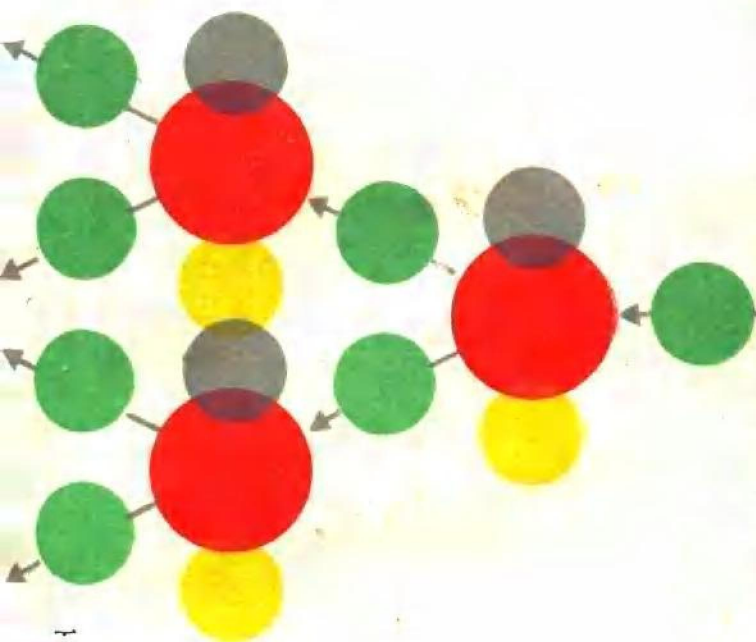


近代物理学

学习指导



出版社

近代物理学学习指导

魏保范 冯 薇 编

天津科学技术出版社

津新登字(90)003号

责任编辑：张炳祥

近代物理学学习指导

魏保范 冯 薇 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道130号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本850×1168毫米 1/32 印张6.875 字数143 000

1992年4月第1版

1992年4月第1次印刷

印数：1—2 930

ISBN 7-5308-0570-3/O·34 定价：4.40元

6F90/T1

前 言

近代物理学是二十世纪发展起来的一门新兴学科，它已广泛地应用到许多科学技术领域。特别是激光、半导体、天体、原子能物理和生物工程、量子化学等学科，它们的发展完全依赖于近代物理的发展。因此，根据四个现代化需要，近代物理已成为高等学校主要基础课之一。

近代物理与经典物理的主要区别是：以相对的时空观代替绝对的时空观；以物理量的量子化代替物理量的连续化；以物质的波粒二象性代替物质的单一性。近代物理这些概念上的变化和发展，给学生的学习带来了困难。因此，学生非常渴望能有一本近代物理学的学习指导书，以满足强烈的学习愿望。

为了指导学生学好近代物理课程，我们以多年教学中积累的材料为基础，参考了国内外有关书籍，经过精心整理编成了《近代物理学学习指导》一书。本书通过基本理论的论述、例题的分析和解答以及习题的配备，使学生切实掌握基本概念，学好近代物理学。

本书基本理论简明扼要，难点解决较透彻，便于自学。例题的选择具有代表性，有的例题在解答前做了有关理论和演算方法的分析，使读者在弄懂弄通概念的基础上，明确解题思路；有的例题在解答之后进行了讨论，以加深对概念的理解和解题规律的掌握；部分例题进行了一题多解，利用不同的概念和方法解答同一问题，使学生对掌握的知识能融会贯通。习题的配备比较全面。教学实践证明，通过这些习题能使学生进一步掌握新的概念，并能提高分析问题和解决问题的能力。书后有习题的答案，供参考之用；对较难的习题还给出了提示，以启发学生的思维，

提高解题能力。

限于编者水平，本书的内容多有疵议之处，错误之处也在所难免，读者如能惠予批评指正，这将对编者最好的支持和鞭策。

编 者

1990.9

目 录

第一章	狭义相对论	(1)
第二章	微观粒子的波粒二象性	(26)
第三章	卢瑟福-玻尔原子	(58)
第四章	多电子原子	(80)
第五章	在磁场中的原子	(110)
第六章	分子物理	(128)
第七章	原子核物理	(144)
习题提示和答案		(190)
参考书目		(199)
附录		(200)
一、	物理常数	(200)
二、	元素周期表	(202)
三、	元素的基态能量*	(204)
四、	原子半径	(205)
五、	物质密度 (克·厘米 ⁻³)	(206)
六、	10的幂词头	(207)
七、	一些核素的性质	(207)

第一章 狭义相对论

一、基本理论

二十世纪初,物理学出现了两个伟大成就:爱因斯坦的相对论和普朗克的量子论。相对论是在研究传播电磁场的媒质——以太的存在问题时产生的。但是,相对论的成就远远超出了电磁场理论的范围,它给出了高速运动物体的力学规律,并从根本上改变了许多世纪以来所形成的有关时间、空间和运动的旧有观念,建立了新的时空观,揭露了质量和能量的内在联系,开始了有关万有引力的探索。目前,相对论不但已经被大量的实验所证实,并且已经成为一些工程技术不可缺少的理论基础。本章仅对相对论的基本理论和主要应用做简要讨论。

1. 伽利略变换

(1) 事件与坐标 我们先来考虑一个物理事件。这个事件可以是雷电击一棵树,也可以是两个粒子相碰撞;它们发生在空间中的某一点和时间中的某一瞬间。一位观察者用4个坐标来标明这个特定的事件,其中3个坐标 x 、 y 、 z 用来量度到观察者所在坐标系原点的距离,时间坐标 t 则是观察者时钟的读数。

现在来考虑两个观察者 O 和 O' 。和他们相联系的坐标系为 (x, y, z) 和 (x', y', z') , O' 相对于 O 沿着他们的共同轴 $x-x'$ 以恒定速度 v 运动。两位观察者都备有米尺和时钟,所以他们可以测定事件的坐标。假定这两位观察者相互校准了他们的时钟,使得他们在 $x = x' = 0$ 彼此经过时,时钟的读数 $t = t' = 0$ 。任何一个给定的事件都有与之相联系的8个数,其中4个坐标 (x, y, z, t) 由 O 给出,另4个坐标 (x', y', z', t') 由 O' 给出(对于同

一个事件)。

(2) 伽利略坐标变换 由图1-1可以看出, 对于一个特定

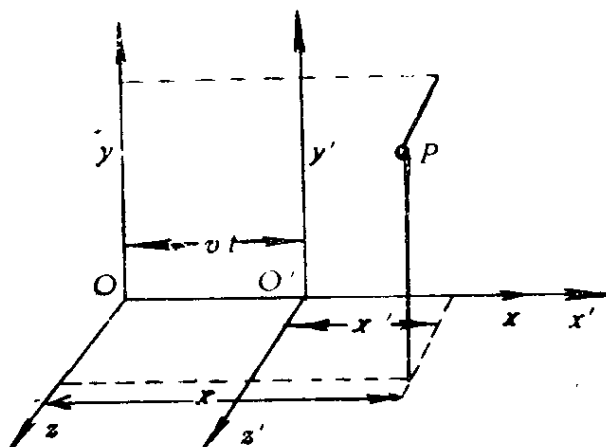


图1-1

的事件, O 的测量值 x 、 y 、 z 、 t 与 O' 的测量值 x' 、 y' 、 z' 、 t' 之间存在着下列关系

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t$$

这四个方程式称为伽利略坐标变换。

(3) 伽利略速度变换 除了一个事件的这些坐标以外, 一个粒子的速度也是很重要的。观察者 O 与 O' 会用三个分量来描述这个粒子的速度: v_x 、 v_y 、 v_z 是 O 所测得的速度分量; v_x' 、 v_y' 、 v_z' 是 O' 所测得的速度分量。

把伽利略坐标变换对时间微分, 就得到 v_x 、 v_y 、 v_z 和 v_x' 、 v_y' 、 v_z' 的关系。例如, 由

$$x' = x - vt$$

可得

$$v_x' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d}{dt}(x - vt) \frac{dt}{dt'} = \frac{dx}{dt} - v = v_x - v$$

这样, 伽利略速度变换就是

$$v_x' = v_x - v \quad v_y' = v_y \quad v_z' = v_z$$

(4) 伽利略加速度变换 一个粒子的加速度是其速度的时

间导数, 即 $a_x = \frac{dv_x}{dt}$ 等. 所以伽利略加速度变换为

$$a'_x = a_x \quad a'_y = a_y \quad a'_z = a_z$$

这说明, 在不同的惯性系中, 质点的加速度是相同的。

(5) 方程的不变性 一个方程的不变性就是当两个观察者确定这方程时, 该方程具有相同的形式. 在经典理论中, 两位观察者的空间和时间的测量结果由伽利略变换联系起来. 这样, 一位观察者在确定了一个方程的具体形式后, 便可以把伽利略变换用于这一形式而求得对于另一位观察者来说该方程的具体形式. 例如, 在所有相互做匀速直线运动的惯性系中, 牛顿运动定律的形式都是相同的, 即

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \vec{F}' = m\vec{a}'$$

这便是伽利略相对性原理的数学表达式. 于是, 伽利略相对性原理通常也可说成是: 牛顿第二定律的方程相对于伽利略坐标变换来说是不变式. 对于电磁波的波动方程, 在伽利略变换下, 因为方程的形式改变了, 所以波动方程不是不变式。

2. 狭义相对论基本原理

(1) 绝对空间和以太 19世纪末, 在光的电磁理论发展过程中, 有人认为宇宙间充满着一种叫做“以太”的媒质, 光是靠“以太”来传播的, 而且把这种“以太”选作为绝对静止的绝对参考系, 凡是相对于这个绝对参考系的运动叫做绝对运动. 根据这一观点, 历史上的一些物理学家设计了各种实验, 期望通过运动参考系中发生的物理现象, 找出一种发现绝对运动并测出绝对速度的方法, 但是, 所有的实验都未得到预期的结果, 最后终于导致了爱因斯坦相对论的建立. 在所有的这些实验中, 1881年迈克耳孙-莫雷所提出的实验, 对相对论的建立起到了决定性的作用. 根据迈克耳孙和莫雷的设想, 如果以太是存在的, 而且它又完全不被地球所带动, 那么地球相对于以太的运动速度就是地球的绝对速度. 利用地球的绝对运动速度和光速在方向上的不同, 应当

在所设计的迈克耳孙干涉实验中能够看到干涉条纹的移动.但是,无论实验条件如何变化,却始终看不到干涉条纹的移动.这引起了物理学界广泛的争论,许多人提出了解决矛盾的方案,但只有爱因斯坦提出了正确的解释,他认为绝对空间(绝对参考系)和以太是不存在的,光速是一个恒量,它和参考系的运动状态无关.

(2) 狭义相对论的基本原理 1905年,爱因斯坦扬弃了以太假说和绝对参考系的想法,在迈克耳孙-莫雷实验基础上,总结出狭义相对论的两条基本原理:一条是相对性原理,即一切彼此相对做匀速直线运动的惯性参考系,对于描述运动的一切规律来说都是等价的.这说明运动的描述只有相对的意义,而绝对静止的参考系则是下存在的,在任一惯性参考系中所做的任何实验都不能确定这一系统本身的“绝对”运动.通过对比,可以看出,这一原理是伽利略相对性原理的推广.另一条是光速不变原理,即在一切实彼此相对做匀速直线运动的任一惯性参考系中,所测得的真空中的光速都是相等的.爱因斯坦在这两条基本原理的基础上建立了狭义相对论,对近代物理起到很大的促进作用.

3. 洛伦兹变换

(1) 洛伦兹坐标变换 爱因斯坦根据狭义相对论的两条基本原理,建立了新的狭义相对论的坐标变换公式,即洛伦兹变换式(代替了伽利略变换式).对于图1-1中的两个观察者,他们之间的洛伦兹变换为

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad y' = y \quad z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

这些式子的逆变换是

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad y = y' \quad z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

在上面的式子中, v 是 O' 相对于 O 沿它们公共轴的速度. 如果 O' 向正 x 方向运动, v 是正的; 如果 v 向负 x 方向运动, v 是负的. 我们还假定, 在时钟开始走动时, 两个坐标系的原点是重合的, 也就是说 $x' = x = 0$ 时, $t' = t = 0$. 注意, 只要在第一组变换中交换带撇和不带撇的变量, 并令 $v \rightarrow -v$, 立即就得到逆变换. 这正是相对论的基本原理所预料的, 因为两个观察者是完全等价的. 不同的只是观察者 O 以速度 $-v$ 相对于观察者 O' 运动.

(2) 光速不变性 假定 O 和 O' 相互通过的时刻 ($t = t' = 0$), 从它们的公共原点向 $x - x'$ 方向发出一个光讯号. 如果 O 发现讯号的空间坐标和时间坐标是以 $x = ct$ 相联系的, 那么根据洛伦兹变换, O' 将发现

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{ct - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \\ &= \frac{ct[1 - (v/c)]}{\sqrt{[1 - (v/c)][1 + (v/c)]}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - (v/c)}{1 + (v/c)}} ct \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{t - \frac{v}{c^2}ct}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\ &= \frac{t[1 - (v/c)]}{\sqrt{[1 - (v/c)][1 + (v/c)]}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - (v/c)}{1 + (v/c)}} t \\ \frac{x'}{t'} &= c \quad x' = ct' \end{aligned}$$

可见光在 O 和 O' 中都以相同的速度 c 运动.

(3) 麦克斯韦方程的不变性 麦克斯韦方程在伽利略变换下不是不变式, 然而, 正如洛伦兹所指出, 这些方程在洛伦兹变换下却是不变式. 见例题12.

(4) 相对论性的速度变换 为了求得速度变换, 我们还是利用图1-1. 两个观察者都观察同一粒子的速度. 对于这个粒子速度分量, O 的记录为 (v_x, v_y, v_z) , O' 的记录为 (v'_x, v'_y, v'_z) . 我们由洛伦兹坐标变换求得如下的洛伦兹速度变换

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v}{c^2}v_x} \quad v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{v}{c^2}v_x}$$

$$v'_z = \frac{v_z \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - \frac{v}{c^2}v_x}$$

与前面一样, 如果 O' 向正方向运动, 速度 v 为正; 如果 O' 向负方向运动, 速度 v 为负. 反变这些等式, 得

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2}v'_x} \quad v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + \frac{v}{c^2}v'_x}$$

$$v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 + \frac{v}{c^2}v'_x}$$

在 $t = t' = 0$, O 和 O' 互相通过时, 从它们的原点向 $x - x'$ 方向发出一个光讯号. 若 O 测得的光讯号速度分量为 $v_x = c$, $v_y = v_z = 0$, 那么 O' 测得为

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - (v/c^2)v_x} = \frac{c - v}{1 - (v/c^2)c} = c$$

$$v'_y = v'_z = 0$$

可见 O' 测得光速也为 c , 符合光速不变原理.

4. 狭义相对论的时空观

(1) 同时性问题 如果 O 观察者看到两个事件同时发生在不同地点, 两个事件可分别用坐标 (x_1, y_1, z_1, t) 和 $(x_2, y_2,$

x_2 表示, 而另一个观察者 O' 则测到这两个事件发生的时刻并不相同. 由洛伦兹变换公式可求得 O' 观察者测得这两个事件的发生时刻如下

$$t_1' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x_1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad t_2' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x_2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

在上两式中, 因 x_1 不同于 x_2 , 所以 t_1' 也不同于 t_2' , 它们的差是

$$t_2' - t_1' = \frac{\frac{v}{c^2}(x_1 - x_2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

这就是说, O' 观察者测得的两个事件是先后发生的, 其时间间隔为

$$\frac{\frac{v}{c^2}(x_1 - x_2)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

(2) 时间膨胀问题 一个事件所经历时间的量度也是随观察者而变化的. 假定 O 测定到在 $x = x_1$ 处发生了一个事件, 这事件开始于 $t = t_1$, 而终止于 $t = t_2$, 所经历的时间间隔是 $\Delta t = t_2 - t_1$.

当一个以速度 v 运动的观察者 O' 测量这事件时, 则认为这事件的时间间隔为 $\Delta t' = t_2' - t_1'$. 根据洛伦兹变换

$$\begin{aligned} \Delta t' = t_2' - t_1' &= \frac{t_2 - \frac{v}{c^2}x_1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - \frac{t_1 - \frac{v}{c^2}x_1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\ &= \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \end{aligned}$$

这就是说, 对于处在与发生事件的地点做相对运动的观察者, 他所测到的时间间隔发生了膨胀.

注意: $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ 关系式是指对 O 观察者看来, 其事件自始至终发生在 x_1 处, 如果地点发生了变化, 那么时间间隔的关系式就不是简单地乘以或除以 $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ 的关系了.

(3) 长度的缩短问题 如果一个物体相对于观察者处于静止状态, 则它的长度可由测量该物体两端点之间的空间坐标差来确定. 由于物体不是运动的, 这种测量可以在任何时刻进行. 这样测量的长度叫静止长度, 或者叫物体的固有长度.

然而, 对于运动物体情况就复杂得多了, 因为必须在同一时刻测定物体两端点的空间坐标. 这两个坐标差就定义为该物体的长度.

现在考虑一个直尺沿 $x-x'$ 放置的问题. 直尺相对于 O 观察者是静止的, 在 O 看来, 它的长度为 $l_0 = x_2 - x_1$, 即直尺的固有长度; 在运动者 O' 看来, 它的长度为 $l = x_2' - x_1'$, 且坐标 x_2' 和 x_1' 要同时测量. 根据洛伦兹变换式

$$x_1 = \frac{x_1' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad x_2 = \frac{x_2' + vt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

所以

$$x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad l_0 = l / \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

因此, 我们的结论为: 相对于物体而运动的观察者所测到的物体长度变短了.

例如, 有一个宇宙飞船, 以 $v = 0.98c$ 的速度相对于地球匀速运动. 在相对速度方向上, 宇宙飞船的长度由正在做宇宙飞行的观察者看来是 20 米, 而由地球上的观察者看来, 这个长度却只有 $20\sqrt{1 - (0.98)^2} = 4$ 米. 反之, 由地球上的观察者看来是 20 米长的一个地上物体, 在宇宙飞船上看来也只有 4 米.

5. 狭义相对论中的质量、能量和动量

(1) 质量随速度的变化 狭义相对论中的主要推论之一是物体的质量随速度的变化. 对于这种变化, 下面做一个很有启发性的论证.

做这样的一个枪弹实验： O' 观察者，向 y' 方向发射一粒子弹，穿进一块不能相对于观察者运动的木块。子弹穿进木块的深度由子弹动量的 y' 分量 $p_{y'} = m'v_{y'}$ 确定；这里 m' 是 O' 测得的质量。

现在从观察者 O 的观点来看这个实验， O' 相对于 O 以速度 v 向 $x-x'$ 方向运动。由于子弹穿过的孔洞与两个观察者运动方向成直角，子弹穿进木块的距离对 O 和 O' 来说将是一致的，因此， O 看到的子弹动量 y 分量将与 O' 看到的子弹动量 y' 分量是相同的。

按照 O 的测定， $p_y = mv_y$ ，式中 m 是 O 测得的子弹质量。按照洛伦兹速度变换，由于 $v_{x'} = 0$ ，得

$$v_y = \frac{v_{y'} \sqrt{1 - (v^2/c^2)}}{1 + (v/c^2)v_{x'}} = v_{y'} \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$$

因此 $p_y = mv_y = mv_{y'} \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$

因为子弹穿进木块的深度对两个观察者是相同的，因此 $p_y = p_{y'}$ ， $m'v_{y'} = mv_{y'} \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ ，这样就必须 $m = m' / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ，即

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

这就是质量随其速度变化的公式。 m_0 是物体相对于观察者处于静止状态时所测到的质量（ m_0 即 m' ）。

(2) 质量和能量的关系： $E = mc^2$ 因为物体的动能等于外力对物体所做的功，即

$$\begin{aligned} K &= \int_{v=0}^{v} \vec{F} \cdot d\vec{x} \\ K &= \int_0^v \frac{d}{dt} (mv) dx = \int_0^v d(mv) \frac{dx}{dt} = \int_0^v (mdv + vdm)v \\ &= \int_0^v (mvdv + v^2 dm) \end{aligned}$$

由于质量随速度的表达式为

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad \text{或} \quad m^2 c^2 - m^2 v^2 = m_0^2 c^2$$

将此表达式两边微分，得

$$2mc^3 dm - m^2 2v dv - v^3 2m dm = 0$$

经整理后得 $mvdv + v^2 dm = c^2 dm$

$$\begin{aligned} \text{所以 } K &= \int_0^v (mvdv + v^2 dm) = \int_{m_0}^m c^2 dm \\ &= mc^2 - m_0 c^2 \end{aligned}$$

爱因斯坦在这里提出了他的独特见解，把 $m_0 c^2$ 称作物体的静止能量，把 mc^2 称作物体的总能量，即： $E = mc^2$ ， $E_0 = m_0 c^2$ 。

此式称为物体的质能关系式。

(3) 动量和能量的关系 由于是动量守恒而不是速度守恒，所以常常用物体的动量代替物体的速度来表示物体的能量。

为此，我们把表达式 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ 两边平方，而且两边同乘以 $c^4[1 - (v^2/c^2)]$ ，得到

$$m^2 c^4 - m^2 v^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

利用 $E = mc^2$ ， $E_0 = m_0 c^2$ 和 $p = mv$ ，我们求得 E 和 p 之间的关系为

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2$$

这一关系有极其重要的意义。把它应用到光子上去（光子的静止能量为零），就可得到光子的动量等于光子能量除以光速 c 的概念： $p = \frac{E}{c}$ 。将上述关系式两边开方，得到 $E =$

$\pm \sqrt{p^2 c^2 + E_0^2}$ ，从负号看出，自由粒子存在着负能量状态。

(4) 求解动力学问题时常犯的错误

$$K \neq \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad \text{和} \quad K \neq \frac{1}{2} mv^2$$

动能正确表达式应是 $K = mc^2 - m_0 c^2$

同理，对于动量，应注意 $p \neq m_0 v$

动量的正确表达式为 $p = mv$ 和 $p = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c}$

所以，在相对论计算中，常常用 MeV/c 作为动量单位。

二、例 题

【例 1】 在实验室中处于静止的一块放射性样品向两个相反的方向抛射出电子.按一位实验室观察者测量,其中一个电子的速度是 $0.6c$,另一个是 $0.7c$.按照伽利略变换,从一个电子去测量另一个电子的速度将是多少?

解 设观察者 O 相对于实验室处于静止状态,而观察者 O' 相对于速度为 $0.6c$ 的粒子(取为正方向)处于静止状态,那么按照伽利略速度变换,则有

$$v_x' = v_x - v = -0.7c - 0.6c = -1.3c$$

讨论 这例题表明,在伽利略变换下,速度是可能大于光速的.此结果与狭义相对论不符合.这说明,在高速情况下,应当是用洛伦兹变换代替伽利略变换.

【例 2】 一个系在一根弹簧上的物体,在一个水平的无摩擦的表面上运动.试证明,按照伽利略变换,一位相对于表面处于静止的观察者和另一位沿着弹簧方向以恒定速度运动的观察者,两人确定此物体的运动方程是一样的.

证 相对于表面静止的观察者 O 所确定的运动方程是 $F = ma$, 或

$$-k(x - x_0) = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

为了找出另一位观察者 O' 所确定的方程,我们利用伽利略变换得到

$$x = x' + vt' \quad x_0 = x_0' + vt' \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x'}{dt'^2}$$

将这些值代入上述振动方程中,得到

$$-k(x' - x_0') = m \frac{d^2x'}{dt'^2}$$

可见在伽利略变换下,此运动方程是不变式.