

这最后一章所涉及的测量不再局限于对电磁辐射的观测

第15章 宇宙射线、中微子、引力波观测

15.1 宇宙射线观测

15.2 中微子观测

15.3 引力波观测

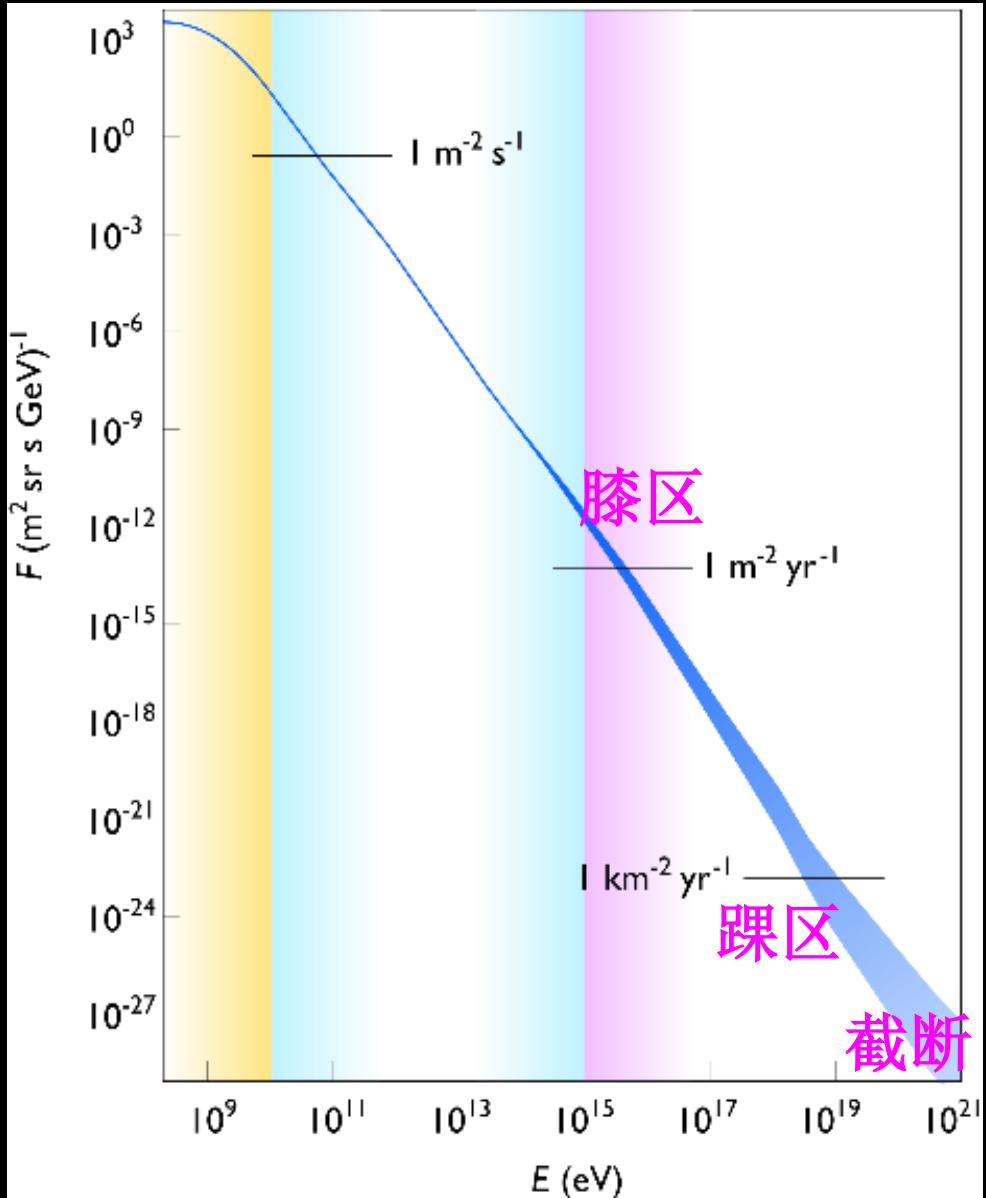
15.1 宇宙射线观测

- 1912年，奥地利科学家韦克多·汉斯（Victor · Hess）带着电离室乘气球升空探测空气中的电离度的实验中，发现电离室内的电流随着海拔升高而增大，从而认定电流是来自地球外的一种穿透性极强的射线引起的，后来有人为其取名为“宇宙射线”。汉斯以此发现获得1936年的诺贝尔物理学奖。
- 二十世纪30年代到50年代，一门宇宙射线物理学的分支学科诞生了。首先与它伴随发展起来的是粒子物理学，因为宇宙线是当时唯一可利用的高能粒子源，用它轰开了基本粒子世界，在宇宙线中发现了一系列基本粒子，推动了早期粒子物理学和高能加速器的发展。

- 宇宙线的起源是天体物理学最感兴趣的课题之一，它携带着其产生地、宇宙空间以及太阳系和地球的空间环境的丰富信息，联系着天体的演化、太阳风与地磁场、空间气候、大气物理和宇宙中的高能现象，是多个学科关注和积极参与的研究领域。

- 1. 宇宙线的成分：至今，我们对这些来自地球以外的宇宙空间的高能粒子的成分有了全面的了解。大约89%的宇宙线是单纯的质子或氢原子核，9%是氦原子核或 α 粒子，还有不到1%是重元素的核（如铁核）。这些原子核构成宇宙线的99%。孤独的电子（ β 粒子，虽然来源仍不清楚）构成其余1%的绝大部分； γ 射线和超高能中微子只占极小的一部分。从宇宙线中还发现了正电子、 μ 子、 π 介子、 κ 介子、 Λ 、 Ξ 、 Σ 等基本粒子。

● 2. 宇宙线的能谱：它们的能谱如图12.1所示。在能量 $<10^9\text{eV}$ 的能段受太阳活动的调制， $10^{15} \sim 10^{16}\text{eV}$ 能谱拐折称“膝区”， $10^{18} \sim 10^{19}\text{eV}$ 能谱另一拐折称“踝区”，观测到粒子的最高能量约为 10^{20}eV 称GZK截断（1966年，美国的Greisen和俄国的Zatsepin和Kuzmin分别在各自国家的刊物上发表了论文，假设大部分高能宇宙射线是质子，得出的结果认为超高能质子与CMB的光子反应导致能量损失，使得能量大 $6 \times 10^{19}\text{eV}$ 的质子不可能到达地面）。迄今已有二十多个事例能量大于 10^{20} eV ，如何解释？尚待研究。



在能量 $<10^9\text{eV}$ 的能段受太阳活动的调制， $10^{15}\sim10^{16}\text{eV}$ 能谱拐折称“膝区”， $10^{18}\sim10^{19}\text{eV}$ 能谱另一拐折称“踝区”，观测到粒子的最高能量约为 10^{20}eV 称GZK截断。

图12.1 宇宙线粒子的能谱

- **3. 探测方式：**宇宙线的观测有空间观测与地面观测两种，**空间观测**要发射探测器上天，探测器面积不能做的很大，探测时间受限制，对于 10^{14}eV 以下的宇宙射线，通量足够大，可用面积约在平方公尺左右的粒子探测器，**直接探测**原始宇宙射线。探测的能量不能很高、能量范围较窄。
- **地面观测**可以将探测器的面积做大，张角可达 2π 立体角，观测时间不受限制，对于 10^{14}eV 以上的宇宙射线，例如，**最高能量> 10^{19}eV 的粒子**，每年、每平方公里、每单位立体角才有一个粒子，必须采用地面探测器。但是，由于大气地面的探测只能是**间接的探测**，影响探测的因素多，误差大。

- 高能宇宙线粒子进入大气层，与大气层空气中的原子核发生多次核作用，形成级联簇射，从而产生大量的次级粒子的过程，称为广延大气簇射（Extensive Air Shower, EAS），参见图12.2。
- 地面观测的是由广延大气簇射生成的次级宇宙线，然后根据其观测结果推算出原始宇宙线的物理特性。广延大气簇射现象是1938年由法国物理学家皮埃尔·俄歇（Pierre Auger, 1899-1993）在阿尔卑斯山观测发现的。

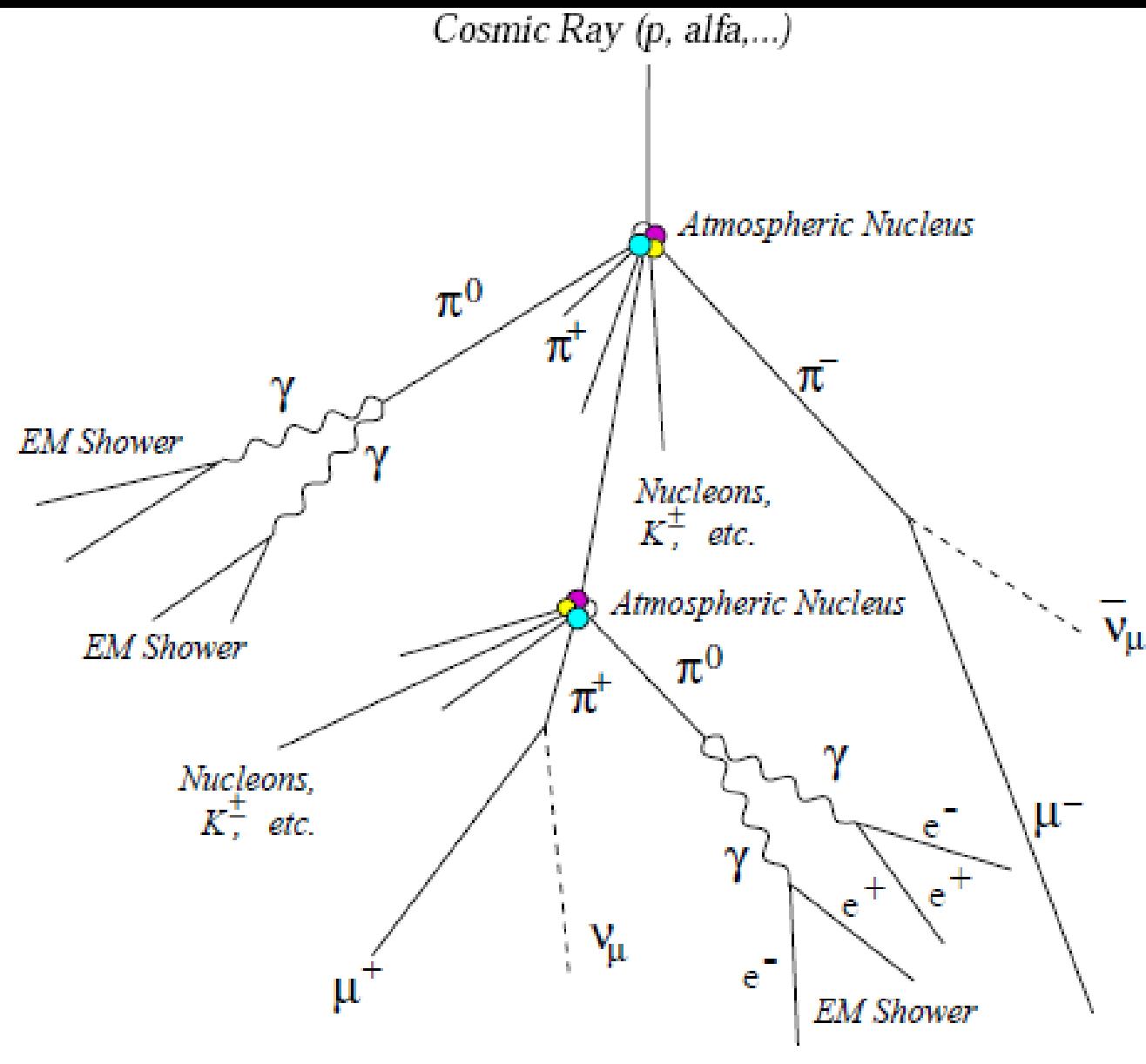
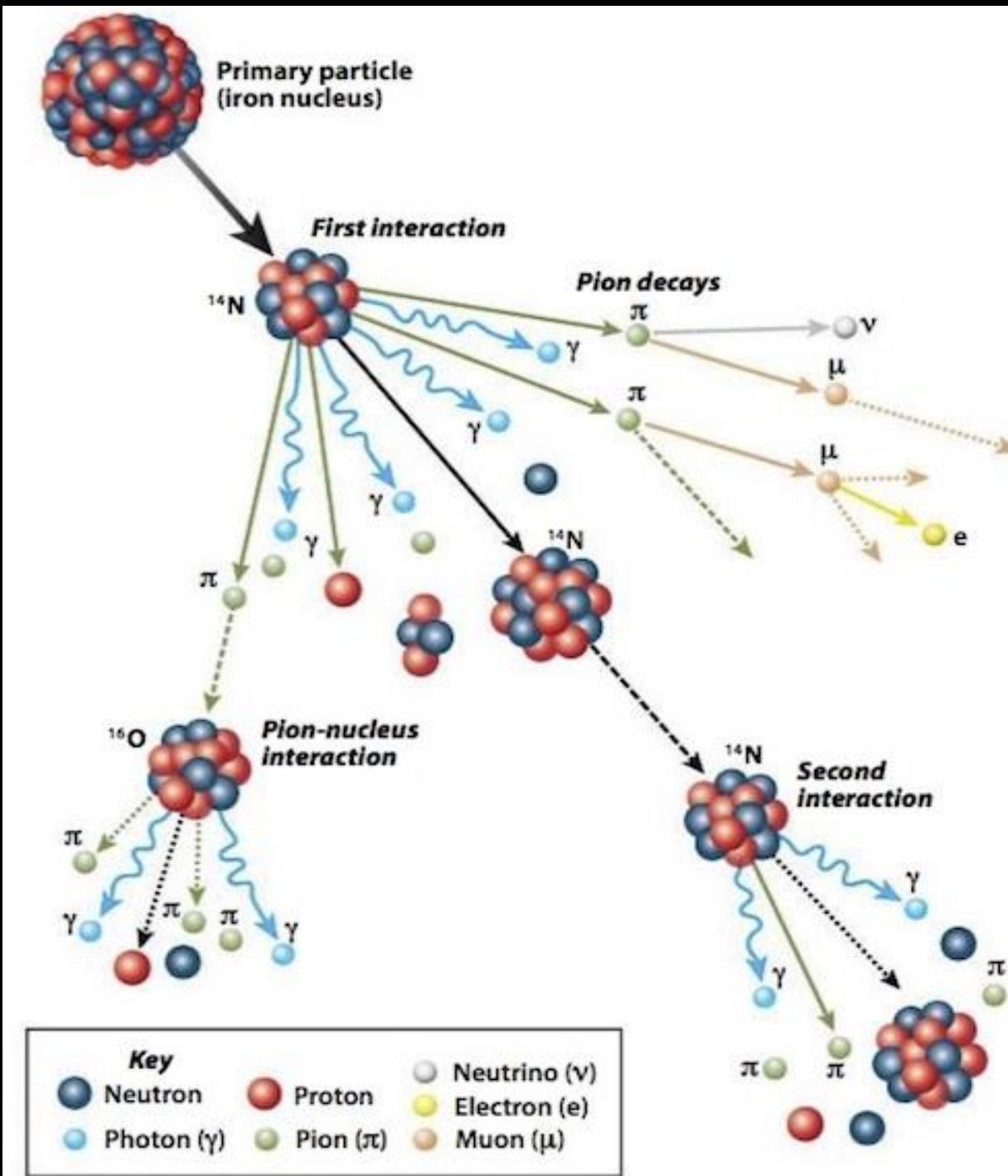


图12.2 广延大气簇射 (EAS)



- 4. 目前世界上最大的宇宙线观测站，以皮埃尔·俄歇命名的观测站，它是2008年建成，有18个国家的约500多位科学家合作，迄今对宇宙射线的成分和能谱取得了一系列令人瞩目的成果。
- 皮埃尔·俄歇宇宙线观测站坐落在阿根廷西部海拔1350米的草原上，为了探索高于 10^{17} eV的宇宙线的起源与特性，研究自然界中这些能量最高的粒子的相互作用。
- 它采用两种独立的方法测定和研究高能宇宙线。一种技术是通过与表面探测器内水槽中的水产生的切伦柯夫效应探测高能粒子；另一种是用荧光望远镜观测地球大气高层发射的近紫外光从而得到大气簇射发展的踪迹。因此，有两种设备，一种是表面探测器阵，另一种是荧光望远镜组。

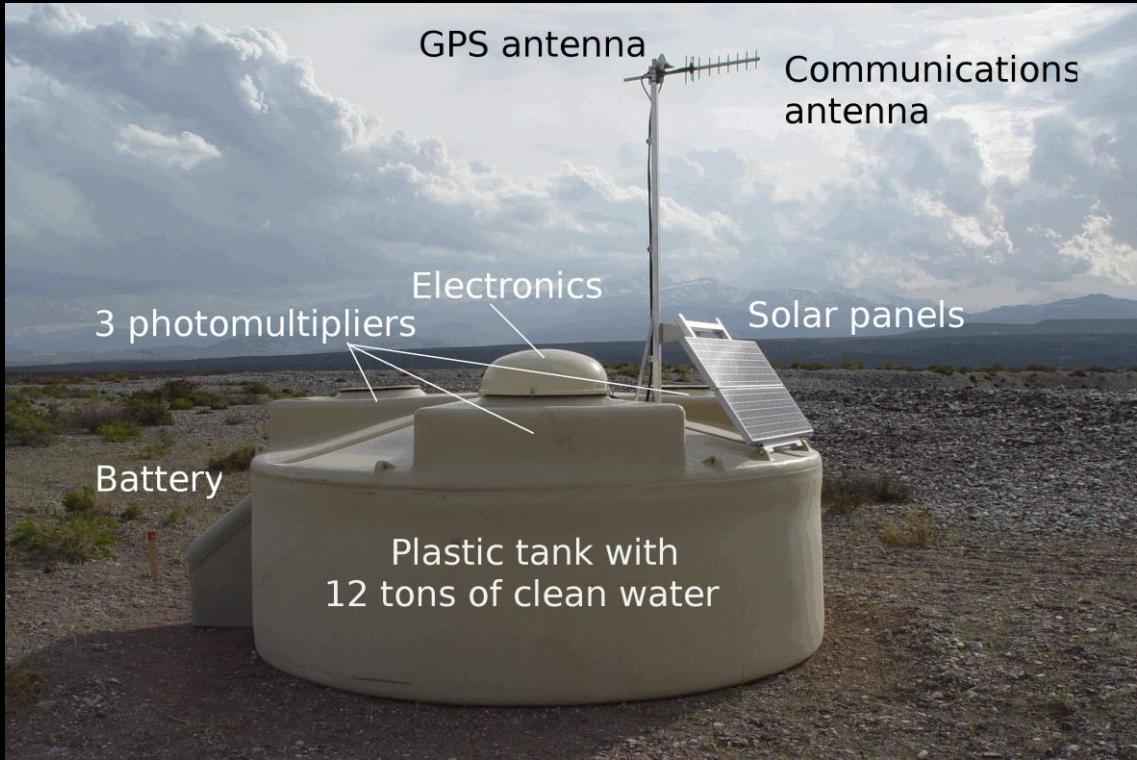
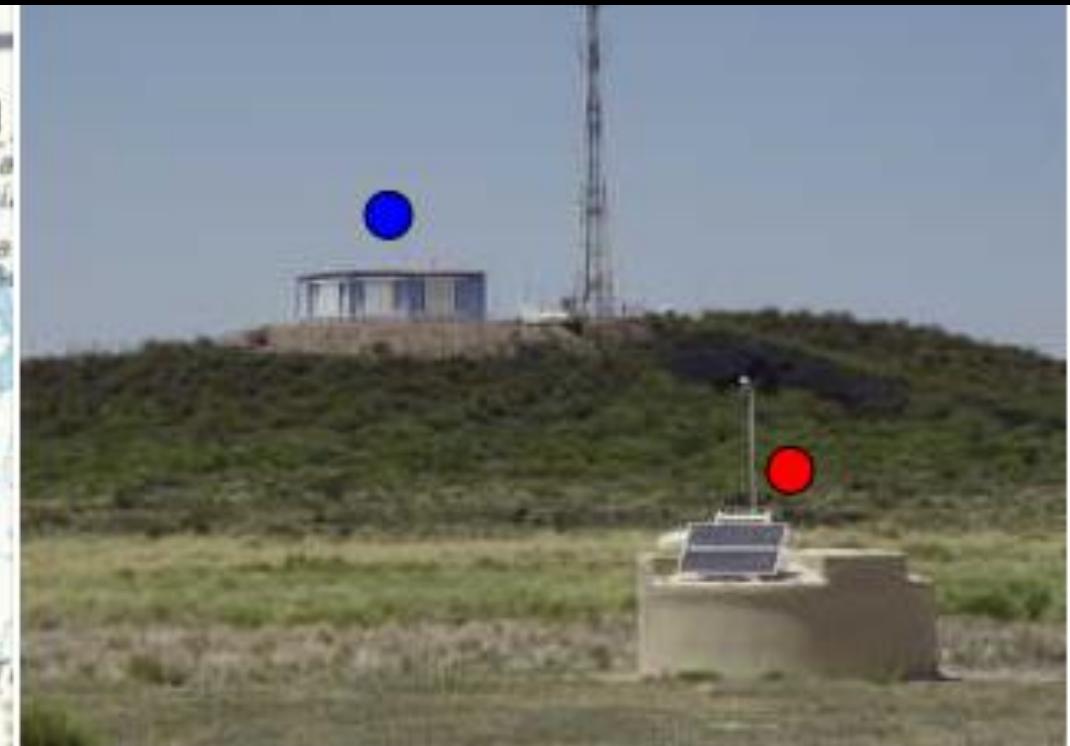
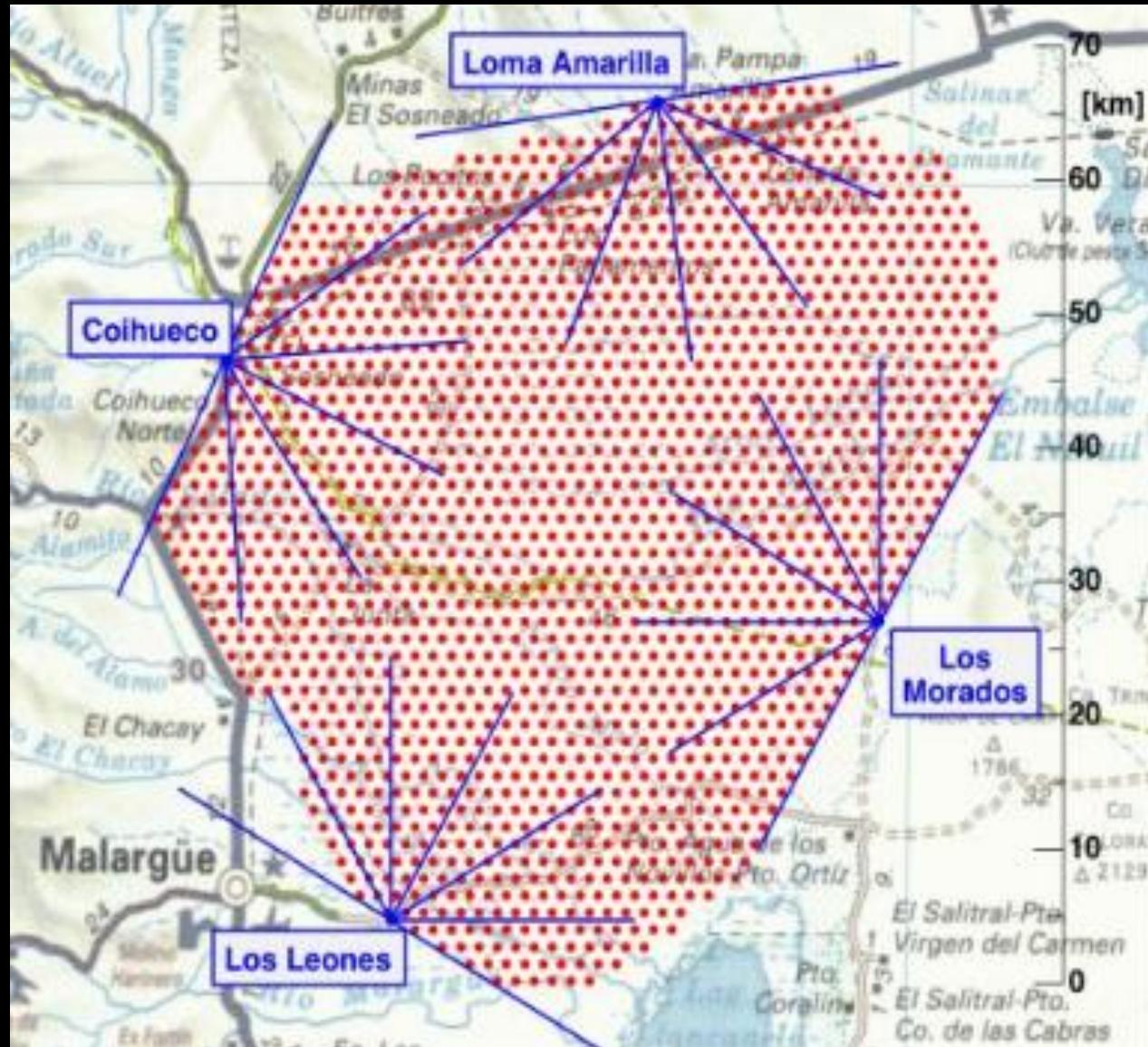


图12.3 表面探测器站外观与结构

- (1) 表面探测器阵由1660个表面探测器站组成，站与站之间相隔1.5公里，占地面积约为3000km²。
- 表面探测器站的外观及结构图如图12.3所示。内部水槽的直径为3.6米，水深1.2米，顶部装有三个光电倍增管探测高能粒子在纯水中的切伦柯夫效应发出的光。每个表面探测器站由自己的太阳能电池提供能源运行，并有电缆与中心运行站相连，可以自动传递数据。

- 当宇宙线的高能粒子穿过水槽，它在水中的速度比水中的光速快，它的电磁激波会产生**切伦柯夫光**，广延大气簇射含有几千万个次级粒子，能同时引起5个以上的水槽产生光爆发。
- 根据探测这一样本的**次级粒子的总光量**能够确定原初宇宙线粒子的能量。在不同水槽位置测得的时间的微小差别，能帮助科学家确定入射宇宙线的轨迹。
- (2) **荧光探测器单元**共4个，安装在表面探测器阵的边缘的四个不同的地点，参见图12.4。图中**红色**的点代表表面探测器站，**蓝色**的点代表荧光探测器单元。



- set of fluorescence telescopes
- Cherenkov detector

图12.4 荧光探测器单元与表面探测器阵的布局

- **荧光探测器单元**，参见图12.5，有6台荧光望远镜，每台望远镜有约 10m^2 的球面反射镜， 30° 的视场，焦平面上放置440个光电倍增管，能够记录分辨率为 1.4° 的图像。大气簇射中的**带电粒子**也会与大气中的**氮**发生相互作用，使得氮通过荧光过程发射300nm到400nm之间的近紫外光，将被荧光望远镜观测到。这样便能记录下氮发射的荧光形成的轨迹，从而得到大气簇射发展的轨迹，其观测的范围可以达到15公里。
- 另增加了三台荧光望远镜，参见图12.6，指向更高的大气，它们俯瞰着 23.5km^2 ，用于探测较低能量的宇宙线（ 10^{17} eV ）的成分，以及推测从银河系宇宙线为主（较低能量）到河外星系宇宙线为主（高能量）的能量区间；此外，还有61台 **μ 子**探测器，相互间隔为750m，埋入地下2.5米深处，探测大气簇射中丰富的 **μ 子**。

Fluorescence Detector

27 fluorescence telescopes
(in 4 different places)

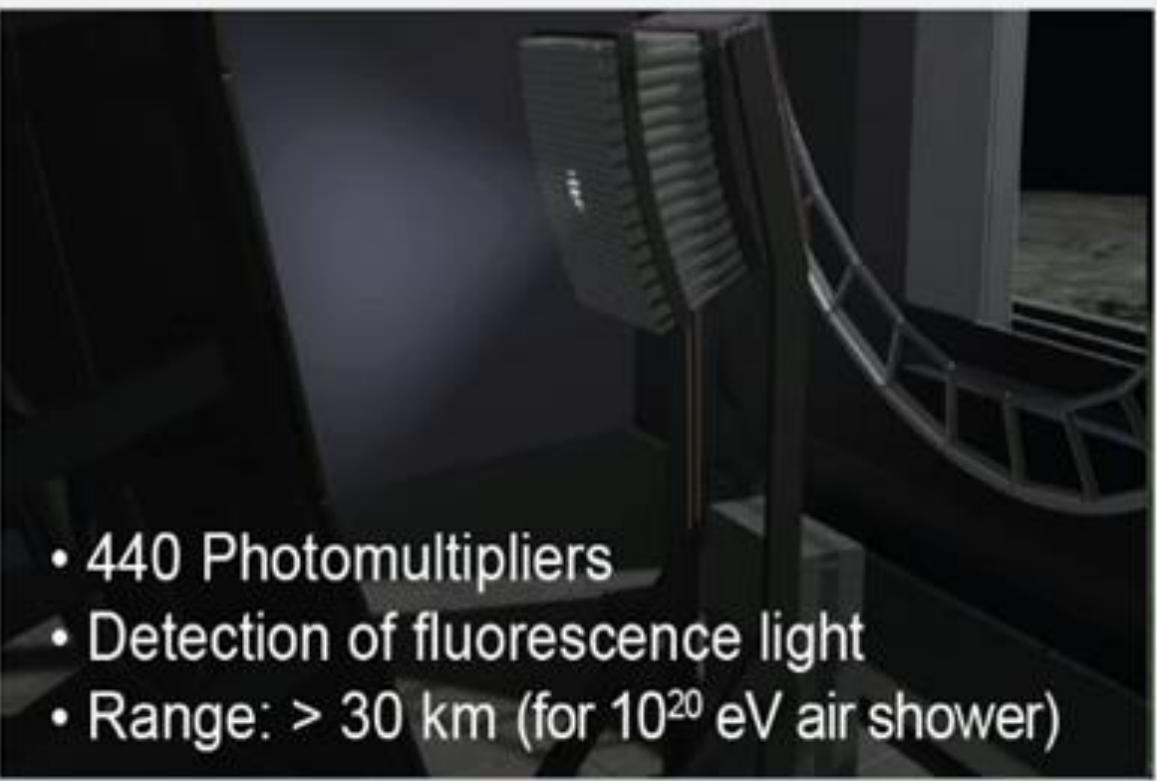
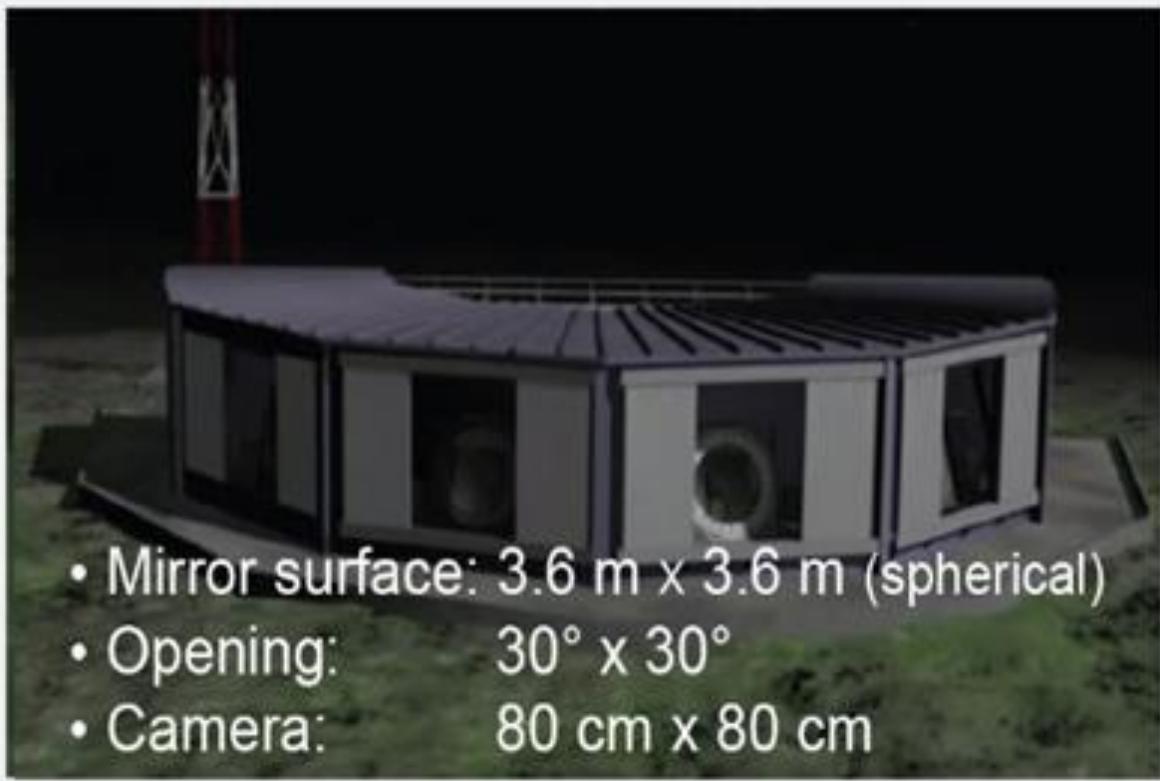


图12.5 荧光探测器单元

图12.6 荧光望远镜

● 5. **我国西藏的羊八井国际宇宙线观测站**：目前开展的实验观测工作主要有中日（**AS γ** ）、中意（**ARGO**）两大国际合作实验项目。

- 羊八井国际宇宙线观测站位于西藏拉萨西北90公里青藏公路和青藏铁路旁，念青唐古拉山下海拔**4300米**的盆地。它不仅是我国最大的**地热**能源基地，还是北半球最高也是世界上常年观测站中海拔最高、最有活力、最有发展前景的观测站。它拥有一个优秀高山站址极为理想的条件：宽阔平坦的地形，几乎无积雪的温和气候，常年畅通的**公路**以及**青藏铁路**，优越的后勤保障和人文环境。
- 观测站现占地**220**亩，建有各种实验室面积达**11800平方米**，参看图12.7。羊八井的高海拔优势是处在**超高能（UHE）**广延大气簇射发展极大附近，在此可以做最精确、系统误差最小的测量。
- 羊八井宇宙线观测站旨在通过对宇宙线多能区、宽视场、大统计量的观测，研究宇宙线的**起源**、宇宙线本身的**特性**以及太阳活动的变化对低能量宇宙线的影响。



图12.7 羊八井国际宇宙线观测站全景图

- (1) 按建设的时间顺序, 先介绍中日大气簇射与 γ 射线 (Air Shower- γ ray, AS γ) 国际合作实验。它的设备有三类:
- 由779个0.5平方米闪烁探测器组成的传统的多点取样阵列AS γ -III (参见图12.8和图12.9), 分布在4万平方米;
- 新型中子 μ 子复合望远镜 (参见图12.10) ;
- 9平米中子望远镜 (参见图12.11) ;
- 以及由28支超级中子管组成的太阳中子监测器(图12.12)。



图12.8 闪烁计数器阵列

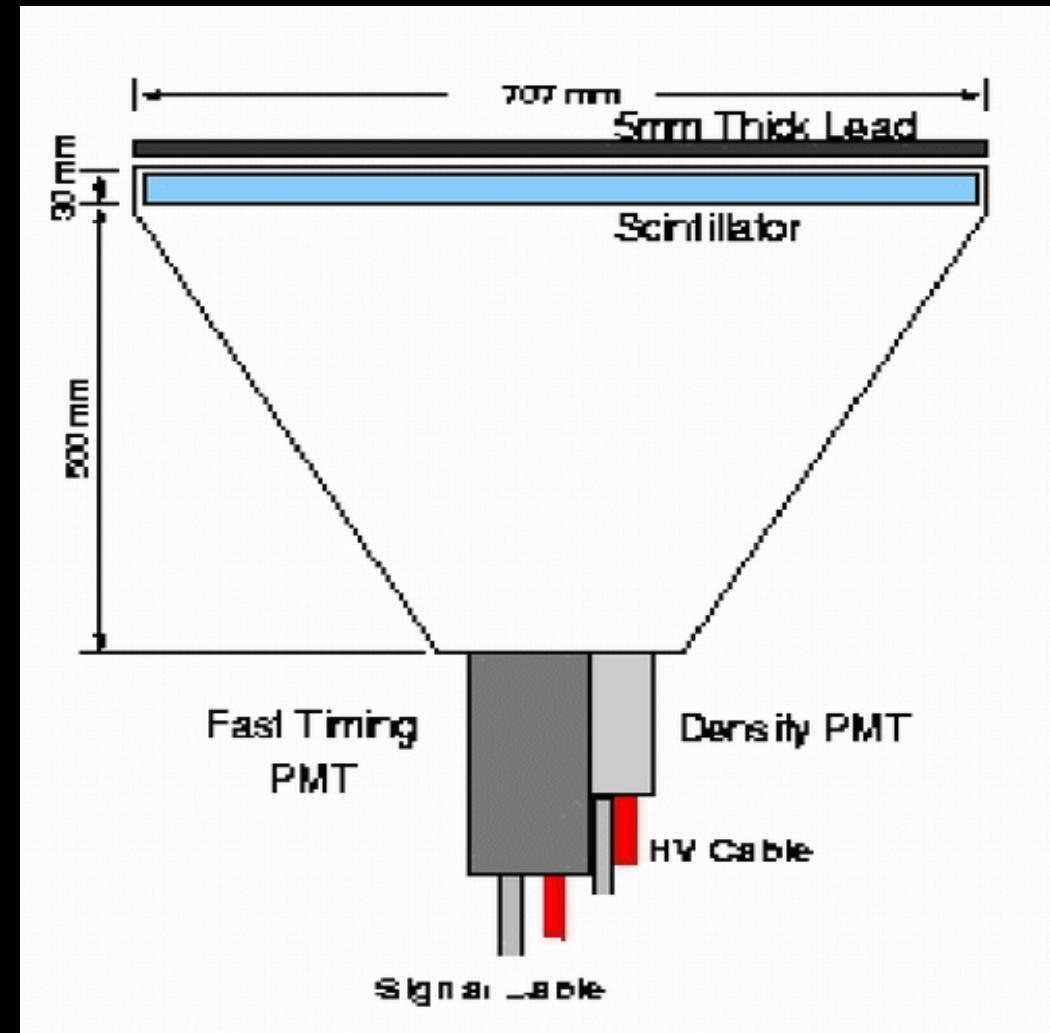


图12.9 闪烁计数器结构示意图



图12.10 新型中子 μ 子复合望远镜



图12.11 太阳中子望远镜



图 12.12 太阳中子监测器

- 1990年建成一期阵列，即成为当时国际上唯一达到10TeV（ $1\text{TeV}=10^{12}$ 电子伏特）阈能的阵列。
- 1996年开始的二期加密阵列将阈能降到了3TeV，从而成为地面阵列中第一个观测到蟹状星云TeV光子辐射的实验，随后还在TeV能区观测到河外的活动星系核Mrk501和Mrk421的耀发。
- 1996年增加了用于研究超高能宇宙线成份和能谱测量的探测器，得到了“膝区”能谱和成份的重要结果。
- 近年来，该实验发现了宇宙线的各向异性分布并得到了宇宙线和银河系共转的证据。
- 开展宇宙线空间环境监测，利用中子- μ 子复合望远镜、太阳中子望远镜和中子监测器采集数据，实现实时传输、处理及网上发布。

●(2) 中意合作的地基观测站的天体粒子物理研究 (Astroparticle physics Research at Ground-based Observatory, ARGO) 实验大厅总面积 **10000m²** (参见图12.13) , **RPC** (高阻性板) 探测器面积 **6700m²** , 由 **1848** 个 **RPC** (每个4.3平方米, 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” (参见图12.14、图12.15), 从而把地面观测的阈能下降至 **0.1TeV** , 并大大提高探测灵敏度, 取样比约由 **1%** 提高到 **93%** , 可与国际上新一代的大气契仑可夫光成像望远镜实验互补地开展 **γ** 射线天文研究。

- ARGO还能在 **超高能区** ($>10^{14}\text{eV}$) 实现逐事例区分宇宙线原初成份, 可为“膝区物理”的突破做重要贡献。
- ARGO还将持续监测宇宙线随太阳活动的变化, 研究其长周期变化与地球环境变化的关联。
- 2006年6月完成全部探测器安装并投入物理运行, 2007年7-8月, 成功观测到来自活动星系核 **Mrk421** 的高能 **γ** 辐射。



图12.13 ARGO实验大厅外观

图12.14 RPC探测器地毯式
安装结构

RPC探测器单元 (1.25 X 2.8米)

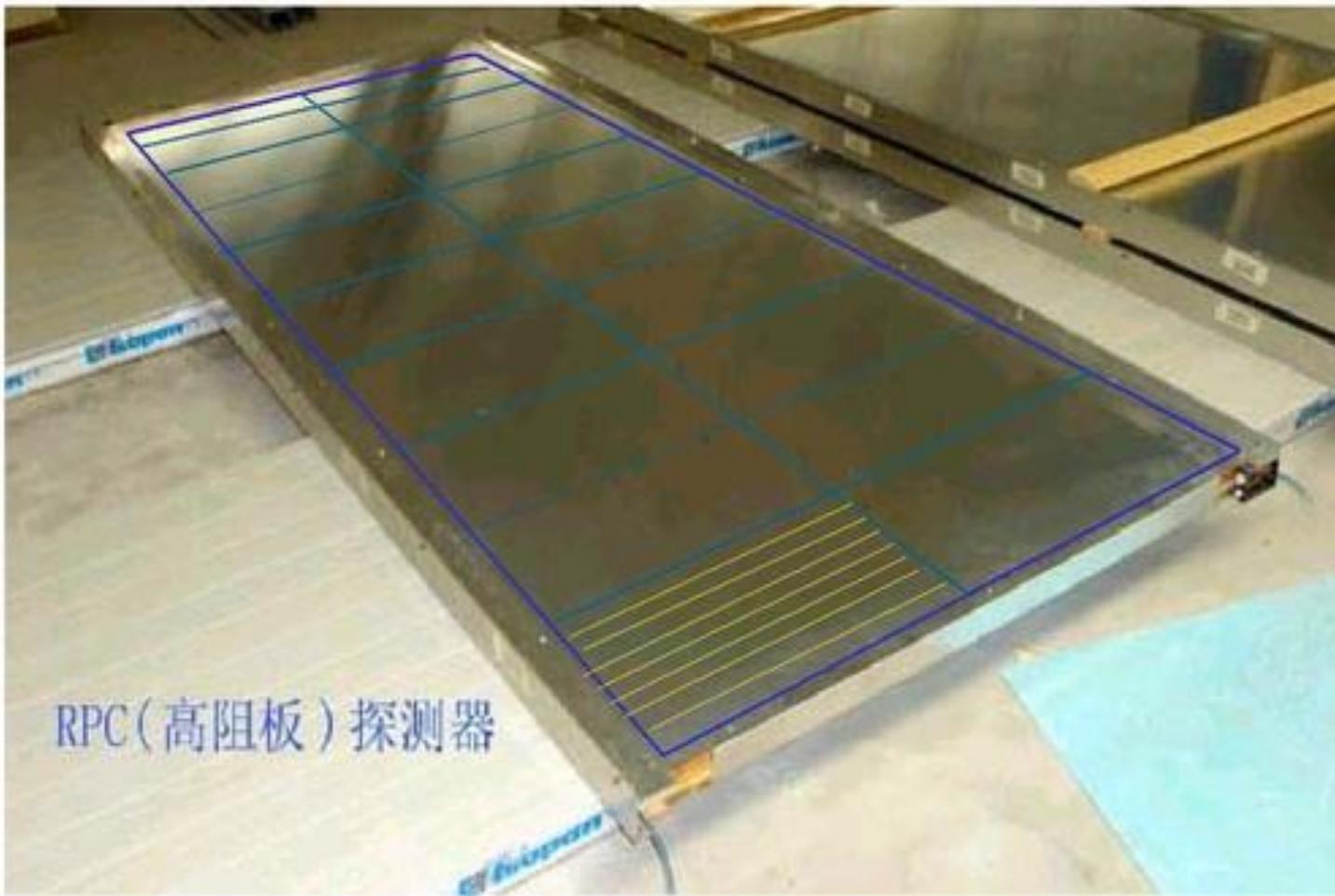


图12.15 高阻板探测器单元

6. “高海拔宇宙线观测站” (LHAASO)

在青藏高原最大的古冰体遗迹——四川省稻城的海子山上，位于海拔4410米的高处，有一个占地面积达1.36平方公里的巨大“圆盘”。它的任务是接住从外太空洒向地面的带电粒子。

中国的宇宙线研究几乎与新中国同龄。新中国成立初期，王淦昌、张文裕、何泽慧、肖健等科学家回国，开启了中国宇宙线观测研究。

1平方公里电磁粒子探测器阵列和有效面积达42000平方米的缪子探测器阵列、以测量簇射粒子在水中产生的切伦科夫光为探测技术的78000平方米探测器阵列、18台广角切伦科夫望远镜阵列。

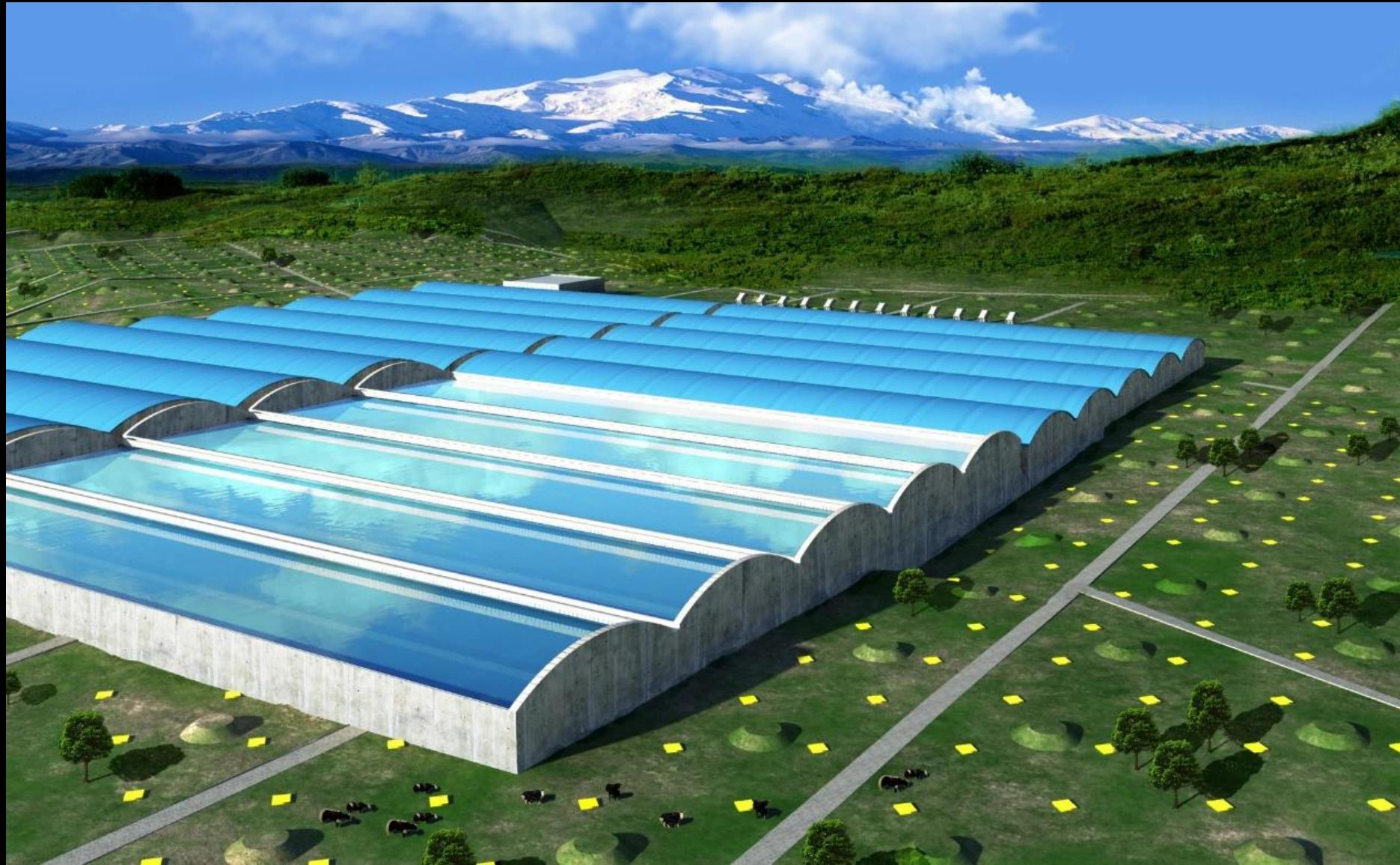
LHAASO (拉索) 鸟瞰, 2021-08

位置: $29^{\circ}21' 27.6''$ N, $100^{\circ}08' 19.6''$ E

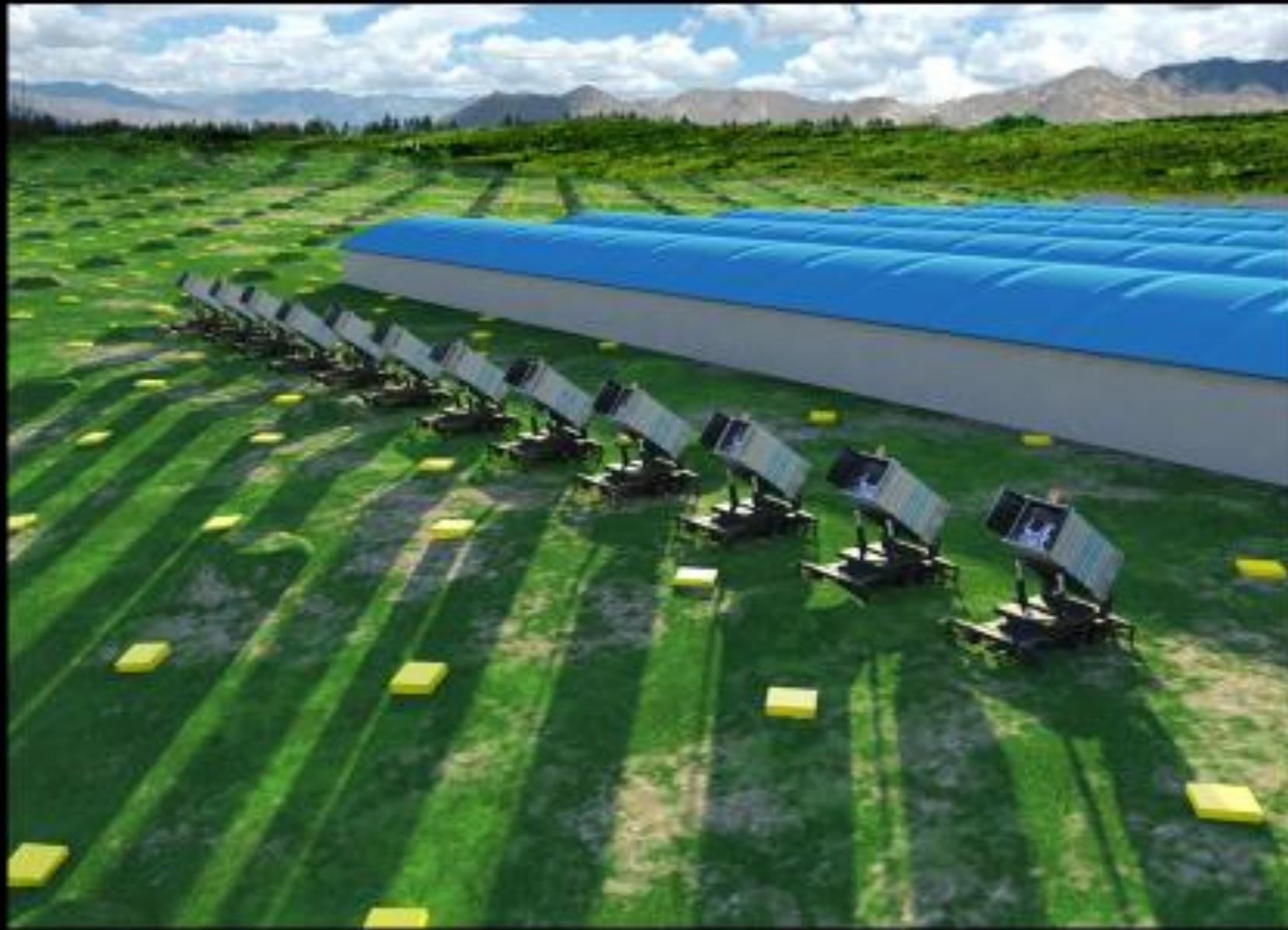
海拔: 4410 米

2021-07 全部建成并投入科学观测运行





水切伦科夫探测器阵列效果图



广角切伦科夫望远镜阵列效果图

紧扣LHAASO的科学目标，制定的总体技术方案是：分别在三个能量范围内，采用不同的技术手段，对宇宙线粒子和伽马射线在大气中产生的空气簇射（EAS）作多参数的精确测量。实现方案为：

- (1) 建设 1km^2 电磁粒子探测器阵列和有效面积达 42000m^2 的缪子探测器阵列的设计方案（KM2A）。
- (2) 建设以测量簇射粒子在水中产生的切伦科夫光为探测技术的 78000m^2 探测器阵列的设计方案（WCDA）。
- (3) 建成18台广角切伦科夫望远镜阵列（WFCTA）。

(1) 地面簇射粒子阵列 (KM2A)

KM2A设计为中心区半径575m 的地面粒子阵列，4901个电磁粒子探测器 (ED) 以间距15m呈品字形均匀排列，1171个缪子探测器 (MD) 以间距30m呈品字形均匀排布于阵列中；外围区是一个半径处于575m-635m之间的环形区域，以间距30m共排布294个ED。

ED: 用于测量EAS中的次级电磁粒子。探测介质为塑料闪烁体，通过波长位移光纤收集带电粒子在闪烁体内产生的闪烁光，并传导到光电倍增管 (PMT)，转换为电信号进行测量。

MD: 用于测量EAS中的缪子含量。基本构造是在一钢筋混凝土罐体内置软体水袋，水袋内装超纯水，水袋顶部中心安装一只8-10英寸的PMT，收集进入罐体的缪子在水中产生的切伦科夫光，转换为电信号进行测量。

(2) 水切伦科夫探测器阵列 (WCDA)

阵列面积为78,000 m²，由2个157.5m×150m和1个307.5m×100m 共3个相邻的大型水池构成，水深4.4m。每个水池分为若干个5m×5m的单元探测器，各放置一支PMT，观测EAS中的次级粒子在水中产生的切伦科夫光，转换为电信号进行测量。

(3) 广角切伦科夫望远镜阵列 (WFCTA)

测量高能宇宙线或高能伽马射线通过簇射在大气中产生的切伦科夫光或荧光。借助望远镜独有的可移动特性、通过阶段性阵列布局调整、联合KM2A、WCDA，多参数、分能段，精确测量宇宙线分成份能谱。采用多块镜片组成的球面反射镜设计方案，反射光由位于焦平面的PMT阵列来收集。

2020年1月，就在他们刚刚建成一半阵列的时候，科研人员通过“拉索”发现，银河系内普遍存在能够将粒子能量加速超过1拍电子伏特的超高能宇宙线加速器，这一发现超出了天体物理学家的预期。5月17日，成果发表于《自然》，被期刊专业副主编评价为“真正的突破”和“新时代的开始”。

在一个多月后，7月9日，《科学》上又出现了来自“拉索”的研究成果：科研人员利用“拉索”，精确测量了高能天文学标准烛光——蟹状星云的亮度，在更广的能量范围内为超高能伽马光源测定了新标准，并由此确定在大约仅为太阳系1/10大小的星云核心区内，存在能力超强的粒子加速器，直逼经典电动力学和理想磁流体力学理论所允许的加速极限。

正进一步参与南部广域伽马射线天文台（SWGO）的酝酿工作。

15.2 中微子观测

- 中微子观测属于宇宙线观测，由于它特殊性和重要性，我们将它单独来介绍。进入21世纪以来，已经有两次物理学诺贝尔奖颁给了宇宙中微子观测。
- 2002年，美国的雷蒙德·戴维斯（Raymond Davis）和日本的小柴昌俊（Masatoshi Koshiba）获奖，因为他们对来自1987A超新星的宇宙中微子的探测。
- 2015年，加拿大的阿瑟·麦克唐纳（Arthur B. McDonald）和日本的梶田隆章（Takaaki Kajita）获奖，获奖理由是“发现了中微子振荡，表明中微子具有质量。”

- 这两次奖涉及到五个大型的观测设备。
- 1. 1968年，在美国布鲁克黑文实验室的戴维斯和他的团队主持下，第一个探测宇宙中微子的大型设备开始运行。
- 它是一个能容纳600吨四氯乙烯 (C_2Cl_4) 的大罐子（参见图12.16），被放置在美国南达科他州霍姆斯塔克地下1500米深的金矿中。
- 这是由于宇宙线中的中微子和其它物质发生相互作用的概率极低。一个起源于太阳中心的中微子，在它穿过太阳内部到达其表面的旅途中，与任何其它粒子发生反应的机会只有 $1/10^{10}$ 。可以说中微予以光速运动能自由地穿过地球。
- 将装满四氯乙烯 (C_2Cl_4) 的大罐子埋在很深的矿井中是为了尽量屏蔽宇宙线中其它粒子。大约每个 C_2Cl_4 分子包含一个 $^{37}_{17}Cl$ ，利用 Cl 俘获中微子的反应： $^{37}_{17}Cl + \nu \rightarrow e^- + ^{37}_{18}Ar$ ，来探测太阳中微子，选择四氯乙烯而不用液态氯是因为它是一种普通的工业溶剂，易于获得和储运。

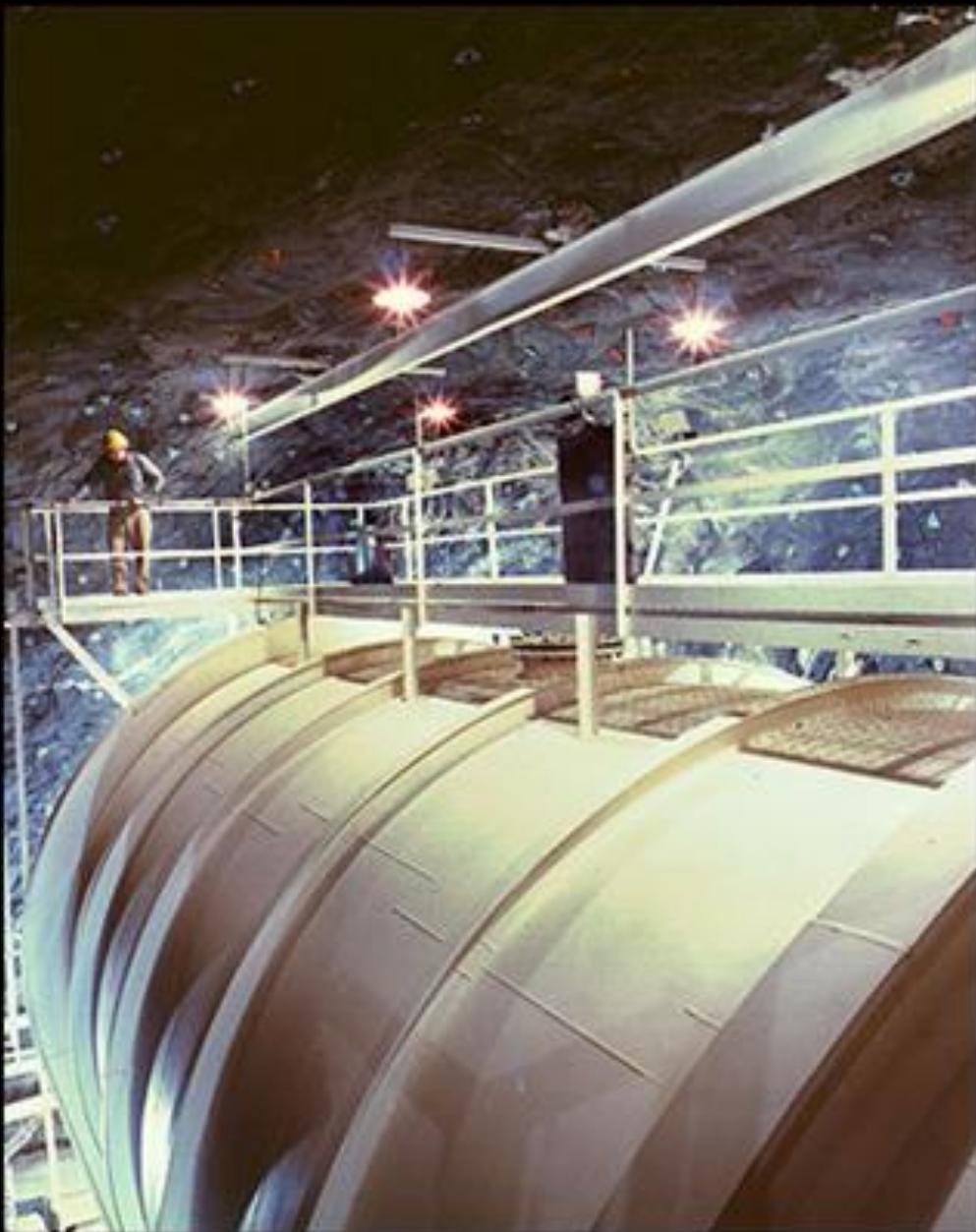


图12.16 第一台中微子探测器

- 由核反应式可知，只要探测到氩 $^{37}_{18}\text{Ar}$ 原子数便可得中微子数目。这可以在罐中通入氦气，氩附着在氦上被带出四氯乙烯，然后将出来的气流通入活性炭冷槽就能将氦与氩分离开。
- 大约每隔一天就能探测到一个中微子。第一台中微子探测器取得了成果。
- 并且很快发现观测到的太阳中微子通量仅仅是理论预言的 $1/3.3$ 。这一缺失被随后的许多探测器所证实，这就是著名的太阳中微子疑难。

- 20年后才出现第二代中微子望远镜，它们是位于日本池野山(Ikenoyama)下1000米深处的神冈中微子探测器(amiokande)，由小柴昌俊领导设计和运行的，和位于美国俄亥俄州(Ohio)地下600米深的盐矿中的IMB(Irvine-Michigan-Brookhaven国家实验室)探测器。
- 其原理与上述的完全不同，这种探测正好是戴维斯等人探测的验证和补充。这两个实验室各有巨大的容器装有大量的纯水，神冈的装有3000吨，IMB的装有8000吨，容器四面壁上布满了光电倍增管，接收中微子作用产生的切伦柯夫辐射，参见图12.17，其容器为圆柱形，高16米，直径15.6米。
- 这一过程可以有两种不同的形式，电子散射和逆β衰变。
 - (1) 电子散射是一个高能中微子和一个电子的弹性碰撞，撞后电子的速度超过光在水中的速度($2.25 \times 10^5 \text{ km/s}$)，方向与中微子的运动方向大致相同，产生切伦柯夫辐射。三种中微子全都散射电子，但是电子中微子的散射效率最高，是其它两种中微子的6.5倍。

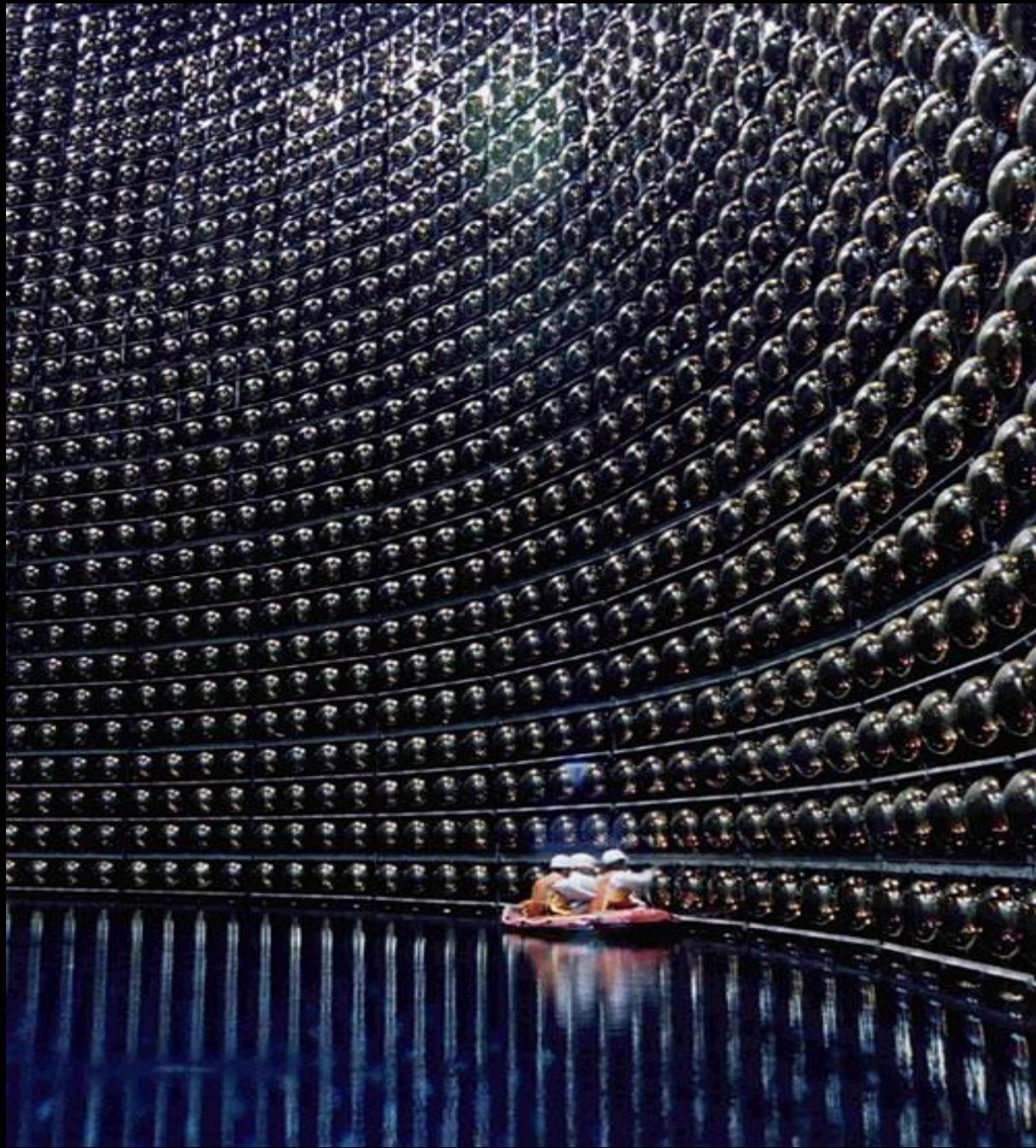


图12.17 神冈纯水中微子探测器

- 根据探测到的切伦柯夫辐射，可以确定中微子流的方向，可以确定中微子的能量，还可以通过其辐射图像、即辐射环边沿比较模糊确认是中微子过程而不是其它的背景造成。
- (2) 逆 β 衰变，通过 $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ 反应产生一个高能正电子，这种事例的概率大约是散射事例概率的100倍，它也能产生切伦柯夫辐射。但是发射正电子的方向是任意的，因此不能给出入射中微子的初始方向。
- 装置经过不断的改进，如纯化水的系统，电子设备的精确定时能力，1985年开始采集探测数据，一年多的数据显示中微子流的方向是由太阳指向地球，证实太阳是中微子源，其中心正在进行氢合成氦的聚合反应。
- 1987年2月，神冈与IMB两个探测器都幸运地探测到大麦哲伦星系中超新星，1987A的中微子暴。这是第一次探测到除太阳以外的其他天体的中微子，并进一步证实了超新星爆发的理论模型。

- 3. 同时，远在加拿大，由阿瑟·麦克唐纳（Arthur B. McDonald）领导的研究小组也通过实验发现，太阳中的中微子并不会消失在其前往地球的路上，相反他们在萨德伯里中微子天文台（Sudbury Neutrino Observatory, SNO）中捕捉到另一种状态的太阳中微子。
- 介绍一下著名的SNO（Sudbury Neutrino Observatory），即萨德伯里中微子天文台。它坐落在加拿大安大略的萨德伯里，SNO放在Creighton铜镍矿下2km的深处，分内外两部分，参见图12.18，内部是一个直径12米的聚丙乙烯球形容器，盛满1000吨纯净重水（D₂O），再浸没在装满7000吨高纯净水的洞里。常态水又进一步屏蔽了周围岩石的放射性辐射。使用了9600个光电倍增管探测重水里面的切伦柯夫辐射。
- 重水与一般水不同，它里面的氘对两类反应都敏感，一类是探测电子中微子的反应： $\nu_e + {}^2_1 H \rightarrow p^+ + p^+ + e^-$ ，产生一个相对论性电子，通过切伦柯夫辐射可以探测到。

- 第二种反应对三类中微子都同样敏感，即任何一种类型的中微子都可以把氘核分裂成质子和中子，中子在重水中热化，能量增大，最终和其它氘核结合并释放出 γ 射线。 γ 射线再通过康普顿散射产生相对论性电子，最后光电倍增管会接受到它们的切伦柯夫辐射。

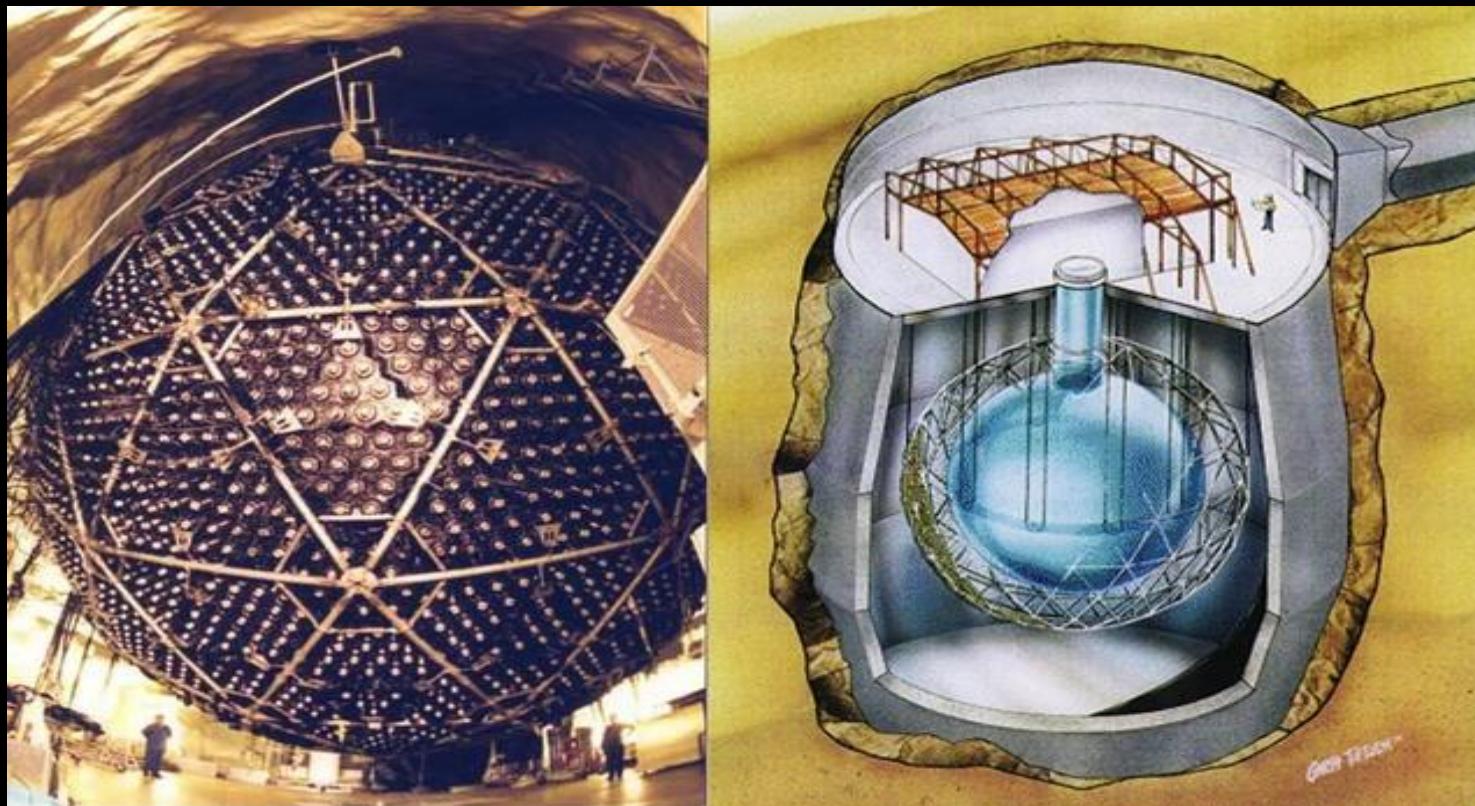


图12.18 加拿大的SNO (Sudbury中微子天文台)

- 4. 证实物理学家提出的中微子振荡假说，二十世纪90年代，在神冈同样的深度建立了一个更大的改进了的探测器，它容纳50000吨纯水，容器内壁布满了光电倍增管，约有11200个，容器仍然是圆柱形，高为41.4米，直径为39.3米。
- 该探测器能探测到 μ 子中微子和电子中微子。 μ 子中微子和质子作用产生一个相对论性 μ 子。由 μ 子产生的切伦柯夫辐射会形成一个轮廓清晰的光环。电子中微子散射产生的相对论电子的切伦柯夫辐射形成的光环相对来说比较模糊，因为电子的质量小于 μ 子的质量。
- 超级神冈中微子探测器可以区分电子中微子和 μ 子中微子，这使它最先提供了中微子振荡的证据。它1996年开始运行、收集数据，在新千年交替之际，梶田隆章（Takaaki Kajita）公布了他在超级神冈探测器上的发现：大气中的中微子会在两种状态之间转换。

- 加拿大的SNO装置里，虽然中子可以和一个氘核结合，但是俘获效率低，大量中子会从探测器逃逸，被周围的普通水俘获。因此，最初在探测太阳中微子时所得的中微子流量低于超级神冈测得的值，由于SNO测得的是太阳的电子中微子，
- 而神冈探测到的是三种中微子。这就肯定了部分太阳电子中微子在它们从太阳中心出发的路上振荡为其它类型。随后，SNO在重水中加了2吨盐，避免中子逃逸，对太阳中微子流的总量进行了测量，终于在2002年证明标准太阳模型的正确性。
- 以上两种探测器后来证实，所有这3种中微子都可以彼此交换身份。于是，困扰天体物理学家数十年的太阳中微子谜团就此解开。相比中微子数量的理论计算，有三分之二的中微子会在测量的时候“消失”。

- 人们从这项发现中获得了一个具有深远意义的结论，那就是：在很长一段时间里被认为是没有静止质量的中微子，其实是有质量的，只是很小而已，电子中微子的上限为3eV， μ 子中微子和 τ 子中微子的上限分别为0.17MeV和18MeV。
- 这是一个历史性的发现，标准模型获得了巨大的成功，经受住20多年实验的验证。然而，它所要求的中微子应该没有质量，这与新发现明显地相悖，表明了作为标准模型并不是解释宇宙基本成分的完美理论。

- 5. 目前，**最大的**探测宇宙中微子的装置是**冰立方中微子望远镜**（IceCube Neutrino Telescope），它位于阿蒙德森-斯科特南极站，就地取材用**南极的冰代替纯水**来探测宇宙中微子，原理与神冈的纯水探测器相同。
- 在冰面上**每间隔125米**钻一个洞，共钻了**86个洞**，占地面积约 1km^2 ，参见图12.19。**60个**密封的光电倍增管设备**间隔17米**连成一串，放进每个洞中、深度从**1450到2450米**，即厚度为 1km ，参见图12.20，所以称**冰立方**。
- 此外，在**冰面上****每个洞上方**安放**两个装满冰的容器**，每个容器由两个光电倍增管设备监测，这便形成了**冰顶大气簇射探测器阵**（IceTop air shower array），占有面积也是 **1km^2** 。中微子与冰中的原子核相撞产生**相对论性μ子**，它在冰中会产生切伦科夫辐射，由于南极冰的透明度极高，这种兰色光束将被光电倍增管记录。

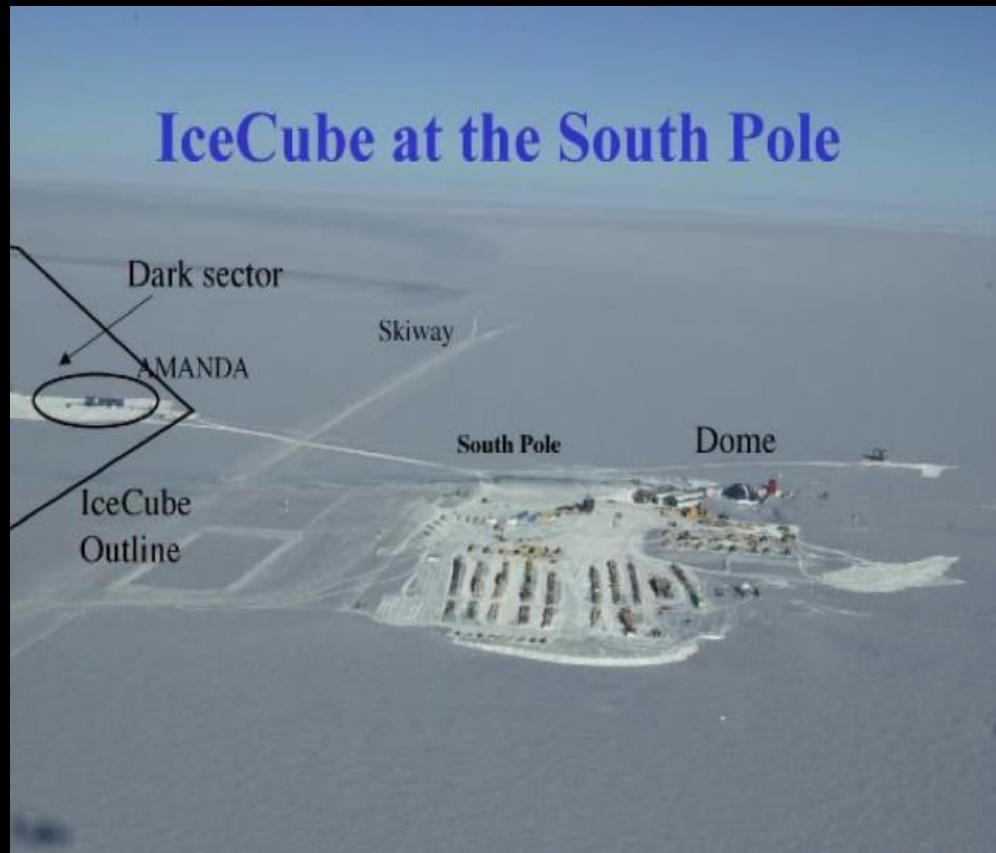


图12.19 千米级中微子天文台冰立方地面建设示意图

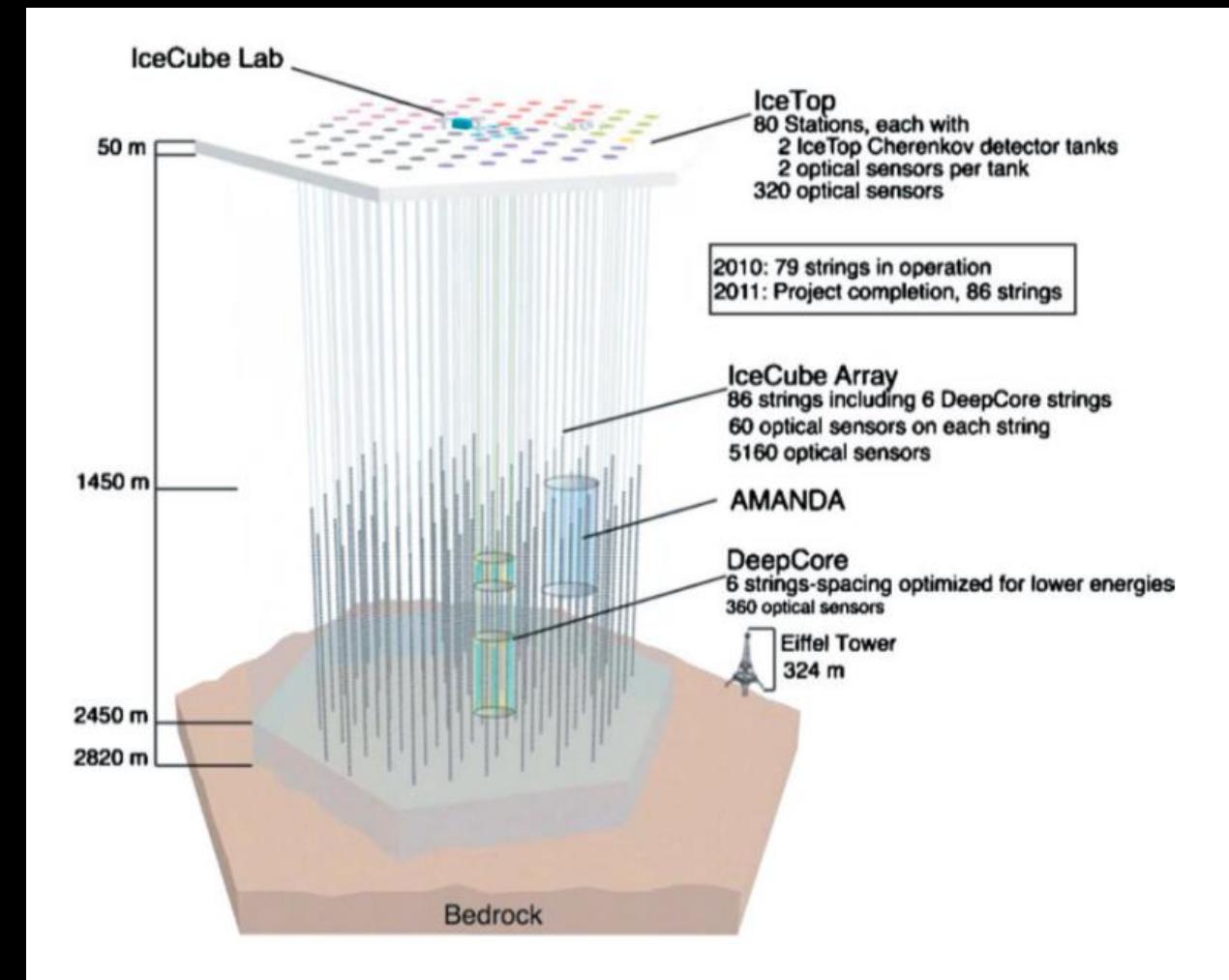
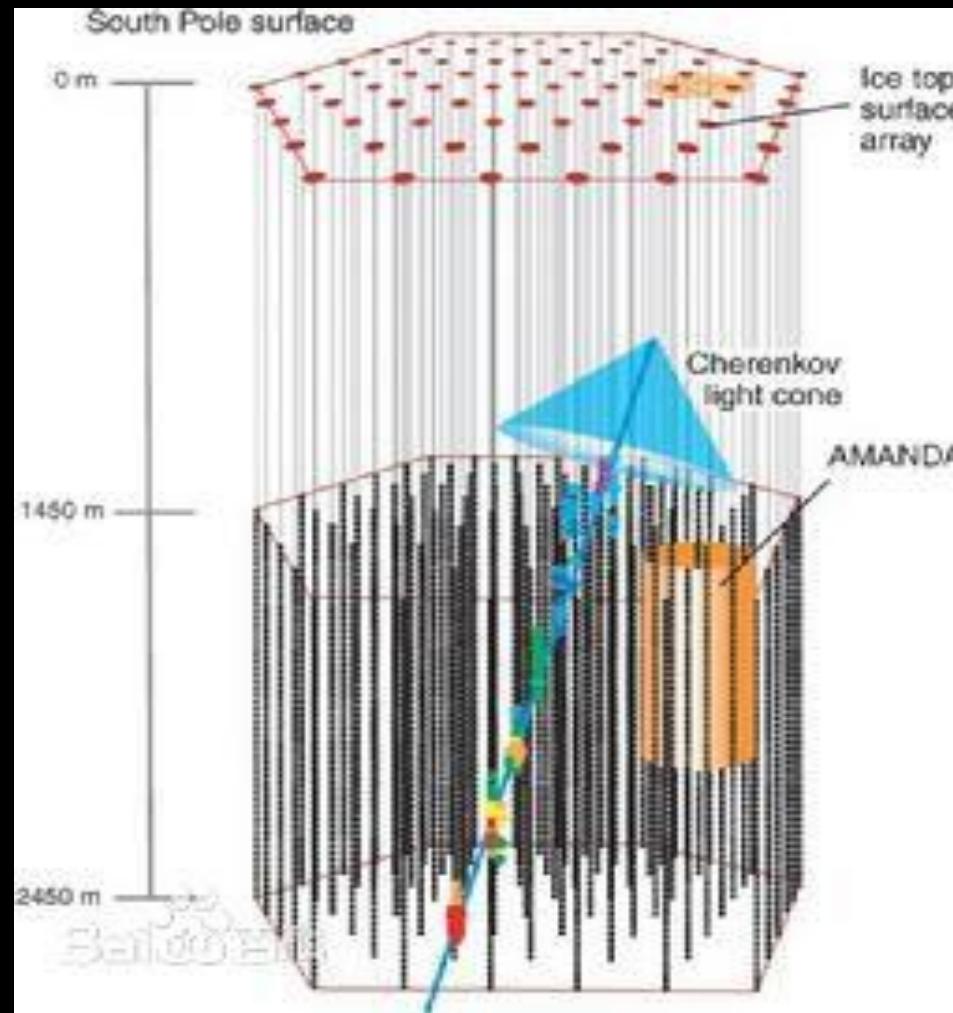


图 12.20 千米级中微子天文台冰立方冰面以下示意图

- 科学家通过辐射的方向，可以追踪到中微子的运行方向、查找到它的起源，看一看它是由超新星、黑洞还是由撞击星系产生的。
- 为了避免干扰，冰立方的传感器直接瞄准下方——经地心指向北极天空，用来探测穿过地球的中微子。由于中微子是目前已知的唯一一种可以畅通无阻地穿过物质的粒子，故冰立方，即南极 μ 子及中微子探测器列阵(AMANDA)把地球当做过滤器，屏蔽其它的宇宙线粒子。
- 冰顶探测大气簇射能够提供信息，补充穿透并达到深埋的冰立方 μ 子的探测。例如，比较冰顶与冰立方的一次簇射的测量可以提供它的初始宇宙线的成分。

15.3 引力波观测

- 引力波是以波动形式和光速传播的引力场，也称为引力辐射，它是横波，具有能量。按照广义相对论，加速运动的质量会产生引力波。
- 引力辐射理论存在度规的多样性问题，有爱因斯坦的度规张量理论，布兰斯与迪克的度规张量理论，霍伊尔与纳利卡的C-场理论，以及许多其它理论。
- 爱因斯坦的度规张量理论中，引力辐射的首要允许模式是四级辐射，偶极辐射是禁戒的。但是，大多数其它理论允许偶极辐射。例如，对双星系统的引力辐射的预言，爱因斯坦理论所允许的四级辐射比其它理论允许的偶极辐射要弱两个数量级。此外，广义相对论预言四级辐射只有2个偏振态，而其它大多数理论却认为有6个偏振态。因此，引力波的探测是对广义相对论最具决定性的检验，这是物理学家感兴趣的原因。

- 预期能发射引力波的天体有：双星体系公转、中子星自转、超新星爆发，及理论预言的黑洞的形成、碰撞和捕获物质等过程，都能辐射较强的、频率约为 $10\text{-}1000$ 赫兹引力波，可观测到的最强引力波会来自两颗中子星的对撞，或两个黑洞的对撞；还有来自星系的并合、超大质量黑洞并合以及宇宙暴涨时产生的原初低频（ $10^{-4}\text{-}1$ 赫兹）引力波。
- 如果探测成功，它能够提供一个观测宇宙的新途径，引力波天文学就将诞生，像观测天文学从可见光天文学扩展到全波段天文学那样，极大扩展人类的视野。
- 传统的观测天文学完全依靠对电磁辐射的探测，而引力波天文学的出现则标志着观测手段已经开始超越电磁相互作用的范畴，引力波观测将揭示关于恒星、星系以及宇宙更多前所未知的信息，尤其是对只有引力效应的暗物质的探测更显其重要性，这一切是天文学家所渴望的。

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

- 引力波会造成地球上各处相对距离的变动，但这些变动的数量级应该顶多只有 10^{-21} ，即相距1km的两个质点，引力波造成的变化约为质子直径的千分之一。测量这样微小变化是极其困难的任务。
- 这里我们主要介绍美国的引力波探测装置LIGO，它可以说是当今引力波探测器发展的方向，紧随其后的一系列探测器在原理与技术上基本借鉴与它，如意大利与法国合作的VIRGO，德国和英国合作的GEO，日本的TAMA，澳大利亚的AIGO。
- 它的原理就是采用大型的迈克尔逊干涉仪，用较强的激光作光源，将其两光臂作长，两臂中的镜子便是接收引力波的质点，在四极辐射的作用下，两光臂的程差将会变化，引起干涉图像的变化，由此能解读出引力波的信息，参看图12.21。

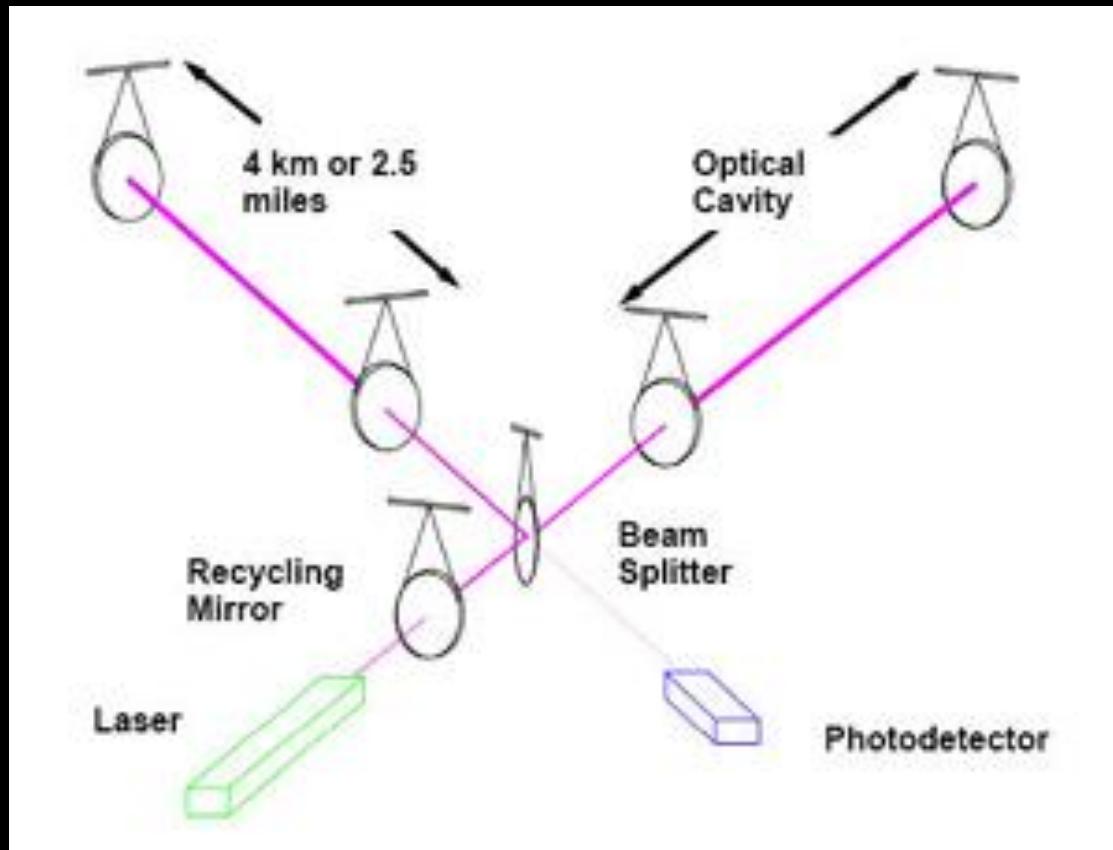


图12.21 LIGO干涉仪的原理图



图21.22 (1) LIGO在路易斯安那州的干涉仪外景图

Advanced Laser Interferometers (10 – 4000 Hz)



图21.22 (2) 左上第一、二张照片, LIGO的两套装置

- 美国的 **LIGO** 拥有两套干涉仪，一套安放在路易斯安娜州的李文斯顿，参看图21.22（1），另一套在华盛顿州的汉福，参看图21.22（2）。干涉仪有一对封闭在 1.2 米直径的真空管中的 **4 公里长的臂**。
- 这二套 **LIGO** 干涉仪 **相距3000km**，同时工作构成一个观测台。这是因为激光强度的微小变化、微弱地震和其它干扰，例如汽车从它附近通过，都可能看起来像引力波信号，如果是此类干扰信号，其记录将只出现在一台干涉仪中，而 **真正的引力波信号** 则会被两台干涉仪 **同时记录**。所以，科学家可以对二个地点所记录的数据进行比较得知哪些信号是噪声。
- **LIGO** 从 **2003** 年开始收集数据。它是目前全世界最大的、灵敏度最高的引力波探测仪。一系列的升级，降低各种噪声，进一步提高其灵敏度，参看图21.23。

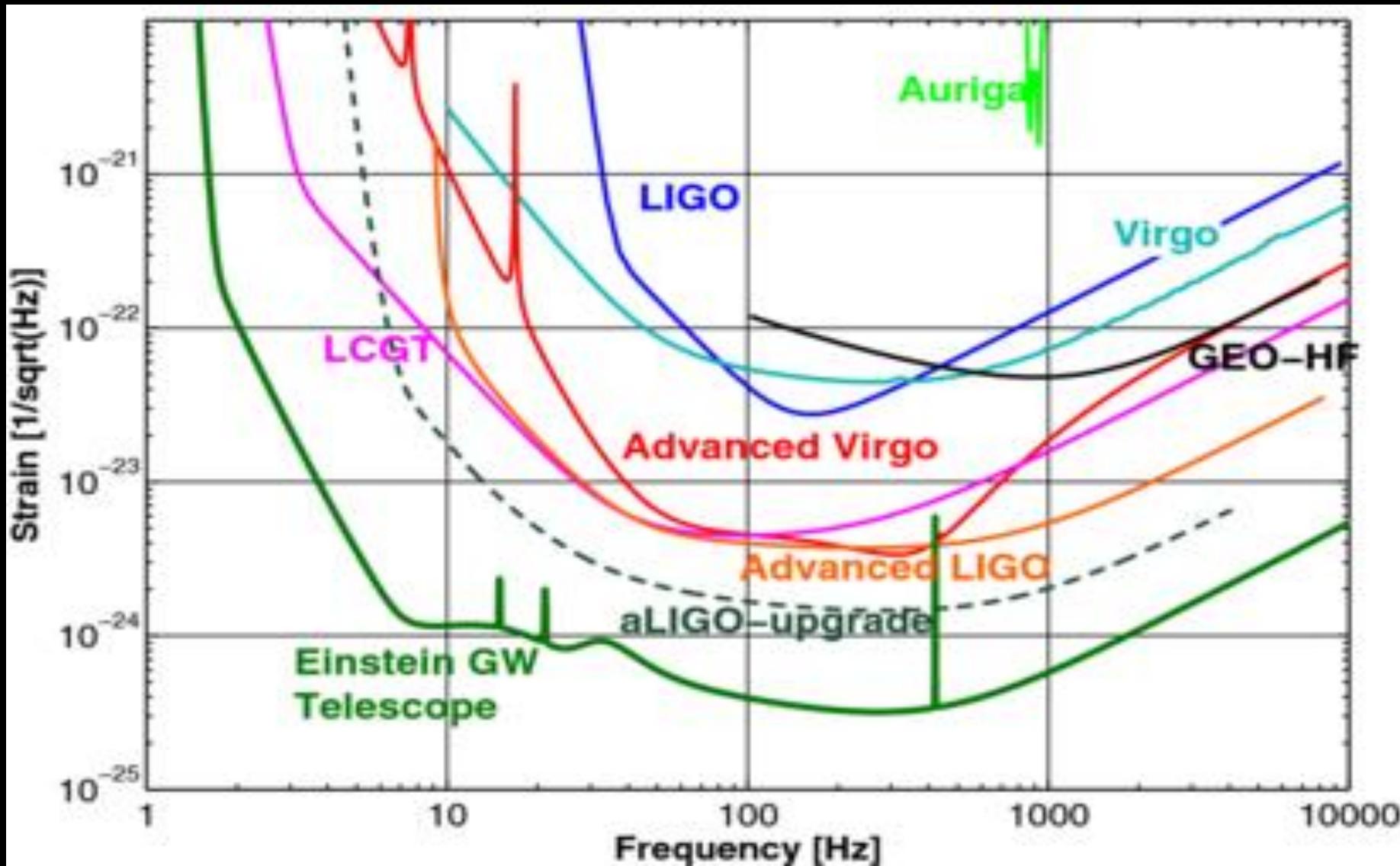
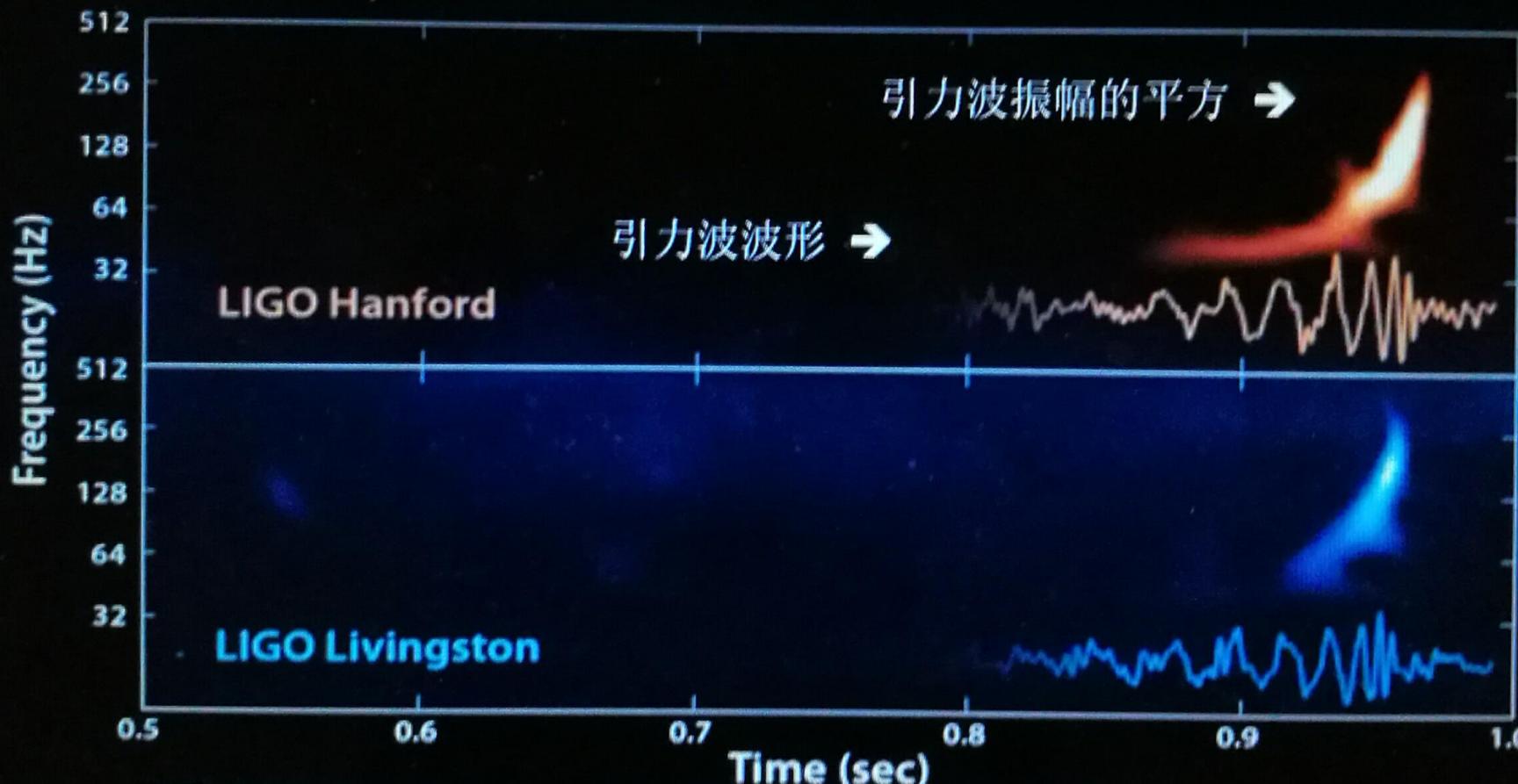


图12.23 LIGO和VIRGO探测的频率与应变曲线

- 2009至2010年，LIGO升級为**Enhanced LIGO**並进行了第六次科学探測。其激光功率提高到**30瓦特**以上，探測范围可扩大**8倍**。截至2014年5月，LIGO正在进行第二次名为**Advanced LIGO**的升级计划，简称**AdLIGO**或**aLIGO**，于2014年投入使用。
- 当前激光功率升高到**180瓦特**左右，**灵敏度**將比此前进一步提高一个数量级，**观测范围**扩大**1000倍**以上。科学家期待**2016年**能得到确认引力波的证据，因为正好是广义相对论建立100周年。
- 参看图12.24，2015年9月14日，第一次探测到引力波。随后又记录了几次引力波事件，参见图12.25、表12.1。

2015年9月14日

引力波的第一次探测



- 两个相隔3000公里的LIGO引力波探测器都探测到信号
- 推断为从 $(30+35) M_{\odot}$ 双黑洞并合产生的引力波，信号长度 $\sim 0.1 s$
- 在并合前引力波振幅和频率随时间单调增大，形成“口哨”式信号

图12.24

- aLIGO 两次正式运作： 2015-2016 (3个月), 2016-2017 (9个月)
- 第1-5次探测，都是由双黑洞并合造成的引力波
- 探测到的黑洞质量大多比已经知道的由X-ray探测到的黑洞要大

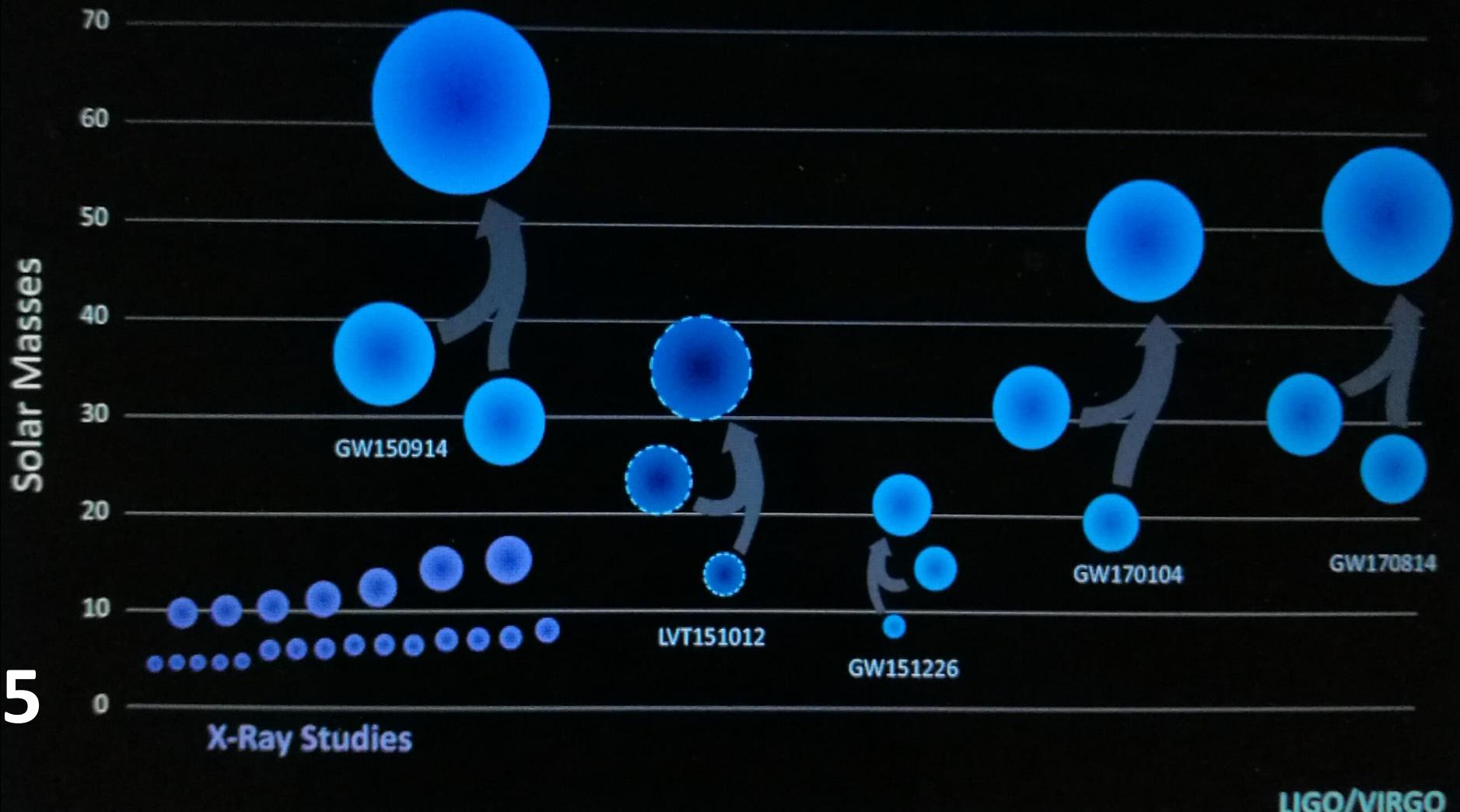


图12.25

Motivation: Stellar-mass BHs

Name	M_1/M_\odot	M_2/M_\odot	TYPE
GW150914	35.4	29.8	BHB
GW151226	14.2	7.5	BHB
GW170104	31.2	19.4	BHB
GW170608	12.0	7.0	BHB
GW170814	30.5	25.3	BHB
GW170817	1.5	1.2	NSB

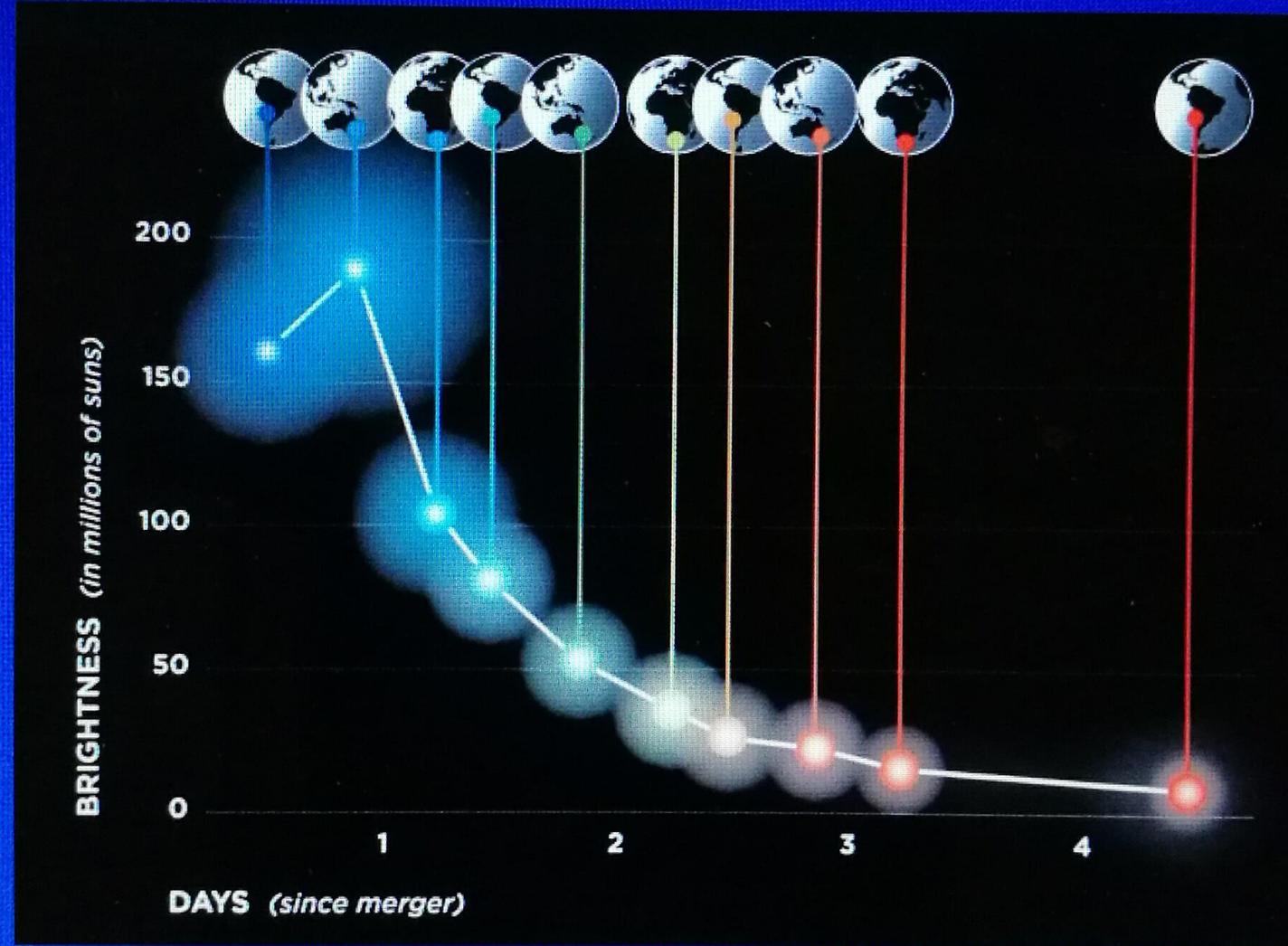
表 12.1

2017年8月17日，美国激光干涉引力波天文台（LIGO）和欧洲的Virgo引力波天文台联合探测到了双中子星并合产生的引力波事件GW170817，参看表12.1。此后1.7秒，美国国家航空航天局（NASA）的费米卫星探测到了它的短伽玛射线暴GRB170817A。随后地面和空间大量的望远镜观测到了GW170817/GRB170817A从伽玛、X射线、紫外、光学（图12.26）、红外一直到射电波段的电磁对应体。

GW170817/GRB170817A的发现开创了引力波天文学的新纪元。

全球各地光学望远镜协力捕捉光随时间的变化

图 12.26
GW170817
并合后的光
学特征观测



Las Cumbres Observatory

2017年十月三日：诺贝尔物理学奖



Rainer Weiss
(麻省理工)

Kip Thorne
(加州理工)

Barry Barish
(加州理工)



- “对引力波探测器和引力波观测的决定性贡献”
“...for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”
- 也是对成功科学管理的肯定和嘉奖

- **VIRGO**（室女座）探测装置坐落在意大利比萨附近，光臂长3km，经过升级后灵敏度也大大提高，与LIGO接近，参见图12.23。位于德国汉诺威的**GEO**，光臂长600m；东京附近的**TAMA**，光臂长300m；以及澳大利亚的**AIGO**，光臂长3km。
- 包括LIGO的这些地面观测设备，同时运行不仅能互相印证，而且能确定引力波源的方位，再配合电磁波段的各种望远镜同时观测，定会将天文学推向一个发展的新阶段。

LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 计划

- 地面上的干扰太多，同时也限制了探测引力波的频率，走向低频（ 10^{-4} -1赫兹），必须要在远离地球的太空进行观测。辐射这种低频引力波的天体源主要是并合中的星系，并合过程中的大质量黑洞，参看图12.27。
- 目前最宏伟的引力波探测计划LISA(Laser Interferometer Space Antenna)空间天线式激光干涉器计划，是欧洲航天局（ESA）和美国国家航空航天局(NASA)的一个空间合作项目，倍受物理学界关注。该计划将向太空发射3个探测器，使其组成等边三角形，参看图12.28，相邻两个探测器之间的距离为500万千米。它们将在地球后面，其中心和地球相对太阳的夹角为 20° ，为了尽可能减少地球引力造成的影响。其所形成的平面与黄道面以 60° 夹角一起绕太阳运行，参看图21.29。

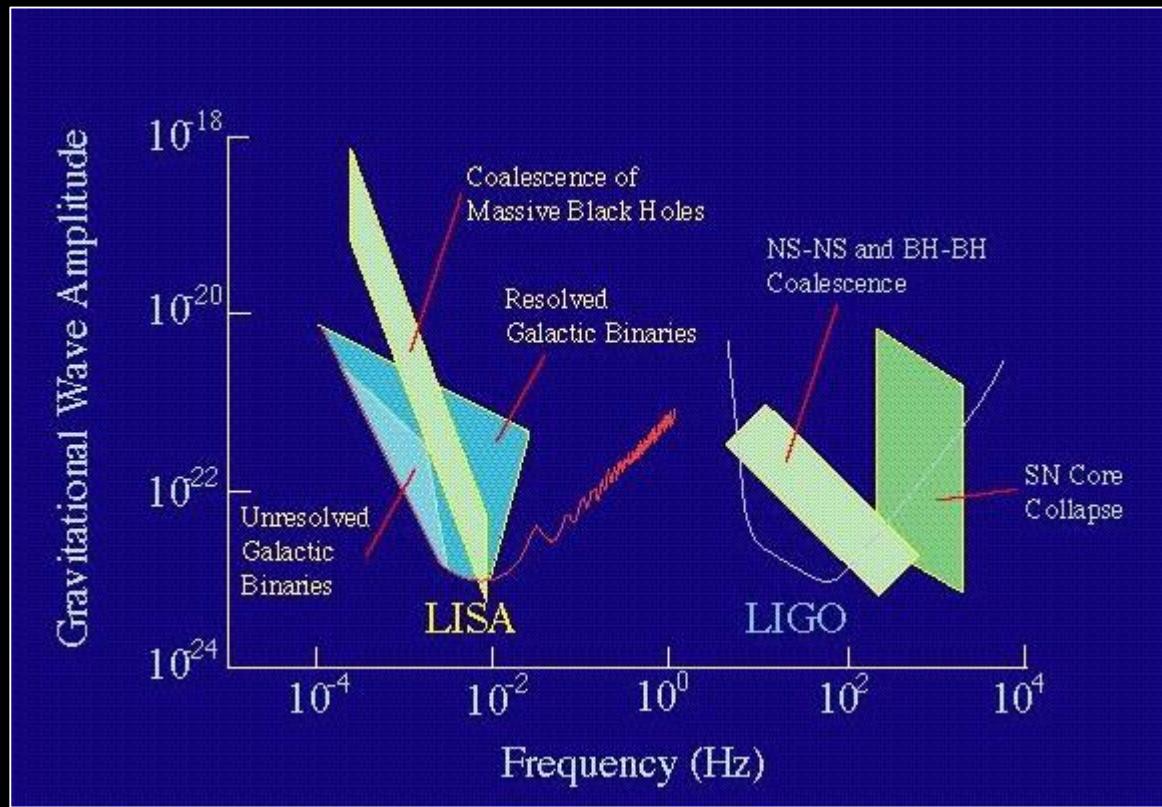


图12.27 LISA和 LIGO 探测的频率与引力波振幅曲线

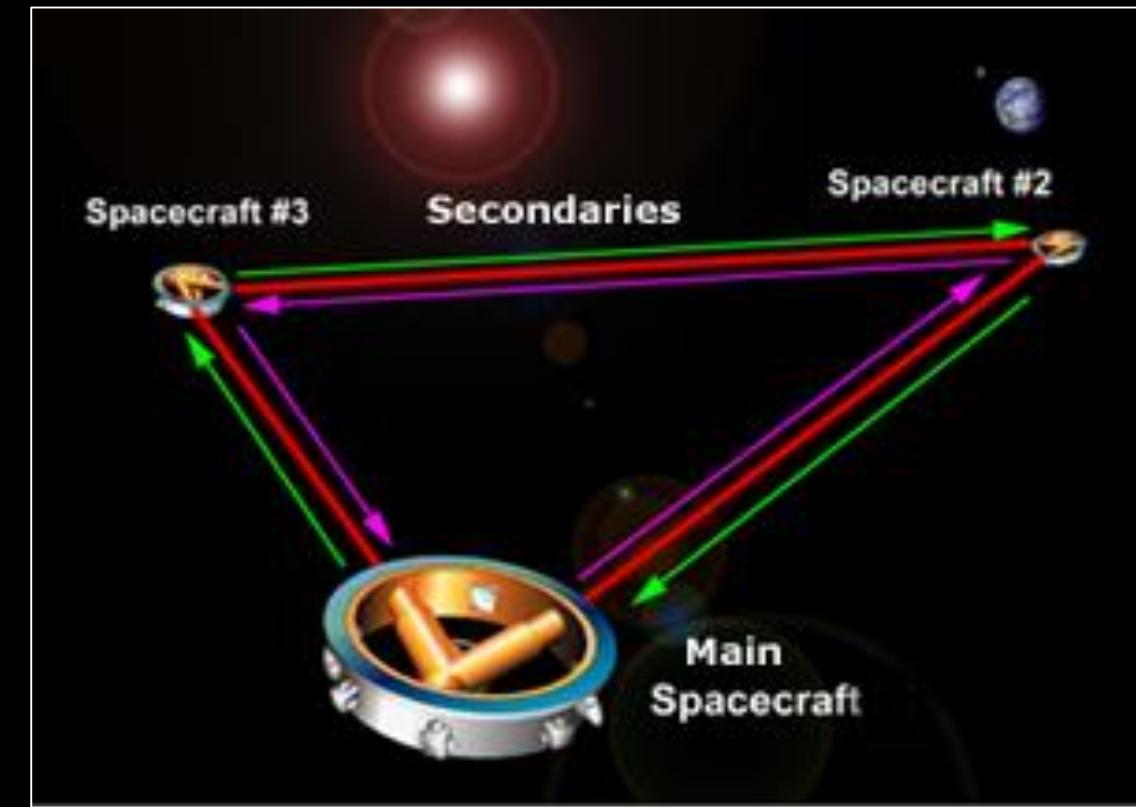


图12.28 LISA的三个探测器

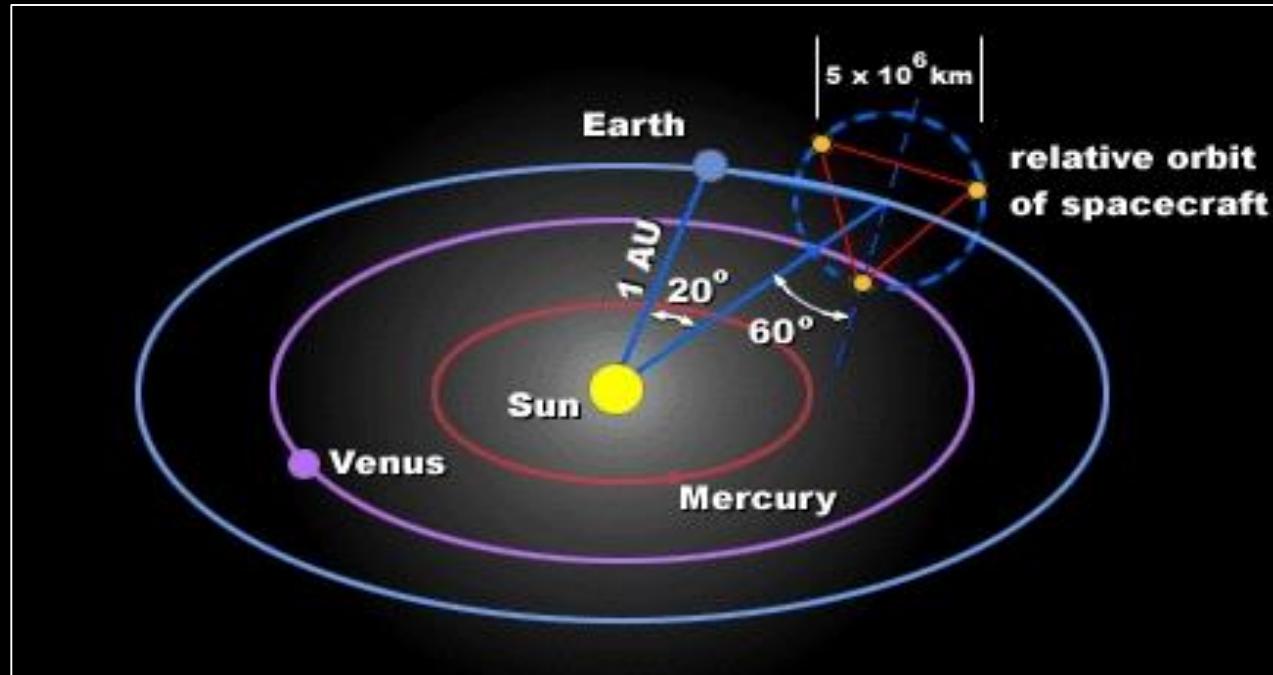


图12.29 LISA的空中组态
及运行轨道

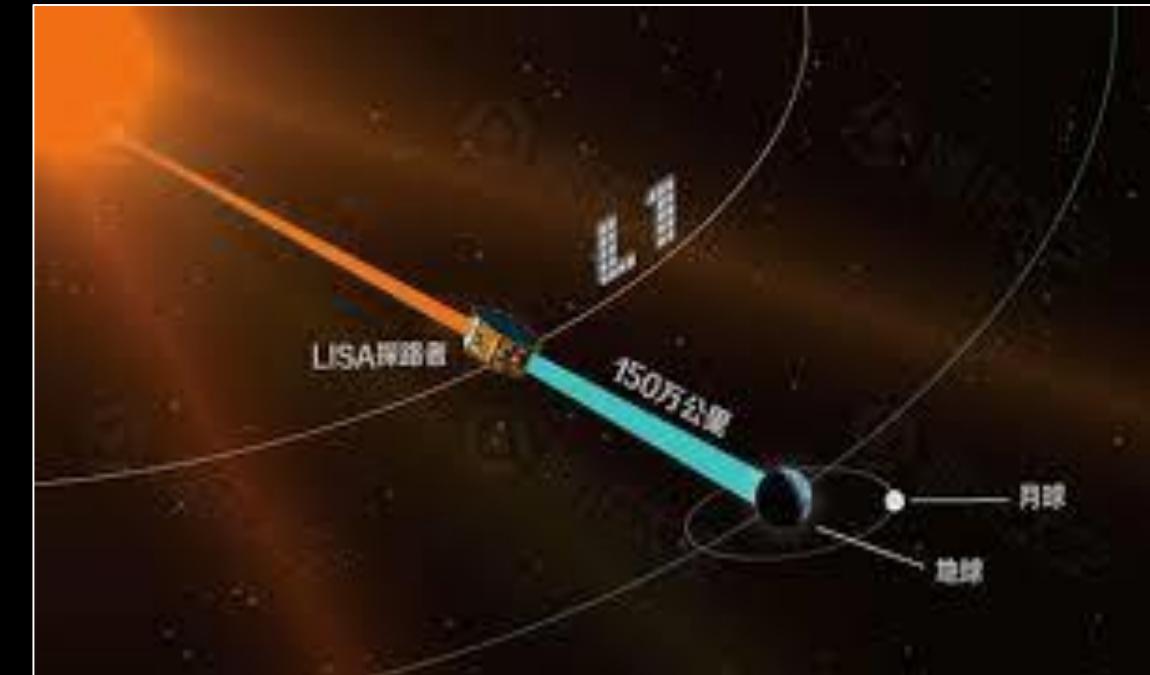


图12.30 LISA探路者在空间中的位置和轨道

- 3个探测器中每个探测器都是另外两个探测器的测试质量，两两之间相互进行激光干涉测距，以探测引力波。在2011年美国国家航空航天局退出該合作计划之后，取而代之的eLISA计划由三个相同的太空飞行器組成一个边长为100万公里的等边三角形，整体沿地球軌道绕太阳公轉。对于毫赫茲低頻波源的灵敏度超过 10^{-20} ，这相当于有能力在100万公里长度上观測到20皮米（小于一个氦原子的直径）的变化。
- LISA的基本組成為干涉測量系統（Interferometry Measurement System）和降扰动系統（Disturbance Reduction System）。这一计划有可能在未来20年内实现。

- 2015年12月3日，欧洲空间局（ESA）“LISA探路者”探测器（LISA Pathfinder）由一枚“织女星”运载火箭从法属圭亚那库鲁航天中心发射升空。ESA说，再经过为期6周的“太空遨游”，抵达位于太阳和地球连线上的“拉格朗日点L1”，距离地球表面150万公里，参看图12.30。
- “LISA探路者”的科学探测将于2016年3月正式开始，预计将持续180天。LISA探路者的作用就是为后续真正能探测到引力波的LISA进行技术验证。基本上，就是把整个100万千米的eLISA基线浓缩到一个人造卫星之内，让两个相距38厘米的自由漂浮的金铂立方体处于失重状态，并用激光干涉测量之间距离的微小变化。所以，它需要飞行到地球与太阳之间的拉格朗日L1点，在那里引力干扰降低到最小。
- “LISA探路者”探测器只是ESA引力波探测计划的前期任务，用于演示和验证相关技术。正式的“激光干涉仪空间天线计划”（LISA）将于2034年启动。

习题八：

- 1、进入21世纪以来，两次获诺贝尔物理学奖的中微子探测的重要意义是什么？请简述其探测原理。
- 2、引力波探测成功的重要意义是什么？特别是**GW170817**的观测成功给科学界带来哪些启示与展望？

15.1 宇宙射线观测

1. 宇宙线的成分
2. 宇宙线的能谱
3. 探测方式
4. 目前世界上最大的宇宙线观测站
5. 我国西藏的羊八井国际宇宙线观测站
6. “高海拔宇宙线观测站” (LHAASO)

15.2 中微子观测

两次诺贝尔物理学奖和五个大型的观测设备

15.3 引力波观测

- LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)
- GW170817与2017年10月的诺贝尔物理学奖