先进的质子衰变探测器。此外，浜松公司也一跃成为世界光电倍增管行业的霸主。

按照小柴昌俊最初的设想，KamiokaNDE 应该可以在一年内探测到质子衰变，但最后却是“竹篮打水一场空”。经过两年的搜寻，小柴昌俊痛苦地意识到，他探测质子衰变的种种努力全都以失败而告终。^①

费了九牛二虎之力，在神冈町的地下矿井里挖了个这么大的水坑，结果却什么都没找到。小柴昌俊不得不思考怎么才能向日本政府和纳税人交差。

小柴昌俊的答案是，不能在一棵树上吊死。他又申请了一笔新的经费，对 KamiokaNDE 进行了全面的升级改造。这回，他的主要目标就不是探测虚无缥缈的质子衰变了，而是探测更为靠谱的太阳中微子。

在之前的太阳系之旅中，我们已经详细介绍过太阳中微子。下面，就来简单回顾一下太阳中微子的内容。

20 世纪 30 年代初，奥地利大物理学家泡利宣称，存在一种全新的基本粒子。这种粒子是电中性的，而且质量非常微小、几乎为 0，所以被人们称为中微子。

因为不带电，加上自身质量几乎为 0，中微子几乎不会与原子核发生相互作用。这意味着，中微子能像幽灵一样，轻易地穿过几乎所有的普通物质（例如人体和地球）。因此，就连泡利本人都曾怀疑，中微子永远都无法被探测到。

但事实证明，即使是泡利这样的智者也会马失前蹄。1956 年，美国物理学家莱因斯和柯万在核反应堆中直接找到了中微子。这也是人类首次发现中微子的存在。从那以后，中微子就成了粒子物理学界最热门的研究课题之一。

① 大多数科学家认为，看不到质子衰变的原因很可能是质子的真实寿命非常长，远远超过 10^{33} 年。