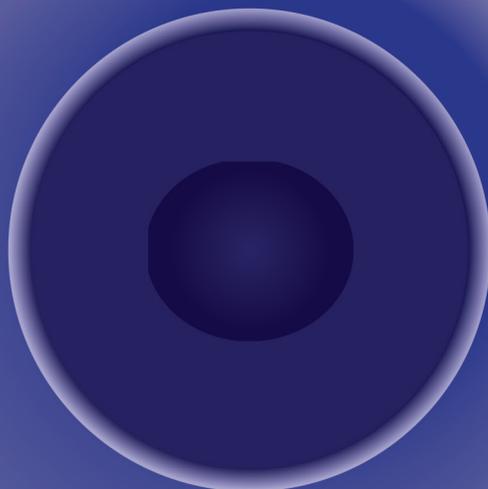


第1章

诡秘暗物质的由来





1.1 什么是暗物质？

“暗”的广泛含义

历史上的“暗”物质事件

1.2 诡异的暗物质真的存在吗？

不好理解的旋转曲线

星体光被严重弯曲

奇特的大尺度星系团

子弹星系团的碰撞

宇宙中有多少暗物质？

1.3 可能的暗物质

暗物质天体

暗物质粒子

特别关注的 WIMP 粒子

1.4 为什么要探寻和研究暗物质

暗物质密切关系到宇宙的生成与演变

梦寐以求的基本粒子

小结

出于求知欲和好奇心，千百年来人类从未间断对天文和宇宙的观察与探求，从地面到高山，从高空到太空，从地下到海底。特别是近几十年来，近百个不同类型的观测设备被发射升空，实现了人类对宇宙的全方位和全波段的观察。图 1.0.1 列出了在地面、空中和太空观察宇宙的各类望远镜及其相应的探测波段。特别是 1990 年由太空航天飞机发射升空的高分辨率哈勃望远镜（见图 1.0.2），它拍摄的照片和提供的信息为我们释疑了很多宇宙疑团，让我们进入到宇宙观测的新高峰，宇宙观测的新时期。我们不仅认识了距我们最近的地球、月球、太阳和银河系，我们还知道了类星体、超新星和脉冲星……也看到了非常遥远的星系、星云、星系团……观测范围几乎要到达约 150 亿光年¹甚至更远的宇宙边缘。利用不同波段光的观察可以绘制出不同类型的宇宙（即不同波段的宇宙）：可见光宇宙、红外宇宙、紫外宇宙、射电及微波宇宙、X 射线及高能宇宙。放眼多波段宇宙，可以将丰富多彩的宇宙层层剥开，探索到包括恒星、星云和星系的宇宙的每个层次。

今天，我们已经信心满满地观察到几乎所有不同波段的宇宙，可以说是一览无遗地“看”到了整个宇宙。但万万没想到，随着宇宙观测和天文学的发展，我们意识到我们所看到的浩瀚宇宙竟然只是宇宙很小的一部分，大部分是没有观察到的暗物质和暗能量。

1 光年是距离的单位，1 光年是光在 1 年中走的距离。光在 1 秒中走的距离是 30 万千米，一年有 3153 万秒之多，1 光年约为 9.4 亿千米。

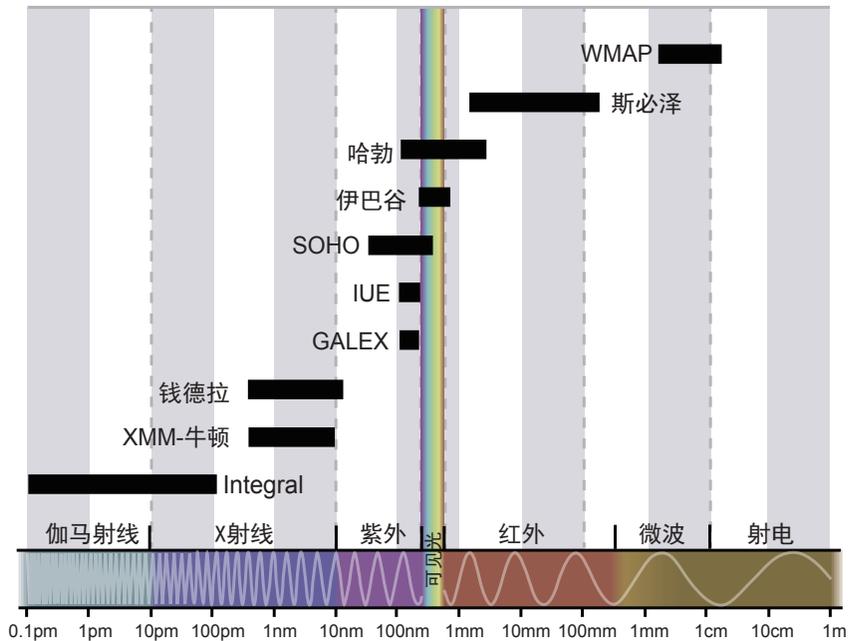


图 1.0.1 观察宇宙的望远镜及相应的波段

图中的望远镜依次为：

微波各向异性探测器 (The Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, **WMAP**)；

斯必泽红外天文空间望远镜 (Spitzer Space Telescope)；

哈勃太空望远镜 (Hubble Space Telescope)；

伊巴谷 (Hipparcos) 高精度视差采集卫星；

太阳和太阳风层探测器 (The Solar and Heliospheric Observatory, **SOHO**)；

国际紫外探测器 (The International Ultraviolet Explorer, **IUE**)；

轨道运行的紫外望远镜 (The Galaxy Evolution Explorer, **GALEX**)；

钱德拉 X 射线观察站 (Chandra X-ray Observatory)；

X 射线空间观察站 (High Throughput X-ray Spectroscopy Mission and the X-ray Multi-Mirror Mission)；

伽马射线空间望远镜 (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, **INTEGRAL**)。



图 1.0.2 太空中的哈勃望远镜

1.1

什么是暗物质？

我们知道宇宙中有两类天体：一类是像太阳那样的发光的天体，在没有光的环境中能被我们看到；另一类像月亮那样，虽然不发光却可以反射或吸收光，在有光照的环境中也能被我们看到。但是人们发现，还有一类很诡异的物质暗藏在宇宙中。它既不发光，也不和光发生吸收、反射或折射等作用，不仅在没有光的黑暗中看不到它，在有光线的环境中也完全透明，同样看不到它。这种不发光又绝对透明，在任何环境下都无法看到却又有质量的物质，被称为暗物质，即暗藏在宇宙中的物质。

当然，这里说的“光”不仅仅是指可见光，而是包括几乎所有波段的“光”；这里说的“看”也不仅仅是用人的眼睛看，它包括了所有形式的现代望远镜或探测器的观察。因此，在暗物质的研究中，“暗”具有更为广泛的含义。

“暗”的广泛含义

“暗”的广泛含义是什么？更广泛意义的“暗”是基于更广泛意义的“光”。光是什么？光实质上是电磁波。科学家通常依据波长把光（或称电磁波）划分为7个区段：无线电波、微波、红外线、可见光、紫外

线、X 射线和伽马射线。图 1.1.1 给出各种电磁波的波段及其相应波长。天文和宇宙科学借助于各种电磁波天文望远镜实现了对宇宙中天体的观测。今天的天文观测几乎涵盖了所有波段的电磁波。但是，不同探测设备对各波段“光”的响应不同，看到的图像也不同。图 1.1.2 所示为借助可见光与 X 光看到的世界和人，可见光只能看到表面，而 X 射线可以看到内部。同样，我们借助红外光、紫外光和 X 射线分别看到了不同的宇宙。图 1.1.3 所示为同一星系在不同波段（射电、红外、可见光、紫外及 X 射线）下的图像。

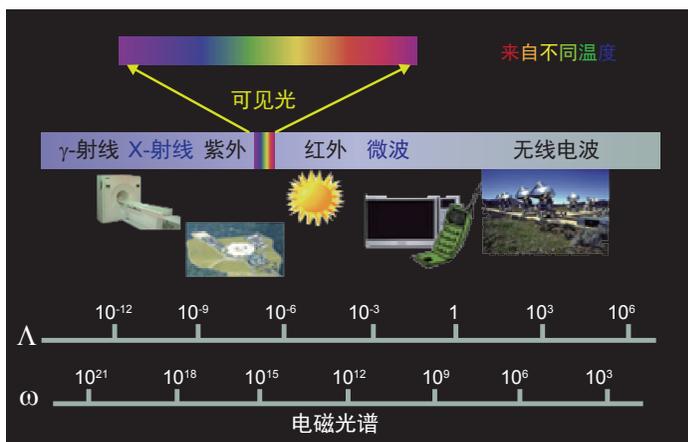


图 1.1.1 电磁波各波段的波长



图 1.1.2 用可见光与 X 光观测到的世界和人
(a) 可见光; (b) X 光

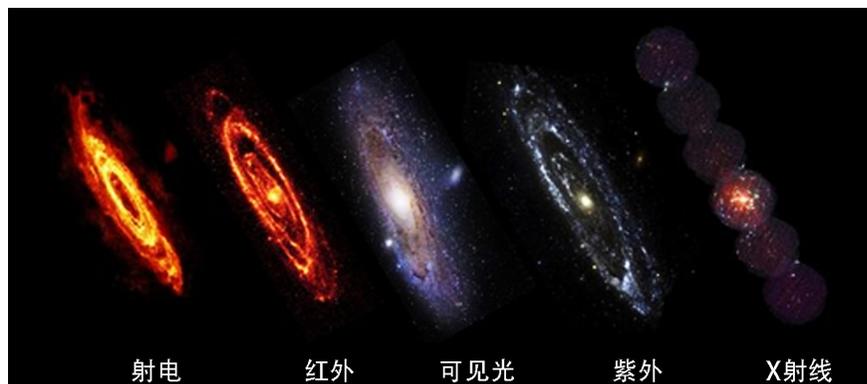
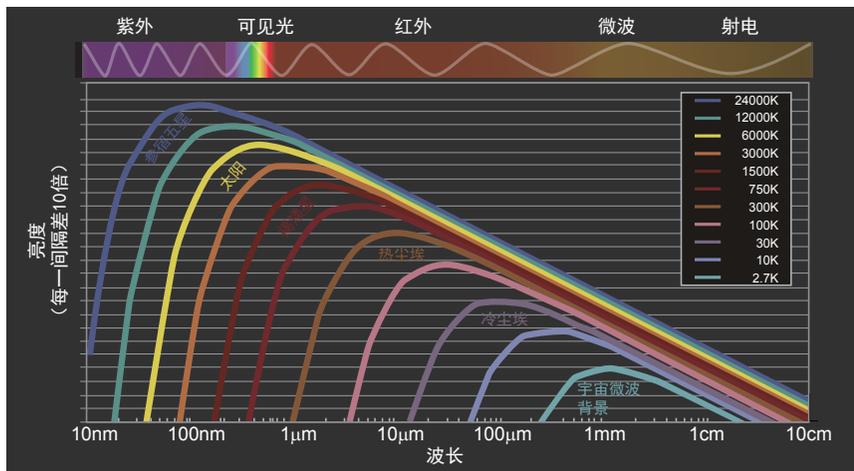


图 1.1.3 同一星系在不同波段（射电、红外、可见光、紫外及 X 射线）下的图像

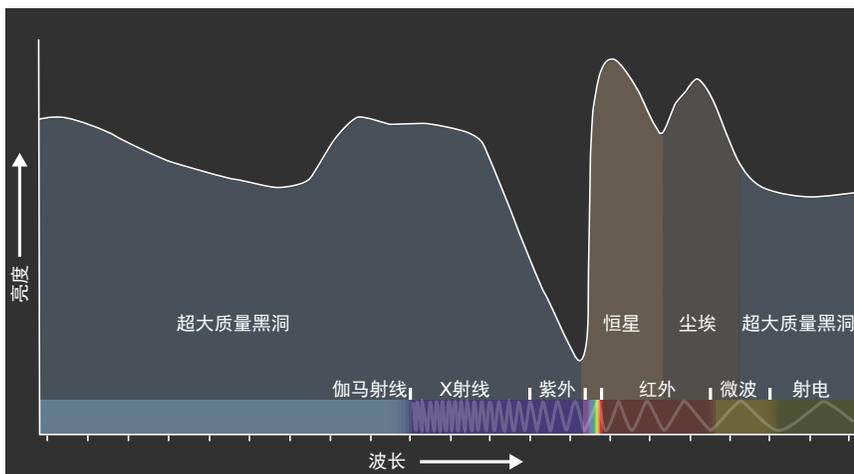
由物理规律可知：①任何物体的温度都不可能低于热力学温标的零度（相当于摄氏 -273°C ，用 K 表示）；②任何高于热力学温标零度的物体都一定会有电磁波（或称光波）辐射发出，只是辐射波长有所不同而已。这两点告诉我们，宇宙中的任何物质都会有电磁波辐射。此外，物体还会与电磁波发生吸收、反射或折射等作用。因此，只要我们能灵敏地测量到所有波段的辐射光，宇宙中的任何物质都逃不出我们的观察。图 1.1.4 (a) 给出不同温度的天体所发出的光波波长及其对应的亮度。图 1.1.4 (b) 给出不同天体所辐射电磁波的波长与其相应亮度。不难看出，尘埃、恒星及黑洞，无一不在我们所能观察到的波长范围内。可以说，不论是从表面发出的还是从星球内部发出的任何波段的“光”均逃不过人类的“火眼金睛”，人类已经可以全波段全方位地观察整个宇宙。

然而不幸的是，诡异的暗物质既不发出任何波段的电磁波，也不和任何波段的光发生作用，它深深地隐藏在宇宙之中。暗物质是用任何波段的探测器或望远镜都无法观察到的物质。构成暗物质的基础粒子应该是暗物质粒子，大量暗物质聚集也可能形成暗物质天体。

这里要注意，首先，暗物质不是我们通常讲的黑物质，普通黑物质因为能够吸收可见光而呈黑色，并非与可见光不发生作用。有人将寻找暗物质比喻成“在各种彩色豆中寻找黑豆”是不够恰当的。其次，暗物质也不是黑暗中的物质。我们看不到黑暗中的物质是因为没有光线，只



(a)



(b)

图 1.1.4 天体的辐射波长和亮度

- (a) 不同温度的天体辐射电磁波的波长及其亮度；
- (b) 不同天体辐射的电磁波波长及其相应的亮度

能说明暗物质是不发光的物质，而不证明是否与光发生作用。因此，把寻找暗物质比喻为“在暗室中寻找黑猫”也欠妥。应当说，暗物质是既不发射任何波段的光又对任何波段的光都是绝对透明的物质。某种意义上，暗物质类似于干净无瑕的普通玻璃，就像有时我们误认为玻璃门还

没有安装玻璃而碰了头。(当然这仅仅是对可见光而言,普通玻璃强烈吸收紫外光,对紫外线就不透明了),我们寻找暗物质可以想象成在光线充足的明亮屋里寻找不发光的绝对透明物体。

历史上的“暗”物质事件

看不见的“暗”物质事件在 20 世纪就曾经发生过。19 世纪末 20 世纪初,科学家在放射线的研究中发现微观世界中能量的吸收和发射是不连续的。不仅原子的光谱是不连续的,从原子核中放出的射线也是不连续的。图 1.1.5 (a) 所示为金 Au^{198} 原子核不连续的能级及其能级间的衰变。其放射出的射线的能量正好等于原子核不同能级间的能量差,即射线的能量是单一的,符合量子世界中能量守恒规律的。奇怪的是,在释放出电子的 β 衰变过程中发现电子的能量并不单一,其能谱是连续的。电子所带的能量只是能级差的一部分,还有一部分能量失踪了(见图 1.1.5 (b))。1930 年,奥地利物理学家泡利依据能量守恒定律提出了一个假设,认为在 β 衰变过程中,除了电子之外,同时还有一种质量为零、不带电、与光子不同的未知粒子发射出来,带走了一部分能量,因此出现了能量“丢失”,即能量守恒定律依然是成立的。通过能量守恒我们感受到一种未知粒子的存在,但当时还没有能力探测到它,便将它称为看不到的“暗物质粒子”。后来通过实验证实的确有这种粒子,并称之为中微子。中微子与其他粒子不是不发生作用,只是相互作用极其微弱,一时难以探测到。中微子的实验不仅看到了“未知的暗物质粒子”,同时还发现了当时还不了解的另一种相互作用,并称之为“弱相互作用”。

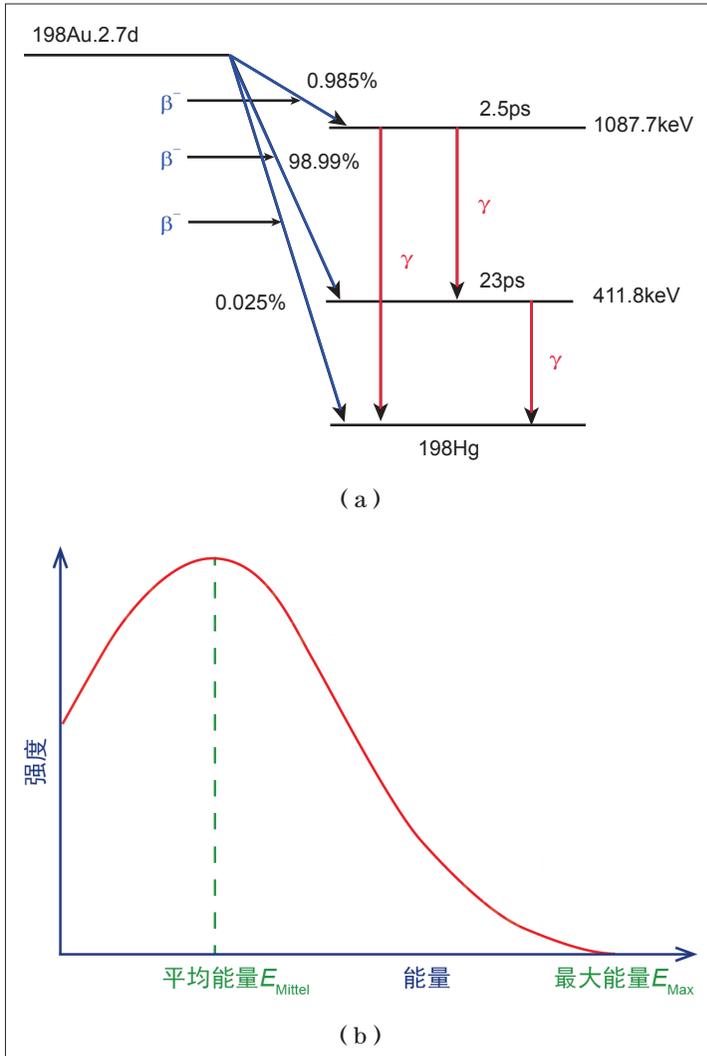


图 1.1.5 金原子核放出的射线

- (a) Au^{198} 原子核的不连续能级及其衰变；
- (b) Au^{198} β^- 衰变过程中电子的连续能谱

另一个有趣的事件发生在从天王星之谜到海王星发现的整个过程中。图 1.1.6 所示为围绕太阳各行星的轨道示意。1820 年，法国天文学家布瓦德依据当时的观测资料 and 天体运动学原理在计算天王星的运动轨道时，出现了不可理解的问题，他算出的轨道与观测值很不相符。后来的很多年里，人们积累了更多的观察数据，计算时又考虑了离天王星最

近的土星和木星的影响，但理论值和观测值仍然相差很远。天王星的观测位置与计算位置相差之大，已远远超出了观测的误差范围。面对天王星运动之谜，人们一方面对依据牛顿力学的天体力学原理提出质疑，另一方面提出存在有看不到的“暗卫星”或“暗行星”的假设，并开始对各种假设和质疑进行求证。直到 1845 年前后，两位年轻的天文学家——英国的亚当斯和法国的勒威耶基于逐渐逼近的方法，提出有可能在比天王星更远的天区有我们还没有看到的行星，并建议柏林天文台的加勒立即在该天区进行搜索。不几天加勒就观察到这颗发光很弱的行星，并将其命名为海王星。

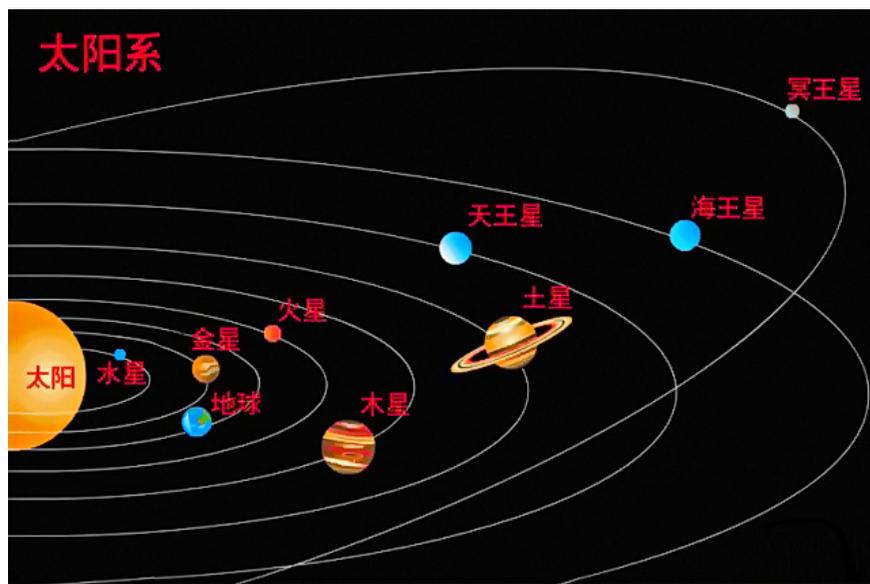


图 1.1.6 围绕太阳各行星及冥王星的轨道

今天，如果我们相信主宰天体运动的引力理论是正确的话，那假设存在有看不见的暗物质，就和当年没有发现海王星的情景一样了。

1.2

诡异的暗物质真的存在吗？

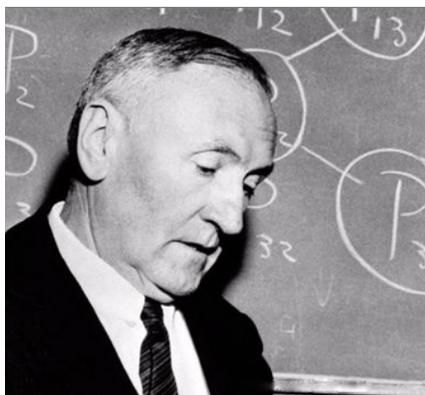
既然暗物质既不发出任何波段的光，也不和任何波段的光发生作用，用任何波段的探测器或望远镜都无法观察到，那人们怎么知道它的存在呢？

我们知道，地球围绕太阳旋转，为什么地球既不被太阳吸引过去也不会远离太阳飞走呢？太阳对地球有引力，而地球围绕太阳旋转有一定的速度而有离心力，当太阳的引力正好等于地球的离心力时，地球就被束缚在一定的轨道上。按照牛顿定律，引力的大小与太阳和地球的质量有关，质量越大，引力就越大。如果地球的速度太大，或者太阳的质量太小，离心力大于太阳的引力时，地球就远离太阳而去。可见，宇宙中星球、星系的稳定运动状态都是它们的运动速度和一定质量之间平衡的结果。太大的质量太低的速度，或者太小的质量太高的速度，都不会稳定，也不可行。

八十多年前（1933年），费里茨·兹威基惊奇地发现了一个奇特的现象：大尺度的星系团中众多星系的相对运动速度非常高，可它们又被约束（或被限制）在星系团中不能远离。但根据我们所观测到的星系团质量估算出的引力却远小于由星系速度估算出的离心力，即质量产生的引力无法将这些星系束缚在星系团中。如果假设星系团中还有我们“看不

见”但具有引力的物质，且质量足够大时，就有可能确保星系团中众多星系虽然速度很高也不会散开。人们把这种“看不见”但具有引力作用的物质称为“暗物质”。可以说这是第一个暗物质存在的证据。暗物质有引力，有质量，但不发光也看不见。

应该说，费里茨·兹威基（图 1.2.1 (a)）是提出“暗物质”概念的第一人。兹威基对事物观察十分敏锐，是闻名遐迩的才子。可惜的是，他被当时的同行认为是一个怪人，人际关系也比较差，没人认真考虑他的观点。他的观察和他对“暗物质”的设想在很长的一段时间内无人问津。1970 年，美国女天文学家维拉·鲁宾（Vera Rubin）（图 1.2.1 (b)）发现了“暗物质”存在的又一个证据——不管恒星距离星系中心有多远，它们围绕星系中心公转的速度都是一样的！至此，“暗物质”的概念才逐渐进入人们的眼帘。此后，天文学家们依据球状星系旋转速度的测量、引力透镜的观测、大尺度宇宙结构形状，以及微波背景辐射等研究中的“异常”等现象，大胆地推测或猜想宇宙中很可能存在大量“看不见”却又能通过引力作用而被感知的暗物质。尽管我们对暗物质的性质仍然了解甚微，但到了今天，占宇宙能量密度很大部分的暗物质的概念已被广为接受了。



(a)



(b)

图 1.2.1 暗物质领域的两位先驱者

- (a) 费里茨·兹威基，最早注意并提出暗物质存在想法的物理学家照片；
- (b) 发现“暗物质”存在的证据的美国女天文学家维拉·鲁宾

现在人们已经发现了很多暗物质存在的证据，不可能在书中一一讨论。下面仅就几个暗物质存在的典型证据——“星系的旋转曲线”“引力透镜效应”“星系团的碰撞”“宇宙大尺度结构”做简单介绍。

不好理解的旋转曲线

万有引力定律告诉我们，围绕地球转动的人造卫星的运行速度和距离和地球的总质量有关。地球绕太阳运行的速度和地球与太阳的距离及太阳的总质量有关。地球是按照引力的平方成反比定律才会在一定的轨道上不停地转动。图 1.2.2 所示为美国发表的最新银河系全景图。银河系是一个典型的螺旋星系，星系中的各个星体围绕中心旋转，中心亮度很大表明质量集中于中心，其直径约 10 万光年。有 4 条螺旋状的旋臂从银河系中心均匀对称地延伸出来。银河系中心和 4 条旋臂都是恒星密集的地方，太阳系位于银河系边缘，银河系第三旋臂——猎户旋臂上。

同理，每个星体或气团围绕星系运行的速度和该物体与星系中心之间的距离以及星系范围内的总质量有关。通常我们用旋转速度与距离的关系曲线来描述它们的运动，称之为旋转曲线。如果按照观察到的星系范围内的质量分布和牛顿定律来计算，因为观察到的可见质量大都集中



图 1.2.2 美国发表的最新银河系全景图

在中心，随着距离的增加其速度应该减少，即旋转曲线是随距离下降的。而实际测量的结果发现旋转曲线是平的，即旋转速度不随距离减少，速度基本不变。图 1.2.3 是螺旋星系 NGC6503 和测量得到的球状星系旋转速度与距离的关系曲线。图 (a) 是螺旋座星系 NGC6503 的亮度图，图 (b) 中的实验点是不同距离观测到的速度，其速度在距离大于 2kpc 就基本不变。图 (b) 中标有“星盘”的虚线是依据星体质量分布计算出的旋转曲线，其速度随距离迅速下降。很明显，两者相差甚远。如何来解释这一差别呢？除非认为我们依据亮度看到的星系的质量分布有误，导致旋转曲线是随距离迅速下降。只有星系中有大量看不见的物质，且分布并不都集中在星系中心时，距离星系中心远的恒星的运动速度才不会比近处的恒星运动速度慢。如果将观察到的气体和尘埃分布以及假设的暗物质分布这三种物质都考虑进去，也就是将图 (b) 中的标有“气体”“星盘”“暗物质”的曲线相加得到的旋转曲线才能和测量到分布（图中的实验点）相符合。这说明星系中必然存在“看不到”的物质，但提供了束缚星系运动的引力。这一天文观测结果为暗物质的存在提供了最直接的证据。这是 1978 年才发现的令人信服的证据。

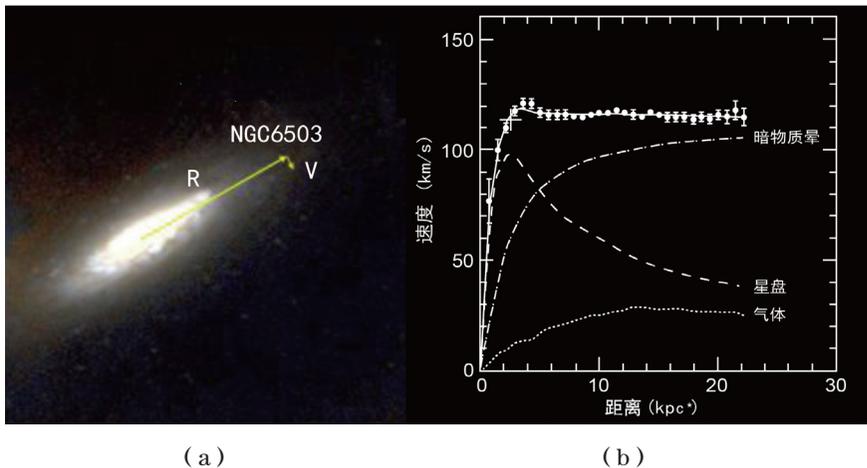


图 1.2.3 球状星系旋转速度 v 与距离 R 的关系曲线

* kpc : 千秒差距 kiloparsec (kpc), 天文学上量度距离的一种单位等于 1000 个秒差距或是 3260 光年, 等于 3.08×10^{19} m。

后来人们观测了几乎所有的螺旋星系，测量了它们的旋转曲线，都有同样的现象。图 1.2.4 所示为部分螺旋星系的旋转曲线。这表明所有螺旋星系中都存在有暗物质。

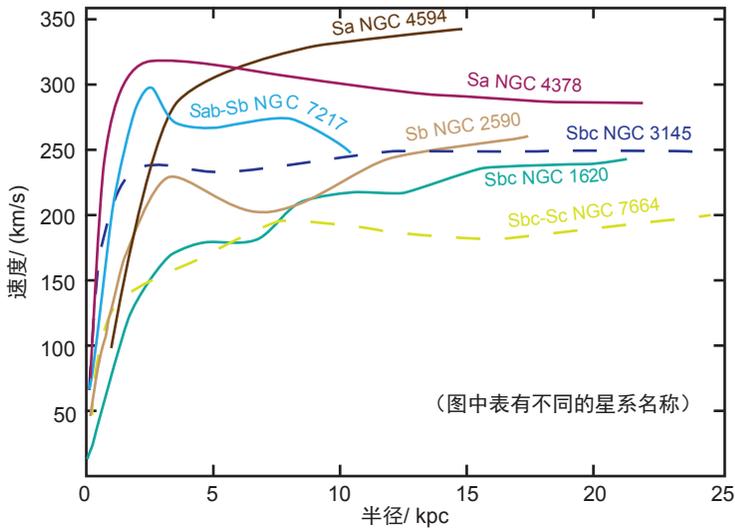


图 1.2.4 Sa NGC 4594 等螺旋星系的旋转曲线

人们自然会问，是否存在另一种可能，即描述引力的牛顿定律有问题？遗憾的是，过去对地球、对太阳等星球的观测积累了大量的观察数据，根据牛顿引力定律计算得到的围绕太阳运行的行星轨道与实际观察数据相一致。太阳系原来的九大行星，即水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星的轨道计算均符合引力定律。应该说，前面讲的海王星的发现也完全是牛顿引力定律的功劳。同样，对银河系的观测也同样证明了引力定律是正确的。银河系看起来像一个有两条旋臂的巨大圆盘形旋涡，围绕其中心不停地旋转如图 1.2.2 所示。太阳在稍稍偏离这个旋转中心的位置上，和其他恒星一样不停地转动，其速度大约为每小时 220km。依据太阳转动的轨道和速度，可以计算出银河系旋转轨道内所有星球的质量总和约为太阳质量的 1 千万倍。这个值和我们在银河里实际观察到的恒星基本吻合。即使是上述的球状星系旋转曲线，靠近

螺旋星系中心的恒星速度也符合牛顿引力定律的理论计算，由此推测螺旋星系中心的可见物质密度非常大，相对暗物质质量很小，近星系中心区域几乎不受暗物质的影响。

结论似乎只能是：星系里必定有看不见的暗物质，它不发光，也不反射其他发光星体的光，但具有引力，也有质量。那么，暗物质有多少呢？天体的亮度反映天体的质量，天文学家通常用星系的亮度来估算星系的质量（也就是可观察到的质量）。当然也可通过引力来计算星系的质量（既包括观察到的质量也包括看不到的质量）。这两者之差就可认为是暗物质的质量。通过旋转曲线测量及引力计算出的银河系的质量是由亮度推算出的银河系质量的十倍以上，在外围区域甚至达五千倍。可见，在银河系整个范围里都存在有大量暗物质，有时称之为暗物质晕，是不言而喻的。

虽然我们假设在银河系整个范围里都存在有大量暗物质，并称之为暗物质晕，但是，要想证明银河系最深处区域有无暗物质是极端困难的，因为银河系深处的核心区域直径约 10 万光年。2015 年初，西班牙、德国及瑞典等国科学家 Fabio Iocco¹，Miguel Pato 和 Gianfranco Bertone，在英国《自然·物理学》杂志发表了他们的研究成果。他们特别关注银河系内部最深处以及太阳周围的区域，在全面汇总大量实验测量的旋转曲线和分析观察数据的基础上，再与最新的银河系质量分布理论作详细的对比分析与研究。研究表明，银河系内部也存在着暗物质，否则观测到的数据将无法得到合理解释。这是第一次得到银河系内部甚至太阳系内部存在暗物质的直接证据，并认为，依据目前的数据，银河系内部以及在太阳系内部的暗物质的主要成分不大可能是像质子或中子一样的重子。

星体光被严重弯曲

我们知道，依据爱因斯坦广义相对论理论，大质量物体周围的时空是弯曲的，时空曲率将产生引力。当直线行进的光线通过大质量的物体时也是弯曲的，它的路线将沿着大质量物体所形成的时空曲率，也就是

说，光线因为引力作用被弯曲。这类似于光线通过凸透镜被弯曲聚焦，且弯曲的程度与光线所通过的质量多少有关。这在物理学中称为引力透镜原理。图 1.2.5 所示为引力透镜的原理示意图，图中左侧为天体发出的光波经过中间的星体到达地球上探测器的示意图，右侧为探测器获得的图像。光波受到所经过星体庞大质量的引力作用而被弯曲，到达地球上的光实际上是被星体引力作用发生了弯曲的光线，其弯曲程度不仅与星体的质量有关，弯曲后的图像还与星体的形状有关。当星体是圆球体时，图像呈环状（爱因斯坦环）；若星体是长条状，图像呈十字叉状（爱因斯坦十字架）；如果星体是宇宙中形状复杂的星系团，其图像则是不很规则的各种弧形。我们可以通过图像知道星系团的大致分布，再由光线弯曲的程度计算出光线所通过的物体的质量。这一原理被广泛地应用到宇宙中星系团质量的测量上，不管该星系团是否发光。

实际测量中我们惊奇地发现，所探测到的星体光线被严重地弯曲，以此弯曲估算出的星系总质量要比与用光学方法测量得到的质量大得多，即比能观察到的星体质量大得多，多出来的部分就应该是星系中看不到的暗物质。可见，研究引力透镜现象同样可以揭示出星系团中有大量暗物质。

图 1.2.6 所示为哈勃太空望远镜在 1999 年完成维修后立即拍摄到的一张照片，来自星系团背后天体的光线因为星系团的巨大质量而形成扭曲的图像，出现许多细弧。一颗遥远的类星体被引力透镜分成了五星样的虚像，这是典型的“引力透镜”现象。这张照片还展示了由引力透镜放大的珍贵星系，甚至还包含了一颗超新星。当然，我们也可以从中获得星系团中暗物质的质量。科学家们依据这一原理，对几乎每个星系团进行“引力透镜”的测量，都能获得这些星系团中的暗物质质量。

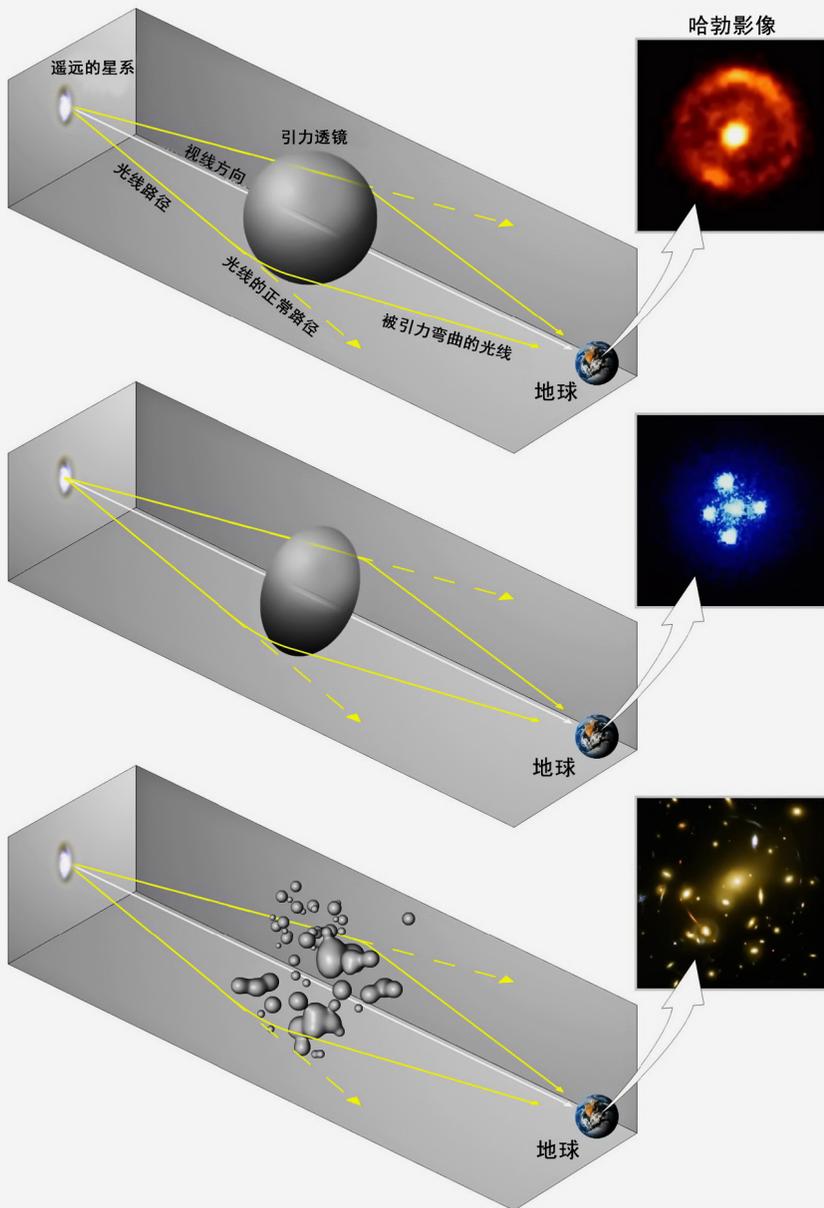


图 1.2.5 引力透镜的原理

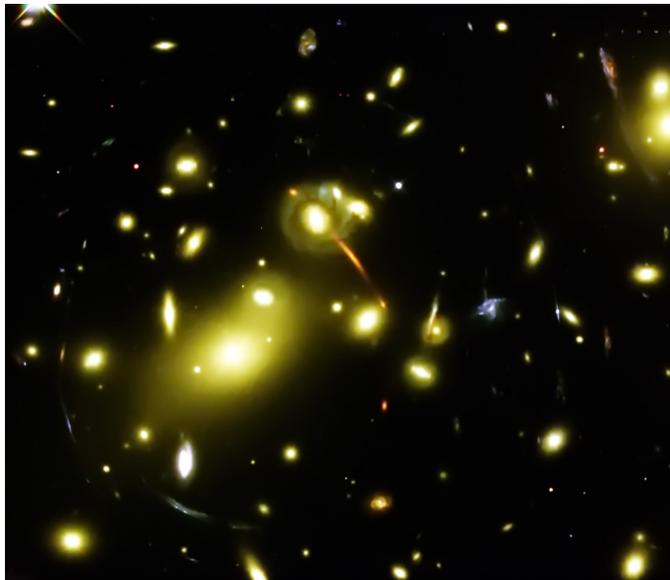


图 1.2.6 哈勃太空望远镜拍到的一张照片

奇特的大尺度星系团

图 1.2.7 所示为奇特的大尺度星系团结构的照片。在遥远的银河外星系，天文学家通过大型望远镜已经发现了上千亿个星系。这些星系在宇宙中聚集起来形成一个个集团，被称为星系团。可以说，星系团是成百或成千上万个星系由于自身引力而约束在一起的束缚体系。这样的集团大小不一，小的由十几个到几十个星系组成，而大的集团由成千上万个星系组成。星系团质量相当于星系集团中所有星系质量以及星系际介质的高温气体质量的总和。就像我们通过观察炼铁炉辐射出的光来测量炉中铁水温度一样，通过测量星系集团发出的 X 射线就可以估计出它们的温度，再由测量到的温度就能计算出这些星体的运动速度。实际观察发现温度异常的高，这意味着它们之间的相对运动速度极大。如果这些运动速度极高的星体还能够聚集在一起并形成星系团，就像上面讲的，它们之间必须有足够大的吸引力。这个吸引力远大于我们所观察到的星系团可见物质质量的引力，除非存在有我们没有看到的物质——暗

物质才有可能。通过相对运动速度和引力获得这些星系集团的质量远远大于观察到的星系和气体质量的总和，这些“多出来的质量”可能就是暗物质。

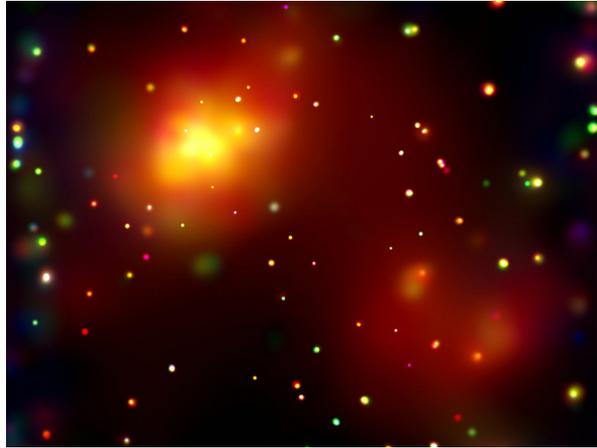


图 1.2.7 大尺度星系团结构的照片

子弹星系团的碰撞

2006 年，美国天文学家利用钱德拉 X 射线望远镜对星系团 1E 0657-56 进行观测，并观测到星系之间碰撞的过程。星系团的碰撞迅猛异常，竟然将暗物质与正常物质分离开来，成为暗物质存在的更直接证据。图 1.2.8 所示为 2006 年 8 月美国 NASA/ 钱德拉发布的一张子弹星系团的照片，它实际上是由三张照片合成的。一张是可见光波段的星系照片（图中的白点），另一张是 X 光波段的星系团内气体分布（红色部分），这两部分相当于同一子弹星系团两个不同波段（可见光和 X 光）的照片。图中蓝色的部分不是直接拍摄下来的，是利用引力透镜原理间接计算得出的质量分布。从合成图中不难看出，这很像两个星系团相撞，蓝色部分（暗物质团）的作用较小，速度快，加速远离；红色部分是可发光的物质团，由于较强的相互作用，彼此离开得较慢，尾随其后，形成几个空间分离的团块。空间分离的团块可以看成存在有两种类型的物质，且可见物质与暗物质的性质有很大差异。这一现象被看成“暗物质”存在的直接证据。

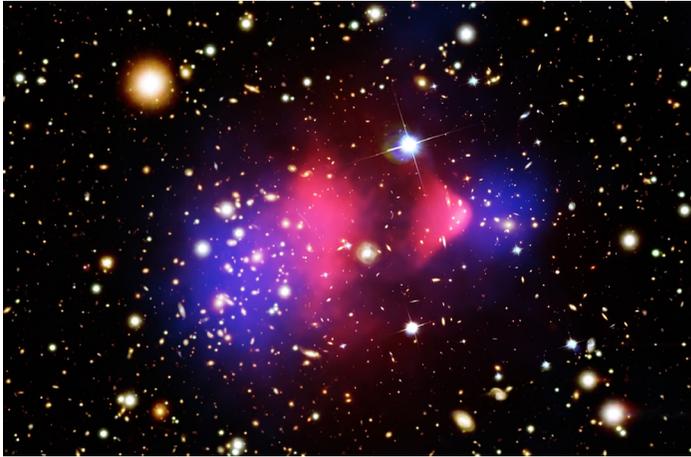


图 1.2.8 子弹星系团的照片

暗物质从根本上讲不是我们通常说的物质。利用现代各种望远镜、各种波段的探测器都无法观察到它的真面目，这是因为它似乎不和其他我们能看到的物质发生任何作用。但是暗物质与普通物质间有引力作用，正是这引力作用和由此产生的各种现象最终让我们证实了它的存在。

总之，不论小尺度的星系、大尺度的星系团或整个宇宙都发现有暗物质存在的迹象。万有引力让我们知道了宇宙中还暗藏有大量看不见的暗物质，感谢引力作用，让我们知道了被“暗藏”的宇宙。

宇宙中有多少暗物质？

暗物质是一种诡异的不可见物质。目前看来，除了引力作用之外，它们和“常规”物质几乎不发生任何相互作用。科学家们之所以知道宇宙中存在暗物质，并不是因为真的“看见”了暗物质，完全是通过看不见的暗物质对可见物质的引力效应间接地获得了它们存在的信息。几十年前暗物质首次被科学家提出时，还只是一个理论性的假设，当时的暗物质猜想在科学界也是个很有争议性的命题。随着时间的推移和科学的发展，特别是前面讲的不少观察证据，暗物质存在的证据逐渐被接受，而且计算出暗物质的质量远大于可见物质质量。

暗物质之间、暗物质和常规普通物质之间都存在引力作用。引力使数百上千的星系聚集起来，形成星系团。另一方面，大量物质的聚集又形成了巨大的引力作用，背后遥远星系发出的光线经过其附近时会发生弯曲，从而形成类似透镜的效应。我们可以利用这种物理上的引力透镜效应作为测量手段来很好地观察寻找暗物质，依照背景星系光线被弯曲的程度来计算光线经过的星系的质量，从而估算出暗物质的质量。科学家们不辞劳苦地对千万个星系逐一测量，得到宇宙中的暗物质分布。总而言之，不管物质“暗”与“不暗”，只要有质量，光线就会被弯曲，并可通过弯曲的程度获得质量的分布。科学家们以此发明了一种“引力透镜质量分布成像”（gravitational lens mass tomography）法，绘制出宇宙中暗物质的分布。

另外，通过宇宙背景辐射测量也可以得到暗物质和暗能量的比例。2009年，普朗克科学探测卫星发射升空。普朗克空间探测器主要对宇宙背景辐射进行观测。通过宇宙背景辐射测量得到的暗物质的比例与之前有所不同。图 1.2.9 给出了普朗克空间探测前后宇宙中暗物质所占的比例。依据普朗克空间探测器的测量，目前普遍认为整个宇宙中，暗能量占 68.3%，暗物质占 26.8%，其他可见物质仅为 4.9%，即在所有物质中，诡异的暗物质竟然占了 85%。

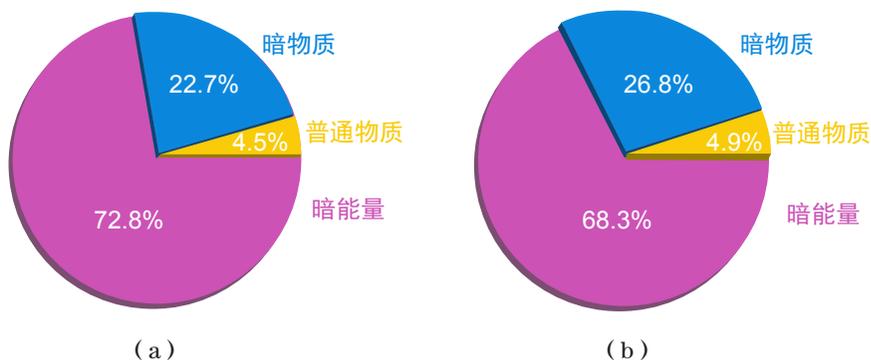


图 1.2.9 宇宙中暗物质所占比例

(a) 普朗克测量前的比例；(b) 普朗克测量后给出的最新比例

暗物质在宇宙中的分布是人们十分关心的问题，也是科学界的重要课题。螺旋曲线测量结果显示，星系中暗物质的分布似乎像比较均匀的“晕”。当代的大型望远镜采用了电荷耦合器件 charge coupled device, (CCD) 技术，可以探测到更加微弱的光线，观察到“弱引力透镜效应”，这使得遥远星系的图像看起来呈现椭圆形。利用这些星系扭曲的图像，再和哈勃太空望远镜 (HST) 拍摄的遥远星系团的可见光图片作对比，就能得到暗物质的具体位置，从而构造出分辨率更高的暗物质分布，并可绘制出长达十亿光年的庞大暗物质分布图。

研究人员发现：第一，宇宙中暗物质无处不在。星系内部充满着暗物质，即便是宇宙中最明亮的星系内部也存在着暗物质。第二，从大尺度看，宇宙就像由众多星系构成的庞大的、呈现为丝状或卷须状的“宇宙网”，暗物质分布在“宇宙网”状结构中空旷的“网眼”内，将网上的千万个星系相互“黏结”在一起。“宇宙网”由暗物质维系在一起，没有它的存在，宇宙或将不会以现在的状态存在。类似于暗物质和可见物质在万有引力的作用下汇聚到一起，在暗物质比较集中的地方更容易吸引可见物质，从而协助星系和星系团的形成。当然，暗物质和可见物质一样也可以密集在一起组成星系，不过与普通的正常星系不同，暗物质星系中没有任何恒星发光，只能通过“引力透镜”来发现它。

图 1.2.10 所示为哈勃望远镜获取的暗物质分布图，图中的蓝色区域是在哈勃望远镜的图像上叠加上的暗物质分布。图 1.2.11 为数字模拟获得的大尺度宇宙内的暗物质分布图，图中明亮的区域是高密度星系集中的地方，那些邻近的暗区域充满了暗物质。

总之，暗物质存在于宇宙的每一个角落。暗物质从每个星系一直延伸到宇宙空间，与邻近星系的暗物质重叠后形成一个巨大的“宇宙网”。暗物质在宇宙网状结构的网格中的空旷区域，其他星系密布在狭窄的网络上。

不过，暗物质在宇宙中的分布到底是什么样的，目前仍然是科学界讨论的课题。



图 1.2.10 哈勃望远镜获取的暗物质分布图
(图中的蓝色区域就是在哈勃望远镜的图像上叠加上的暗物质分布)

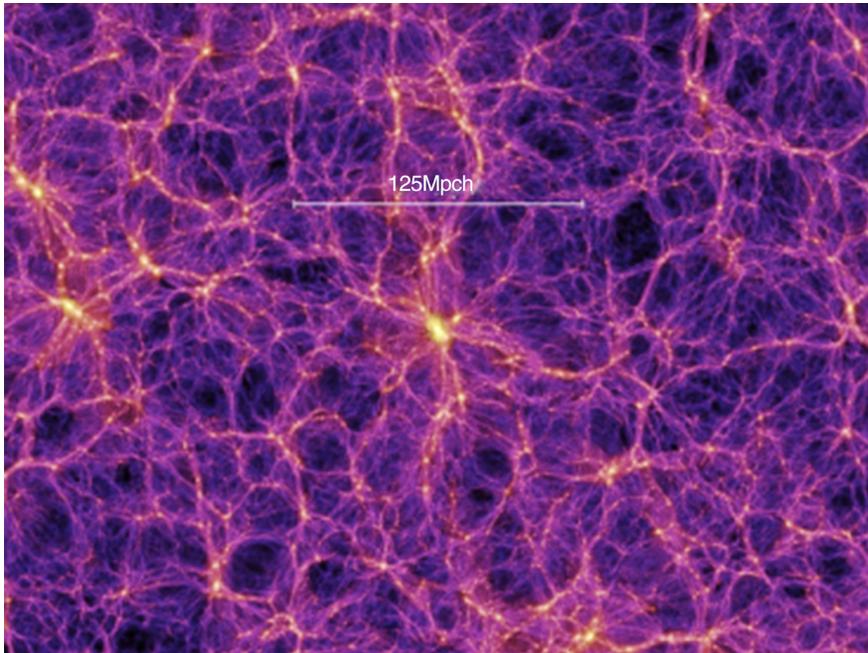


图 1.2.11 数字模拟得到的大尺度宇宙内的暗物质分布图

1.3

可能的暗物质

在没有真正了解和认识暗物质的时候，只好先假设一些可能的暗物质候选者，同时分别对其进行科学的确认。

暗物质天体

人们首先想到的是宇宙中的中子星[见图 1.3.1 (a)]、白矮星(见图 1.3.1 (b))、褐矮星(见图 1.3.1 (c))和黑洞(见图 1.3.1 (d))等暗物质星体，它们都是质量大而致密晕的天体，其组成类似质子、中子，属重子类的暗物质。恒星演化到末期，经由重力崩溃发生超新星爆发后，根据质量的不同，整个恒星被压缩为白矮星、中子星以至黑洞。它们的体积不大但物质密度很大，引力极强，以致光线都逃离不了其星体表面。由于光线无法逃离，我们用望远镜等也无法看到它们，所以这类天体是暗的。可惜，目前观察到的这些星体的数目不多，它们的质量总和也太小，即使它们是暗物质，也远不能解释宇宙中如此大的暗物质份额，也不能解释在星系的整个空间中所弥漫的暗物质。

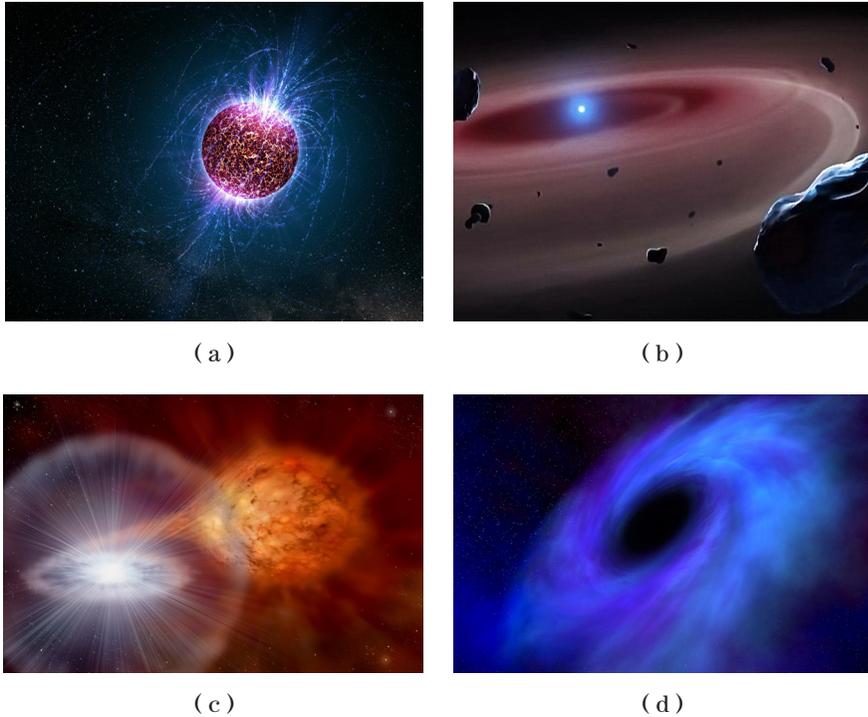


图 1.3.1 可能是暗物质的天体

(a) 中子星; (b) 白矮星; (c) 褐矮星照片; (d) 黑洞

暗物质粒子

我们对暗物质的另一个猜想是暗物质粒子，并假设这些粒子既可以存在于广袤的太空中，也有结合成暗物质天体的可能。所谓广泛分布在宇宙中的暗物质粒子，可能是宇宙形成初期产生的寿命极长的粒子。这些粒子与重子类暗物质天体不同，属非重子类的暗物质粒子。一类暗物质粒子是宇宙形成初期、温度还很高的时候形成的粒子，其速度接近光速，属相对论型的暗物质粒子，有时也称之为“热”暗物质粒子，如质量很小的中微子等。另一类是宇宙形成较晚时候的暗物质粒子，是速度较慢的粒子，称为“冷”暗物质粒子，如轴子，WIMP 粒子等。当然，也可猜想有中等速度的、不冷不热的“温”暗物质粒子。图 1.3.2 中列出了暗物质的可能候选者，如中微子、轴子、WIMP 粒子。

谁是暗物质可能的候选者？

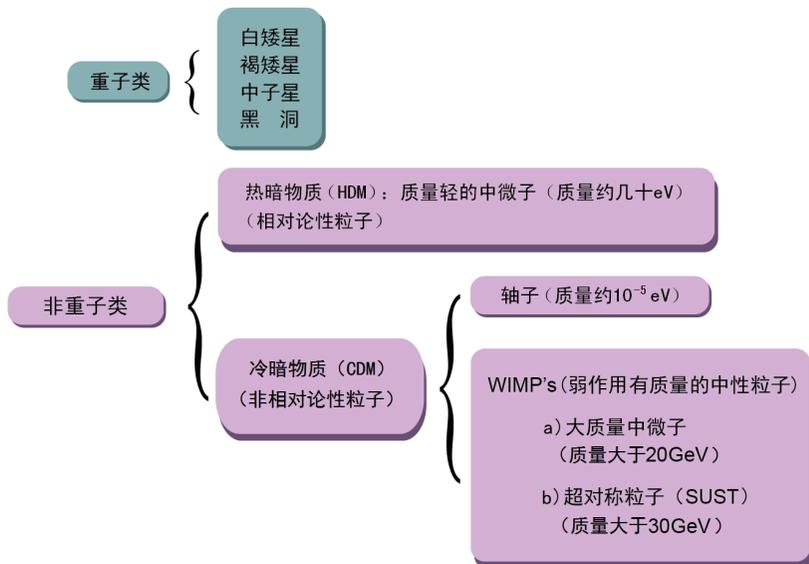


图 1.3.2 暗物质可能的候选者

第 4 节会讲到，三种中微子都是已经被发现的常规粒子，是目前基本粒子物理标准理论中的基本粒子。它们不带电，和其他粒子既无强作用也没有电磁作用，但有弱作用。这种与其他粒子作用很弱、作用概率很小的粒子具备了暗物质粒子的特征。可惜其质量太小，每个粒子的质量甚至小于 eV 的量级。与普通质子或中子（质量约为 $10^9 eV$ ）相比，相差 9 个量级。这难以解释宇宙中如此大比例的质量。另外，如此轻的中微子，即使能量不高的中微子也在接近光速运动，这个运动速度实在是太快了，以致根本无法聚集在一起形成任何类型的星系或星系团。所以中微子不大可能是主要的暗物质成分。

轴子 (Xion 粒子) 是 20 世纪 70 年代为解决强相互作用理论的时间不对称问题所提出的物理模型中一个假想的粒子，但直至目前还没有被实验证实。理论预言的轴子质量在 $10^{-6} \sim 10^{-2} eV$ 范围内，质量比中微子还要小得多。轴子之间的作用很弱，诞生于宇宙温度较低的状态，速度也不高，有可能彼此吸引而聚集在一起。如此低质量的粒子，也很难

是暗物质粒子主要的成分。

那么，哪些粒子才是构成宇宙暗物质的主要成分呢？人们将注意力转向弱作用大质量粒子（week interaction massive particle, WIMP）。

特别关注的 WIMP 粒子

WIMP 是假设和普通粒子具有弱作用并且质量较大的粒子。这显然是一种很宽泛的说法，没有严格定义 WIMP 到底是什么粒子。但是我们可以认为：第一，WIMP 的质量可能比普通粒子（如质子、中子等）的质量大很多，第二，WIMP 不带电，没有电磁作用，也没有像普通核子之间的强作用，它们几乎与普通物质粒子不发生相互作用；第三，即使 WIMP 与普通物质粒子发生相互作用，也是很弱的作用——可能是基本粒子标准理论中的弱作用，也可能是我们还不知道的另类弱作用。另外，理论认为 WIMP 产生于宇宙初始阶段。它们有较大的质量，在宇宙中运动的速度缓慢，有可能聚集成团。随着宇宙膨胀并逐渐变冷，WIMP 相互远离，最后它们无法再相遇并发生湮灭反应从而存活下来。WIMP 被认为是最有可能的“冷暗物质”候选者。当然，也有可能质量较小、速度较快的粒子，那将是“热暗物质”或“温暗物质”的候选者。

基于 WIMP 性质所构造的宇宙学模型与天文实验观测有较好的符合，由 WIMP 弱作用的相互作用概率和统计物理的退耦理论推算出的数值与实际观察值差不多，尤其是 WIMP 和粒子物理中某些理论模型预言的粒子特性相似，这些都成为把 WIMP 作为暗物质粒子主要候选者的重要原因。另外，从实验探测技术的角度出发，WIMP 粒子似乎也是比较容易观察到的粒子。

虽然目前还没有完全通过实验证实 WIMP 的存在，人们还是希望 WIMP 是一种大质量的特殊“中微子”，它与普通粒子之间可能有我们已经了解的弱相互作用，我们更加希望 WIMP 是粒子物理“超对称理论”中所梦寐以求的超对称（supersymmetry, SUSY）粒子等。

1.4

为什么要探寻和研究暗物质

历经几个世纪的探索，人类对世界的认识范围包含了一百多亿光年（ 10^{25}m ）尺度的浩瀚宇宙至 10^{-35}m （普朗克长度）的微小基本粒子。随着探索的深入，我们意识到所知道的竟然是宇宙很少的一部分。这难道还不让人惊奇、费解并值得深究和探讨吗？探寻大量暗藏在宇宙中的物质，找回“缺失”的宇宙，或者说寻找“隐藏”的宇宙，必然是一个“天大”的课题。

波兰天文学家哥白尼（Nicholas Copernicus，1473—1543年）在1543年出版的《天体运行论》一书中指出，“地球并不是宇宙的中心，地球只是围绕太阳运行的一颗普通行星，而且自身又有转动”。哥白尼的“日心说”推翻了统治天文学千年的“地球是宇宙中心”的“地心说”，是人类对宇宙认识的第一次飞跃。此后，天文学和宇宙学的实验观察和理论研究不断地突破了人们关于宇宙构成的认知。地球不是中心，太阳也不是中心，甚至银河系还不是。随着爱因斯坦广义相对论的提出，人们才认识到宇宙根本没有中心。同样，暗物质和暗能量的存在是以前人类从未想象、也无法想象的事情。今天，随着暗物质、暗能量被证实在宇宙中占有很大比例，这难道不是对我们的宇宙观及物质观的极大冲击

和巨大突破吗？

也许，正是暗物质促成了宇宙结构的形成和演变，如果没有暗物质就不会形成今天的星系、恒星和行星，也就更谈不上今天的人类了。尽管宇宙在极大的尺度上似乎是均匀和各向同性的，但在一些小尺度上却存在着恒星、星系、星系堆积或星系团。我们知道，大尺度上能够维持物质运动的力就只有引力了。我们也知道，绝对均匀分布的物质之间不会有能使其运动的力。因此，今天所有的宇宙结构应该出自宇宙极早期物质分布的微小涨落，而这些涨落又会在宇宙微波背景（cosmic microwave background, CMB）中留下一些痕迹。如果我们不了解占宇宙几乎四分之一的暗物质的性质，不了解宇宙极早期暗物质的分布或涨落，就不能说我们已经了解了宇宙和宇宙的演化。只有进一步探索这些“不可见的宇宙”，找到暗藏在宇宙中的物质，才能真正全面地认识宇宙的构成；只有了解“暗物质”和“暗能量”如何影响银河系及整个宇宙的去、现在和未来，人类才能最终理解宇宙的起源。

所以说，暗物质的探究对宇宙学、天文学的发展具有重大的意义，同时对研究物质基本结构和基本相互作用的粒子物理学也是重大挑战。20世纪末美国国家科学技术委员会（National Science and Technology Council, NSTC）组织了“宇宙物理学”的跨部委的工作小组，研究21世纪的重大科学前沿问题，并在2004年5月初发表了“宇宙物理学”报告（封面照片见图1.4.1）。报告中提出了“建立夸克和宇宙的联系——新

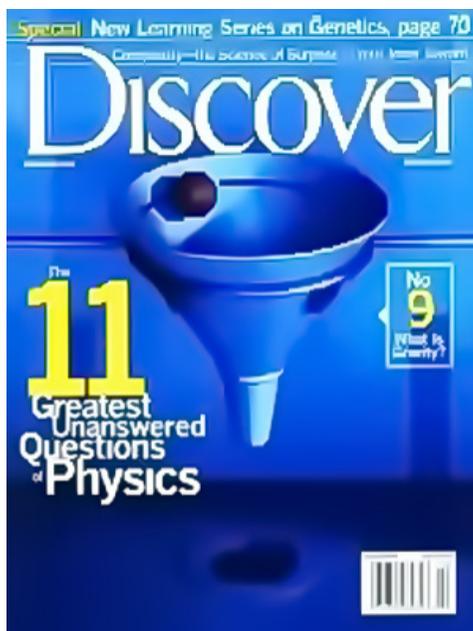


图 1.4.1 “宇宙物理学”报告的封面

世纪的 11 个科学问题”，其中第一个问题就是“什么是暗物质（What is the dark matter？）”。可见，暗物质的侦测与研究不仅是横跨“宇宙学”“天文学”“粒子物理学”三大学科的重大基础研究课题，而且是对这三大学科的重大挑战。

目前物理学界有两个理论：一个是关于宇宙结构和演化的宇宙学标准模型——大爆炸宇宙论；一个是关于物质基本构成和相互作用的基本粒子物理学标准模型理论。

暗物质密切关系到宇宙的生成与演变

“大爆炸宇宙论”认为：宇宙是 150 亿年前由一个极其致密和炽热的奇点在一次大爆炸后膨胀形成的。1929 年美国天文学家哈勃依据天文观察提出了星系的红移量与星系间距离成正比的哈勃定律，并推导出星系都在互相远离并不断膨胀。这就是说，不管你在哪里，也不管你向哪个方向看，远处的星系都正在快速远离你而去。换言之，宇宙正在不断地膨胀。这也意味着很久很久以前星体相互之间靠得很近很近。依照星系远离我们而去的速度可以推算出，大约 100 亿至 200 亿年之前的某一时间，它们应该聚集在同一地方，显然，此时的密度应该非同寻常的大。哈勃的发现暗示了存在着某个起始时刻，宇宙从此时刻开始互相远离膨胀。1950 年前后，俄裔美国科学家伽莫夫第一个建立了热暴胀理论。他提出，在宇宙极早期的时候，宇宙很小，然后有一非常短的暴胀阶段，其后宇宙立即变得很大。以伽莫夫建立的热暴胀理论为基础，经过之后的几十年努力，宇宙学家们为我们勾画出一部宇宙演化的历史：首先是宇宙起点的 10^{-43} s 大爆炸，接着 10^{-35} ~ 10^{-33} s 暴胀，暴胀期的温度为 10^{27} ~ 10^{32} K，主要成分为夸克、电子等基本粒子，而后温度下降。大爆炸后数分钟内出现了一些核反应，合成出宇宙中几乎所有的氦。随着膨胀的进行，宇宙逐渐变冷。宇宙中物质冷却的过程中聚结成原初的星系。原初的星系一方面分裂为恒星，另一方面聚在一起成为范围更广

的集团。随着恒星的诞生和死亡，逐渐合成出碳、氧、硅、铁这类重元素……图 1.4.2 形象地描绘出宇宙暴胀过程的几个时期的特点，图中的横轴表示时间。大爆炸理论引导着我们去追溯整个宇宙的演化，从时间的头几毫秒到地球的形成、生命的出现，甚至可能的未来。同样，如果存在暗物质的话，也应该在宇宙早期的 38 万年以前就形成了；暗物质粒子也应该是那个时候产生的，至少是在质子、中子等被称作重子物质产生之前产生的。随后，宇宙变得很冷了。

暗物质的概念不仅来自人们观察宇宙天体运动中的各种奇特的现象（如 1.2 节中的天体运动的典型例子），也出自对宇宙产生与演化的理论研究。

按照大爆炸宇宙学，整个宇宙的几何性质是由其质量 - 能量密度（或称宇宙密度）决定的。基于宇宙在大尺度上是均匀及各向同性的基本认识，宇宙的几何空间结构由所谓的罗伯逊 - 沃尔克（Robertson-Walker）度规来描述。根据宇宙物质密度的不同，由罗伯逊 - 沃尔克度规描述的宇宙有以下三种基本类型。

设宇宙的密度为 ρ ，存在一个临界密度（罗伯逊 - 沃尔克临界密度）为 ρ_c 。其数值为 $3H_0^2/8\pi G$ （其中， H_0 为当前的哈勃（Hubble）常数，下标 0 表示一个量的当前数值。 G 为牛顿的万有引力常数）。

（1）当宇宙物质密度高于临界密度 ρ_c ，宇宙的空间曲率为正，宇宙几何是球形的，是封闭的；

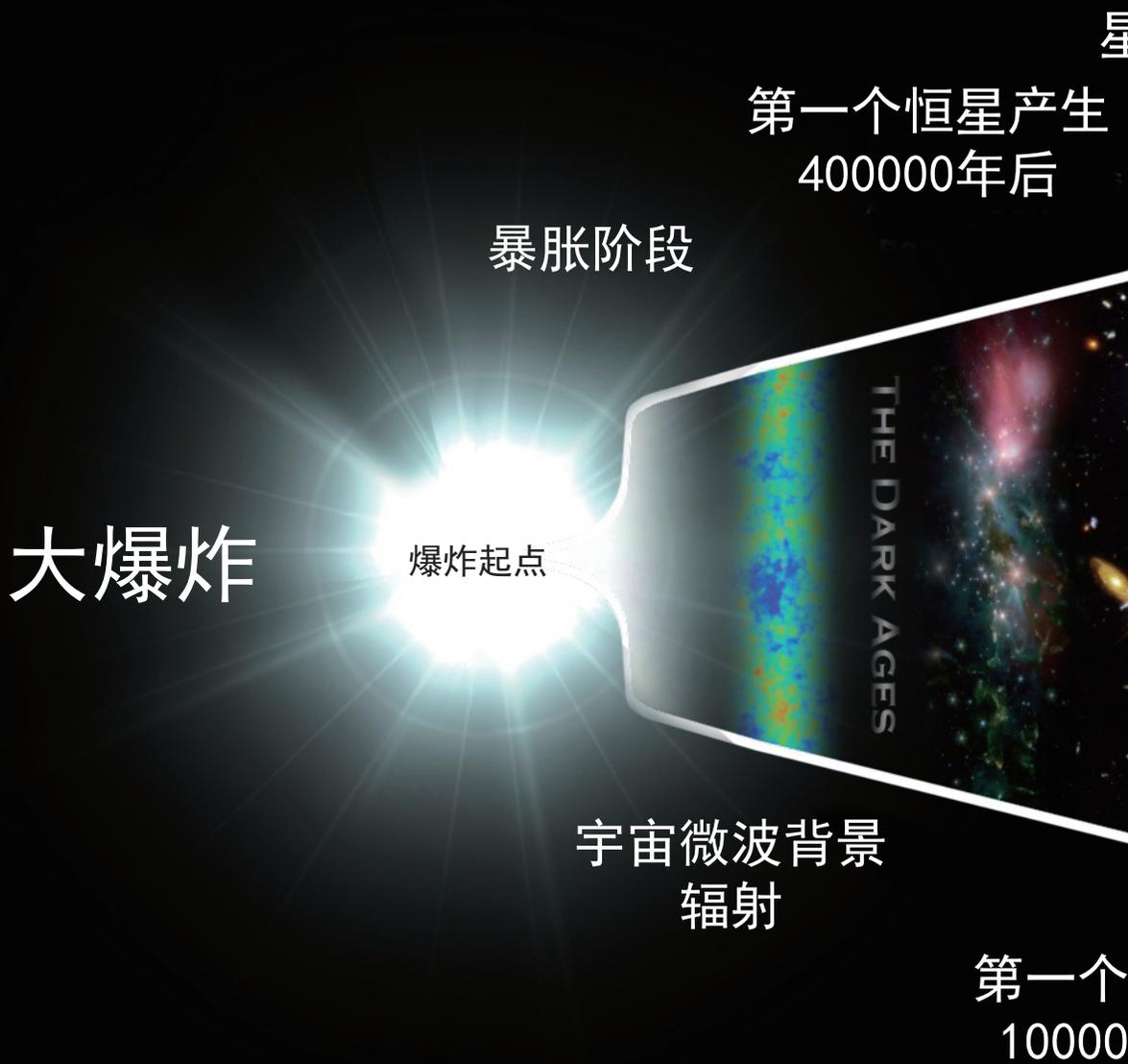
（2）当宇宙物质密度等于临界密度，宇宙的空间曲率为零，宇宙是平直的；

（3）当宇宙物质密度小于临界密度，宇宙的空间曲率为负，宇宙是开放的，呈马鞍形。

如果用 Ω 表示宇宙物质密度与临界密度之比（ ρ/ρ_c ），则上述三种情形分别对应于 $\Omega>1$ ， $\Omega=1$ 和 $\Omega<1$ 。

我们的宇宙适合于这三种情形中的哪一种呢？研究宇宙演化的理论有一条重要定律—— Ω 应满足下面的关系式：

图 1.4.2 宇宙暴胀过程



星系不断演化

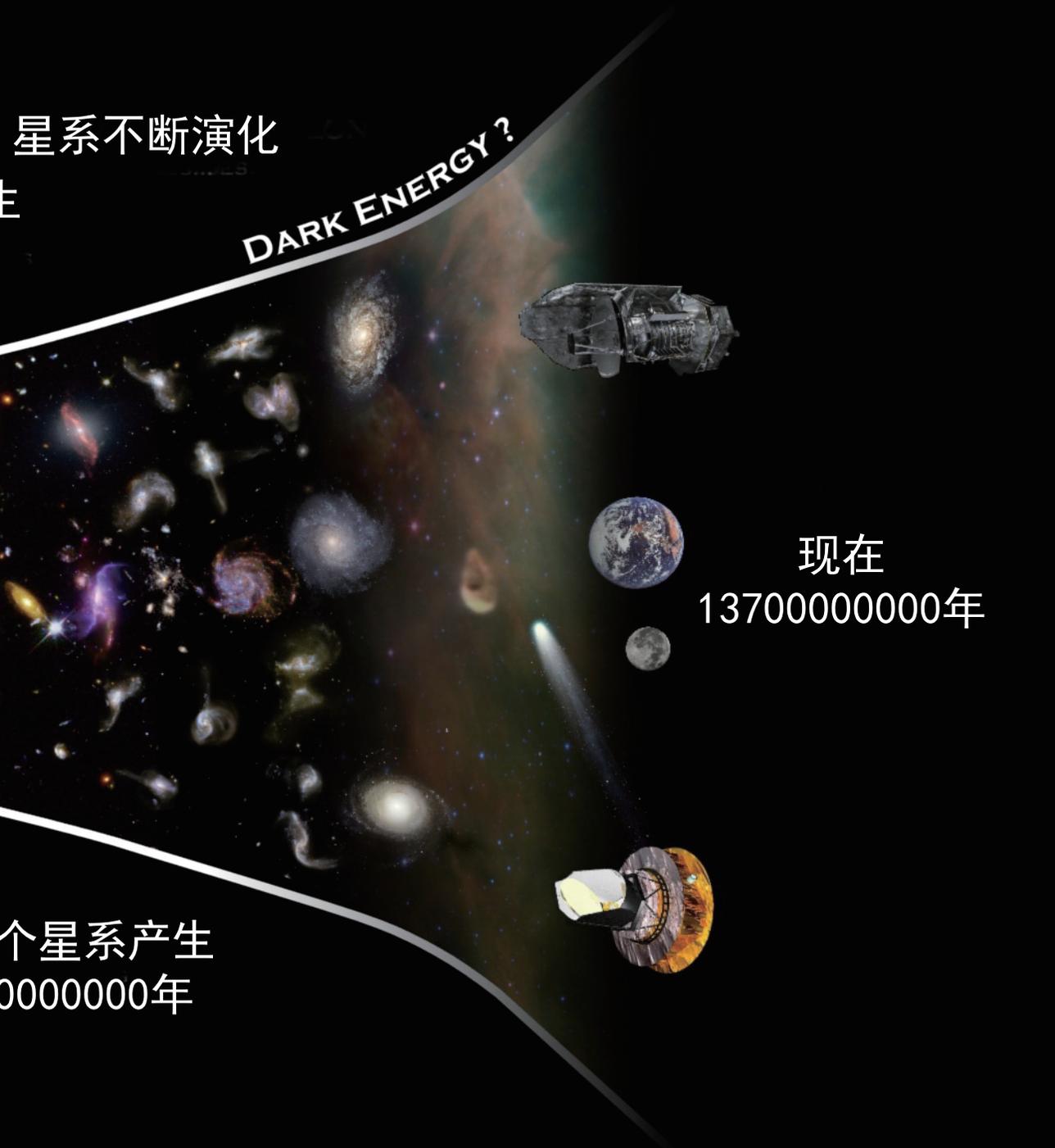
主

DARK ENERGY ?

个星系产生
0000000年

太阳系形成
700000000年后

现在
13700000000年



低了粒子碰撞或湮灭的频率，直到碰撞或湮灭不可能再发生为止。到大爆炸后大约 10ns (1ns 为十亿分之一 s)，宇宙不再拥有产生 WIMP 所需的高能量，同时也不再具备让它们湮灭所需的高密度，WIMP 的数量便保存了下来。

在假设 WIMP 的预期质量以及它们的相互作用强度（这决定了正反 WIMP 湮灭的发生频率）的基础上，物理学家计算出会保留下来的 WIMP 数量。让科学家非常兴奋的是，计算出来的 WIMP 的数量和质量刚好能够解释今天宇宙中的暗物质比例。科学家把如此不同寻常的吻合称为“WIMP 巧合” (WIMP coincidence)。这也是把 WIMP 作为首选暗物质粒子的重要原因。当然，这不过是在假设存在 WIMP 的基础上对宇宙学的观测事实的解释，只有当 WIMP 被真正探寻到才可以得到证实。

这样，两个十分重大而又非常基本的问题摆在我们面前：宇宙学的大爆炸宇宙论中能够使宇宙膨胀的动力是什么？目前所观察到的宇宙物质密度远小于临界密度的缘由是什么？前者可能是暗能量，后者可能就是暗物质。由此不难看出暗物质研究的重大意义了，对暗物质的探索绝对是天文学、宇宙学和天体物理学的重大前沿课题。

梦寐以求的基本粒子

我们知道，普通的物质是由最基本的粒子组合而成的。物质由原子、分子组成，原子由原子核和电子组成，原子核由核子（即中子和质子）构成，而核子由最基本的夸克构成。我们已知的基本粒子如图 1.4.3 (a) 所示，包括：六种夸克分别用字母 u、d、s、c、t、b 表示；六种轻子分别用： e 、 μ 、 τ 、 ν_μ 、 ν_e 、 ν_τ 表示以及它们的反粒子；另外有传递相互作用的粒子（传递电磁作用的伽马 γ ，传递强作用的胶子 g 和传递弱作用的 W、Z 粒子）以及希格斯粒子。另外，普通粒子的相互作用除引力外，还有电磁作用、核子之间的强作用以及轻子之间的弱作用。图 1.4.3 (b) 中形象地给出了不同粒子的几种相互作用，图中最低层的三种中微

子 ν_μ 、 ν_e 、 ν_τ 只有弱作用；中间层的三种带电的轻子参加电磁作用；最上面的六种夸克之间是强相互作用。我们要问：第一，暗物质粒子(如上面所说的 WIMP 粒子等) 是否是我们已经知道的这些粒子中的某种粒子？第二，暗物质粒子本身之间有什么样的作用？第三，暗物质粒子与普通物质粒子之间除引力之外还会有其他作用吗？第四，如果有作用，是普通物质粒子相互作用中的某一种呢，还是存在其他作用？……可见，寻找暗物质粒子不仅对粒子物理研究具有重大的意义，也是对粒子物理的一个重大挑战。这就不难理解，为什么把暗物质的寻找和研究称为 21 世纪“建立夸克和宇宙的联系”的首个重大课题了。

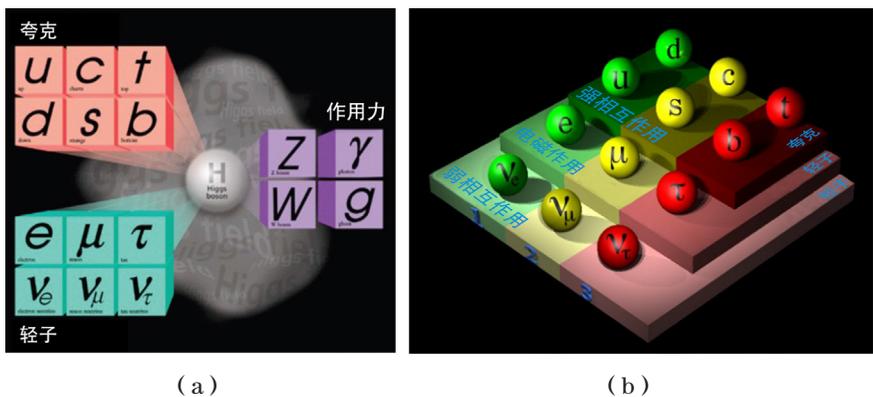


图 1.4.3 基本粒子及相互作用

(a) 组成物质的基本粒子和传递作用的玻色子；(b) 三种相互作用和相应的粒子

粒子物理学的标准模型理论十分成功地解释了各种实验现象，被广泛地接受。特别是最近，标准理论中预言的“上帝粒子”在最大强子对撞机 LHC 实验中被找到。“上帝粒子”(即物理上称之为的希格斯(Higgs)粒子)的证实，表明粒子物理学的标准模型理论近乎完美。

但是标准模型理论也有其不足之处。在粒子物理理论中还有一些棘手的问题，比如标准模型中著名的等级问题(Hierarchy Problem)，即为为什么在电弱统一的能标与其他几种作用统一的能标(或称普朗克能标)之间存在高达十几个数量级的差别？此外，基本粒子按照自旋的差别被

分为两大类，自旋为整数的粒子（被称为玻色子（Boson））及自旋为半整数的粒子（被称为费米子（Fermion）），而这两类粒子的基本性质截然不同。什么样的对称性能将这两类粒子联系起来呢？能够回答这些的理论被称为“超对称理论”。超对称是指费米子和玻色子之间的一种对称性。该理论认为，标准理论中的每个粒子都有和它镜像对称的粒子伴，如图 1.4.4 所示。超对称理论所预言的粒子叫超对称粒子。图 1.4.5 给出了和标准理论粒子对应的超对称粒子的名称和自旋。该理论还认为，虽然在相互作用能量低的时候（能标低的时候），电磁作用、强作用、弱作用，甚至引力作用的作用强度有很大不同；当相互作用能量很高的时候（能标很高的时候），就会趋于一致，而且可能在某个能标下几种作用几乎相同（见图 1.4.6）。我们也可以这样理解，宇宙中只有一种相互作用，只是能标低的时候表现为不同形式而已。例如电磁作用，在某些时候只表现磁作用，某些时候只表现电作用，但它们本质上是同一种作用在不同场合下的不同表现而已。

超对称理论大大简化了粒子物理的基本构架，约化了相互作用，但也带来了烦恼。最讨厌的是在基本粒子大家庭中凭空增添了成倍的成员。超对称理论还预言了一种“中性伴子”，它具有一定质量，寿命还很长。“中性伴子”之间的相互作用以及与普通物质的作用都很弱，很容易“穿过”正常物质。

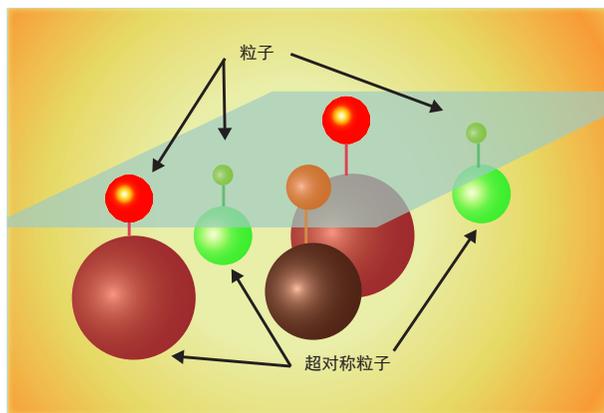


图 1.4.4 基本粒子及其镜像的超对称粒子示意图

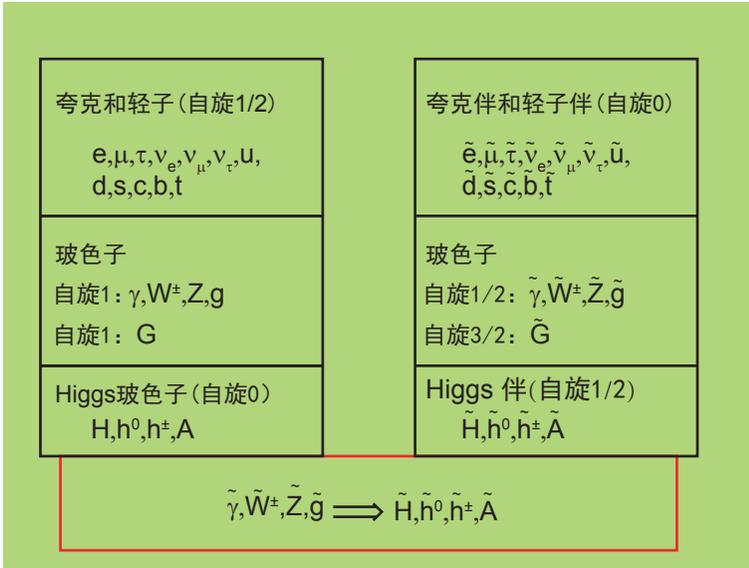


图 1.4.5 基本粒子与其对应的超对称粒子

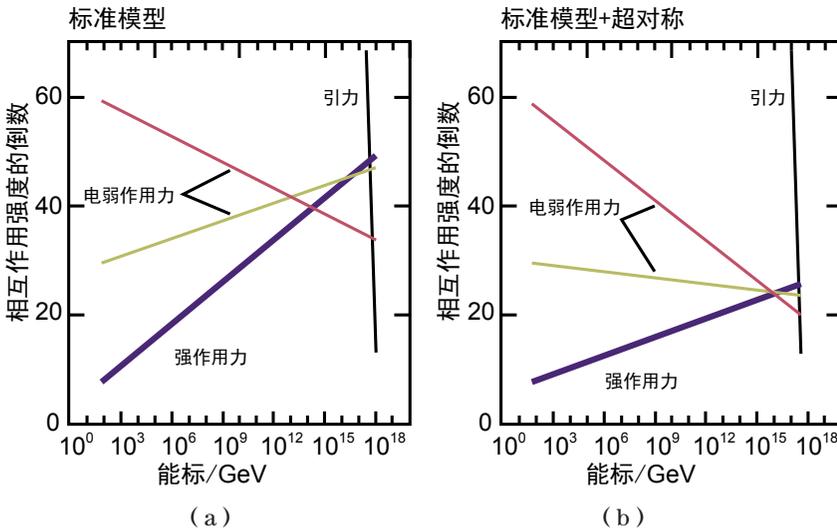


图 1.4.6 不同能标下的几种相互作用强度

遗憾的是，多年来这种理论所预言的那么多的超对称粒子，包括“中性伴子”，一个也没有找到。人们不禁要问，它们会不会是暗物质粒子呢？如果暗物质粒子是某种超对称粒子的话，将是对该理论重大的实验支持。从这里也不难看出，暗物质粒子的侦测对基本粒子物理学是多么

的重要，又是多么的需要。

物理学家们在展望 20 世纪物理学前景时认为，“19 世纪的物理学天空被‘两朵乌云’笼罩了”，20 世纪对这“两朵乌云”的探究出现了“量子论”和“相对论”，给物理学界带来了革命性的变革，极大地推进了人类对客观物质世界的认识。

21 世纪的今天，现代物理学的天空中又有“两朵乌云”——暗物质和暗能量。揭开暗物质和暗能量这“两朵乌云”之谜，很可能导致下一场物理学的革命，促成人类对物质世界和宇宙认识的又一次重大飞跃。

这就不难理解，为什么在 2008 年欧洲推出的“物理学长期发展规划”中将暗物质列为 21 世纪的六大科学难题之首；2009 年，中国科学院战略研究系列报告“创新 2050：科学技术与中国未来”中指出，暗物质是不远的未来可能出现革命性突破的重大基本科学课题。美国国家科学院发布的天文及天体物理“2012—2021 十年规划”中，暗物质和暗能量是主要的研究方向。

小结

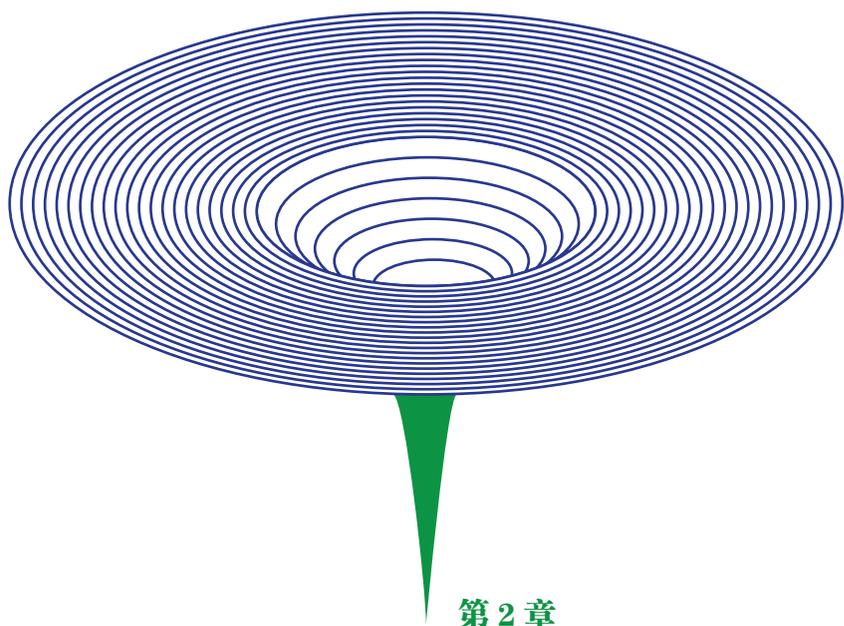
今天，我们已经信心满满地观察到几乎所有不同波段的宇宙，可以说是一览无遗地“看”到了整个宇宙。万万没有想到，所看到的如此浩瀚宇宙竟然只是它的很小部分，大部分是没有观察到的暗物质和暗能量。

诡异的暗物质既不发出任何波段电磁波，也不和任何波段的光发生作用。暗物质是用任何波段的探测器或望远镜都无法观察到的物质。科学家们之所以知道宇宙中存在暗物质，并不是因为真的“看见”了暗物质，完全是通过引力效应间接地感知到了它的存在。除了引力作用之外，目前还没有发现暗物质和“常规”物质之间的任何相互作用。

宇宙中的暗物质包括各种暗物质天体和分布广泛的各种暗物质粒子。暗物质密切关系到宇宙的生成与演变，也许它也是我们梦寐以求的

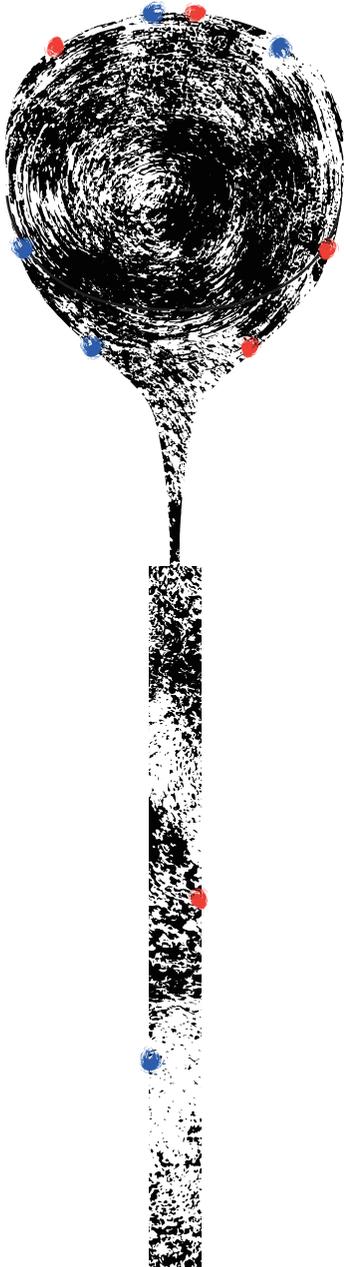
基本粒子。侦测和研究暗物质是天文学、宇宙学和天体物理学的重大前沿课题。

21 世纪的今天，现代物理学的天空中又有“两朵乌云”——暗物质和暗能量。揭开暗物质和暗能量这“两朵乌云”之谜，很可能导致下一场物理学的革命，促成人类对物质世界和宇宙认识的又一次重大飞跃。



第2章

暗物质的侦测方略



2.1 暗物质粒子的基本性质

必须大胆地猜想

暗物质粒子 WIMP 可能的性质

2.2 暗物质粒子的侦测方略

两类侦测方案

三种探测方法

2.3 暗物质粒子 WIMP 的直接探测

暗物质粒子与原子核的碰撞

如何辨别暗物质粒子事件

对探测技术的挑战

2.4 暗物质粒子 WIMP 的间接探测

暗物质粒子的湮灭

对间接探测技术的要求

2.5 人工产生暗物质粒子

小结

2.1

暗物质粒子的基本性质

我们对宇宙中大量星系和星系团进行观察，通过引力现象“感知”到了暗物质的存在，那么如何才能像探测普通物质那样直接或间接探测到暗物质呢？普通物质的探测都是通过强作用、弱作用和电磁相互作用来实现的。例如我们前面提到的海王星，通过望远镜观察到它的微弱光线才知道海王星的存在，并通过对光谱的测量和分析了解到更多有关信息。中微子也一样，开始只是由能量测量“感觉”到它的存在，直到观察到中微子和已知粒子的碰撞或散射（在物理上叫相互作用）的事例才真正得到确认。现在，我们已经通过引力知道了暗物质的存在，为什么还要对暗物质探寻呢？前面讲过，暗物质的天体不是构成宇宙的主要部分，宇宙的主要部分很可能是分布极广的暗物质粒子。探秘这些暗物质粒子的含义不仅仅是回答有无的问题，而是要知道：第一，暗物质粒子与普通物质粒子之间除引力之外是否还有其他作用？第二，如果有作用，其作用强度有多大，在相互作用中表现出的质量有多大？第三，如果有作用，是普通物质粒子的相互作用中的某一种呢，还是存在其他类型的作用？第四，暗物质粒子的种类、质量，在宇宙中各自的分布……

必须大胆地猜想

在人们还没有直接观察到暗物质的时候，还不了解它的真面目的时候，想要侦测它，只有一种办法，那就是先大胆地做一些假设或猜想，然后按照假设的暗物质性质设计实验并逐一进行验证。只有得到验证的假设才能被认可。就像前面讲的，现在人们普遍认为暗物质粒子的主要候选者是 WIMP，那我们就应该首先对 WIMP 的性质做大胆的猜想，再依据猜想设计出各种实验来设法“探测”到它，看看它与普通物质有无相互作用。如果有的话，并且与猜想的性质基本相符，我们才算侦测到它了。如果没有发现相互作用或者与事先的猜想不相符，说明我们的假设有问题，需改变所做的假设与猜想。由于目前人们普遍认为 WIMP 是最可能的暗物质粒子候选者，本章将以探测 WIMP 为重点介绍侦测暗物质的原理、方法和实验。

要想探知 WIMP，设计能够探测 WIMP 的实验，必须设想或者比较有根据地假设一些 WIMP 的基本性质，否则将无从下手。

暗物质粒子 WIMP 可能的性质

依据对宇宙中星系及星系团的观察，除引力外，对 WIMP 性质的猜想可归纳为以下几点：

(1) WIMP 应该是来源于宇宙大爆炸的粒子，而且很稳定（或寿命很长），直到今天仍然大量地存在于宇宙中。

(2) 每个 WIMP 的质量很大，有可能比质子的质量还要大得多。质子的质量为 1GeV 左右（即 6×10^{23} 个质子的质量大约是 1g ），而 WIMP 粒子质量是质子质量的几倍、几十倍或几百倍，在 $1\sim 100\text{GeV}$ 的范围。

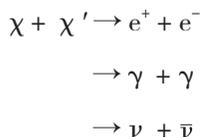
(3) 可以肯定地说，WIMP 不带电，是中性粒子。因为如果 WIMP 带电的话，早就可以通过电磁作用发现它们了。

(4) WIMP 和普通粒子之间不仅没有电磁相互作用，也不会有类似于原子核内那样的很强的核作用力；要有作用的话，也一定是非常的弱，

或许是像普通粒子 β 衰变中表现的弱相互作用，也或者是我们还不了解的其他类型弱相互作用。如此弱的作用，使得 WIMP 与普通粒子发生作用的概率一定非常小。当然，我们可以通过发生作用的事例率来判定其作用的强弱。

(5) 宇宙中 WIMP 的数量很大。通过宇宙的质量密度和 WIMP 的质量，可以估算出宇宙中 WIMP 的密度，其数值和光子的差不多（光子的密度为 $300\sim 400/\text{cm}^3$ ）。虽然数量大，但它与普通物质发生作用的机会并不多。有人估算，目前每秒钟正有数以十亿计的 WIMP 穿过地球以及地球上每种动植物的机体。考虑到 WIMP 在宇宙中的密度和相对地球的运动速度，再假设其与正常物体发生作用的强度接近于我们已知的弱作用的强度，那对于质量约 60GeV （相当 60 个质子的质量）的 WIMP，穿过一个体重为 70kg 的人体，每年可能发生大约 10 次撞击事件；若 WIMP 的质量为 $10\sim 20\text{GeV}$ ，则每年约有几百个这类粒子和人体内的原子核发生撞击。

(6) 像普通的正反电子（带正电的电子和带负电的电子）或正反质子（带正电的质子和带负电的质子）湮灭一样，正反 WIMP 碰撞后也可能有湮灭现象发生。所谓湮灭，就是正反粒子碰撞后，两粒子立即消失并在消失的同时有新的粒子产生。假设暗物质粒子 WIMP 和它的反粒子在发生碰撞时也发生湮灭，而且湮灭后会生成一对我们很熟悉的粒子（如一对电子，或一对伽马射线，或其他粒子等）。如果用 χ 表示 WIMP 粒子， χ' 表示 WIMP 反粒子，其过程可表示为



式中， e 代表电子， γ 表示射线； ν 表示中微子。当然，这只是我们的假设，需要实验证明。

(7) 依据宇宙或天文观测，认为暗物质粒子 WIMP 弥漫在整个宇宙中，虽然有一些分布上的涨落，在大尺度上讲基本上是均匀的。WIMP

在各星系或银河系中形成大致均匀的 WIMP “云雾” 或 “晕”。WIMP 较为均匀地弥漫在银河系中，太阳在 WIMP “晕” 中运动。我们知道，太阳在银河系中的速度是 220km/s 左右，而我们所在的地球在太阳系中运动，其速度大约为 30km/s。考虑到 WIMP 暗物质粒子自身的速度不高，就不难想象，WIMP 相对于我们地球的速度在每秒 250km 左右。在微观世界里，这个速度显然是比较低的。按照这些假设可知，除 WIMP 本身的热运动外，WIMP 相对于地球的动能是不大的。

2.2

暗物质粒子的侦测方略

2.1 节对 WIMP 的基本猜测告诉我们，银河系外 50 万光年的区域有较为均匀的暗物质晕，我们太阳系也同样在银河系的暗物质粒子晕中。图 2.2.1 所示为银河系及其周围的暗物质粒子想象的分布，图中有暗物质晕、银河系和其中的太阳系，图中公式是暗物质粒子热运动速度的分布。

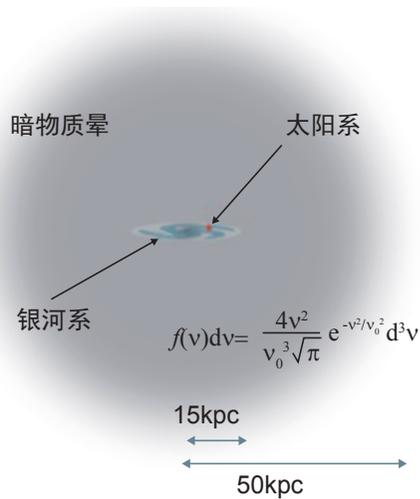


图 2.2.1 银河系及其周围的暗物质粒子分布示意图

基于这一猜测，我们需要借助实验来证实周围的这些暗物质粒子。除暗物质粒子本身的热运动外，还有地球围绕太阳的转动及太阳在银河系中的运动。我们周围的暗物质粒子相对在地球上探测器的运动速度可以通过太阳和地球的运动估算出来。依据前面的假设，对于我们的探测器而言，暗物质粒子不是静止的粒子，而是有一定速度（大约 250km/s），或者说是具有一定能量的粒子。其密度大约为每升十几或几十个。

两类侦测方案

有两大类实验侦测暗物质粒子 WIMP 的方案：一类是对宇宙中 WIMP 的探测，直接回答宇宙中是否存在有暗物质粒子，最方便的是在地球上寻找 WIMP，当然，也可以到空中或太空去寻找和侦测；另一类是设法人工产生 WIMP，而后对 WIMP 进行探测和研究。前者是被动地去找宇宙中的 WIMP，将探测器放到天上或地下，等待宇宙中的 WIMP 进入探测器并被探测。虽然有点“碰运气”和“守株待兔”的味道，但是一旦探测到 WIMP，不仅可证明我们的探测方案可行，而且能证明宇宙中的确有 WIMP 的存在。后者则不同，它是人为主动地用很高能量的普通粒子碰撞产生 WIMP，然后进行探测。该方案的可行性基于一个大胆的假设：当能量足够大（远大于 WIMP 的质量）的普通粒子发生碰撞有可能产生一对 WIMP。这种方案有利于我们主动地、有条不紊地探测和研究所产生的 WIMP，同时还能证明普通粒子可以产生暗物质粒子，当然也表明了普通粒子与暗物质粒子之间有某种相互作用。

在过去的几十年中，我们利用加速器已经产生过很多自然界没有或很难找到的粒子（这些粒子寿命极短，宇宙中即使有也稍纵即逝，无法抓着它们）。例如利用正负电子对撞产生寿命极短的 J/ψ 介子、W 和 Z 玻色子等。所以人们极富想象力地假设 WIMP 也可以通过普通粒子的相互作用产生出来，例如高能的正反质子对撞有可能在产生一般粒子的同时也会产生一对 WIMP 粒子 ($P + \bar{P} \rightarrow \chi + \chi'$)。如图 2.2.2 所示，加

速器中粒子对撞产生了很多粒子，其中有可能有 WIMP。很显然，这种方案比在宇宙中寻找要容易控制，可以比较容易仔细地进行研究，不过这还不能让我们直接证明宇宙中是否存在有 WIMP。

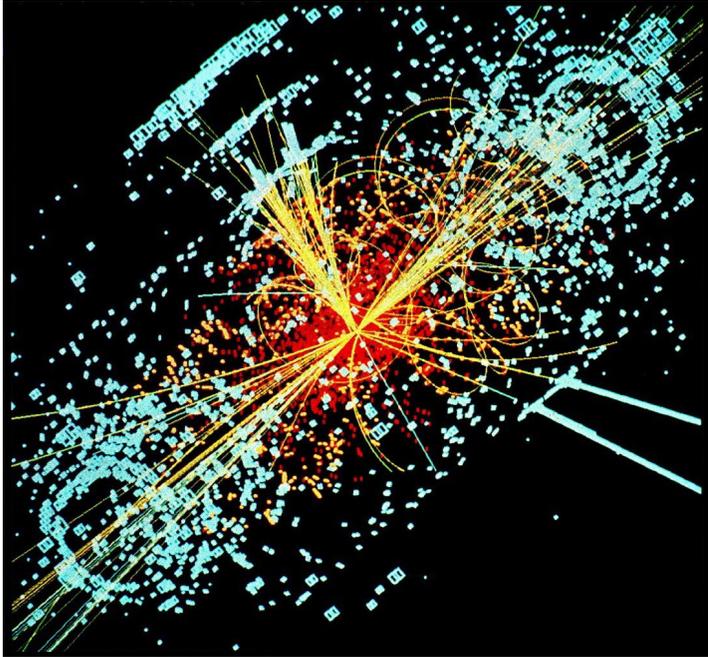


图 2.2.2 加速器中粒子对撞产生粒子示意图

三种探测方法

1. 被动探寻方案

在地球上或太空中探寻 WIMP 的被动探寻方案中，有两种不同的测量方法：一种是侦测 WIMP 与普通粒子之间碰撞的“直接探测”；另一种是侦测正反 WIMP 粒子之间湮灭现象的“间接探测”。

(1) 直接探测

要想知道 WIMP 与普通物质的粒子（如原子核）之间到底有无相互作用，最简单又直观的方法就是看看 WIMP 与普通的原子核是否发

生弹性或非弹性散射。由 WIMP 直接轰击普通的探测器介质的原子核，观察 WIMP 与其原子核之间有无发生相互作用的事件。如果没有发生作用，WIMP 就会穿堂而过。如果发生作用，那么探测器介质中的原子核就会从 WIMP 那里获得一定能量，这些获得能量的原子核会在探测器介质中产生我们已知的各种物理现象（例如，探测器介质中可能会产生电荷，也可能产生可见光等）。通过这些现象我们可以推演出 WIMP 的信息。这种探测方法被称为直接探测。图 2.2.3 所示为直接探测原理的示意图，图中 χ 代表暗物质粒子射入探测器，与探测器中的原子核发生作用后从探测器飞出，探测器中的原子核被“反冲”而得到一定的能量。不难看出，这种方法很适合在地球上的探寻（2.3 节中将详细介绍这种探测方法）。

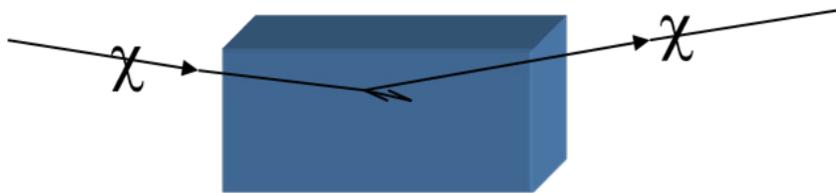


图 2.2.3 直接探测原理示意图

(2) 间接探测

间接探测方法是基于暗物质粒子 WIMP 粒子和它的反粒子之间有可能发生湮灭的假设。通过探测 WIMP 粒子和它的反粒子湮灭后生成一对电子（能量相同的两个正负电子）、两个伽马射线（能量相同的一对伽马射线）、正反质子、正反中微子等我们知道的粒子来探知 WIMP，WIMP 粒子碰撞也可能产生一对夸克，夸克再转变为很多其他粒子，如图 2.2.4 所示。湮灭后生成的粒子都是我们很熟悉的粒子，伽马也是我们很了解的高能量射线，都是很容易被探测到的，然后通过这些湮灭后生成的粒子推断出 WIMP 的存在与性质。这种探测方法被称为间接探测。不难看出，间接探测方法真正探测的粒子是我们很了解的普通粒子，所

使用的探测技术与粒子物理或核物理实验中的探测技术几乎一样，不过要把探测实验放到 WIMP 粒子及其反粒子浓度大（即 WIMP 粒子及它的反粒子湮灭机会大）同时湮灭后产生的次级粒子（如电子或伽马）不容易丢失的地方。很显然，将探测实验放到太空，至少是大气层以上的地方比较好，实验过程可以减少大气的干扰（2.4 节将详细介绍这种探测方法）。

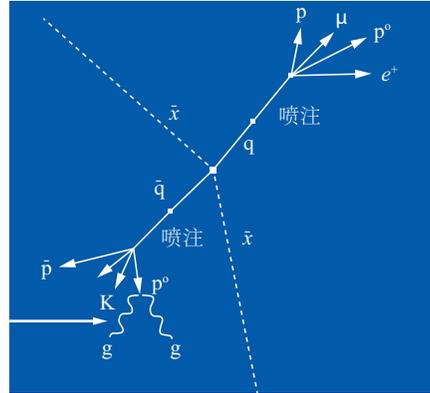


图 2.2.4 间接探测示意图，两个暗物质粒子湮灭后生成普通粒子

2. 主动探寻方案

主动探寻方案只有一种探测方法，即在人工产生 WIMP 的同时实现对 WIMP 的探测。虽然将探测器安置在对撞机附近很容易实现，但困难也很大。首先，普通粒子对撞产生 WIMP 的概率极小，千百万次碰撞才可能有一次产生。其次，产生普通粒子的概率极大，在能够产生 WIMP 的碰撞中还同时产生大量普通的粒子，这意味着要在大量普通粒子的背景中寻找 WIMP。由于探测器可以高效率地探测到普通粒子，而 WIMP 与探测器的作用概率极小从而很可能穿出探测器不留任何踪迹，这就意味着即使产生了 WIMP 也很难捕捉到它。这就需要通过能量或动量守恒来间接解析有无 WIMP 了（因为 WIMP 总要将部分能量或动量带走，2.5 节将详细介绍这种探测方法）。

3. 新物理的探寻

实际上，前面讲的探寻方案或测量方法都是假设存在有不同的物理相互作用或物理过程。如果没有这些物理过程，也就不可能实现对暗物质的探测了。图 2.2.5 表示了上述探寻方案所假设的基本

物理过程。图中，DM (dark matter) 代表暗物质粒子，SM (standard mode) 代表我们已经知道的标准粒子模型的普通粒子。图中从左往右的过程表示 $DM+DM \rightarrow SM+SM$ ，即两个暗物质粒子相互作用产生了两个普通粒子的过程，即间接探测的物理过程。从下往上的过程表示 $DM+SM \rightarrow DM+SM$ ，为暗物质粒子与普通粒子相互作用过程，它们之间可能是弹性碰撞，也可能是非弹性碰撞，即直接探测的物理过程。从右往左的过程表示 $SM+SM \rightarrow DM+DM$ ，为两个普通粒子相互作用产生两个暗物质粒子的过程，即人工产生暗物质粒子的过程。

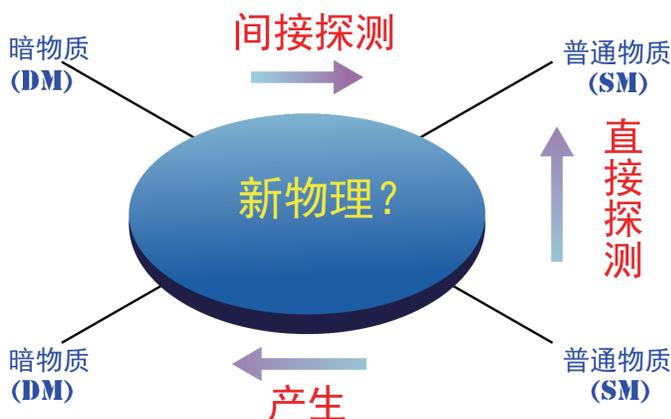


图 2.2.5 探寻 WIMP 所基于的新物理

不难看出，无论是第一种 WIMP 之间的相互作用，第二种 WIMP 与普通粒子的作用，还是第三种普通粒子作用产生 WIMP 都是我们猜想的相互作用，而且都是目前人们还没有发现或被证明的物理过程，通常称之为“新物理”过程。如果存在这些作用的话，其中都孕育着至今为止我们所不了解的自然规律，即上面讲的探寻方案或测量方法，其实质是基于所假设的新物理。

由此可见，探寻或测量暗物质粒子不仅仅是寻找暗物质，更是新物理的探寻。如果没有所假设的这些新物理过程，就根本谈不上对 WIMP 的探测。但是，一旦探寻到暗物质粒子就意味着发现了新物理，这将改变我们对物质世界的认识，其意义不亚于“量子论”和“广义相对论”

的创立。这也是粒子物理学家特别关注暗物质粒子实验探测和研究的重要原因。

当然，这些还只是我们的科学假设，需要有力的实验证实。不过，在对暗物质探寻之前这种假设又是必需的，这些假设是我们制定探寻方案的基础。依据已有的一些不全面甚至片面的物理征兆，大胆提出假设，而后进行实验和科学论证是人类认识自然和了解宇宙的基本路径。

2.3

暗物质粒子 WIMP 的直接探测

暗物质粒子与原子核的碰撞

检验暗物质粒子与普通粒子有无作用，就是要看它们能否发生直接碰撞。相互作用越强，碰撞的概率越大，单位时间内发生碰撞的事例就越多。如果没有任何相互作用就永远不会有碰撞。

暗物质粒子 WIMP 的直接探测就是要看到 WIMP 与探测器介质中原子核的直接碰撞，通过直接碰撞告诉我们 WIMP 是否和普通的物质粒子有相互作用。可以通过直接碰撞的概率获得相互作用的强度，通过碰撞中的能量和动量传递获得 WIMP 的质量等信息。总之，只有观察到 WIMP 与普通介质中的粒子的碰撞（物理上讲的相互作用），我们才能说探寻到暗物质了。

怎样才能知道 WIMP 与普通介质中的粒子发生相互作用了呢？我们知道，如果探测器中的原子核与暗物质粒子发生了碰撞，并从暗物质粒子得到一定的反冲能量，就可以通过该原子核获得相互作用的信息。问题可以归结为两点：一是设法提高 WIMP 与探测器介质中的原子核发生相互作用的机会；二是提高探测从 WIMP 那里获得一定能量的原子核的效率。

图 2.3.1 所示给出直接探测 WIMP 的示意图。图中灰色的大球代表 WIMP 暗物质粒子，红色和绿色小球是探测器介质中的两种原子核。当 WIMP 射入到探测器介质中与介质中的原子核作弹性碰撞，原子核被反冲的同时 WIMP 也被散射（图中右下方的灰色球）。这是典型的两体弹性碰撞，也称作“核反冲”事件。介质中原子核被反冲并从 WIMP 获得一些能量，得到能量的原子核离开原来位置并将围绕外面的电子甩掉成为“裸核”。显然，被反冲出来的“裸核”是带电的离子（图中没有画出电子）。带电的离子是我们十分了解的粒子，它与探测器介质的其他原子有电磁相互作用，很容易被探测到。如果我们应用各种手段来测量被反冲并带电的原子核（或称裸核）的能量或动量，就可以推导出 WIMP 的质量大小。通过发生的事件多少估算出发生碰撞的概率，也就知道它们之间的相互作用强度了。从这个意义上讲，所谓的直接探测也并非真正的直接探测，而是通过探测被反冲的原子核来实现的。

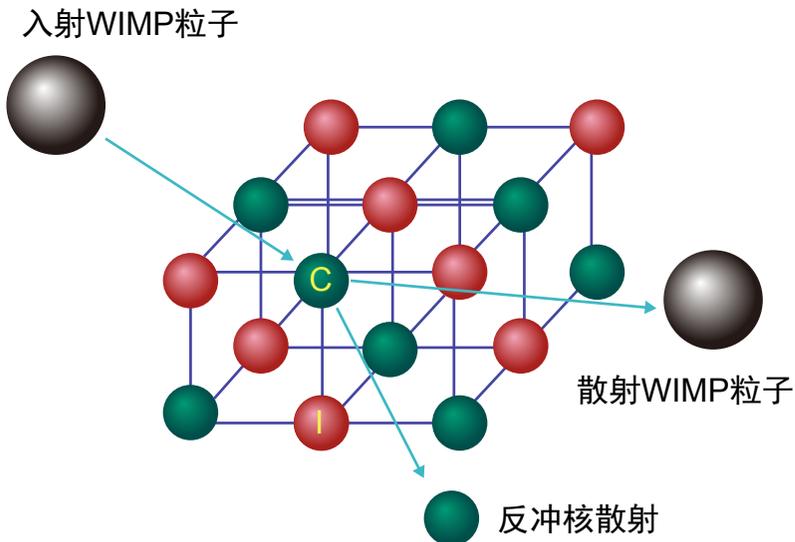


图 2.3.1 直接探测 WIMP 的示意图

如何辨别暗物质粒子事件

1. 单一事件辨别法

暗物质粒子 WIMP 与探测器中普通的原子核作用概率非常小。探测器周围有大量的伽马射线、带电粒子和宇宙线粒子等，这些射线或粒子与原子核作用概率非常大，成为探测器的本底事件。我们必须一方面采取一切措施减少本底事件，另一方面要有辨别暗物质粒子事件和本底事件的能力。

如果我们能通过暗物质粒子的“核反冲”事件和本底事件的特征对其加以区别，就可以对每一个事件做分析，将暗物质粒子事件从大量本底事件中挑选出来。不过这是一件很困难的事，一是反冲原子核的能量很低，很低能量的核反冲事件与本底事件的特征很相似；另外，外界的电磁干扰和探测器本身的电子学噪声都会影响其辨别能力。当然，如果 WIMP 的质量很大，反冲原子核的能量大，其难度还小些，辨别的灵敏度会更高些。

伽马射线本底很大，首先要将 WIMP 事例和伽马射线本底事例区别开来。我们知道，伽马只和原子核外的电子发生作用，即只能反冲电子。而 WIMP 与原子核发生作用，是核反冲事件。我们必须将这种“电子反冲”事件与“核反冲”事件区分开来。图 2.3.2 给出电子反冲和核反冲的示意图。

另一个更重要的问题是中子本底问题。中子与原子核的作用与暗物质粒子一样，都能将原子核反冲出来。到目前为止，还没有任何办法来区分 WIMP 和中子的核反冲事件。唯一的办法是采取一切可能的措施不让中子进入探测器中；或者精确地知道进入探测器的中子数量和产生“核反冲”事件的数量，而后将这部分扣除。

假若很难以单个事件的特征（或称个体特征）来鉴别暗物质的话，也可以通过对比暗物质粒子事件和本底事件的群体特征来鉴别暗物质。其中，反冲核事例率和能量的关系（或称“反冲核能谱”）以及弹性散

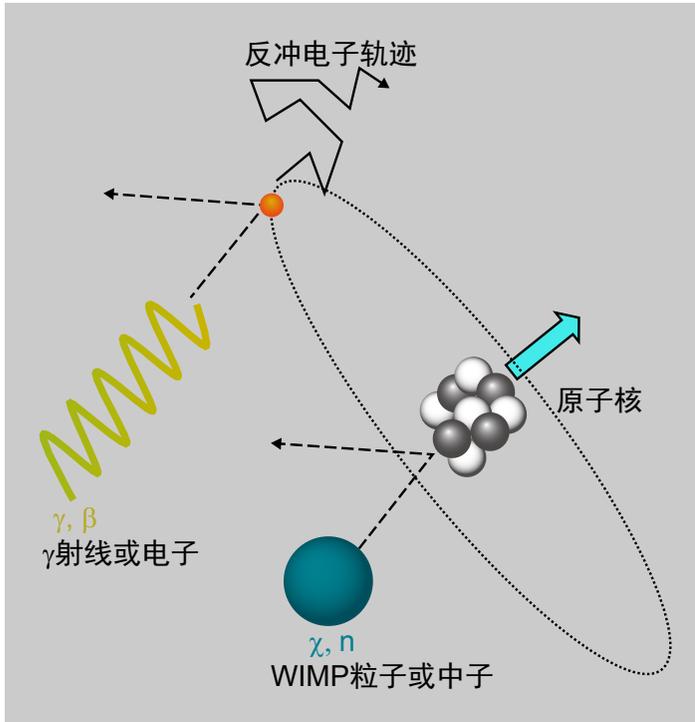


图 2.3.2 电子反冲和核反冲示意图

射事例率和时间的关系（或称“弹性散射时间谱”）就是两个重要的群体特征。虽然群体特征的差别不能确定单个事件的属性，即不能确定哪个事件是暗物质粒子事件和哪个事件是本底事件，但可以确定有无暗物质粒子事件的存在的事实。“能谱测量法”就是依据“反冲核能谱”来鉴别暗物质粒子的方法，“年调制效应检验法”和“日调制效应检验法”是依据“弹性散射时间谱”来鉴别暗物质粒子的方法。

2. 能谱测量法

如果没有办法通过对每一个事件进行比对，将 WIMP 的“核反冲”事件挑选出来，我们可以利用“核反冲”事件的能谱与本底事件能谱的不同来发现 WIMP。所谓“核反冲”事件的能谱就是不同“反冲核”动能的事例率。本底能谱基本上是“反冲电子”的能谱。如果我们测量到的能谱不同于本底能谱，就有可能有 WIMP 所产生的“核反冲”事件的

能谱。或者说，将所有可能的实验本底扣除掉之后仍然有“多余”的部分能谱无法解释，并且与理论预期的 WIMP 能谱相近，我们就可以认为是看到了 WIMP。

当然，“扣除”不是一件容易的事。因为相对 WIMP 与核的碰撞事件相比，本底事例量实在是太大了，高出了十几个量级。必须将本底数量减少到与 WIMP 粒子的核反冲事件到同一个量级的水平，才有可能将其分离出来，这是对实验的极大挑战。

很显然，我们最好预先知道“核反冲”事件能谱和本底能谱的分布。前者我们可基于假设的 WIMP 的理论模型计算得到，后者可以通过实验获得。下面对“核反冲”事件能谱的理论预言做一简单分析。

假设 WIMP 的质量为 M_x ，动能为 E_x 。图 2.3.3 表示 WIMP 与静止的原子核碰撞，WIMP 被散射，散射角为 θ ，原子核被反冲并获得能量 E_R 。核反冲能量 E_R 的大小，与两者的夹角 θ 有关，角度 θ 小，核得到的反冲能量就小；角度 θ 大，核得到的反冲能量就大。在无法对角度进行测量的情况下，或者说，考虑所有可能反冲角度的情况下，发生碰撞事例率和反冲能量 E_R 的关系为

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{R_0}{E_0 K} e^{-\frac{E_R}{E_0 K}}$$

$$K = \frac{4m_W m_N}{(m_W + m_N)^2}$$

式中， K 为约化质量， R 为事例率， R_0 为总事例率。 E_0 为 WIMP 最可几的入射动能。

总事例率 R_0 的大小反映出 WIMP 与原子核的作用强度。由于 WIMP 和原子核的作用是极其微弱的作用， R_0 值极小，所以事例率极其的低。上式还表明，反冲能量越小，其事例率相对越高，事件率随反冲核的能量增加呈指数下降。

实际远不止这么简单，其事例率还与原子核的形状因子、自旋，以及探测器的效率、分辨率等有关。上式中并没有包括这些因素，这里就不多讲了。图 2.3.4 给出氙 (Xe)、硅 (Si)、锗 (Ge) 与 WIMP 碰撞后，

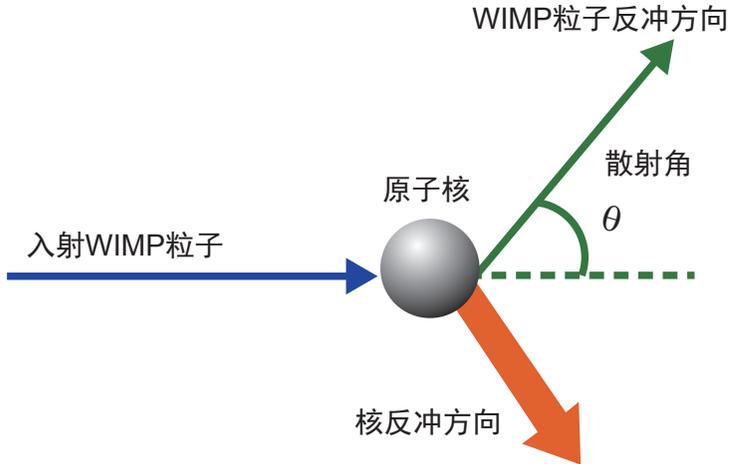


图 2.3.3 WIMP 与原子核碰撞散射中的动量和散射角

三种原子核的反冲能与事例率的关系。反冲核能谱在半对数坐标中基本上是一直线。这里假设相互作用的截面为 10^{-45}cm^2 ，WIMP 的质量为 $100\text{GeV}/c^2$ 。图中横坐标为反冲核的能量，单位是 keV；纵坐标是事件数，单位为每公斤每天每 keV 能量区间里的事件数(用 cpkkd 表示)。图 2.3.5 给出了质量为 10GeV 的 WIMP 将 Ge 原子核反冲出来后，反冲 Ge 核能谱，图 2.3.5 (a) 为不考虑任何修正的能谱，图 2.3.5 (b) 为考虑了修正后的能谱。

相互作用的种类不同，其强度就不同，作用概率也就不同。一般用作用截面来表述概率。为什么作用截面会与概率有关呢？不难想象，假设有两个小球在一定空间中随机运动，球的直径越大，体积越大，相互能“看”到的截面就越大，碰撞的机会就越大；反之碰撞概率就小。所以，截面大小可以用来代表碰撞概率，也就可以间接代表相互作用的强度。例如，电磁作用的强度比较强，作用概率大，作用截面在 10^{-24}cm^2 左右；而弱作用的强度很弱，作用概率很小，其相互作用的截面在 $10^{-45}\sim 10^{-42}\text{cm}^2$ 之间；两者之间相差约 20 个量级。

因为微观粒子都非常小，碰撞截面也很小，不可能用宏观物理中的平方厘米作为单位。为了方便计算，就规定以 1cm^2 的负 24 次方 (10^{-24}cm^2) 作为单位，称之为 1b (巴)，而 1mb (毫巴) = 10^{-3}b ， 1vb (微

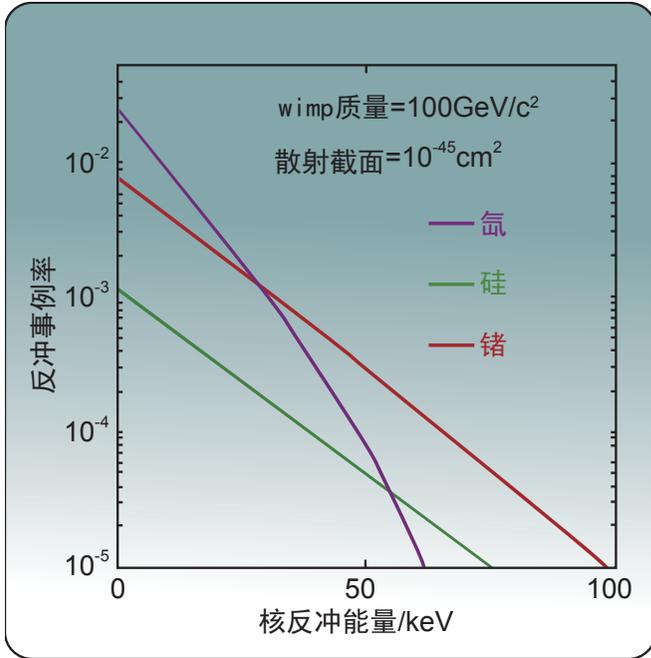


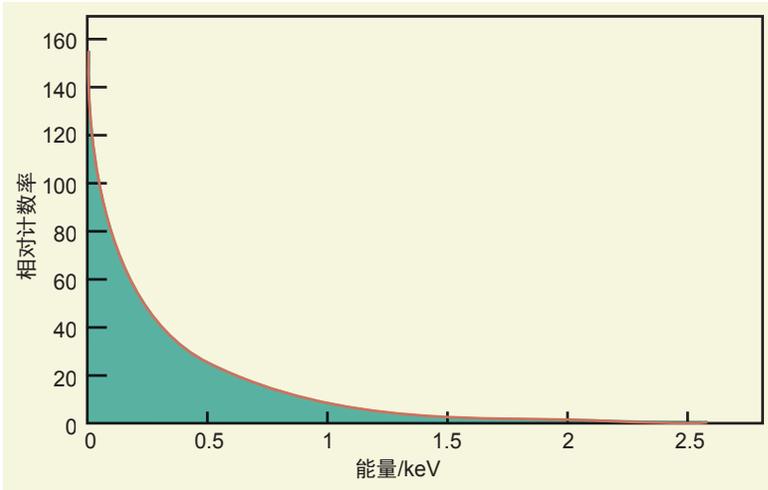
图 2.3.4 Xe, Si, Ge 三种原子核与 WIMP 碰撞的反冲能与事例率的关系

巴) = 10^{-6} b , 1 pb (纳巴) = 10^{-9} b 。

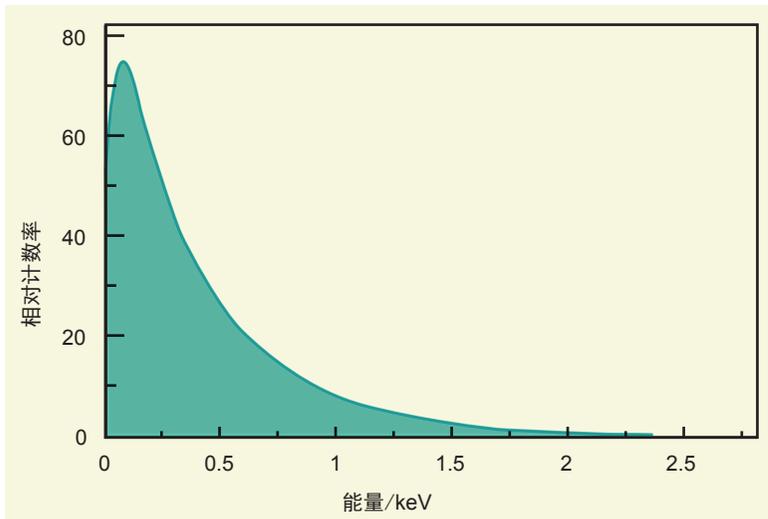
当然，碰撞的概率与性质不仅和 WIMP 有关，也与探测器介质的原子核的质量有关。从图 2.3.4 中三种不同介质的原子核的事件率数可以看出：

(1) 由于相互作用很弱，发生碰撞概率很小，所以事例率极低。当探测器介质的质量为 1kg 时，有可能 100 天才会发生一次 WIMP 与原子核的反冲事件 [用 $\approx 0.01 / (\text{kg}/\text{d})$ 表示，即 1kg 的探测器介质，在 1 天中只有 0.01 次碰撞]。图中给出的事件率是基于碰撞截面为 10^{-45} cm^2 计算出来的。

(2) WIMP 相对于地球上探测器的速度只有 250 km/s 左右，这意味着 WIMP 相对撞击原子核的速度很小，原子核得到的反冲能量很低，在 keV 的范畴。即使 WIMP 的质量是质子的质量的 100 倍，总的动量也还是太小，传递给探测器介质的原子核的能量也不大。图 2.3.4 中是假设 WIMP 的质量为 100 GeV (相当于 100 个质子的质量) 时，Xe、Si、Ge



(a)



(b)

图 2.3.5 Ge 反冲核能谱

(a) 无修正的能谱; (b) 修正后的能谱

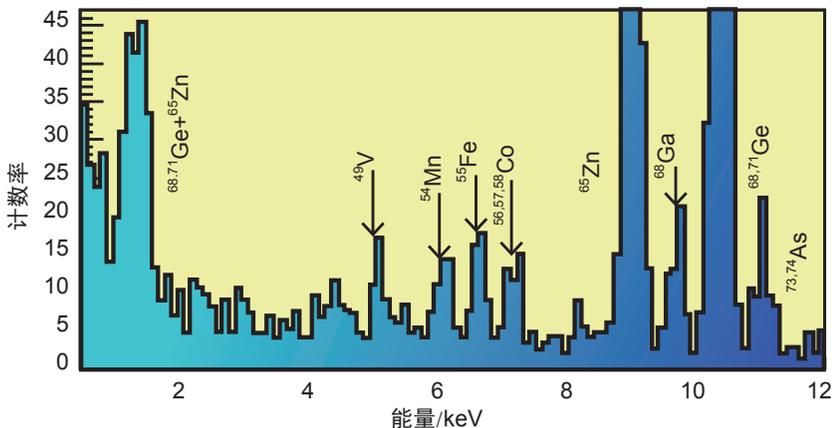
三种核的反冲能量，都在 keV 量级。

(3) 从事例率与反冲能的关系可以看出，反冲能量越小，其事例率越高，即很大部分的碰撞里原子核得到能量都比较小。为了提高探测能力，要求探测器有探测小反冲能量事件的能力，也就是要求探测的能量

阈值（能测量的最低能量）要小。

本底事例的能谱就需要实际测量了。虽然采取了严格的措施来减少本底（包括屏蔽和鉴别等），仍有“剩余”的本底在探测器中。图 2.3.6 所示为 Ge 探测器实验测量得到的能谱。除连续能谱外，还有不少单能峰。图中标出了伽马射线对应的能量及来源，不少是 Ge 探测器内部的由于宇宙线产生的（“宇生”）放射性元素的特征 X 射线。Ge 探测器有很好的能量分辨能力，不论是外部进入的还是探测器内部的本底，只要是单能的伽马射线就可以从能谱中看到有单能峰的出现。我们知道，表示 WIMP 的核反冲谱是连续的（见图 2.3.6），这些单能峰显然不是 WIMP 事件，我们可以直接扣除掉。最后，将扣除掉单能峰的本底谱与上述理论预言的能谱做比较，就可以知道有无探测到 WIMP 事件了。

当然，本底少、WIMP 事件很多时，能谱测量的方法是很不错的。我们没有必要知道哪个事件是 WIMP 事件，哪个是本底事件，这是能谱测量的优势。但实际工作没有这么简单，因为无论是本底事件还是 WIMP 事件都很少，而且随机事件的统计涨落很大，如何在少事件的情况下从能谱中辨别有无观察到 WIMP 事件也是一个难题。



（图中的箭头分别代表各种放射性同位素（ $^{68,71}\text{Ge}$ 、 ^{65}Zn 、 ^{49}V 、 ^{54}Mn 、 $^{56,57,58}\text{Co}$ 、 ^{68}Ga 、 $^{73,74}\text{As}$ ）放射出的 X 射线峰的能量）

图 2.3.6 高纯锗探测器测量到的典型能谱

另外，能谱测量方法依赖于理论模型。不同的模型给出不同的能谱预期，得到不同的实验结论。当然，我们可以对不同理论进行实验检验，也不失为好办法。

3. 年调制效应检验法

上述两种探测 WIMP 的方法都需要将 WIMP 事件与本底事件区分开来，一个是通过单个事例特征的不同，一个是通过事例能谱特征的不同。不过也可以利用 WIMP 事件随时间的周期变化，来检验 WIMP 是否存在。一年中 WIMP 事件随时间的周期变化叫“年调制效应”，这种通过“年调制效应”来分辨 WIMP 的方法不需要非常严格地区分本底事例或将本底事例完全扣除。

前面讲过，我们地球在银河系大致均匀分布的暗物质粒子“晕”中运动。太阳以每秒 220km 的速度绕银河中心运动，地球又围绕太阳运动。相对于太阳而言，暗物质粒子像“风”一样吹来，如图 2.3.7 (a) 所示。因为地球又围绕太阳运动，地球相对暗物质粒子“晕”的运动则是这两个运动的复合运动。不难看出，冬天 12 月，两运动的方向一致，其速度是两速度之和；夏季 6 月，两运动方向相反，其速度是两速度之差，即在一年中有一周期变化。如果相对速度加大，同样密度的暗物质粒子与探测器介质碰撞的概率就加大，碰撞的能量也大一些，探测到的事件多一些；相反，相对速度较小时探测到的事件率会较低。WIMP 与原子核发生碰撞的概率在一年中有周期变化，这就是形成所谓“年调制效应”现象的缘故。如果我们能探测到这种“年调制效应”，也不失为探寻暗物质粒子的一种好办法。

不过有一个前提，即普通粒子与探测器介质碰撞率不应随季节变化，即本底事例不能有年调制现象。可惜的是，这种周期性的现象有很多，如宇宙线强度、温度、湿度等都有可能随季节变化。只有把这些随季节变化的因素扣除干净才行。图 2.3.7 (b) 所示为实验探测器观察到的事件率与时间的关系，可以看出，事件率随时间有很明显的周期变化。

另外，年调制效应也很微弱，不同季节的事例数的差别很小，只有百分之几。发生碰撞的事件具有随机特性的涨落，也会因为事例涨落给观测这种效应带来很大的困难。

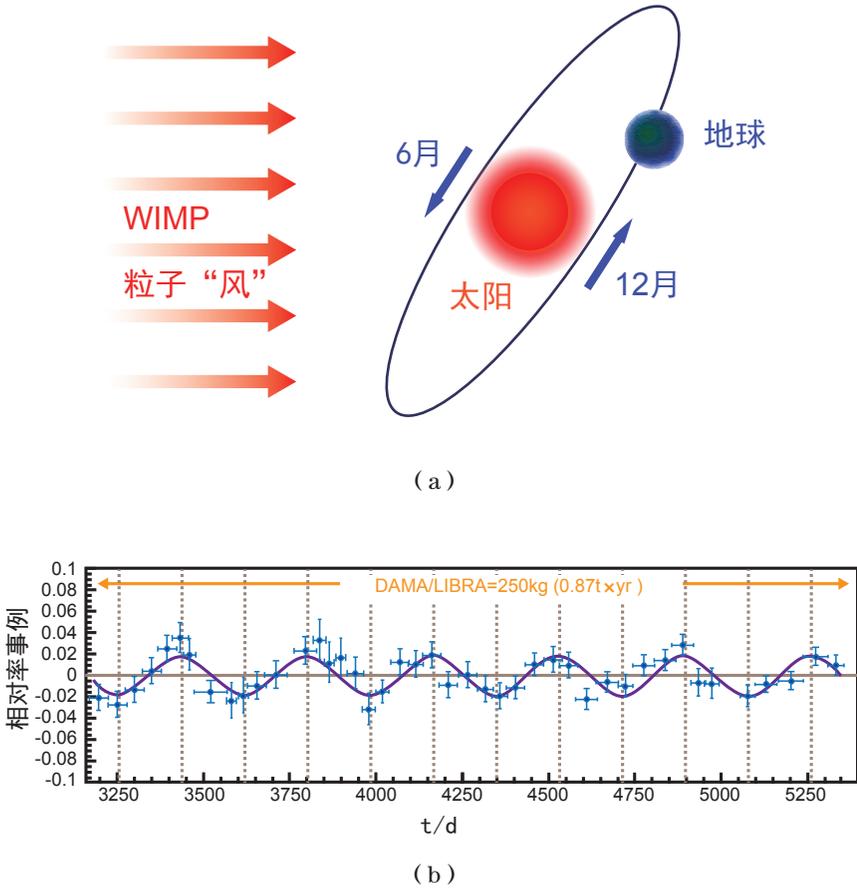


图 2.3.7 地球在银河系暗物质粒子“晕”中相对运动的观察实验

- (a) 地球在银河系暗物质粒子“晕”中相对运动示意图；
- (b) 实验探测器观察到的事例率与时间的关系

4. 日调制效应检验法

地球绕太阳的公转造成了年调制效应，但在分析时，并没有考虑地球本身的自转。实际上，由于地球的自转，相对于地球的某个探测器而

言，暗物质粒子“风”来的方向也随时间改变。如图 2.3.8 所示，早上 0 点钟时候，WIMP 垂直入射进入探测器，下午 12 点钟的时候水平入射进入探测器。如果我们能够知道暗物质入射的方向的话，就可以得到进入探测器的事例在一天中随时间的变化，这叫“日调制效应”。而本底事件没有方向性，不同时刻的事件率没有变化。这样，我们可以通过“日调制效应”获知暗物质的存在。

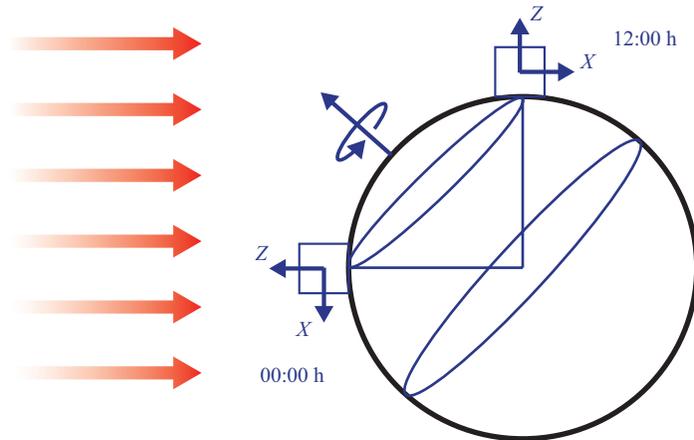


图 2.3.8 地球自转与暗物质粒子“风”

对探测技术的挑战

暗物质与普通物质的作用极弱，事例率很低。但是，周围环境的放射性物质放出的伽马射线及各种带电粒子（如 β 粒子、 α 粒子等），还有很高能量的宇宙线粒子（如质子， μ 粒子等）。这些普通物质粒子和探测器介质的相互作用是电磁作用或强作用，其反应截面比弱相互作用高 10~20 个数量级，造成探测器极大的本底。其本底事例率比暗物质事件要高几十个数量级。“在万亿倍的本底事例中把暗物质的作用事例找出来”成为主要难题之一。一方面要尽力减少这些本底，另一方面要有很高的本领来分辨这些本底事例，对直接探测实验提出的极大挑战。

另一个问题是如何探测到反冲能量很小的事例。这要求探测器对如此小能量的事例具有很高的灵敏度。然而能量越小本底事例也越多，这又要求探测器对小能量本底事例有很高的甄别和分辨本领。

在碰撞概率很小而 WIMP 的密度又不很清楚的情况下，只有靠增大介质中原子核的数量来获得较多的暗物质事例。这就要求探测器介质尽可能的大。设计出建造体积很大、能量测量下限又很低的探测器是极其困难的课题。而且体积越大本底越多，越难获得低能量的探测灵敏度。这又是一个挑战。

归纳起来，对探测技术的要求包括：

(1) WIMP 进入探测器与其原子核碰撞，就像 WIMP 打靶，将探测器中的原子核“敲打”出来。由于被“敲打”出来核（物理上称为反冲核）的能量很小，不可能从探测器介质中飞出，这就要求在探测器内就能立刻探测到这个反冲核。可见，探测器既是 WIMP 的靶子，又必须是能十分灵敏地感知反冲核出现的探测器。

(2) 由于发生作用的概率极小，作为靶子的探测器介质必须很大，应该是含有很多原子核的探测器。探测器的规模很大，目前达到了吨量级。

(3) 反冲核的能量很小要求探测器必须有很低的探测能量的下限，即探测阈很低。目前最低的探测阈达到 100eV 或几十 eV。

(4) 放射性物质无处不在（如铀、钍、钾、铯等放射性物质），这些物质释放的射线、中子、电子等都是辐射本底事例的来源。因此，探测器自身不能含有辐射本底的杂质，即无自身的辐射本底。如果有克服不掉的自身辐射本底，最好具有分辨本底事例和甄别本底事例的能力。大多本底事例是探测器介质中被打出的电子（称为电子反冲事例），而 WIMP 是将原子核打击出来（称为核反冲事例），如图 2.3.9 所示。不过，中子本底与 WIMP 事例一样，也是核反冲事例，这种本底几乎无法与暗物质粒子事例区分开来。唯一的办法是将中子阻挡在探测器之外。

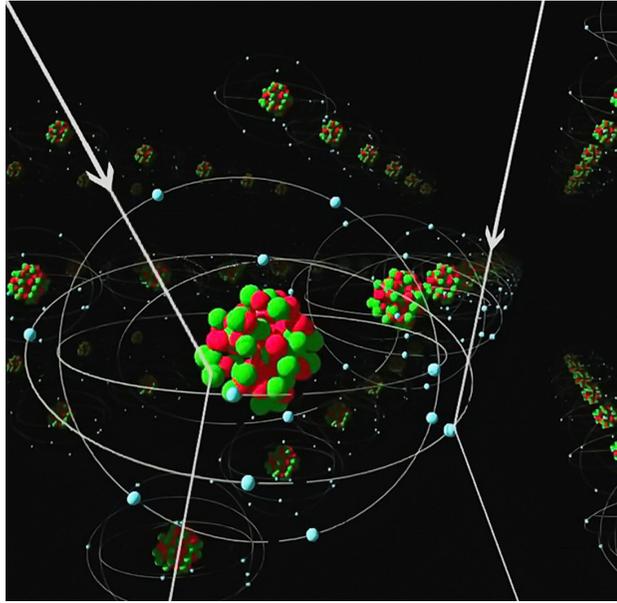


图 2.3.9 电子反冲的本底事例核和反冲事例

(5) 宇宙线带来的干扰。从太空到达地面的宇宙线如图 2.3.10 所示。从宇宙空间来的原初宇宙线的能量很高（大部分是质子等），到达地球大气层后由于和大气中的元素发生作用而产生大量次级粒子（如 π 粒子和 μ 粒子等），这些次级粒子有很大的穿透力，穿过大气到达地球表面，甚至穿透很深的地面。这些宇宙线和地球表面的物质相互作用，会产生更多的放射性物质或次级粒子（如伽马、中子等）。宇宙线本身以及它的次级粒子成为严重的本底事例。宇宙线通量很高，每秒每平方厘米就有一个宇宙线粒子到达地表，不难估算，每天每平方分米就有近 9×10^4 个宇宙线粒子。人工地将这些宇宙线阻止在探测器外几乎是不可能的事情，只有几百米或上千米厚岩石下或者几千米的水才有可能把大部分宇宙线挡住。

另外，宇宙线会将探测器中的介质或周围的屏蔽体“活化”，将本来稳定的物质转变为放射性物质（通常叫做“宇生”放射性）。例如，高纯锗探测器在海平面上被宇宙线活化，生成 Ge-68。Ge-68 可以放出 9.22、9.25、10.3keV 的 X 射线，其半衰期 271 天。又如，宇宙线中的

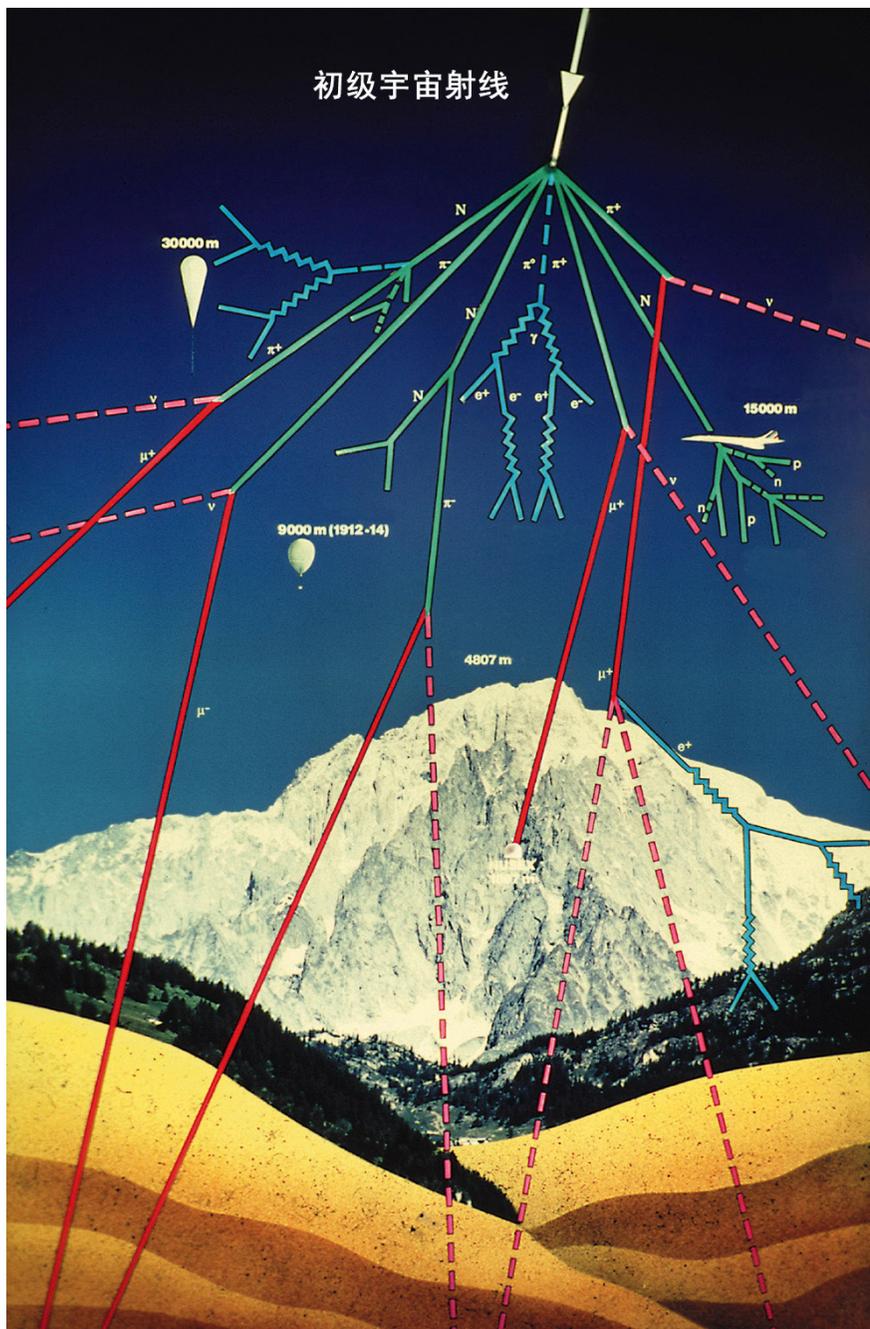


图 2.3.10 从太空到达地表面的宇宙线

中子可以在探测器内通过裂变反应生成氙，氙的 β 衰变寿命很长（12.7 年）。由宇宙线形成的“内照射”本底事件，是地面上无法避免的本底。

为了避免宇宙线本身和它的次生本底，以及“宇生”本底，直接探测实验探测需要在很深的地下或水下进行。为避免探测器周围放射性的影响，还需要把探测器安排在能够屏蔽中子、 γ 射线的屏蔽体内。