

## 质能方程本质的再认识

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授，理论物理教师，中国管理科学院学术委员会特约研究员，北京相对论研究联谊会会员，中国民主同盟盟员（作者为中国科学院高能物理所研究员）

[xiandaiwulixue@21cn.com](mailto:xiandaiwulixue@21cn.com), [1922538071@qq.com](mailto:1922538071@qq.com)

**Abstract:** 拉格朗日和哈密顿的工作使力学彻底摆脱了对几何学的依赖，成为完全分析的形式，并且以能量取代力的概念体系为力学在物理学领域的广泛应用开辟了道路。能量守恒定律指出：“自然界的一切物质都具有能量，能量既不能创造也不能消灭，而只能从一种形式转换成另一种形式，从一个物体传递到另一个物体，在能量转换和传递过程中能量的总量恒定不变”。

[Li X. 质能方程本质的再认识. *Academ Arena* 2017;9(16s): 183-191]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 7. doi:10.7537/marsaaj0916s1707.

**Keywords:** 物理学；力学；因果；分析；数学；方法

### 1、能量守恒定律

拉格朗日和哈密顿的工作使力学彻底摆脱了对几何学的依赖，成为完全分析的形式，并且以能量取代力的概念体系为力学在物理学领域的广泛应用开辟了道路。——董光壁：《世界物理学史》

能量守恒定律指出：“自然界的一切物质都具有能量，能量既不能创造也不能消灭，而只能从一种形式转换成另一种形式，从一个物体传递到另一个物体，在能量转换和传递过程中能量的总量恒定不变”。

注意：1、从一种形式转换成另一种形式是泛指，是指所有形式能量。

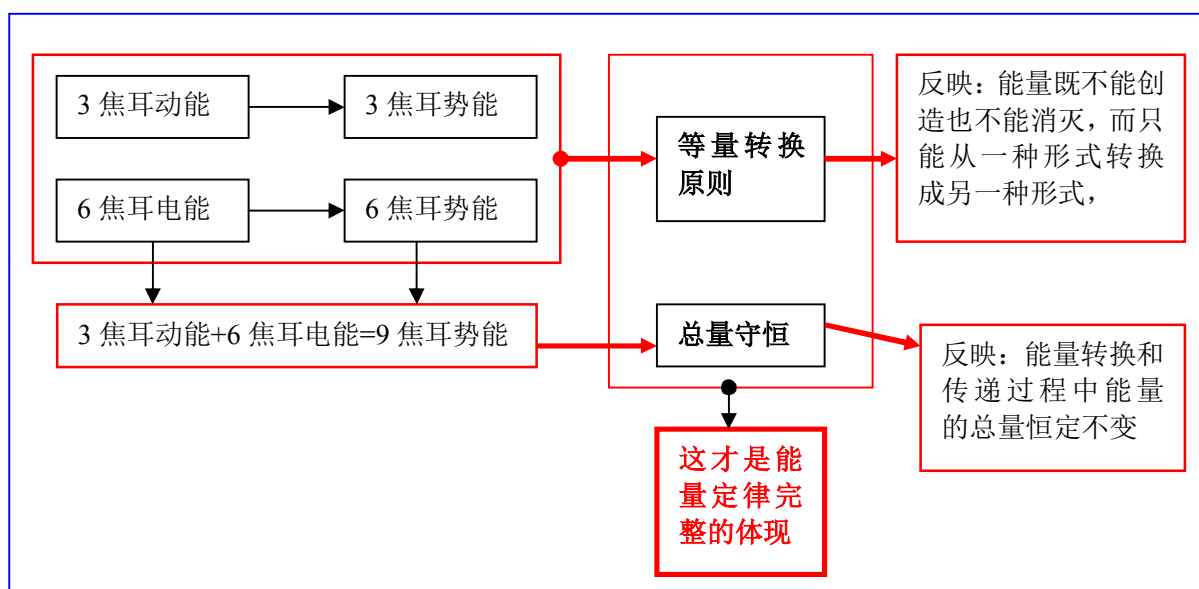
2、能量转换和传递过程中能量的总量恒定不变，并没有限制是那几种形式能量。

设：一体系，有3焦耳动能增量和6焦耳电能增量全部转换势能：

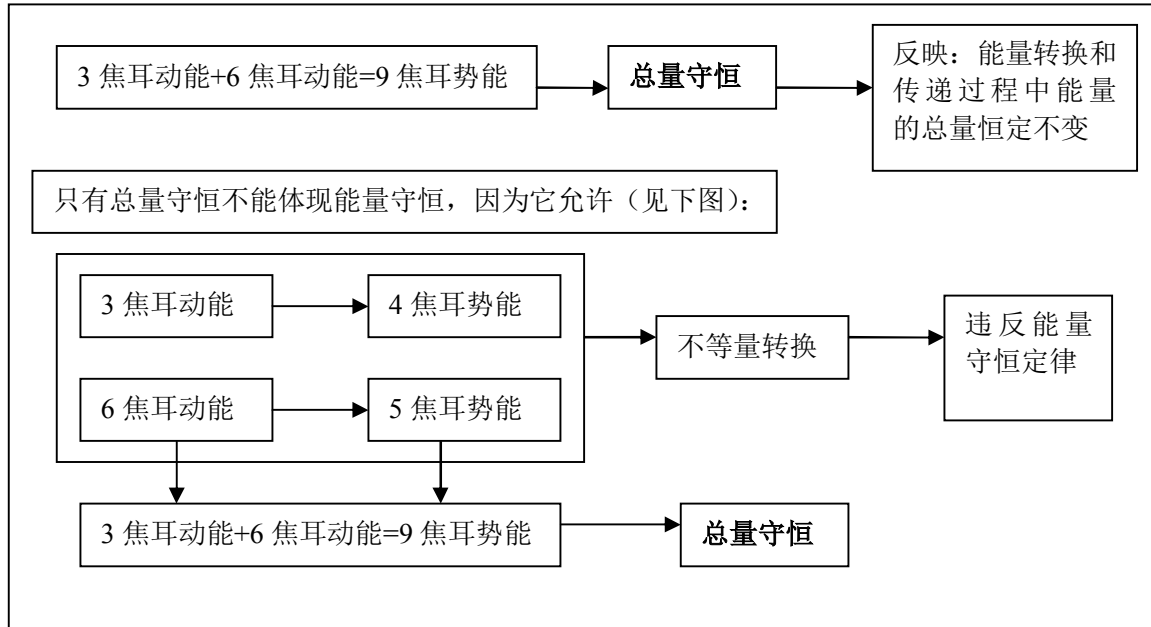
根据各种形式的能量相互转化的规律可知：要保证系统能量守恒，其根本原因：一是系统内各种形式的能量可以相互转换，且转换的量值一定相等（以下称为：等量转换原则）；

二是系统内变化形式能量的减少量与变化形式能量的增加量相等。

$$\sum dE_{\text{减少}} = \sum dE_{\text{增加}} \quad (3-1)$$



而不是：



注意：系统内的作用是有时间与过程的，不同形式能量之间的转换是多种多样，故要确保能量守恒定律成立的条件之一就是所有形式能量之间是可以相互转换的，且转换量一定相等。

故此我们可得出：

一、 $\Sigma E = \text{常量}$ （或  $\Sigma E = \Sigma E$  或  $\Sigma dE = \Sigma dE$ ）只是保证总能量守恒或总能量增量守恒，并不保证体系内的所有形式能量之间能量转换必需遵守等量转换原则，在  $\Sigma E = \text{常量}$ （或  $\Sigma E = \Sigma E$  或  $\Sigma dE = \Sigma dE$ ）中，不仅含有不同形式能量之间转换遵守等量转换原则的总能量守恒或总能量增量守恒，而且还含有不同形式能量之间转换不遵守等量转换原则的总能量守恒或总能量增量守恒。而根据能量守恒定律，能量的变化只能是不同形式的能量互相转化，在转化中每一种形式的能量转化为另一种形式的能量时，都要严格遵守等量转换原则，从而才能保证总能量守恒。明显  $\Sigma E = \text{常量}$ （或  $\Sigma E = \Sigma E$  或  $\Sigma dE = \Sigma dE$ ）不能等同于能量守恒定律。

同理，单一（或二/三种）形式能量的守恒只能保证分析的这几种形式能量的转换遵守等量转换原则，并不能保证所有形式能量之间的转换遵守等量转换原则，也是不符合能量守恒定律的。

二、能量守恒定律成立的条件是：一是功和能的关系——各种不同形式的能可以通过做功来转化，能转化的多少通过功来量度，即功是能转化的量度。二是能量增量与各种形式能量之间关系——各种形式能量的转换遵循等量转换原则，能量增量是所有形式能量的增量，是此形式能量的增量，也是彼形式能量的增量。而  $\Sigma dE_{\text{减少}} = \Sigma dE_{\text{增加}}$  与  $\Sigma E = \text{常量}$  是结果。长期以来物理学界一直把  $\Sigma E = \text{常量}$  等同于能量守恒，是对能量守恒定律认识不足。

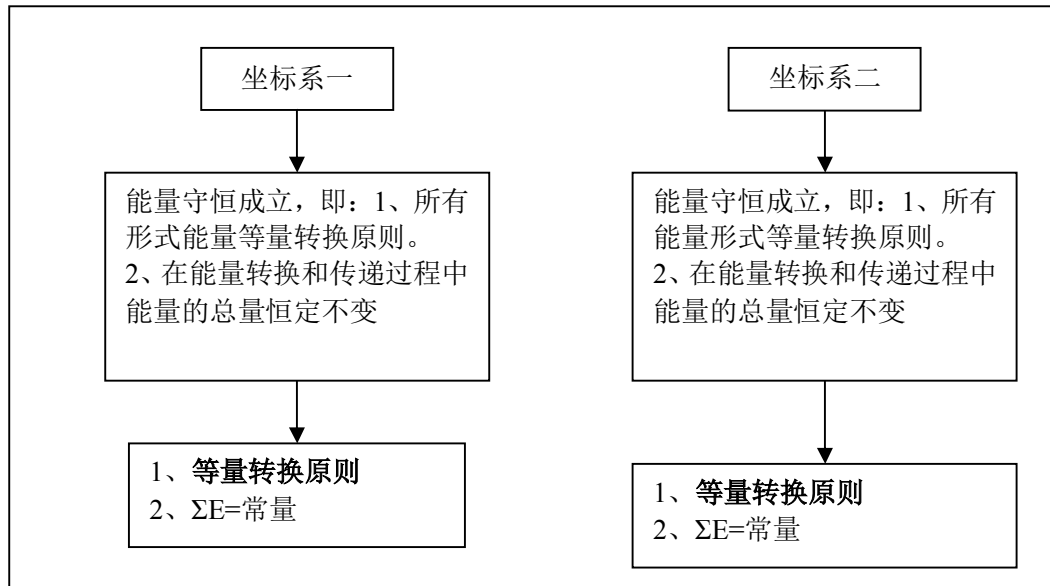
三、能量守恒定律与总能量守恒(总改变量守恒)以及几种能量形式等量转换间之关系是不可逆的，由能量守恒定律可得总能量守恒(总改变量守恒)以及能量形式等量转换，但由总能量守恒(总改变量守恒)以及几种能量形式之间等量转换是不能得到能量守恒定律的。能量守恒定律与总能量守恒(总改变量守恒)以及几种能量形式等量转换是不能等同对待的。

四、能量守恒有二，一是等量转换，二是总量守恒，二者不可缺一。

五、功能原理与能量守恒定律的本质是一致的。

## 2、能量守恒定律对坐标变换的要求

换位思考能量守恒与坐标变换的关系，分析能量守恒定律对坐标变换的要求，按照现代物理的说法，能量守恒只在每个参照系各自内部都有一套描述守恒的方法，它们都在自己的描述下承认能量守恒。则必须要假设在二个坐标系能量守恒成立，至于能量守恒是相对的，还是有条件的，暂不讨论。



注意：1、各种形式能量的转换遵循等量转换原则。

2、能量增量在能量守恒定律中的重要作用，能量的转移和传递其实是靠能量增量（功能原理）。

众所周知，能量有多种形式，如动能、势能、化学能、电磁能、核能等等，各种形式能量之间可以相互转换，都能参加物体之间的作用，而不同形式能量都有自己的数学表达式。

首先我们不难看出，由于能量有多种形式，人们不能保证自己已经知道了所有形式能量，要保证所有不同形式能量之间转换遵循等量转换原则，从数学上不可能每一种形式能量地证明。

质量与能量在物理学中是二个不同的物理量，也是人们公认的物质的二大基本属性。不过在牛顿时代，人们已经认识到：能量与质量有关。例如，物体的势能 =  $mgh$ ， $m$  是该物体的质量， $g$  是重力加速度， $h$  是它相对于地面的高度。物体的机械运动动能 =  $0.5mv^2$ ， $v$  是它的机械运动速度。固体或液体的热能  $Q = cmT$ ， $c$  是其比热， $T$  是其本身的温度。那时，人们认为质量是物质的一个与运动状态无关的更本质的内在属性，质量不变或质量守恒被认定为物理学以至自然界的一个基本的客观规律或法则。同时，人们也发现，物质的能量虽然表现形式可以改变，但在一个封闭系统内却总是守恒的。因而，能量守恒也被认定为物理学以至自然界的一个基本的客观规律或法则。

质能方程是由一位意大利人 Delinto De Pretto 首先发现，于 1903 年，发表在一份叫 Atte 的意大利杂志上。1905 年相对论问世前，汤姆孙、考夫曼等早已在质速关系和质能关系的实验与理论研究上作了大量有成效的工作。奥地利物理学家哈孙隆耳 1904 年通过实验证实了质量增大与辐射能量成正比，并导出了著名的关系  $E = mC^2$ 。罗瑟道：“质能相当定律（ $E = mc^2$ ）不是意味着，质量有时能够转化成能量，也不是说能量转化为质量，而是说，一种变化伴随着另一种相应的变化，惯性质量与能量彼此成比例。”这里，罗瑟直接把“能量惯性定律”改称为“质能相当定律”。【1】著名的 W.Heisenberg 对此是这样评论的。“时常有人说，原爆炸的巨大能量是由于质量直接转化为能量，并且只有根据相对论人们才能预计这些能量。然而这是一种误解。原子核中可利用的巨大能量早在 Becquerel, Curie 以及 Rutherford 的放射性衰变实验中就已知晓。……铀裂变变的能源主要是原子核分裂而成两部分间的静电斥力。原子爆炸的能量直接出自这个来源，而不是由质量转换为能量而得到的，静止质量有限的基本粒子数在爆炸时并未减少”。

参考文献：

【1】W·G·V 罗瑟著《相对论导论》241 页。

### 3、质能方程的相对论推导

方法 1：设质点在外力作用下，由静止开始沿力方向运动一段位移  $ds$ ，由动能定理：

$$\mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = dE_k$$

$$\begin{aligned}
 E_k &= \int_0^{E_k} dE_k = \int_0^s \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^s \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \right) \cdot d\mathbf{s} \\
 &= \int_0^s \mathbf{v} \cdot d \left( \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \right) = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - m_0 \int_0^v \frac{v}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \cdot dv \\
 &= \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} + m_0 c^2 \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \Big|_0^v = mc^2 - m_0 c^2
 \end{aligned}$$

所以，相对论动能为：

$$E_k = mc^2 - m_0 c^2$$

说明：(1)  $E_o = m_0 c^2$  ——物体的静止能量。

静止能量是物体内能之总和。即物体分子的动能、分子间的势能、分子内部原子的动能和势能，以及组成原子的基本粒子的相互作用能量之总和。

(2)  $E = mc^2$  ——物体的总能量，是物体动能与静止能量之和。

质量、能量是物质的两种基本属性，质量通过惯性表现，能量通过做功表现。能量变化必然伴随质量变化，反之亦然。但它们并非相互转化，在封闭系统中，总质量和总能量各自保持守恒。

$$(3) \quad v \ll c \Rightarrow E_k = (mc^2 - m_0 c^2) \rightarrow \frac{1}{2} m_0 v^2$$

$$\begin{aligned}
 E_k &= mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1 \right) \\
 &= m_0 c^2 \left\{ \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2 + \dots \right] - 1 \right\} \approx m_0 c^2 \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2
 \end{aligned}$$

方法 2：当外力作用在静止质量为  $m_0$  的自由质点上时，质点每经历位移  $ds$ ，其动能的增量是  $dE_k = F \cdot ds$ ..... (1)。如果外力与位移同方向，则上式成为  $dE_k = F ds$ ..... (2)，设外力作用于质点的时间为  $dt$ ，则质点在外力冲量  $F dt$  作用下，其动量的增量是  $dp = F dt$ ..... (3)。考虑到

$$v = \frac{ds}{dt}, \quad \text{由上两式相除，即得质点的速度表达式为亦即} \quad v = \frac{dE_k}{dp} \dots \dots \dots (4),$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{平方，得}$$

$$dE_k = v d(mv) = v^2 dm + mv dv \dots \dots \dots (5), \text{把式}$$

$$m^2(c^2 - v^2) = m_0^2 c^2, \text{对它微分求出 } mv dv = (c^2 - v^2) dm \dots \dots \dots (6), \text{将(6)代入上式(5)得:}$$

$$dE_k = c^2 dm \dots \dots \dots (7). \text{上式说明，当质点的速度 } v \text{ 增大时，其质量 } m \text{ 和动能 } E_k \text{ 都在增加，质量的增量 } dm \text{ 和动能的增量 } dE_k \text{ 之间始终保持(7)式(} dE_k = c^2 dm \text{ )所示的量值上的正比关系. 当 } v = 0$$

时，质量  $m = m_0$ ，动能  $dE_k = 0$ ，据此，将式(7)  $dE_k = c^2 dm$  积分，即得：

$$\int_0^{E_k} dE_k = \int_{m_0}^m c^2 dm \dots \dots \dots$$

(8),  $E_k = mc^2 - m_0 c^2$  ..... (9), 上式是相对论中的动能表达式, Einstein 在这里引入了经典力学中从未有过的独特见解, 他把 ( $m_0 c^2$ ) 叫做物体的静止能量, 把  $mc^2$  叫做物体的运动能量, 我们分别用  $E_0$  和  $E$  表示之:  $E = mc^2$  ..... (10),  $E_0 = m_0 c^2$  ..... (11), 上列式子叫做物体的质能关系式. 【1】

在质能方程的推导过程中只是利用了引力质量的质速关系, 并没有利用 Lorentz transformation. 对于一个物体, 外力对它所做的功  $Fdx$ , 等于该物体能量的改变  $dE$ , 即  $dE=Fdx$ , 而  $dx=udt$ , 牛顿第二定律推广为:  $F=d(\mu)/dt$ , 所以:  $dE=Fdx=F \cdot udt=ud(\mu)$ , 将速度从 0 到  $u$  对上式求积分, Einstein 得到:  $\Delta E=mc^2-m_0c^2$  为物体的静止能量,  $mc^2$  为物体的运动能量. 物体在任一刻的总能量为:  $E=mc^2$ . 在特殊条件下, 原子核内发生裂变或聚变, 物体的质量出现亏损, 以核能的形式释放出来 ( $\Delta E=\Delta mc^2$ ).

2003 年 10 月, 在西安召开的《相对论及现代物理创新国际会议》上, 来自美国的大学教授张超先生, 介绍了他的工作, 他的主要实验工作就是和其他教授一起探测某些粒子的能量、动量, 然后根据相对论的能量动量公式来计算粒子的质量:  $E^2 = E_0^2 + P^2 c^2$ ,  $E$  是粒子运动时的能量,  $E_0$  是粒子静止时的能量,  $P$  是

粒子运动时的动量. 由于,  $E_0 = m_0 c^2$ , 所以  $m_0^2 = \frac{E^2 - P^2 c^2}{c^4}$ ,  $m_0$  是粒子的静止质量.

参考文献:

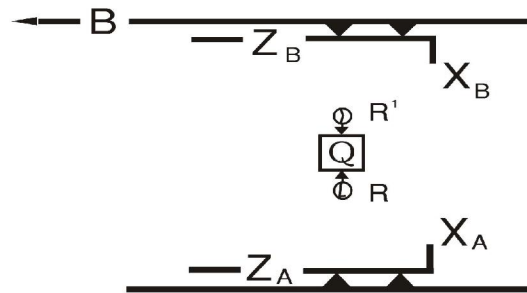
【1】程守洙、江之永, 《普通物理学》, 高等教育出版社, 1998 年 6 月第五版.

4、质能方程的非相对论推导

1、Einstein 对于质能方程的非相对论性推导

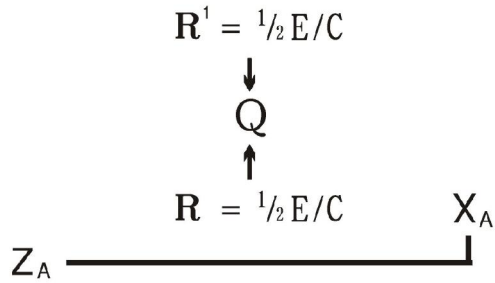
Einstein 曾经利用狭义相对论的原理、动量守恒定律、辐射压力的表示式以及光行差的表示式, 而没有利用它的形式结构推出质能方程【1】. 证明如下:

“比如, 我们考虑另外一个思维实验, 它可以从下图 (图 2) 中方便地想象出来. 它是图 1 中一个部分的放大. 图中 A 和 B 还是相对作匀速  $V$  运动的两个平台. 在它们之间的空间中有一个自由漂浮的物体 Q, 从平台观察, 它是静止的. 我们在各个平台上都建立一个 Z-坐标框架来规定 Q 的位置.



(图 1)

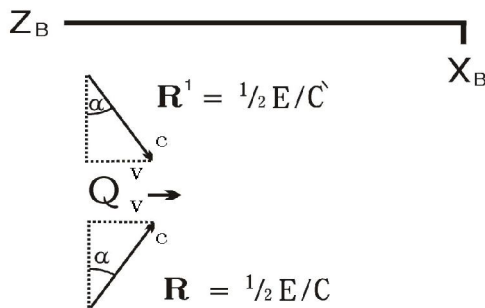
(图 2) 现在研究, 如果两个等同的辐射束  $R$  和  $R^1$  沿垂直于  $Z_A$  轴的直线向着  $Q$  运动, 并被  $Q$  所吸收, 这时会发生什么情况? 我们可以先从平台  $A$  的观点, 再从平台  $B$  的观点来分析这一过程. 我们将始终记住相对论假设——物理定律对各个空间飞行器都是等同的, 尤其是动量守恒定律在每组坐标轴上都是有效的. 在辐射被吸收以前, 相对于  $X_A-Z_A$  轴,  $Q$  是静止的. 自从有了麦克斯韦电磁理论, 人们已经认识到能量  $E$  的辐射所携带的动量等于  $E/C$ , 这里  $C$  是光速. 如果我们赋予每一辐射束  $R$  和  $R^1$  一份能量为  $1/2E$ , 则动



量为  $(1/2) E/C$ ，那么被 Q 吸收的辐射可以设想为：

由于每个辐射束以垂直于  $Z_A$  轴的相反方向击中 Q，所以 Q 相对于  $X_A-Z_A$  轴显然保持静止。

现在我们从平台 B 的观点来看同样的过程。参照这个平台，平台 A 上的物体都是沿  $Z_B$  轴以与速度 V 的负方向运动的。



辐射束 R 和  $R'$  在  $X_B-Z_B$  上的运动方向由相近的箭头标出。它相对于  $X_B$  轴形成角  $\alpha$ 。正像上图解所表示的，对于小的角， $\alpha = V/C$  有很好的近似。从前面用平台 A 上的坐标  $X_A-Z_A$  所作的分析可知，辐射束 R 和  $R'$  被 Q 所吸收，它相对于 A 的速度（在这里是零）仍然不变。因此，现在用坐标系  $X_B-Z_B$ ，物体 Q 的速度在辐射 R 和  $R'$  被吸收以后也保持不变。

引入狭义相对论假设，并把它应用于动量：动量守恒定律对每个平台（A 或 B）都有效。尤其是，相对于平台 B，我们写出一个辐射被吸收前的表达式，再写出一个辐射被吸收后的表达式，然后令它们相等。由于 Q 的运动与  $Z_B$  轴平行，我们须要考虑沿这个轴的 R 的动量分量和  $R'$  的动量分量。R 与  $R'$  之和加上物体 Q 的质量 M，得到吸收前的动量  $= 2[0.5 \times E/C \times V/C] + MV$  ①，这里用  $V/C$  代替角  $\alpha$ 。在辐射被吸收之后，吸收后的动量 =（吸收后的质量）（吸收后的速度），但是我们在平台 B 上看到物体 Q 的速度 V 一定保持不变，因为平台 B 相对于平台 A 继续以相同的速度 V 运动，不受空间中物体 Q 吸收辐射的干扰。所以，如果动量守恒定律有效，那么  $MV + EV/C^2 = (\text{辐射吸收后的质量}) \times V$  ①，由于 E, V 和  $C^2$  都是正数，我们不得不作出结论：辐射吸收后的质量  $M^1$ ，比吸收前的质量大。明确表达为  $M + E/C^2 = M^1$  ①，或  $E = (\Delta M) C^2$  ①，即，质量改变直接与能量吸收成正比例。如果选择适当的 M 和 E 的单位，我们可省略  $\Delta$ ，得到质-能等当公式的熟悉形式： $E = mc^2$  ” ②

1946 年，Einstein 在纽约《技术杂志》上发表《质能相当性初探》一文。该文中，Einstein 根据麦克斯韦理论推导出： $m - m_0 = \Delta m = \Delta E/c^2$ 。由此可见， $\Delta E = \Delta mc^2$  是麦克斯韦理论的结果，它与真空光速不变原理无关。至于是否能把  $\Delta E = \Delta mc^2$  改写成  $E = mc^2$ ，只有优先引入真空光速不变原理才可以肯定。因为麦克斯韦理论著名结论是光速为恒定值。Einstein 在这里利用了辐射推导质能方程验证了后面关于引力质量与电磁质量等价性观点的正确性。

## 2、质能方程的 space-time 平权理论的推导

根据功的原理  $E = W = Fs = mas$ ，令  $E = 1J$ ， $m = 1kg$ ， $s = 1m$ ， $a = 1m/s^2$ ，得  $1J = 1kg \times 1m/s^2 \times 1m = 1kg \times m^2/s^2 = 1/b^2 kg$ ，所以  $1kg = b^2 J$ ，其中  $1(s) = b(m)$ ，即  $E = mc^2$ ，Einstein 的质能方程成立。质能方程的推导简化了，各种简化的形态是科学本身的基础，并且表现为认识过程得以实现的必要条件。质能方程也可以从单位换算中得到，能量的单位也可以用 kg 表示能量是 space-time 与实物粒子的相互作用，Einstein 的质能方程反映了 space-time 平权问题，揭示了 space-time 结构对物质的作用，与物质自身的性质无关，惯性质量在这里仅仅起比例常数的作用。

根据 space-time 平权理论可知, 引力质量不仅意味着能量, 同时意味着动量. 假设一物体的引力质量为  $m$ , 那么它的引力动量应当为  $mc$ , 即  $P=mc$ , 不妨称之为引力动量方程, 把静止物体的引力能量与引力动量称为绝对引力能量与绝对引力动量, 它们都是数量. 在物理学中所讲的引力能量与引力动量应当分别为它们的相对空间与相对时间形式. 由于引力能量反映了引力质量的相对空间存在形式, 相对空间各向同性, 因此引力能量是数量. 由于引力动量反映了引力质量的相对时间存在形式, 相对时间各向异性, 因此引力动量是向量.

质能方程的本质就是时空平权理论的反应, 时空平权是狭义相对论理论的核心, 这也说明了闵科夫斯基四维时空观点的正确.

### 参考文献:

【1】Einstein 方在庆韩文博何维国译. 《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000 年 3 月第 1 版.

### 5、动能公式与质能方程的统一性

温伯格曾经表示: “我们的错误并不在于我们太把已有的理论当回事, 而在于我们并没有对它们给予足够的重视.”

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} v = mv$$

在洛伦兹变换下, 静止质量为  $m_0$ , 速度为  $v$  的物体, 狭义相对论定义的动量  $p$  为:  
(1—1)

式中  $m = m_0 / \sqrt{1-\beta^2}$ ,  $\beta = v/c$ . 式 (1—1) 所定义的相对论动量于经典力学定义的形式完全一致,

均为质量与速度的乘积. 但相对论定义的质量与速度有关. 相对论的能量  $E$  为:  $E = mc^2$  (1—2).  $mc^2$  是运动物体的总能量, 当物体静止时  $v=0$ , 物体的能量为  $E_0=m_0c^2$  称为静止能量; 两者之差为物体的动能  $E_k$ , 即

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (1-3)$$

当  $\beta \ll 1$  时, 式 (1—3) 可展开为  $E_k = m_0c^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right) - m_0c^2 \approx \frac{1}{2} m_0v^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m_0}$  (1—4), 即得经典力学中的动量—能量关系.

由式(1—1)和(1—2)可得:  $E^2 - c^2 p^2 = E_0^2$  (1—5), 这就是狭义相对论的动量与能量关系. 而动

能与动量的关系为:  $E_k = E - E_0 = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} - m_0c^2$  (1—6). 这就是我们要验证的狭义相对论的动量与动能的关系.

狭义相对论保留了力的动量定义式:  $F=dp/dt$  ( $d$  是微分符号, 动量  $p=mv=ft$ ). 根据实验所描绘的曲线可以得到:  $m=m_0/(1-v^2/c^2)^{1/2}$  (其中  $m$  为相对论质量,  $m_0$  为静质量或固有质量), 则  $dp=mdv=m_0/(1-v^2/c^2)^{1/2} \times dv$ , 所以, 在相对论中的功:  $dW=Fds=dp \times ds/dt = vdp = dp \times p/m$ ----- (1), 根据微积分的知识:  $dp^2=2pdp$  代入(1), 得  $dW=dp^2/2m$  ----- (2), 因为  $m=m_0/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ , 两边平方得  $m^2c^2 - m^2v^2 = m_0^2c^2$ , 得:  $m^2c^2 - p^2 = m_0^2c^2$  即  $p^2 = m^2c^2 - m_0^2c^2$ , 对两边微分得:  $dp^2 = d(m^2c^2 - m_0^2c^2) = 2mc^2 dm$ ----- (3)

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

根据狭义相对论, 当  $v \ll c$  时,

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}c^2 - m_0c^2$$

$$= m_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)c^2 - m_0c^2 = \frac{1}{2}m_0v^2$$

又回到了牛顿力学的动能公式。

根据时空平权理论，在相对 space-time 中，两个物体的引力质量分别为 M、m，它们之间的作用力为 F，相对位移为 S，则对于一个物体所作的功均为 FS（以另一个物体为参照物），因此动能相等，物体的动能可以用  $0.5mv^2$  表示，它们的动能之和为  $mv^2$ 。静止物体在绝对空间里的动能为  $mc^2$ ，因为整个宇宙的正引力质量为无限大。

## 6、质能方程的验证

Bertozzi 在 1964 年用量热法测量电子的绝大部分动能转化成的铅盘的热能，并由此确定电子的动能的实验——证明了相对论的动能公式。

新华社洛杉矶 2007 年 12 月 22 日电 美国国家标准技术研究所和麻省理工学院的物理学家说，他们通过迄今最直接、最精确的实验证明了 Einstein 狭义相对论中著名的质能公式。质能公式 ( $E=MC^2$ ) 指出，物质的总能量相当于其质量乘以光速的平方。它表明能量和质量可以互相转换，而光速是恒定不变的常数。这一公式是 Einstein 1905 年发表狭义相对论时提出的，被认为是狭义相对论的基础，也奠定了新的时空观。此前，其他物理学家曾用多个间接实验证明了质能公式的正确性。但科学家认为，这些实验存在一定前提条件，可能引起对质能公式广泛适用性的质疑。美国科学家在 22 日出版的《自然》杂志上发表论文说，他们所采用的方法已能直接支持质能公式。这一实验的原理是：按照质能公式，当一个原子核捕获新的中子时，它的质量就会变成原先原子核和中子质量之和、再减去这一过程消耗的中子结合能，中子结合能包括放射出的伽马射线能量以及原子核碰撞后的反冲。因此，只要分别测出原子核被中子轰击前后质量的变化以及轰击期间发出的能量，然后进行比较，就可以验证质能公式是否准确。科学家选用了硅和硫原子来进行实验。国家标准技术研究所的科学家依据伽马射线在晶格中的散射角来测量其波长，波长就决定了伽马射线的能量。而麻省理工学院的科学家则用电磁阱“固定”住捕获中子前后的原子，并精确测定其质量。他们的测量结果表明，质量和光速的平方的乘积 ( $MC^2$ ) 与能量 (E) 的差异，大约为千万分之四，足以表明质能公式的正确性。科学家在论文中称，这是“迄今为止对质能公式最精确的直接验证”，比此前的证明精度高了 55 倍。

## 7、质能方程的发现意义

1756 年俄国化学家罗蒙诺索夫把锡放在密闭的容器里燃烧成氧化锡。容器里的物质的总质量在燃烧前后并没有发生变化。经过反复的实验验证，他得出结论：在化学变化中物质的质量是守恒的。稍后，法国的拉瓦锡于 1777 年做了同样的实验，结果一样，物质守恒定律于是获得公认。20 世纪初，德国化学家朗道耳特 (Landolt) 于 1908 年，英国化学家曼莱 (Manley) 于 1912 年，分别做了极高精度的实验，证明了化学反应前后物质总质量的变化小于一千万分之一。物质守恒定律于是被实验确立。

1907 年 4 月，A.Einstein 写下了关于狭义相对论和质能关系的论文：<<关于相对性原理所要求的能量惯性问题>>和<<关于相对性原理由此得出的结论>>，进一步揭示了“同惯性有关的质量 m 相当于其量的  $m \times c^2$ ”，“对于孤立的物理体系，质量守恒定律只有在能量保持不变的情况下是正确的...”。在历史上两条相互独立的自然规律：能量守恒和质量守恒，由相对论统一起来了。相对论诞生是物理学上的革命性的进步，其导出的质能关系是现代核能理论的基础，同时它蕴涵的哲学思想改变了人们对时空观的认识。

中国科学院院士何祚庥说：“狭义相对论深化了牛顿所奠定的牛顿力学，深化了牛顿所提出的时空观，从而影响到当代物理学的各个领域。人们公允地认为这是物理学领域里的大突破，亦即由宏观低速运动领域进入到宏观高速领域的突破。这一突破的重要后果之一，是 Einstein 首先发现了质量能量等价的公式  $E=mc^2$ ，并为人类利用原子能指出了方向。”

Einstein 认为只要用  $E=mc^2$  公式就可以算出质量或能量的变化，烟感器就是根据这个公式设计出来的。镅 241 是一种带有放射性的金属，在每一个烟感器中，都有非常微量的镅 241。镅 241 释放出带电的微小粒子束，任何烟雾一旦出现，就会改变微小粒子带电的状态，引发能量变化，启动报警器。

1938 年，美国核物理学家贝特发表了有关氢通过碳——氮——氧循环而聚变的论文。这篇论文给加州理工学院凯洛格实验室的核物理学家以极大的刺激，因为他们一直在从事这一课题的研究。年轻的福勒从



1933 年起就在这里研究碳——氮——氧循环中的第一个反应，进行碳核捕获一个氢核形成氮同位素核氮 7 的实验，还测量了碳核和氮核受质子轰击的作用截面。他们的实验研究定量地给出核反应中释放的能量，提供了检验碳——氮——氧循环可行性的实验依据。在碳——氮——氧循环中首先由碳核和一个质子碰撞，质子打入碳核使之变为氮的同位素  $N(7,13)$ ，它是放射性的，很快放出正电子和中微子形成碳的同位素  $C(6,13)$ ，它和质子反应生成氮核。新的氮核和质子相碰撞形成氧同位素  $O(8,15)$ ， $O(8,15)$  也是放射性的，它放出一个正电子和一个中微子后衰变成氮的同位素  $N(7,15)$ ；最后， $N(7,15)$  和一个质子碰撞形成碳核和氮核。这一系列的反应都是放热反应，因此，只要有足够多的质子，就可以成为稳定的能源。碳——氮——氧循环的结果是 4 个质子合成一个氮核，同时产生 2 个正电子、2 个中微子和 3 个光子，释放出 25.03 兆电子伏特的能量。参与反应的碳元素在核反应前后没有发生任何变化，而氮、氧同位素只是在中间过程中产生又消失。他们认为，只有在 1500 万开以上的高温条件下，碳——氮——氧循环核反应才能有效地进行。因此，只有在比太阳质量大很多的恒星上，这种核反应才成为提供能源的主要途径，实现由氢到氮的聚变。

以牛顿第二定律所表现出的质量称为惯性质量。定义是给概念规定界限的判断，而定律是几个概念之间彼此的本质联系，它所反映的是客观规律。牛顿第二定律正是这样的客观规律，它所反映的是力、质量和加速度这三者之间的本质联系。实际上，人们所以能总结出牛顿第二定律，就是因为人们预先就对力、质量和加速度这三个物理量的概念和测量方法已经有所掌握，然后才能通过实验找出它们之间的内在联系。也就是说，质量的概念及测量方法并非来源于第二定律，而是先于这个定律。第二定律建立过程的历史事实正是如此，早在牛顿第二定律建立之前，人们（包括牛顿）已经用“物质之量”给质量下了定义，并已凭经验知道了通过比较重量来量度质量的方法。牛顿在其著作中说：“物质的量是质的量度，可由其密度与体积求出。”然而，质量没有定义之前又那来的密度？显然，牛顿这个定义等于没有说。“物质的量”往往是指物质多少或物质数量一类的东西，由相对性原理的制约，物质多少这样一个概念本身无法再进一步给以定义，物质的概念被认为是不说自明的。正是这个原因，在牛顿力学中寻找不到“物质的量”与惯性质量之间的任何联系，使得“物体所含物质越多，物体惯性越大”这条经验定律一直游离于物理学之外。也正是这个原因，物理学上的质量除了牛顿定律所赋予它的意义外不再有别的意思，质量乃是阻挠速度变化的量度。这又要回到用定律来定义质量上来，让人很不满意。

要使牛顿质量定义（物质的量）具有生命力，必须要用到爱因斯坦的重要发现——静质能方程（ $E_0=m_0c^2$ ）。当它作为一个公设引入后，我们就能够进一步给予“物质的量”以明确定义，即“物质的量”可以用能量的多少来度量，从而建立起牛顿惯性质量与“物质的量”的联系。

5/6/2017