

# 粒子物理实验训练教程

## 第一课：标准模型简介

杨思奇

中国科学技术大学近代物理系

2015年6月8日

标准模型（Standard Model, SM）是粒子物理发展到今天用以概括描述一切现象的最成功的物理模型。它用相对简单的方式给出了成体系的、自洽程度很高的模型理论。标准模型的预言完美地符合几乎一切现有实验结果。粒子物理的研究内容，从本质上来说，大体可以分为两类：一类是对标准模型预言结果的直接检验，另一类是直接寻找超出标准模型预言的现象。当然，对于标准模型预言结果的精确检验也是对新物理的重要寻找手段之一。比如标准模型预言了某个参量的值，通过实验精确测量这个参量，如果发现与标准模型预言值有较大偏差，往往也意味着有新的物理在干扰标准模型的体系。

### 自然单位制

在粒子物理领域中，粒子运动速度较高，相对论效应是不可避免的。考虑到相对论效应的物理空间叫闵可夫斯基空间，此空间有四个维度，比如三个空间分量和一个时间分量在闵可夫斯基空间构成时空矢量，这就是人们常说的时间和空间地位相等；再比如，三个动量分量和一个能量分量在闵可夫斯基空间也构成一个矢量，叫四动量矢量。闵可夫斯基空间的矢量统称为四矢量。矢量有模长，在坐标变化下是不变的。四矢量的模长叫做时空不变量：

$$|\vec{S}|^2 = S_1^2 - S_2^2 - S_3^2 - S_4^2$$

注意，闵可夫斯基空间内计算矢量模长时不同分量的符号不同，这对应于一个空间的度规。度规这一概念可以理解成描述基矢量按什么方式张开成整个空间。空间中的矢量进行运算时以度规为依据。矢量点积的完整表示方式为

$$\vec{X} \cdot \vec{Y} = \sum X_i Y_i G_{ii}$$

其中 $G_{ii}$ 就是度规。三维空间的度规 $G_{ii} = 1, 1, 1$ ，因此矢量点积就是矢量分量乘积的和；闵可夫斯基空间度规 $G_{ii} = 1, -1, -1, -1$ ，于是矢量点积按之前的式子进行。

如果几个物理量在某个空间是一个矢量的分量，说明这几个物理量的地位应当是完全相同的。为了体现这一点，在粒子物理，尤其是高能粒子物理中广泛采用自然单位制：

$$[c] = [h] = 1$$

也就是光速 $c$ 与普朗克常量 $h$ 定义为1，而且没有量纲。在这种单位之下，所有闵可夫斯基空间的矢量分量都变成了同样的量纲。比如说，时间等于空间除以速度 $t = s/v$ ，在速度没有量纲的情况下，时间和空间的量纲就保持了一致。同样，因为 $E = 1/2 \times mv^2$ ， $P = mv$ ，所以能量、动量和质量的量纲相同。所有的四维矢量分量的量纲在自然单位制下都是相同的，但不代表量纲相同就能凑在一起构成四维矢量。四维矢量的构成是有物理意义的。有兴趣请自行学习相对论和电动力学的相关知识。

自然单位制具有重要的物理意义。我们都知道在狭义相对论中，质量和能量可以相互转化，所以它们具有相同量纲就是很有必要的事情；同样，坐标变换与参考系变换会带来时间膨胀、尺度收缩之类的效应，因此时间和长度具有相同量纲也是有物理必要的。从现在开始，我们讨论的一切内容都在自然单位制下进行。

练习：

- 设在国际标准单位制中，eV表示一个单位电荷在1伏特电势中所具有的电势能（能量量纲），求证在自然单位制中，

$$1[MeV] = 1.8 \times 10^{-30}[kg] = \frac{1}{6.6 \times 10^{-22}[s]} = \frac{1}{197 \times 10^{-15}[m]}$$

- 一个粒子质量为90 GeV，求对应为多少kg？
- 一个电子、一个质子的质量在自然单位制中表示为多少MeV？

## 基本粒子与相互作用

标准模型中基本粒子分为两大类：fermion（费米子）和boson（玻色子）。其中，费米子构成物质，玻色子传播相互作用。费米子又可以分为lepton（轻子）和quark（夸克）。

轻子在目前的模型下被认为是没有尺度的点粒子。最新实验表明轻子的尺度小于 $10^{-18}$  m。之所以叫轻子，是因为它们的质量相对来讲都很小。轻子按照质量分为三代。第一代轻子质量最小，包括electron（电子， $e^-$ ）、positron（正电子， $e^+$ ）、electron-neutrino（电子中微子 $\nu_e$ ）和positron-neutrino（反电子中微子 $\bar{\nu}_e$ ）。电子和正电子互为反粒子，带一个单位电荷。所谓反粒子，是相对于正常粒子而言。正反粒子的质量、寿命、自旋等属性完全一样，但是类似于电荷这种量子数大小相等方向相反。比如电子和正电子就只是带电符号不同而已。中微子是一种特殊的粒子，每种轻子都会有自己对应的中微子。中微子在标准模型中被认为是没有质量、没有电荷的粒子。电子是稳定粒子，可以认为寿命无穷长。电子质量很小，只有0.511 MeV。请注意，正反粒子在本质上对应了同一粒子场的不同激发，并不是所有粒子都有反粒子这种概念。比如电子中微子和反电子中微子，它们并非正反粒子，而仅仅是“电子对应的中微子”和“反电子（正电子）对应的中微子”而已，被认为是两种粒子。

第二代轻子包括 $\mu^-$ 及其反粒子 $\mu^+$ ，还有各自相对应的中微子 $\nu_\mu$ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 。 $\mu$ 的质量是电子的两百多倍，但是在标准模型中， $\mu$ 中微子和 $e$ 中微子一样，没有质量。 $\mu$ 的寿命比电子短很多。但是不至于一旦生成立刻衰变。所以无论是加速器物理还是宇宙线物理，高速运动的 $\mu$ 都是可以被直接观测到的。第三代轻子包括 $\tau^-$ 、 $\tau^+$ 、 $\nu_\tau$ 和 $\bar{\nu}_\tau$ 。 $\tau$ 的质量最重，有1.7 GeV。 $\tau$ 的寿命更短，可以认为生成就会发生衰变。高代轻子可以向低代轻子衰变，同时释放相应的中微子。典型过程：

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

释放中微子，是因为物理反应需要满足轻子数守恒。比如上述反应， $\mu^-$ 带+1  $\mu$ 轻子数， $e^-$ 带+1  $e$ 轻子数， $\bar{\nu}_e$ 带-1  $e$ 轻子数， $\nu_\mu$ 带+1  $\mu$ 轻子数。于是反应两边轻子数守恒了。这里注意不同种类的轻子带有不同种类的轻子数。关于轻子数守恒会在后面进行详细介绍。其它高代轻子比如 $\tau$ 太重了，所以它不仅可以向低代轻子衰变，还可以衰变成其它粒子。三代轻子的组成见表 1。

第一代	$e^- (e^+)$	$\nu_e (\bar{\nu}_e)$
第二代	$\mu^- (\mu^+)$	$\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$
第三代	$\tau^- (\tau^+)$	$\nu_\tau (\bar{\nu}_\tau)$

Table 1: 三代轻子构成表.

quark是构成强子的基本粒子。已发现的quark有六种，分别是up ( $u$ )，down ( $d$ )，strange ( $s$ )，charm ( $c$ )，bottom ( $b$ ) 和top ( $t$ )。它们各自还有各自对应的反粒子 ( $\bar{u}$ 、 $\bar{d}$ 、 $\bar{s}$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{b}$ 和 $\bar{t}$ )。quark也按照质量分为三代 ( $u$ 、 $d$ )、( $s$ 、 $c$ ) 和 ( $b$ 、 $t$ )。三代quark的质量由低到高排列。最重的top quark质量达到175 GeV，是已观测到的最重的基本粒子。quark带分数电荷，quark的反粒子叫反quark。quark的带电量由表 2给出。标准模型中最为重要的规则之一，是quark不能单独存在，必须相互组合成特定的粒子。所以事实上我们仍然只能观测到整数倍单位电荷的粒子。quark组成的粒子统称为hadron（强子）。由三个quark组成的粒子叫做重子。比如proton（质子）由 $uud$ 组成，带一个单位正电；anti-proton（反质子）由 $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ 组成，带一个单位负电。neutron（中子）由 $udd$ 组成，不带电。由两个quark组成的粒子叫做介子。比如 $\pi^0$ 由一个quark和它的反quark组成，不带电。

质子和电子是稳定粒子，中子的质量最低态也是稳定粒子。其余一切粒子都不会是长期稳定的。所以物质只由质子、中子和电子组成。质子和中子按照不同的数目组成了不同的原子核与同位素。加上核外电子，构成了基本元素原子。原子再组成分子，分子再组成了物质世界。

$u (\bar{u})$	$\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$
$d (\bar{d})$	$-\frac{1}{3}(\frac{1}{3})$
$s (\bar{s})$	$\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$
$c (\bar{c})$	$-\frac{1}{3}(\frac{1}{3})$
$b (\bar{b})$	$\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$
$t (\bar{t})$	$-\frac{1}{3}(\frac{1}{3})$

Table 2: quark与对应的电荷.

quark和lepton统称为fermion，还有一类粒子叫做boson。这些粒子不参与物质的构成，它们的主要作用是传递相互作用。已知相互作用有四种。最早确认的是引力相互作用。一切有质量的粒子都会发生引力相互作用。中微子没有质量，所以中微子不参与引力相互作用。引力相互作用是超长程力。然后是电磁相互作用。一切带电的粒子都会参与电磁相互作用。电磁相互作用也是长程力。之后有两种相互作用，是强相互作用和弱相互作用。这两种作用是短程力，只有在尺度小于 $10^{-10}$  m，也就是小于原子核大小的情况下才会显现出来。强相互作用的作用强度最高，标准模型中的耦合强度接近1。电磁相互作用次之，耦合强度大概 $10^{-2}$ 。弱相互作用再次，耦合强度大概 $10^{-5}$ 。引力相互作用的耦合强度是最弱的，大概 $10^{-38}$ 。因为引力相互作用太弱，其它三种相互作用只要显现，引力就可以完全被忽略的。因此在粒子物理研究中，从不考虑引力相互作用带来的影响。

电磁相互作用的传播子是photon（光子， $\gamma$ ）。光子没有质量，不带电。强相互作用的传播子是gluon（胶子， $g$ ）。胶子也不带电。弱相互作用有三个传播子，分别是 $Z^0$ （质量91.18 GeV，不带电）、 $W^+$ 和 $W^-$ （质量80.4 GeV，带单位电荷）。引力相互作用的传播子还未发现。不过反正在目前研究情况下是忽略它的。

传递相互作用的粒子都是vector boson（矢量玻色子）。除了它们，还存在一个极为特殊的粒子Higgs（希格斯， $H$ ）。Higgs粒子是标量玻色子，它不承担传递相互作用的任务。它存在的作用是使得 $Z$ 和 $W$ 带有质量。因为在量子场论的最初理论预言中，矢量玻色子应当都是如同photon一般，是没有质量的。但是现实观测的结果却是 $Z$ 和 $W$ 带有相当大的质量。为了解释这一实验现象，理论预言了Higgs粒子。它的存在可以导致原初矢量玻色子场重组，从而使得新的场带有质量。这就是Higgs机制。Higgs粒子是标准模型所预言的粒子，但是Higgs粒子的质量是自由参数，没有给出直接的预言，因此对Higgs粒子的寻找经历了相当长的时间。最终于2013年在LHC（Large Hadron Collider，大型强子对撞机）上的ATLAS和CMS两个实验共同发现了质量为125 GeV的Higgs粒子。至此，标准模型直接预言的所有基本粒子全部被发现。

标准模型的基本粒子构成如图 1所示。三代quark和三代轻子相对应，按纵排排列。注意图中有淡淡的范围框将相互作用的信息标示出来。胶子 $g$ 和所有quark框在一起，表明强相互作用由胶子传播，以及能够发生强相互作用的基本粒子；光子 $\gamma$ 和除了中微子之外的所有带电粒子框在了一起，表明电磁相互作用由光子传播，以及能够发生电磁相互作用的粒子； $Z$ 、 $W^\pm$ 和所有的粒子框在了一起，表明弱相互作用是由 $Z$ 和 $W^\pm$ 传播，并且存在于所有的基本粒子之间。由此我们可以看到，中微子唯一参与的相互作用就是弱相互作用。

## 物理反应

粒子物理领域中讨论各种物理反应。反应前的状态叫初态，反应后的状态叫末态。一个物理反应中，必然伴随初态粒子和末态粒子之间发生动量交换，这个交换是通过相应的传播子实现的，没有动量交换就没有物理反应。

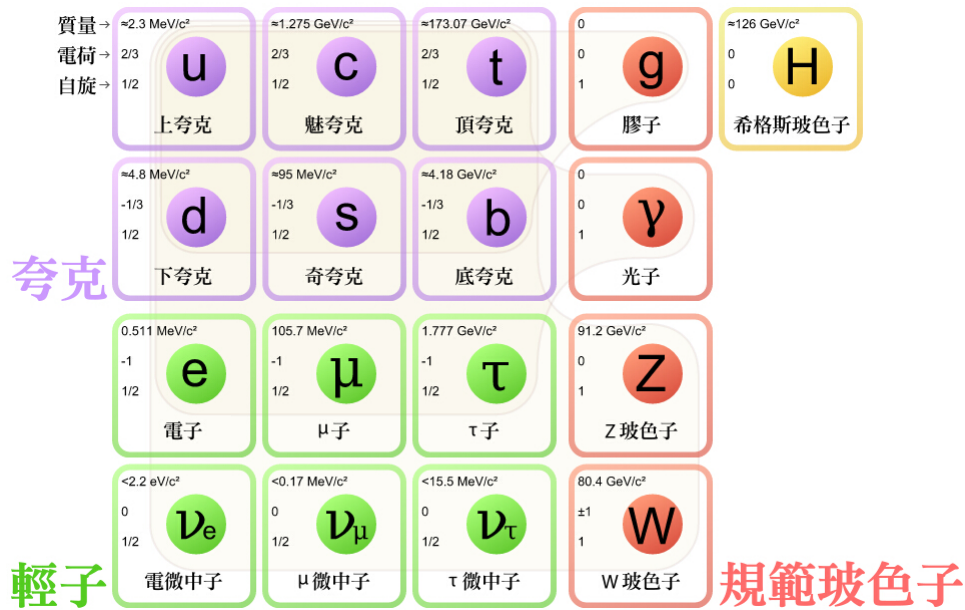


Figure 1: 标准模型的基本粒子表。注：台湾将charm夸克翻译成魅夸克，世界其它中文习惯是将其翻译成璨夸克。

最简单的物理反应就是弹性散射。比如初态两个电子 $e_1$ 和 $e_2$ 各自以一定速度运动，靠近后由于电磁相互作用，通过交换光子使动量有改变，然后远离飞去，没有发生任何其它状态变化。如果反应过程中伴随着粒子的产生、湮灭、衰变等过程，这就是一个非弹性散射过程。比如初态两个电子 $e^+$ 和 $e^-$ 各自以一定速度运动，在弱相互作用下变成中间态 $Z$ ， $Z$ 再衰变到末态 $\mu^-$ 和 $\mu^+$ ，这就伴随了粒子的产生和湮灭。

注意：并非初态和末态的粒子相同就是弹性散射。比如上面说的初态两个电子 $e^+$ 和 $e^-$ 变成中间态 $Z$ ， $Z$ 可以再衰变成正负电子对，虽然初态和末态都是两个电子，但是这个过程仍然有粒子的产生和湮灭，只不过最后产生的末态跟初态一样而已。

物理反应需要满足各种条件才能发生。首先，胶子 $g$ 是强相互作用的传播子，而只有quark能够参与强相互作用，因此不可能存在 $g$ 与轻子、中微子直接联系的物理反应；同理，不存在光子与中微子（因为不带电）直接联系的反应。由于所有粒子都能参与弱相互作用，因此所有基本粒子都可以与 $W$ 和 $Z$ 玻色子直接联系。

其次，物理反应要遵循各种量子数守恒。最常见的是电荷守恒。除了电荷，还有轻子数守恒，也就是反应初态和反应末态的轻子数相等。各种轻子对应的轻子数如表 3所示。

	电子轻子数	$\mu$ 轻子数	$\tau$ 轻子数
$e^-$ 、 $\nu_e$	+1	0	0
$e^+$ 、 $\bar{\nu}_e$	-1	0	0
$\mu^-$ 、 $\nu_\mu$	0	+1	0
$\mu^+$ 、 $\bar{\nu}_\mu$	0	-1	0
$\tau^-$ 、 $\nu_\tau$	0	0	+1
$\tau^+$ 、 $\bar{\nu}_\tau$	0	0	-1

Table 3: 各种轻子对应的轻子数。

注意， $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$ 是三种不同的轻子数，物理反应需要满足每一种都守恒。比如说上面举出的例子 $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ ，初态三种轻子数都是0，末态也都是0，反应是可以发生的；再比如 $\mu$ 衰变： $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ，反应初态电子轻子数为0， $\mu$ 轻子数为+1，末态也是这样，反应能够进行。反之，类似于 $e^- + e^- \rightarrow \mu^- + \mu^-$ 这样的反应就是不存在的。

轻子数守恒其实表明了物理反应不能随意改变粒子总种类。对应于不同轻子种类有轻子数守恒，quark反应也有类似的要求。比如反应 $s \rightarrow g + u$ 就是不存在的，不可能一个 $s$ 夸克就自己变成 $u$ 夸克了。

除了上述问题，最重要的是能量动量守恒。注意，这里所说的能量守恒，是将粒子质量转化成能量之后与粒子动能加起来的总能量守恒。为了更好解释能量守恒，先引入不变质量的概念。

我们知道，粒子在高速运动时，质量会发生改变。所谓不变质量，是指粒子在静止时所对应的质量，记作 $M_0$ 。之前我们说过，能量动量在闵可夫斯基空间中是一个四矢量，而不变质量正是这个四矢量的模长，所以是一个洛伦兹变换不变量：

$$E^2 - P_x^2 - P_y^2 - P_z^2 = M_0^2$$

其中 $E$ 是总能量， $P$ 是总动量。不变质量是粒子最重要的一个属性，我们一般所说的粒子质量，都是指粒子的静质量，也就是不变质量。

练习：利用相对论与洛伦兹变换的相关知识，证明四动量的模长就是粒子静止时的质量

比如说反应 $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ ，设初态两个电子的动量相等，方向相反，那么根据动量守恒，质心系没有速度，生成的中间态 $Z$ 是静止的，两个电子的质量加上动能完全转化为 $Z$ 的质量。而后 $Z$ 再衰变成 $\mu^+\mu^-$ ，也应该是动量相等方向相反的。但是如果初态两个电子动量不相等，比如分别为80 GeV和10 GeV（方向仍然相反），那么根据动量守恒，虽然初态总能量有90 GeV，但是整个系统应当具有70 GeV的动量，也就是说最多只有20 GeV能够用于转化成 $Z$ ，生成的 $Z$ 应当具有70 GeV的初动量。 $Z$ 的不变质量高达90 GeV左右，因此上述情况很难发生，属于有效反应能量不够。反应如果能够发生，有效反应能量至少应当达到生成新粒子不变质量所对应的能量大小，这个叫反应阈能。

练习：

- 请说明为什么中子可以衰变成质子，但质子不能衰变成中子。
- 能量守恒和动量守恒要同时满足，这限制了某些反应的发生。请思考真空中，一对正负电子靠近，能否湮灭成一个光子？反之，真空中一个光子能否衰变成一对正负电子？
- 北京正负电子对撞机将正电子和负电子分别加速到2 GeV进行对撞，而西欧核子中心的大型电子正电子对撞机（LEP）将正电子和负电子分别加速到100 GeV进行对撞，请说明这两个对撞实验分别能够对哪些基本粒子的性质进行测量研究？