

中国科学院高能物理研究所“小粒子 大宇宙”系列课程

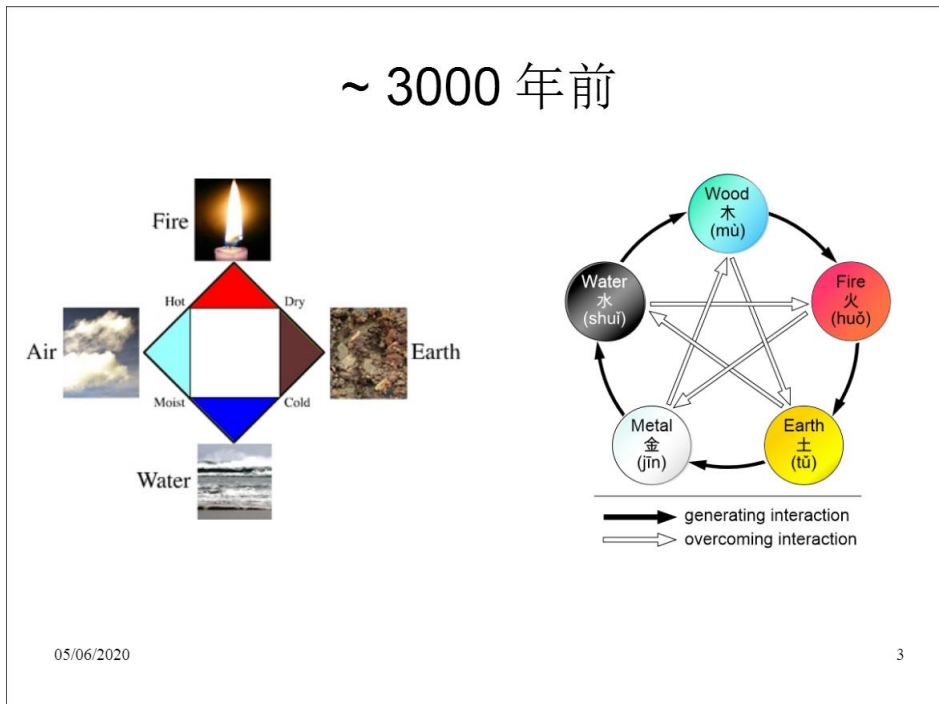
第二讲：粒子世界的未解之谜以及 Higgs 工厂

阮曼奇

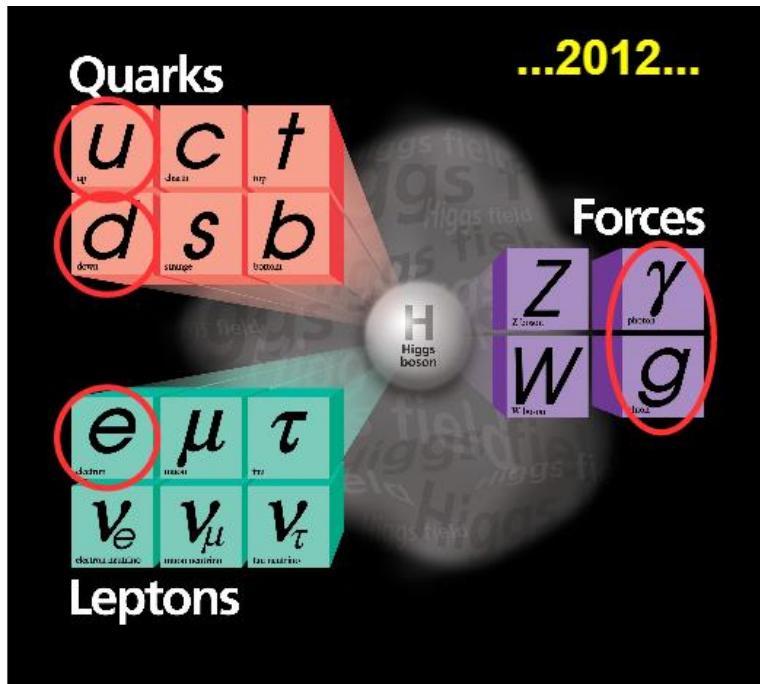
大家好！

欢迎来到“小粒子 大宇宙”系列课程。这里是中国科学院高能物理研究所。我是阮曼奇。

这次科学公开课的主题是粒子物理世界的未解之谜以及我们去探索它们的一个重要手段——Higgs 粒子工厂。说到粒子物理，我们首先要理解它研究的基本对象。粒子物理研究的是两个非常古老的问题：“这个世界是由什么组成的”以及“这个世界是怎样运行的”。实际上从我们人类有了文明开始，我们就从来没有停止对这两个问题的探索。在 3000 多年前我们对这两个问题的认识是这样的。那个时候大家知道在西边有希腊文明，在东边有我们的中华文明。在希腊人当时看来，这个世界是由 4 种基本元素水、火、土、气所组成的。而在东方，中国和他相对应的有五行学说，金、木、水、火、土。100 多年前，我们对这个问题的认识就提升到了原子模型这样的答案。而这个原子模型的确立，应该来说是科学史上非常重要的一件事情。因为从那个时候开始，我们对周围所见到的所有物质、所有元素有了一个统一的诠释。这是 100 多年前我们对这个问题的认识。



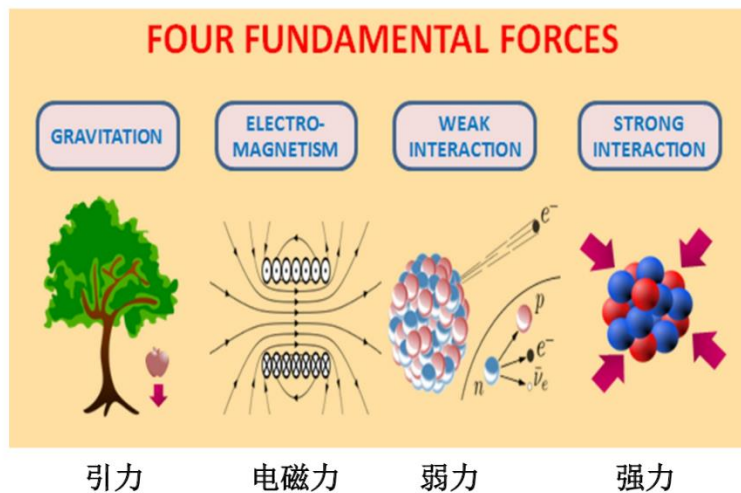
到了今天我们对这个问题的认识又进一步的升级。今天在粒子物理看来我们的世界是由标准模型粒子所组成的。标准模型的粒子谱，大家可以看到还有很多，它看起来比原子模型还要更加复杂。其实在标准模型的粒子当中，有一部分就是我们常见的原子的组成部分。这些部分包括电子，同时也包括原子核的组成部分。原子核的组成部分，如果用我们今天的观点来看，当中包括了两种夸克和胶子。同时原子的激发、发光等过程，会发射或者是吸收光子，所以光子也是我们的老朋友，也在这个图得到了体现。



我们今天对这个问题的认识，已经远远的超越了原子模型。有很多的粒子是我们在日常生活当中看不到的，但这些粒子实际上在漫长的宇宙演化当中发挥着不可或缺的作用。我们可以说这当中任何一种粒子如果缺失的话，都会导致比如宇宙无法演化出生命等结果。简单点来说，我们今天对“世界是由什么组成的”这样的一个关键问题的认知，就是这个世界它的组成部分包括了我们的标准模型的这些粒子。

那么对第二个问题，这个世界是怎样运行的，我们今天的答案是：这个世界是在四大基本相互作用的支配下来运行的。这四大基本相互作用包括了电磁相互作用、引力相互作用、弱相互作用和强相互作用。

四大相互作用



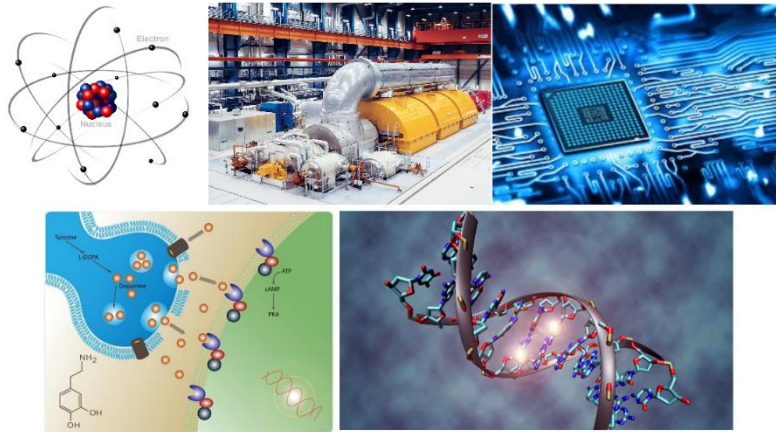
05/06/2020

5

电磁相互作用，实际上大家应该很熟悉。因为我们今天的文明离不开电，我们要发电，要传输电，我们用的手机、平板电脑、芯片这些东西，都离不开电。而实际上电磁相互作用的内涵比我们这种狭义的电力要广泛得多。因为电磁相互作用指的是任何交换光子所导致的

相互作用。这些相互作用就包括了支持我们生命的相互作用，比方说感受到摩擦力、我们的心理活动等等。所有这些相互作用，它其实背后都是电磁相互作用。

电磁相互作用： Everything



05/06/2020

6

第二种相互作用是强相互作用。强相互作用当中很重要的一部分就包括像太阳发光在内的相互作用。因为太阳的相互作用，实际上是把四个氢原子聚合成一个氦，同时在这个过程中损失质量。由于质量就是能量，这个过程也会发出大量能量，使得太阳发光发热。

强相互作用： 聚变

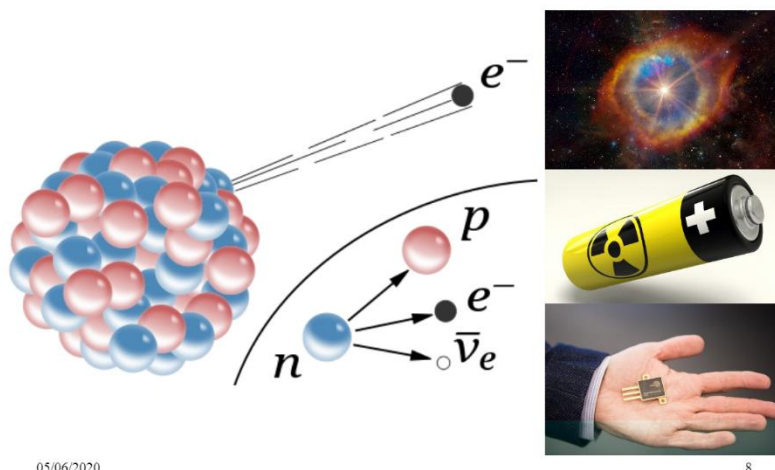


05/06/2020

7

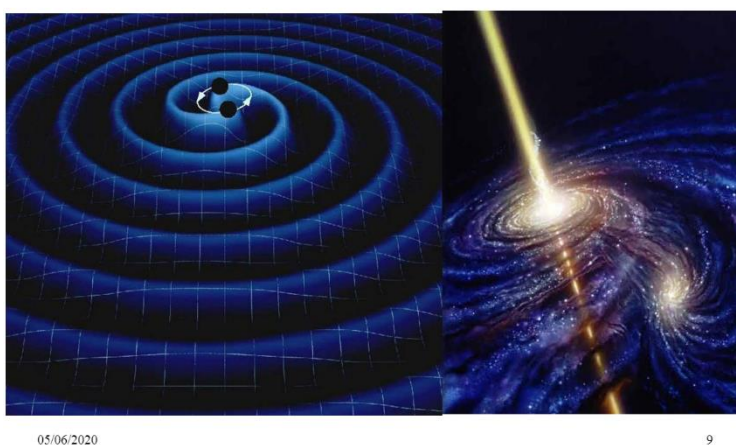
弱相互作用同样也不陌生。因为弱相互作用当中包括了我们的核能、原子弹，甚至包括了遥远的超新星的爆发等等。这些现象背后的一个核心的推动力，就是弱相互作用。

弱相互作用：裂变



最后说到大家的老朋友引力相互作用。大家知道牛顿认识到把苹果从树上拽下来的力，和让月亮绕着地球转的力，本质上是一样的，鉴于此发现了万有引力。

引力相互作用：黑洞，天体。。。

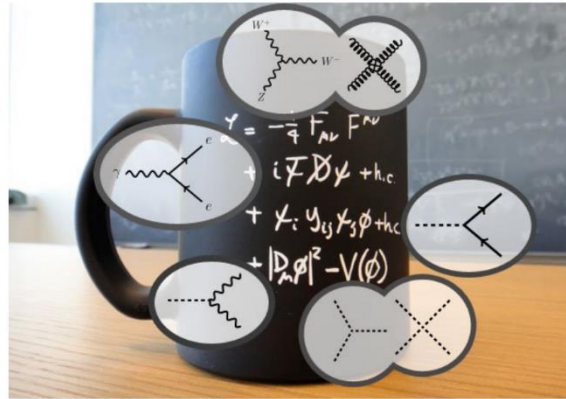


标准模型为基本相互作用的描述提供了一个基本框架。我们刚才已经提到过一次标准模型这个词，我们说这个世界的组元是标准模型当中的基本粒子。那么刚才说到的四种相互作用当中的三种，电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用，可以在标准模型的框架下得到一种统一的诠释。

我们最后可以把标准模型写成这样一个简单的式子，它简单到甚至可以在你的茶杯上写下来。可以看到我们人类肯定经过了很多非常聪明的人们的不懈的努力，一级一级抽丝剥茧地归因到这样一个相对简单的式子。

标准模式同时也预言了大量的粒子。其中除了有原子的基本组元，还有大量的其他类型的粒子，比方说顶夸克、**Z 粒子**、**W 粒子**等，这些粒子因为他们的寿命非常短，不少直到最近才被人们在实验上确认发现。但这些都是非常重要的。我们可以说这些粒子如果当中任何一个缺失、或者任何一个的性质发生一些变化，那么今天的宇宙就很可能和我们现在观测到的宇宙会非常不一样。

标准模型：以简单、优美的数学形式，统一描述了电、弱、强相互作用



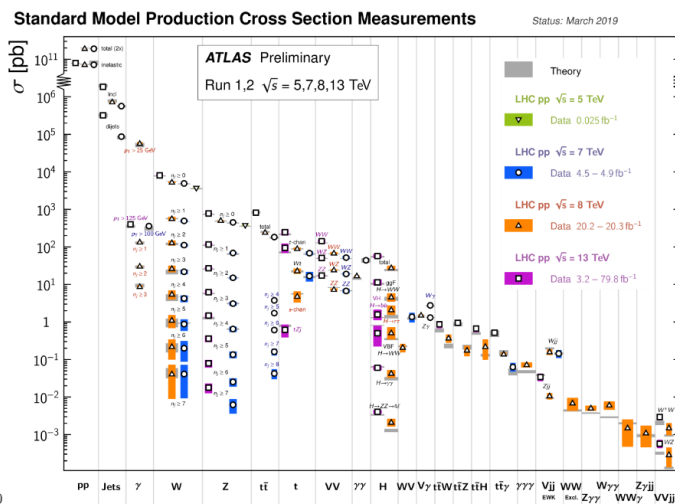
- 相关诺奖
- 2008
- 2004
- 1999
- 1979
- 1965
- 1957
- 1949

05/06/2020

10

标准模型还有一个非常成功的地方，在于它基本上统一地描述、诠释和预言了所有我们在高能物理实验，特别是在对撞机实验当中看到的高能物理实验数据。下面这张图相对比较复杂，先给大家稍微解释一下这张图上面的横轴，上面的每一个点表示的是一个不同的物理过程，而纵轴是我们表示这个物理过程有多么容易发生，这个量我们称为截面，你可以这样认为实际上就是它发生的一个概率。那么标准模型它会计算出来这样一个发生的概率，而这个发生的概率我们实际上可以通过实验去进行检测。大家可以看到，在十好几个量级的范围之内，标准模型的预言和实验的结果是高度吻合的。所以这样一张图也说明了标准模型巨大的成功之处。

标准模型：预言并诠释了几乎所有的高能物理实验数据



05/06/2020

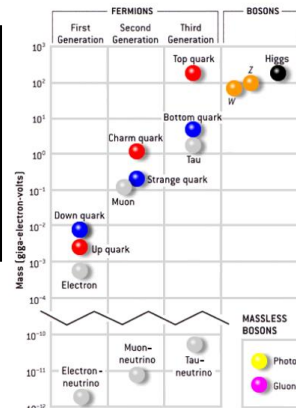
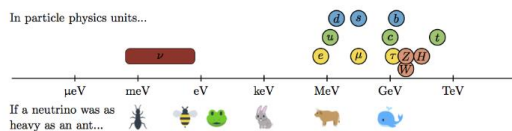
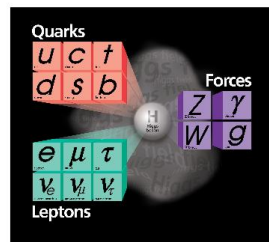
13

标准模型也为我们对宇宙演化的理解奠定了一个非常稳固的基础。我们基本上都清楚了从宇宙大爆炸之后的 0.1 个纳秒到今天所有的物理过程。有同学可能要问 0.1 个纳秒之前是什么事情，实际上我们现在还不那么了解。这些事情也是我们希望能够通过进一步的研究和探索去弄清楚。

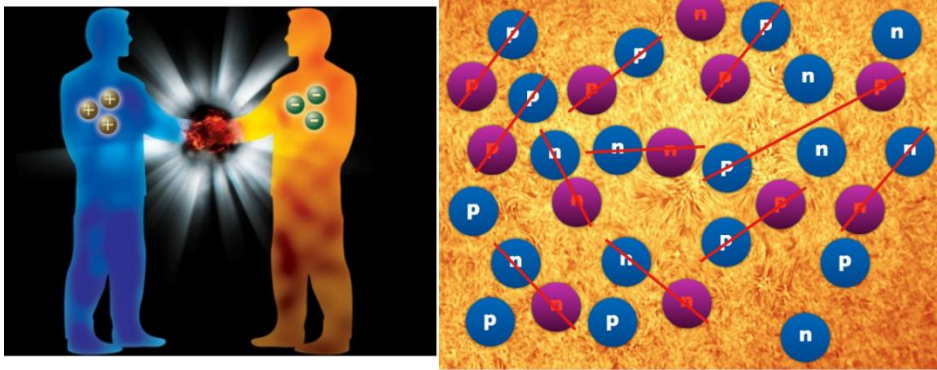
刚才说到了标准模型的成功之处，但是标准模型同样有大量的事情是无法解释的。这些无法解释的问题当中包括了中微子的质量，因为在标准模型看来中微子是没有质量的，但实际上测到的中微子确实是有质量的。中微子有质量这样一件事情突破了标准模型的框架，那就意味着背后一定有一个更新的物理原理。除了中微子质量这件事情之外，我们还面临着质量等级问题。质量等级问题是什么意思呢？标准模型预言了大量的粒子，这些粒子也在实验中被发现了，那大家发现了一个很有趣的现象：这些粒子的质量是非常不一样的。这些粒子当中最轻的中微子和最重的比方说顶夸克，它们之间的质量差了 15 个量级，1 后面 15 个 0。这个巨大的质量差比蚂蚁到蓝鲸的体重的比还要夸张，而另外一方面标准模型又相信这些粒子当中有很多粒子的质量是同源的。所以这件事情就非常的诡异。我们相信背后一定有某种机制决定了这样一个非常丰富、跨度非常大的标准模型的质量谱。还有一个问题是，为什么我们宇宙当中的物质比反物质要多。因为物质和反物质原来是对称的，如果对称性能够得到保持的话，我们认为现在宇宙当中的物质应该和反物质是一样多的，但实际上我们的世界主要是物质组成的，那反物质到底去哪了呢？或者说这些物质是怎么产生的？这样一个问题，标准模型并没有给我们一个非常满意的答案，也需要我们进一步的探索。

质量等级

- 对比与顶夸克
 - 电子轻 5 个量级；
 - 中微子轻 15 个量级！
 - 它们的质量真的是同样的机制产生的吗？

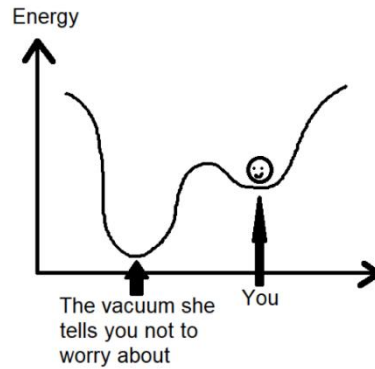


为何宇宙中的物质比反物质多？



与此同时，还有一些更重要的问题，包括宇宙的稳定性的问题。在我们看来今天的宇宙可能并不是完全稳定的，如果它不是完全稳定的话，它有一天可能会像水发生沸腾一样，发生一个相变。发生相变就意味着在宇宙当中在某处可能会产生一个“气泡”，而这个“气泡”可以以非常大的速度开始扩张。在我们今天的标准模型看来，我们的宇宙既不是完全稳定的，也不是不稳定的，它是一个亚稳态。它好比是你把一个自行车竖着放在那，它看起来是稳定了，但是你推一推它，它会倒，它会到一个更稳定的状态。

宇宙是稳定的吗？

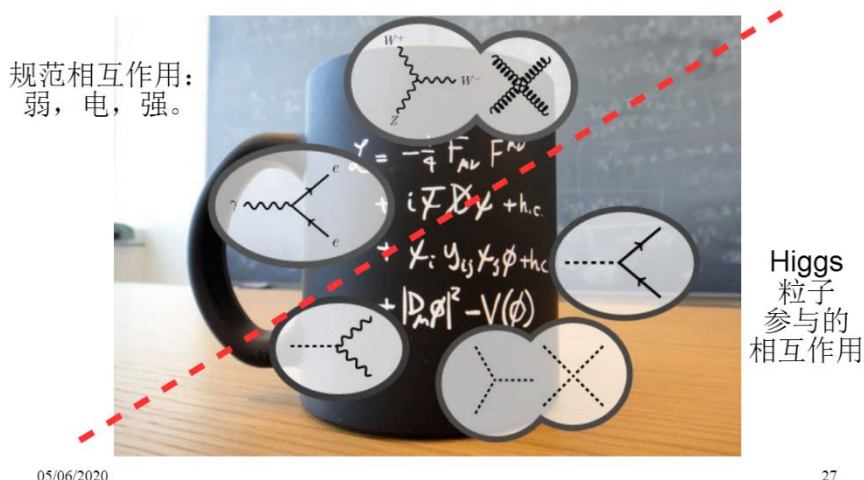


为什么在标准模型看来宇宙刚好处在一个亚稳态，而不是一个完全稳定的状态，也是需要我们去理解的。如果我们回到早期宇宙，刚才提到的在宇宙演化过程当中 0.1 纳秒之后的事情，我们基本是清楚的。那 0.1 纳秒之前发生了什么呢？我们现在认为 0.1 纳秒之前它发生了一次尺度上的巨大的增加。这个被我们称为暴胀。如果有这样一个暴胀，就好比气球被飞快地吹得很大。那么究竟是谁吹动了这个气球，究竟是谁让宇宙的尺度在非常短的时间内得到了非常大的增加？这件事情标准模型也没有答案。

如果我们把标准模型的成功放在一边，看看现在标准模型无法解释的谜团，我们可以看

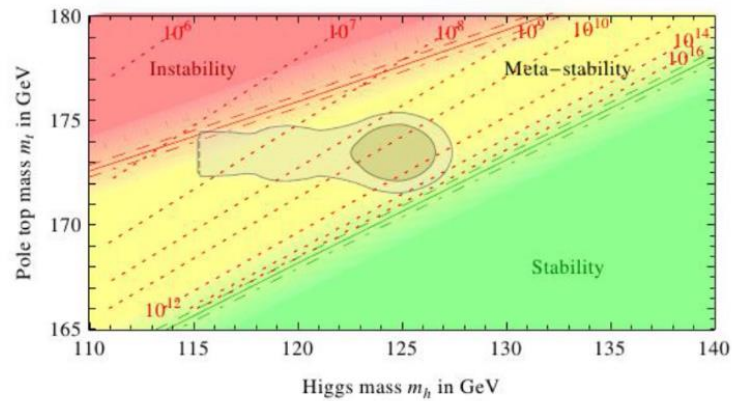
到当中有暴胀，有质量等级，有中微子质量，有物质和反物质的不对称性，有宇宙的稳定性的，有暗物质和暗能量等等一系列的未解之谜。这每一个未解之谜实际上都是对今天的物理学大厦的一个巨大的挑战。这实际上意味着我们对标准模型、对于宇宙为什么选择标准模型，是处于一个知其然不知其所以然的状态。那么如何去突破标准模型？我们有一个非常明显的线索：这些未解之谜中绝大部分都和**质量**直接发生联系。我们可以通过研究标准模型当中的**质量起源**去对这样的一些根本性的谜团进行探索。也许我们就能看到点什么，标准模型当中的**质量之源**是什么呢？标准模型当中的**质量之源**实际上是**Higgs 场**，它的激发态就是**Higgs 粒子**或者说“上帝粒子”。

Higgs 场：质量之源，标准模型的核心



我们回到标准模型的数字形式，看一下茶杯上的式子，在这个式子当中如果我们斜着画一条线，在这个线的上方部分描述的就是规范场，实际上就是弱电强三种相互作用。它下方是我们的**Higgs 场**所参与的相互作用，或者说是标准模型中**质量之源**的这一部分**Higgs 场**和它参与的相互作用，占据了标准模型的半壁江山。

因为**Higgs 场**是**质量之源**，它和刚才我们提到的很多问题有直接的联系，比方说如果我们真的理解了**质量起源**背后的一些机制，也许我们立刻就能回答为什么标准模型当中的粒子有的轻有的重、它们的重量差异可以有十几个量级那么大。所以，**Higgs 场**、**Higgs 粒子**在标准模型当中起到了非常重要的作用。它所参与的实际上是不同于四大基本相互作用的、新的相互作用。它本身决定了电子的质量和原子的大小。为什么这么说呢？因为我们知道原子的大小是和电子的质量成反比的，而电子的质量由**Higgs 场**参与的相互作用所决定。这样一来，原子的大小就是由标准模型的**Higgs 场**所决定。



Higgs 场也决定了真空是否稳定。我们看这张图，上面有顶夸克的质量和希格斯粒子的质量。在标准模型看来，这两个质量的不同会决定我们的宇宙是否是稳定的。在这个意义上质量之源就直接参与了宇宙的稳定性这样的一件非常重要的事情。Higgs 场同时也部分参与和决定了质子和中子的质量差。大家知道质子是绝对稳定的，或者从今天粒子学的观点来看的话，可以认为质子是绝对稳定的。而中子的话它会衰变成质子，如果你把中子放到真空当中，那么你大概过 15 分钟看一眼的话，大概有一半的中子就没有了，就变成质子加其他东西跑掉了。中子能够衰变成质子的原因，是因为中子比质子重那么一点点，而重的那一点实际上也是由 Higgs 场参与决定的。这件事情很重要。如果万一这件事情反过来一点，变成质子是稳定的，中子完全不稳定，我们今天见到的宇宙肯定就很不一样了。

在此基础上，Higgs 场是否和刚才提到的暗物质、暗能量甚至暴胀有着更深刻的联系，我们现在并不清楚。但是我认为，他们之间有联系也是足够合理的猜测。这个猜测需要我们进一步去研究，去肯定它或否定它。所以在这个意义上的话，Higgs 场不仅是标准模型的半壁江山，也和标准模型当中所有的这些重要的未解之谜紧密相关。

我们需要去理解为什么 Higgs 粒子如此能干，它的本质到底是什么。因为 Higgs 粒子本身并不稳定，你需要通过对撞机才能产生它，才能对它的行为和性质进行测量。那么要去研究 Higgs 粒子的性质，我们就需要一个 Higgs 粒子的工厂，就是能大量产生 Higgs 粒子的对撞机。我们现在有哪些选项呢？今天就运行着一个非常成功的 Higgs 工厂，就是 LHC 实验，大型强子对撞机实验。这个实验坐落在瑞士和法国的边界，是一个被埋在地下 100 米深的、周长有 27 公里的大型对撞机。

Higgs 工厂： LHC

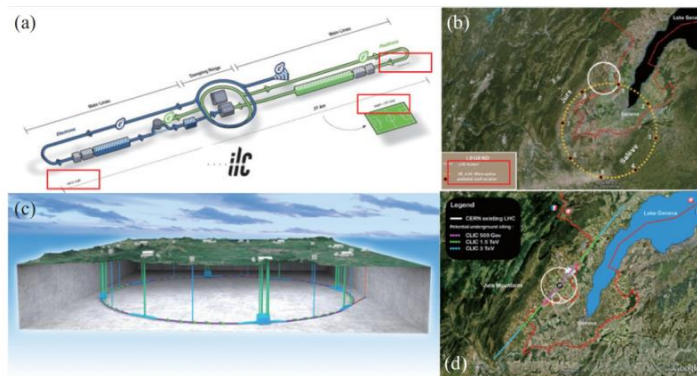


05/06/2020

31

除了大型强子对撞机之外我们人类还计划建造一系列的其他的 Higgs 粒子工厂，包括国际直线对撞机、紧致直线对撞机，还包括未来环形对撞机和我们中国高能物理学界倡议建设的环形正负电子对撞机。这些对撞机和大型强子对撞机相比，它们的对撞环境要干净得多，它们能够对 Higgs 粒子的性质进行一个更为精确、更为精准的测量。这些新的、倡议建设的对撞机能够实现对 Higgs 粒子的测量精度有一个本质性的飞跃，与此同时还能进行一系列其他的研究，这些其他的研究也将帮助我们去理解刚才提到的那些关键问题。

四个主要的正负电子 Higgs 工厂



- ILC (a): 2013 年完成技术设计报告 (TDR ~ 蓝图)
- FCC (b): 2019 年完成概念设计报告 (CDR ~ 初步设计蓝图)
- CEPC (c): 2018 年完成概念设计报告
- CLIC (d): 2013 年完成概念设计报告

05/06/2020

34

刚才我们知道暗物质是如今的可见宇宙当中非常重要的一部分，它大概在可见宇宙当中占了 1/4 的比重。同时我们又知道 Higgs 粒子实际上是标准模型粒子的质量之源，那么，它会不会是一个共有的质量之源，以至于它能够在暗物质粒子的质量产生当中发挥一定的作用呢？这是很有可能的一件事情。而如果这件事情是真的，产生的 Higgs 粒子就有可能衰变成暗物质粒子。实际上通过一系列研究发现，如果 Higgs 粒子当中有千分之一的概率能够衰变成暗物质粒子的话，那么我们的正负电子的 Higgs 工厂，就能够发现并确认这样一个信号。

今天跟大家简单的介绍了粒子物理现在所取得的成就以及面临的很多困难。标准模型取得了巨大的成功，但是与此同时有一系列的问题，标准模型没有办法给出一个令人满意的解

释，而这些问题的线索都指向了标准模型当中的质量之源，就是 Higgs 场。那么通过研究 Higgs 粒子，我们有望对这些问题提供一个非常精确的答案，能够大大加深我们对这些基础问题的理解。这些问题当中任何一个的解释或者进步，都意味着基础物理学当中巨大的进步。

所以为了去做这样一件事情，人们计划建设一系列的新的精度更高的 Higgs 粒子工厂，这些 Higgs 粒子工厂当中就包括了我国倡议的环形电子对撞机，一旦建成的话那将能够很好地推动这方面的研究。针对环形正负电子对撞机的一些设计，我们已经进行了大量的前期的工作。如果一切顺利的话，我们希望能够在 2030 年左右的时候正式在这些新的机器上面获取实验数据来进行我们进一步的探索。

谢谢大家！