

能量作为表征孤立系统唯一的普适标签

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2025-05-31 收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250705

CSTR: 32040.14.wl20250705

Energy as the unique universal attribute characterizing isolated systems

CAO Ze-Xian[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

……能量的概念是这门学问首先要定义的……

——皮埃尔·迪昂¹⁾

摘 要 能量是物理学最基础的概念，但是关于“什么是能量”的问题一直没有答案。本文指出，能量是表征孤立系统唯一的普适标签，它是一个抽象的量，是一个平凡的数学的量，是正定的。相互作用的子系统构成一个巨孤立系统，相互作用的量化遵从因果等价的形而上原则。能量守恒有两重意义，其一是孤立系统的能量是定值，这不过是对系统孤立性的确认；其二是相互作用过程造成的子系统能量变化之和为零，后者涉及的是具体的、具象化了的能量名目，为作为孤立系统标签的抽象能量概念的元素。物理研究的首要方法是孤立，第一步是孤立出待研究的体系，第二步是孤立出待研究的问题。在能量为定值的前提下追求另一层面的物理量如作用量或熵的极值，这构成了描述孤立物理系统动力学的理论范式。等价性是引出各种能量名目以及熵概念的过程中所借重的观念。依据我们的能量定义，可以澄清许多关于能量概念和能量守恒律的错误认识。

关键词 能量，孤立系统，普适标签，正定性，能量守恒，等价，形而上原理，作用量，熵，理论研究范式

Abstract Energy is the most fundamental concept in physics, but the question “What is energy” remains unanswered. Here I point out that Energy is the unique universal attribute characterizing isolated systems. It is an abstract, trivial mathematical quantity devoid of any physical essence, and it is positive definite. Interacting subsystems together constitute a grand isolated system, and the quantification of the interactions therein follows the metaphysical principle of *causa aequat effectum*. The law of energy conservation has thus twofold meanings, one is that the energy for an isolated system is fixed, it is simply the confirmation of isolatedness of a system; the other refers to the statement that the total energy change for all the interacting partners within an isolated system should be zero, and the energies here concerned are concrete terms of actualized energy, which are the elements of the abstract concept of energy characterizing isolated systems. The primary method of research in physics is “to isolate”, to

1) …l’idée d’énergie étant la première que cette doctrine ait à définir… Pierre Duhem, *Traité d’énergétique ou de thermodynamique Générale* (能量学或广义热力讲义学), Gauthier-Villars (1911).

isolate the system of concern, and consequently to isolate the problems to be studied. The fundamental theories of physics combine exact conservation and extremism, i. e., under the presumption that energy is fixed, a physical quantity at the other stratum of dimension, that's action for mechanics as well as entropy for thermodynamics, strives for extremum. The various terms of energy and the concept of entropy are introduced via the principle of equivalence. The current work may help clarify many incorrect perceptions over the concept of energy and the law of energy conservation.

Keywords energy, isolated system, universal attribute, positive definiteness, energy conservation, equivalence, metaphysical principle, action, entropy, theoretical paradigm in research

能量概念是物理学思想史上最伟大的发明。伟大的、富有成果的思想的问世从来都既不是突如其来，也不是一下子就以终极完美的姿态亮相的(in a state of complete perfection)。不幸的是，能量这个最基本的概念至今依然处于意义不明的状态。

本文试图回答“什么是能量”这个物理学的基本问题，并为答案做尽可能系统全面的辩护。文章按照如下段落展开：1 引言；2 能量概念；3 能量守恒定律；4 关于能量表征孤立系统之认识的启发；5 相互作用与守恒律的属性；6 落体的机械能守恒定律推导；7 能量的正定性；8 能量就是哈密顿量吗？9 物理理论的两层次结构；10 结束语。

1 引言

本文试图阐述如下观点：

(1) 能量是表征孤立系统唯一的普适标签。它是一个抽象的量，一个平凡的数学的量，一个具有可加性的量(additive quantity)。孤立系统的能量是一个常数，确切地说是定数(E is fixed)，这只是对系统之孤立性(isolatedness)的另一种表述。这是本文对“什么是能量”这个问题的答案。

(2) 能量是正定的。

(3) 相互作用着的子系统之总体构成一个巨孤立系统(grand isolated system)。这个巨孤立系统有一个表征其孤立性的能量，为一定值。孤立系统的能量为一定值是能量守恒的一层意思。

(4) 体系间发生相互作用时能量得以表现，相互作用总可以论述为能量的传递。一体系之能量不会在相互作用时耗尽，即体系之能量只能无限趋于零。

(5) 能量守恒另一个层面的意思得自一个重大的形而上原理(grand metaphysical principle)。当相互作用被表述为因果律时，因果相当(causa aequat effectu)的信条就导致能量守恒律，为此会针对具体问题构造满足能量守恒的不同能量名目。具体的能量概念是在接受和坚持能量守恒的信条下逐步发展出来的，此中的关键概念是等价性(在热力学语境中这个具有广泛哲学意义的词被汉译成了当量)。一些能量名目是基本物理量，如动能、引力势能、电磁势能、自由能等，而一些所谓的能量名目不过是技术性概念，如核能是强相互作用势能的残余。

(6) 孤立系统内部子系统间相互作用表现出来的能量守恒律，其所涉及的能量名目是表征系统孤立性的抽象能量概念的元素。相互作用意义上的能量守恒就发生的空间以及所涉及的能量名目而言，是局部的。

(7) 在因果相当信条之外，物理学还需要另一个重大的形而上原理，即在能量为定值的前提下，物理学尚有另一层面的物理量如作用量或熵在追求极值。这构成了描述物理过程动力学的两层次理论范式。

以上简单列出了笔者关于能量及相关的能量守恒定律、相互作用、等价性、物理理论范式等话题的浅薄理解。基于对基础物理学及其概

念演化历程的思考，笔者接下来将对上述观点作回溯性的阐述，并为个人提出的新观点作相应的辩护。

2 能量概念

能量是最基本的物理量。也恰恰因为能量的这个基本属性，到目前为止我们并不确切地知道能量是什么^[1-5]。正如《费曼物理学讲义》所言：“直至今日，在物理学中我们尚不知道能量是什么，认识到这一点很重要(It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy is)”^[6]。这个局面相当令人尴尬。

能量，energy，会被理解为做功能力的量度(measure of ability, power)。欧洲的物理课本里大约都是这样表述的，如“energia, la capacità di compiere lavoro (意)”，“énergie, la capacité à produire un travail (法)”，或者“Energie, die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten (德)”，意思都是“能量是做功的能力”。有的表述会深刻一些，谓energy constitutes a fundamental limitation on the capacity of a system to perform work (能量构成一系统之做功能力的上限)。注意，能力和能力上限应该有实质性的区别。不过，这些都是一般入门级教科书中关于energy的直观说明，不可以当作普适的定义。

Energy是一个古老的概念，来自希腊语的ἐνέργεια，即en+ergon，意思是展现出效果的(能)力(efficacy or effective force)。它的对立面是δύναμις(dynamis, 今译动力学)，其字面意思是force en puissance (蕴藏之力)。亚里士多德在公元前四世纪就用到ἐνέργεια一词了，使用的就是完成时形式，用其表示la réalité effective (成就了的现实)，与la réalité possible (可能的现实)相对照。亚里士多德的ἐνέργεια与δύναμις在英语中分别被译成actuality与potentiality，或者译成act与potency，又或者acto与movimiento，可以理解为汉语的实际发生与潜在可能。实际上，actual energy和potential energy就是后来物理学接受下来的动能~势能的能量两分法，见文献[7]。法国人

把énergie直接理解为force en action (作用着的力)，而按照德国人的理解，Energie这个古老的词汇具有纯粹的哲学意义(eine rein philosophische Bedeutung)，其表示活生生的现实与功效(von lebendiger Wirklichkeit und Wirksamkeit)。亚里士多德是在其著作Metaphysics IX中针对运动讨论dynamis和energeia这两个概念的，他指出dynamis和energeia比运动自身要意味深远，这一点对笔者理解energy的现代意义启发很大。

现代意义上的energy概念一般认为始见于英国人托马斯·杨(Thomas Young, 1773—1829) 1807年的讲义^[8]。在这部自然科学经典中随处可见energy一词，其意义就是vis viva (活力)。Energy被定义为物体对抗阻力上升或穿透一定深度的潜力(the tendency of a body to ascend or to penetrate to a certain distance, in opposition to a retarding force. 参见文献[8] p.44)，就是 mv^2 (The term energy may be applied, with great propriety, to the product of mass or weight of a body, into the square of the number expressing its velocity. 参见文献[8] p.78)。

从1686年开始，德国人莱布尼兹(Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646—1716)写了一系列的文章^[9]，论证在自然中那个绝对的、不可磨灭的(absolute and indestructible in nature)不是运动量 $m|v|$ ，而是活力 mv^2 。

拉格朗日(Joseph-Louis Lagrange, 1736—1813)在1811年用积分表明势能与活力之间的关系时，指出活力应该有个 $1/2$ 因子^[10]。在其1788年的著作Mécanique Analytique (分析力学)中有用符号 T 表示动能的做法。一说是1829年科里奥利(Gaspard-Gustave Coriolis, 1792—1843)给活力加上 $1/2$ 因子将之变成动能的，他称之为quantité de travail (功的量)。给活力加上 $1/2$ 因子的，还有科里奥利的同事庞斯莱(Jean-Victor Poncelet, 1788—1867)，他的用词是travail mécanique (机械功)，表达式为 $\frac{1}{2} \frac{P}{g} V^2$ ，其中 P 是重量， g 是重力加速度^[11]。此外，庞斯莱还提出了关于作用或机械功(即动能)传输的一般原理(principe général de la

transmission de l'action ou du travail mécanique)。及至 1853 年兰肯(William Rankine, 1820—1872)造了“potential energy (势能)”一词, 人们算是对 energy 一词有了现代意义上的理解。不过, 笔者仍请大家记住, Energy 本身就具有 potency (潜力、势)的意思。Energy 可译成汉语的能(力), 但如今约定成俗的译法为能量, 一个“量”字算是把这个概念拉低了一个层次。此外, 在遇到英文的 quantity of energy, 德语的 Energiemenge, Energiequantum 时比较尴尬, 因此此时才是在谈论“能的量”。Energiequantum 是能的小量, 慢慢地演化出我们今天理解的“能量量子”的含义。

势能是相互作用的特征量, 针对不同的相互作用要构造不同的势能形式。比如引力势下的有质量物体运动与吸引电磁势下的电荷运动有本质的区别, 那区别应该来自势能的区别, 异性电荷间的吸引来自电荷的极性, 那是引力势所不具有的性质。

动能和势能概念变得清晰以后, 能量的概念并不自然地就变得清晰了。但是, 这些具体的能量概念以及能量转化意义上的能量守恒给了笔者充分的启发。

将一个物体或者系统从环境中孤立出来, 这是物理研究的第一个步骤。孤立的过程是必须的, 否则我们谈论的对象便缺乏主体性(identity)^[12], 对于宇宙这一步可以省略。一个系统必须被定义, 保持孤立, 且对其进行量化与数学化是必不可少的步骤 {A system must be defined, and kept isolated; and quantification and mathematization are essential. 参见文献[1]}。孤立体系排除了与外界的相互作用, 或者说交流、联系(free of interaction, communication or connection)。笔者以为, 我们为孤立系统所选择的特征标签即为能量; 当然也可以取一个别的什么名称。因为我们是从做功的能力一窥这个标签的性质的, 它被历史地称为 energy。它是一个抽象的量, 超越系统的具体物理特征。惟其为一抽象的量, 当其原子性(atomicity)渐渐显露, 由此而来的(光)能量量子的概念才让人感到惊奇与难以接受; 它是个简单的数学的量; 它是普适的, 即对所有的系统我们都必须且可以定义一个

这样的量(与此相对, 只有部分的系统可以贴上电荷标签, 而光则不能贴上质量标签); 在用来表征所有的孤立系统这一点上, 它是唯一的物理量。对于给定的孤立体系, 作为标签的能量是一个定数, $E = \text{const.}$ 。这也常常被说成是能量守恒。后面我们会分析另一种使用“能量守恒”说法的情形。

能量是个普适的数学的量, 它是最抽象的观念, 与系统的任何其他物理特性无关。只有这种超越存在之具体细节的物理量, 才是共同的、普适的标签, 才可以进行量的比较, 使得数学化成为可能。沙特莱夫人(Émilie du Châtelet, 1706—1749)认识到不同性质(名目)的能量必须具有相同的量纲, 或者说必须被改造成相同的量纲, 是这个认识过程中的关键一步^[13—15]。有了这个认识, 可以克服将能量概念作为某种实体带来的认识困难(Some difficulties with the concept of energy as something material can be overcome)。能量是孤立系统唯一的普适标签, 由此也就明白为什么描述任何物理系统时能量的概念都是不可或缺的。

能量守恒定律与能量概念的发生过程是相纠缠的。考察物理学的思想史, 笔者甚至想说各种名目的能量几乎是能量守恒律的衍生物。举例来说, 恰恰是从守恒的思想我们才为运动物体的活力加上 $1/2$ 因子从而得到了正确的动能概念的, 此过程历时 150 年左右。这也佐证了想得到能量的概念有多么不易。

在 20 世纪之前的旧文献中, force, power, energy 等几个词在能量意义上是混用的, 后来才逐渐分化了的, 读者朋友们请多留心。

3 能量守恒定律

能量是个抽象的普适概念。对于孤立系统, 能量是一个固定的量, 当年玻尔兹曼想到遍历假设(ergodic hypothesis)时, 构造相关理论的前提就是能量是定值(见文献[1] p.307)。严格说来, 这可不是能量是否守恒的问题。当谈论孤立系统内子系统间的相互作用时, 能量守恒涉及的是具体的能量项, 此时表达能量守恒的表达式 $\Delta E = 0$ 中的

ΔE 所涉及的能量在空间上是局域的^[16]，笔者以为更应该强调的是本性上(by nature)它是局域的，即只涉及特定本性的能量名目。守恒的是孤立系统所具有之具象化的能量形式的部分元素，比如用刚性的壁隔开的两团气体交换的是分子动能。当针对子系统间的相互作用纳入因果律时， $\Delta E = 0$ 表达的能量守恒才被当作信条被提出。这个信条屡屡让我们获得对自然的正确认识，在今天它已变得不容置疑。

沙特莱夫人在她的《牛顿自然哲学的数学原理》法文译本的旁注(marginalia)中首先提出能量守恒的思想^[13]，确立了一个后来称为“energy”的守恒的、可测量的量。基于从落体运动的高度—速度转化中得到的启示，沙特莱夫人指出能量必须在不同形式中有同样的量纲(the same dimensions in any form)，这是能够在不同形式中考察能量的前提。她这是发现了能量的定量的、具有统一能力的特征(quantitative unifying feature)^[15]。笔者由此想到，也惟因此，能量的定义要脱离具体的形式上升到抽象的层面。

1853年，兰肯明确使用了“能量守恒律”的表达，他指出能量守恒定律早已为人们所熟知，即宇宙的实能与势能之和是不变的(The law of the conservation of energy is already known, viz. that the sum of the actual and potential energies in the universe is unchangeable)。此处兰肯引入了势能的概念，用 U 表示；而所谓的“actual energy”，词源上 *energeia* 与 *actuality* 恰是同一个意思(见前)，也是一种潜能，转化为功(干活儿)了的潜能^[7]。兰肯用不可改变(unchangeable)论述的能量守恒所论及的是整个宇宙这个极端的孤立系统——笔者将之归于能量守恒的第一层意思。在同一页上，兰肯还使用了“the law of the transformation of energy (能量转换律)”的概念，一般所说的能量守恒是这个层面上的——笔者将之归于能量守恒的第二层意思。

在关于能量守恒的论述中，经常会拿热功当量(等价性!)以及热机的第一定律说事儿。热机第一定律是能量守恒定律，确切地说是能量转化定律，它就是对因果相当这一形而上原理的直白

表达。 $Q_1 - Q_2 = W$ ，这个表达式中对 Q 、 W 采用同样的物理量纲，它是量上的相等。实际的历史是，我们是从不同的角度认识、量化热量 Q 和功 W 的，在此过程中它们曾被赋予了不同的单位，因此才有了那个表示热—功等价性的系数 4.18 J/cal。历史上，焦耳于 1845 年做了脚踏轮实验，初步引出了这个等价量^[17]，而这不过是为了对形式的超越，在一个抽象的概念层面上达成一致，最终将热和功都归于能量的范畴。类似的能量守恒，不过是对因果相当的表述。因果相当，就是表述 Mechanical equivalent of heat 中的那个 equivalent (等价)要表达的意思。熵概念的引入，同样是基于 equivalence (等价性)的概念，这方面的知识，包括哲学的、数学的和物理的知识，我们一定要补上。笔者此前有过粗浅的论述^[18-20]。

在伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)的斜坡实验中，理想情形下小球在斜坡上的上升高度等于当初的下落处的高度，与斜面的倾角无关。这里作为因果关系中的两个对象是全同的，有关系 $\Delta h = k\Delta H$ ，其中 ΔH 是沿一侧坡的下落高度， Δh 是沿另一侧坡的上升高度，当量(equivalence)显然应是 $k = 1$ 。当上升侧为平面时，即 $\Delta h \equiv 0$ ，等价关系变成了下落高度与所获得速度之间的 $v^2 = k\Delta H$ ，当量 $k = 2g$ ^[11]。

关于因果律—等价—守恒律的一体性，可用一个寻常的例子加以说明。设想有两个孤立的小水塘 A 与 B，水的体量 V 是表征它们的普适标签，类似能量。引入相互作用，具体的作用机制可以是重力也可以是抽水机(对研究者来说可以是不清楚的)，过程满足守恒律， $\Delta V_A + \Delta V_B = 0$ ，而我们观察到的物理现象是水平面的升降，规律为 $\Delta H_A = -k\Delta H_B$ ，当量 $k = S_B/S_A$ 为池塘的面积比，是一个可观测量。当底层的作用机制为重力时，水面高的水塘是因果关系里的因；当作用机制为抽水机时，被抽水的那个水塘是因果关系里的因。

能量守恒作为基本定律，其对所有物理现象都成立。对于作用的参与者，能量必须是共有的性质，或者说是所有可孤立出来的对象、系统的普适标签。它要面对各种各样的变化(manifold change, mannigfaltigkeit)。能量守恒只能是最抽象

的观念,是一个数学原理(mathematical principle)。

关于能量转化层面上的能量守恒还有另一个形而上的信条。迈耶(Julius Robert von Mayer, 1814—1878) 1841年曾有表述“能量既不能被创造也不能被消灭”^[17]。1847年,亥尔姆霍兹(Hermann von Helmholtz, 1821—1894)明确阐述了能量守恒的广泛理论基础^[21],提供了守恒的证据,不过不完善,甚至同严格的守恒不相恰。作为信条的能量守恒定律当然必须是严格的。神圣的能量守恒定律(sacrosanct principle of energy conservation)作为一种信念,且不论对其使用的形式与过程是否正确,曾结出了累累硕果。硕果之一就是中微子概念的提出。静止的原子核会发射出高速粒子,表现出极大的动能,依据能量守恒的信条人们最终于1906年从电动力学得到了公式 $E = mc^2$ ^[22],即惯性质量本身作为一项能量被纳入了能量守恒的考量,于是质能关系被确立了下来。接下来,面对中子衰变过程 $n \rightarrow p^+ + e^-$ 的质—能不守恒,对能量守恒律的坚持让泡利(Wolfgang Pauli, 1900—1958)于1930年提出了中微子的概念——有一个未知的中性粒子携带着缺失的那部分质—能。注意, $E = mc^2$ 被说成是energy-mass equivalence,关键是equivalence,电荷势能 $V = \frac{q_1 q_2}{r}$ 也可以理解为电势能—电荷间距之间的等价关系。能量是物理实在的等价量!

再强调一遍,文献中提及的能量守恒定律可能指向两种略有不同的情境。一是孤立系统的能量是常数、定值, $E = \text{const.}$ 。这里的能量是一个抽象的数学的量,不指向特定的物理内涵。一种是相互作用着的子系统,其总能量变化为零,即 $\sum_i \Delta E_i = 0$ 。这后一种情形中的能量有具体的物理内涵,这里的能量形式是这些子系统所构成之巨孤立系统之作为特征标签的能量的元素。此外,具体参与的那些能量名目其变化也可能仅发生在相互作用体系的局部。多数时候能量守恒律所指的是这后一种情形的能量转化律。能量守恒还可以取微分形式, $\frac{dE_1}{ds} + \frac{dE_2}{ds} = 0$,其中 s 是某个合适的过程参数,见于普朗克的辐射过程热力

学的研究。

从相互作用的子系统的具体细节生发出了一个必要性,即为子系统赋予质量、电荷、自旋之类的标签。质量、电荷、自旋等是关于存在之除了能量之外的具体的标签,与相互作用机制相联系。所谓的相互作用,就是把这些标签也纳入能量项(的表述)。

化学能、核结合能之类的概念是基于能量守恒信条而来的技术性概念而非基础概念。能量转换的说法是一种便宜的说辞。一句机械能转化为电能的所谓原理,不涉及过程或参与者的细节,没有任何物理内涵——它不能帮助我们造出发电机。

能量有大量的不同形式,这是一种幻觉。能量的定义应该是普适的。我们需要的是找到相互作用着的具体物理量(的描述),去就和能量守恒的原则,同时还要满足具体的物理条件,与其他理论的自恰,等等。典型例子是爱因斯坦的广义相对论,它要构造同时满足能量守恒和其他理论要求(如广义协变性等)的能量—动量张量,我们发现那很不容易,也许是不可能完成的任务。注意,是爱因斯坦的广义相对论,当然还有哈墨尔(Georg Hamel, 1877—1954)关于欧拉—拉格朗日方程与对称群的研究^[23],启发或曰催生了诺特(Emmy Noether, 1882—1935)的工作,诺特定理将对称性与守恒律联系起来。在拉格朗日力学语境中,根据诺特定律,同能量守恒相联系的是时间平移对称性。但是,一个孤立系统有一个恒常的量作为标签,这个量是能量,它是超越具体表达形式的概念。相互作用着的子系统所构成的一个更大的巨孤立系统,其能量不变,此与“nature is uniform (大自然是均匀的)”的对称性无关。正如普朗克1887年所言,(能量是)一个在大自然所有变化中保持不变的量(eine in allen Veränderungen der Natur unverändert bleibende Grösse)。孤立系统能量的不变性具有绝对意义。

就相互作用而言,能量的概念包含关于一系统“同其他系统交流之能力(the ability to communicate with other systems)”的信息,这对理解具体的能量名目很关键。当看见不同子系统间有交流

的时候,“具体情境中的能量是什么”是一个要根据具体情境商议的问题。当我们拥有了很多具象化的能量形式,且借助不同的能量形式运用能量守恒定律获得了越来越深刻的关于自然的认识时,则思考一般意义下的“什么是能量”的问题就更显得有必要了。

4 关于能量表征孤立系统之认识的启发

关于能量是表征孤立系统唯一的普适标签的认识,来自笔者阅读一些物理学巨擘之经典著作时所受到的启发。

启发1来自马赫(Ernst Mach, 1838—1916)对牛顿力学三定律的表述问题^[24]。牛顿第一定律云,除非受力,一个物体会保持静止或匀速直线运动。这可以表示为对于孤立体系, $v = \text{const.}$ 。牛顿第三定律云,对任意的作用,总存在相反的、等量的反作用。马赫把第三与第一定律合起来表述,认为这意味着对于孤立体系,其相互作用着的子系统之速度间的线性组合为常数。对于相互作用着的两个子系统所构成的孤立体系, $MV + mv = \text{const.}$ 。这个组合的系数就是面对运动变化的不情愿,或曰惰性(惯性),即惯性质量。马赫的原文为“Wenn zwei Massen M und m aufeinander wirken, so erteilen sie sich nach Newton entgegengesetzte Geschwindigkeiten V und v , welche sich verkehrt wie die Massen verhalten, so daß $MV + mv = 0$ ”。这里的 V 和 v 是相对于初始时的零速度所获得的速度。

马赫关于时间的表述为“绝对的、真实的、数学的时间自顾自地飞逝,依其本性均匀地飞逝,与任何外部存在无关(Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußern Gegenstand. Sie wird auch mit dem Namen Dauer belegt)”。这里马赫观念的关键是“与任何外部存在无关”。其实, absolute (ab-solute), 我们汉语译成“绝对”,字面意思就是“脱离”,以至于没有参照。马赫的关于运动

与时间的表述处处都是对系统孤立性的强调。孤立系统是定义的出发点!当然,对于真实的物理世界,孤立是理想化的事物(Isolation is something of idealization)”^[25]。

启发2来自热力学。克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)是热力学的奠基人,他的思考为物理学带来了最重要的关键词:熵(Entropie)。克劳修斯1865年的经典文献的最后一句,是物理学文献中罕见的宣言式的一句,值得我们细品^[26]。兹照录如下: Vorläufig will ich mich darauf beschränken, als ein Resultat anzuführen, daß, wenn man sich dieselbe Größe, welche ich in Bezug auf einen einzelnen Körper seine Entropie genannt habe, in consequenter Weise unter Berücksichtigung aller Umstände für das ganze Weltall gebildet denkt, und wenn man daneben zugleich den anderen seiner Bedeutung nach einfacheren Begriff der Energie anwendet, man die den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie entsprechenden Grundgesetze des Weltalls in folgender einfacher Form aussprechen kann:

(1) Die Energie der Welt ist constant,

(2) Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

这一段可大致翻译如下。当前我将局限于呈现一个结果,即当把那个我针对一个单一物体称之为熵的那个量,当作是以较舒适的方式考虑到所有的情形为整个宇宙所构造的,且与此同时据其本义对其他物体应用简单的能量概念,则热的力学理论的两大定律所对应的宇宙之基本规律可用如下简单方式表述:

(1) 世界的能量是常数;

(2) 世界的熵趋于最大。

在克劳修斯的这句结论中,我们注意到其中的关键词“单个物体(ein Einzelner Körper)”和“整个宇宙(Das ganze Weltall)”都意在强调它们是孤立的、与它者没有瓜葛的存在。对宇宙之构成单元,可以以能量的本义运用能量的概念,宇宙的能量是各构成部分之能量的总和。支配孤立体系的基本规律为“能量是个定数”。这是最根本

的、第一层面的规律。它表现为一个等式, $E = \text{const.}$, 或者 $dE = 0$ 。对于那些存在大数构成单元的孤立系统, 支配其行为的还有第二个层面的基本规律, 熵努力达到最大。它表现为一个不等式, $\Delta S \geq 0$ 。

这里的 Welt, 应和句中的 Weltall 一样理解, 是指整个宇宙。但是, 为了照顾字面, 我还是用“世界”一词翻译了。对于一个指定的物体, 它之外的、围绕着它的存在, 德语称之为 Umwelt, 汉译环境。整个宇宙当然是一个孤立存在。对于构成宇宙的大小、不同层面的存在, 欲将之作为研究、认识的对象, 要做的第一步是将其孤立出来, 而该对象以外的所有存在可用 Umwelt 一词打包。

对孤立系统的强调, 自然被后来的热力学—统计力学研究继承了下来。举例来说, 冯·诺伊曼(John von Neumann, 1903—1957) 1927 年的量子统计奠基性文章, 题目为“量子系综的热力学”^[27]。然而, 这个我们翻译成“系综”的概念, 英语文献沿用法语词 ensemble, 德语词为 Gesamtheiten, 是非常直白的“整体、全部”的意思。研究一个热力学体系, 要强调它是一个整体、全部, 第一步是将其同环境分割开来(isolieren es gegen die Umwelt)。这种分割当然是理想的、数学的, 而非现实的、物理的。

研究物理, 起始动作就是孤立。第一步是孤立出要研究的对象, 如玻尔兹曼所言, 想象一个物体系统, 其是孤立的, 不与其他物体处于相互作用中(Denken wir uns ein System von Körpern, welche für sich isoliert und nicht mit andern Körpern in Wechselwirkung sind)^[28]; 第二步是孤立出要研究的问题, 埃伦费斯特就是这样的杰出物理学家, 在其科学生涯早期分析统计力学时, 埃伦费斯特针对辐射问题和气体运动学理论孤立出了很多麻烦之处(Through his analysis of statistical mechanics early in his scientific career, Ehrenfest had isolated many problematic points in the understanding of radiation theory and kinetic theory)。比如, 针对黑体辐射, 艾伦菲斯特就指出黑体辐射的平衡是绝对平衡才是问题所在(详情参阅拙著《黑体辐射》)。

一个孤立体系, 能量是定数。当我们欲研究这样的物体处于不同能量下的状态时, 我们会让它同一个(热容)无穷大的、温度为 T 的库接触(in Kontakt mit einem unendlichen Wärmereservoir von der Temperatur T), 其同环境或曰库(Reservoir)之间的交流(communication)以我们可控的方式凭想象进行。达至热平衡时, 我们又将该系统撤回孤立状态。这就是热力学的常见研究范式。

孤立体系的能量是定数, 这在物理学中是刚性的。局域过程中能量守恒, 这也是刚性的, 没有能量守恒可以被违背多长时间的所谓不确定性原理。

5 相互作用与守恒律的属性

两个以上的系统间若有相互作用, 或者说建立了交流、联系或传输, 则它们形成一个巨孤立系统。孤立系统有特征的能量标签, 为一定数, $E = \text{const.}$ 。

系统内两子系统之间的相互作用, 比如一个大一点的热库和一个小一点的热库之间的传热(热力学中经常出现这样的模型), 可以用因果律表示, $\Delta y = -k\Delta x$ 。选择合适的量纲改造后, 这就是 $\Delta E_1 = -\Delta E_2$, $\Delta(E_1 + E_2) = 0$, 即能量守恒。此处涉及的能量, 就形式而言, 都可以看作抽象能量概念的元素。当相互作用涉及多于一种以上的能量形式时, 会被理解为能量转化。

对于一个处于作用中的体系, 我们必须赋予它一个变动着的能量值, 而不是什么能量处于转化中(under conversion)。任何能量转化的说法都算不上物理。相互作用着的体系之间在发生具体的、有细节的物理, 那才是物理学的内涵。所谓能量转换, 其实是把物理当垃圾扫到毯子下面(sweeping the physics as dust under the carpet)。能量转化表达了一个物理事实但不涉及任何物理过程(it expresses a fact and does not explain the physical process), 它丝毫无助于我们对特殊问题之特殊性的理解。物理学以及物理学家所关切的是具体的物理细节。比如电解问题, 有观察到的表现 $m \propto Q$, 即电解出的物质质量 m 正比于用电量

Q 。这是个因果关系，笼统地用能量转化的套话来讲就是电能转化成了化学能，但从中得不到任何有用的信息。就 $m \propto Q$ 这个关系而言，在科学史上它带来的最重要认识是，如果 $m \propto Q$ 成立而质量 m 是原子式的存在，则电荷 Q 也应该是原子式的存在，即存在电的原子(atom of electricity)。这是对基本电荷认识的第一步。这才是做物理。

能量转换的说法不能解释到底发生了什么物理过程，它只是反映了一个联系不同观测数据(to connect observable data)的等式。孤立系统各有各的能量值；一旦建立起相互作用，则各自系统的能量就通过相互作用被改变了。结果等于原因，反映在表示系统的那个普适能量标签之某些元素的变化上， $\Delta E_1 = -\Delta E_2$ ，或者 $\Delta(E_1 + E_2) = 0$ 。能量转化的故事因为缺乏应有的细节而没有任何精彩之处。真实的情形是，借助可观测或可测量的要素，物理学建立起不同领域间的等价关系。

6 落体的机械能守恒定律推导

机械能守恒定律常见于初等物理课程，笔者未曾见到一个合理的、简明的推导。笔者构造了如下符合物理学史进程的得到机械能守恒定律的论证过程，有利于我们理解能量守恒定律及其中涉及的概念的意义，特别地是要说明能量守恒是对系统孤立性以及相互作用中因果等价信条的强调。笔者再次强调，此处的论证是笔者在教授力学过程中参悟到的。如果此前的文献里能找到同样的内容，则算笔者学术不端——调研不充分不是好借口。

考察自由落体运动。荷兰人斯格拉夫桑德(Willem Jacob 's Gravesande, 1688—1742)约在 1722 年用铜球和粘土做实验研究这个问题——铜球在泥土中的穿透深度可定性反映球进入泥土时的速度，当然还有视觉上对速度的评估。由实验观察能得到的粗略结论是，落体的初始高度， h ($h > 0$ ，以地面为零点)越大，则到达地面(附近)最终获得的速度， v ，就越大，即两者呈现正相关。那么，这个正相关该如何表述呢？ $v \propto h$ ？经验不支持这一结论，感觉下落高度加倍不足以带

来速度加倍。那么， $v^2 \propto h$ ？嗯，比 $v \propto h$ 更接近事实。好，就是它了(观察事实是，铜球下落高度与其在粘土里的穿透深度大致成正比。 $v^{1.99999999723(15)} \propto h$ 形式的精确物理学是后世才有的奢侈)。

针对下落过程中的任意一段，把 $v^2 \propto h$ 改写成：

$$\Delta v^2 \propto -\Delta h, \quad (1)$$

更明确地可写成：

$$(v_1^2 - v_2^2) \propto (h_2 - h_1). \quad (2)$$

这样的比例式可以理解为因果律，是定性定量之间的描述。引入一个常数因子 k ，式(2)可改写成等式：

$$(v_1^2 - v_2^2) = k(h_2 - h_1), \quad (3a)$$

进一步改写成如下形式：

$$\frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2) = mg(h_2 - h_1). \quad (3b)$$

虽然这里的 m 被诠释为落体的质量(其实左侧是惯性质量，右侧的是引力质量)， g 是地球表面的引力加速度，而因子 $\frac{1}{2}$ 的引入更是物理学史上的大事(在迈耶那里， $mv^2 = mgh$ 。参见文献[17])，但形式上有意义的是这里只有一个比例常数。式(3a)与式(3b)是等价的。

将式(3b)两边移项，得：

$$\frac{1}{2} mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2} mv_2^2 + mgh_2, \quad (3c)$$

这个等式两侧形式严格相同，而左侧指标只有 1，右侧指标只有 2，可见这个等式与指标 1, 2 无关{这个研究的方法论，爱因斯坦在 1913 年的 *Déduction thermodynamique de la loi de l'équivalence photochimique* (光化学当量律的热力学推导)一文中用到过，狄拉克在推导泊松括号与量子对易式之间的关系时用到过^[29]}。于是有结论：

$$\frac{1}{2} mv^2 + mgh = \text{const}. \quad (4)$$

这就是所谓的关于落体的机械能守恒定律。上述推导就是从自由落体过程中提取出一个“机械能”概念的过程。读者从中可以体会一个抽象概念是如何生成的。

我们看到，这个定律涉及的是一个物体(铜球)和地球构成的孤立体系。这个孤立体系必须拥

有某个为定值的特征量。当我们考察其中的组成部分的变化时，因果律是我们的方法、哲学与工具，这个因果律的表述得到了一个可理解为某个量守恒的结论。整个体系的为定值的特征量，和局域过程涉及的那个守恒量，我们都以能量概而论之，但后者是前者的元素，是一个具象。

自由下落是启发我们认识到要为物理过程赋予一个守恒量的原初情境。一个由不同部分相加而来的量，其守恒是对所隐含的因果律的定性一定量表示。就下落过程而言，此与守恒量之构成元素(比如动能与势能)的具体形式无关。仅就此处落体实验的表述而言，能量守恒律表示为 $\frac{1}{3}mv^3 - mgh = \text{const}$ 。也是可以的。

7 能量的正定性

一个孤立的体系，有一个量表示它的孤立，本着简单性的原则，这个量应该是一个平凡的量，一个简单的标量，具有可加性，为此我们选择连续的一元数。作为孤立系统抽象的、数学的标签的能量，应该是个大于零的实数， $E \in (0, \infty)$ 。不为零是对存在的肯定。0 隔开了正定的(positive definite)和负定的(negative definite)两个区域，二者只能取其一，我们选择了能量具有正定性的物理学。能量具有正定性，它就没有为负的理由。类似的还有表征系统之惯性的量，即质量 m ，那也是一个平凡的量， $m \in (0, \infty)$ 。所谓光子质量为零的说法，正确的说法似应是光子，如果有光子的话，根本没有质量这个属性标签。对于单个粒子(此为孤立体系)， $E = mc^2$ 成立，质量的正定性与孤立体系能量的正定性相洽。

但是，有一个棘手的问题，在很多具体物理问题中出现了能量为负的情形。对此应该认真分析。不妨先聊聊我们关于温度的认识。温度是热力学系统的强度量，恒为正的实数，即 $T \in (0, \infty)$ 。然而，经常会遇到负温度的说法。一种情形是温标选择造成的，比如以标准大气压下冰水混合物的温度为 0 点的摄氏温标。这样的温标表示的温度，虽然有取负值的场景，但在物理规律表述中

以 $(T + 273.15)$ 的形式出现。另一种情形是对于出现粒子数反转的物理体系还强行用玻尔兹曼分布 $e^{-E/kT}$ 的说辞，计算出一个为负值的温度。这是噱头，没有物理意义。具有普适性的物理学的温度，即绝对温度，是正定的。我们将看到，负能量的说法，如同负温度的说法，源于非物理的因素。

表示为速度平方项的动能恒为正值，负能的问题来自势能。举例来说，弹簧的势能为 $\frac{1}{2}kx^2$ ，总为正值。其实，这里正确的表达应是 $\frac{1}{2}k\Delta x^2$ ， $\Delta x = 0$ 对应明确的物理状态，此处没有零点选择的自由度问题。这个体系的能量没有为负的困惑。造成负能问题的是引力势以及异性电荷间的电磁势。对于引力势与电磁势，有说法，我们按照惯例选取无穷远处的势能为零。引力势能为形式为 $V(r) = -G \frac{Mm}{r} = -\frac{k}{r}$ 的标量函数，此处负号是为了满足势能损失意味着做功的约定(the convention that work is gained from a loss of potential energy)。同样选取无穷远处势能为零和势能损失意味着做功的约定，两电荷相互作用的电磁势则是 $V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Qq}{r}$ 。电荷是极性的，积 $Qq < 0$ 时势能为吸引势， $V(r) = -\frac{k}{r}$ ，有负值的问题。

那么，我们遇到的一些出现负能的问题意味着应有(孤立体系的)能量落在全实数域中，即 $E \in (-\infty, \infty)$ 吗？答案是，不会。

看看开普勒问题。根据文献[25]，引力势 $V(r) = -\frac{k}{r}$ ，则系统能量表示为

$$E = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{l^2}{2mr^2} - \frac{k}{r}, \quad (5)$$

其中 l 是守恒的角动量。径向的运动方程为

$$\dot{r}^2 = \frac{2E}{m} - \frac{l^2}{m^2r^2} + \frac{2k}{mr}, \quad (6)$$

得方程解为

$$\frac{1}{r} = \frac{mk}{l^2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{2El^2}{mk^2}} \cos(\theta - \theta') \right\}. \quad (7)$$

记 $e = \sqrt{1 + \frac{2El^2}{mk^2}}$ ，为偏心率，方程解(7)式可简化为

$$\frac{1}{r} = \frac{mk}{l^2} \{1 + e \cos(\theta - \theta')\}. \quad (8)$$

于是有如下论断:

$$\begin{cases} e > 1, E > 0, & \text{双曲线;} \\ e = 1, E = 0, & \text{抛物线;} \\ e < 1, E < 0, & \text{椭圆;} \\ e = 0, E = -\frac{mk^2}{2l^2}, & \text{圆.} \end{cases}$$

这个论断予人一个印象,即轨道的几何(绝对的特征)由能量 E 的正负所决定,仿佛此处能量的正负也具有了绝对性。应该说,这个论断是误导性的。

假设势能选取近处的零点,因此有形式 $V(r) = -\frac{k}{r} + V_0$,这不会影响问题的解,可得 $e =$

$$\sqrt{1 + \frac{2(E - V_0)l^2}{mk^2}}, \text{也即 } E - V_0 \text{ 决定了轨道的几何。特别地,当 } e = 0 \text{ 时,能量方程(5)就是:}$$

$$\frac{mr^2\dot{\theta}^2}{r} = \frac{k}{r^2}, \quad (9)$$

这就是万有引力下的圆周运动。显然,势能零点的选择不影响对运动的描述。

势能零点的选择无法避免 $r \rightarrow 0$ 时, $V(r) \propto -\frac{1}{r} + V_0$ 会表现出 $V(r) \rightarrow -\infty$ 的问题,仿佛会出现负的能量。但是, $V(r) \propto -\frac{1}{r} + V_0$, $r \in (0, \infty)$,这样的约定是理论上的便宜。存在 $r \rightarrow 0, V(r) \rightarrow -\infty$ 只是理论的缺陷或者无奈,所幸的是 $r \rightarrow 0$ 这种非物理的情形不会出现。异性电荷的组合给了我们一个很有说服力的例子。我们看到,选择真空能级为零,也即势能形式为 $V(r) \propto -\frac{1}{r}$,量子力学告诉我们氢原子能实现的负的势能也就是2倍的-13.6 eV的大小。对于此问题涉及的兼有分立与连续部分的能量谱也有势能零点选择的问题,总可以选择合适的势能零点保持解题过程中 $E > 0$,虽然形式上允许 $E < 0$ 让表述看起来简单。也就是说,对于正负电荷所构成的孤立体系,要求其能量标签为正也不带来任何困难。当氢原子本身作为一个孤立体系看待时,其内部的异性电荷间的电磁势不会影响作为其标签的能量的正定性。索末菲(Arnold Sommerfeld,

1868—1951)在构造原子谱线的量子论时自然也要面临所谓异种电荷间 $V(r) \propto -\frac{1}{r}$ 造成的负能量问题,知道这只是流于表象的问题。索末菲云,总能量出现个负号,不应该让我们感到惊奇(Daß die Gesamtenergie mit negativem Zeichen erscheint, braucht uns nicht zu überraschen)^[30]。

至于狄拉克方程出来以后的负能量解,那不过也是个为了表达上的便利所造成的误解,所谓“电子的负能量”的说法其实是“正电子的正能量”。那里能量的正负不是对相对论能量 $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ 开平方带来的问题,即 $\sqrt{1} = \pm 1$ 的问题,而是 $\sqrt{-1} = \pm i$ 的普适表现^[31]。你把薛定谔方程 $i\hbar\partial_t\psi = H\psi$ 写成 $-i\hbar\partial_t\psi = H\psi$ 的形式也对。这也是为什么狄拉克方程的研究最终会牵扯到电荷共轭、时间反演对称性的原因。

在关于单粒子的质能关系 $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ 中,设立一个绝对能量零点的问题解决了。如同质量在惯性系中有共同的零点,能量有了同样的自然零点(natural zero)。

强调能量的正定性,才能使得物理理论是自恰的。任何孤立的粒子都联系着一个物质波(所谓的相波),能量与频率间的关系为 $\nu = \frac{\varepsilon}{h}$,频率不能为负,这里的能量自然也不能为负(物质波频率公式 $\nu = \frac{\varepsilon}{h}$ 中的能量是粒子的相对论能量还是动能,是个未决的问题。笔者倾向于认为 ε 是粒子动能才合理^[32])。又,单个光子是一个孤立体系,光(量子)的能量表述为 $E = h\nu$;黑体辐射是由很多不同频率的光子构成的巨孤立体系,其能量表述为 $E = V \frac{4\pi}{c} \frac{2\pi^5}{15} \frac{k^4}{c^2 h^3} T^4$,在这些表达式中能量都是从定义上就是正定的,且和频率与绝对温度的正定性是相恰的。更重要的是,这些公式连能量的标度(energy scale)问题也一并解决了。

8 能量就是哈密顿量吗?

在分析力学与量子力学中,哈密顿量都被当成系统的能量特征(the energetic characterization of

a system)。如果系统的约束，或者说广义坐标，是时间无关的，则哈密顿量为系统的总能量， $H = T + U$ ，其中的势能 U 不包含广义坐标对时间的微分。这是在说，(处于相互作用中的体系的)哈密顿量是关于作用量的时间对偶量。当系统的拉格朗日量具有时间平移对称性时，哈密顿量为守恒量^[33]。在量子力学中，与哈密顿量算符对易的算符，也是守恒量。不过请注意，对于动能只包含广义速度2阶项的情形，哈密顿量才是系统的总能量。对于运动参照系，动能包含广义速度的0阶和1阶项，则哈密顿量虽然是个运动积分，但不是能量(积分)^[34]。

这些语境下对能量概念和能量守恒定律的应用与本文关于能量作为孤立系统的普适标签没有矛盾(的可能)。哈密顿量概念的运用与时间概念相伴随。时间的引入是个更加艰难的话题。对于孤立系统，存在一个唯一的作为表征的常数；对于一个孤立系统内子系统间的相互作用，遵从因果相当的哲学，这些都是形而上的信条，不依赖于其他概念的出现。基于时间概念的拉格朗日力学与哈密顿力学，以及与时间概念几乎无涉的热力学，都以能量守恒为基础。能量守恒其实与时间无关。诺特定理下能量守恒作为时间平移对称性之推论，不妨理解为在接受能量守恒定律的前提下对时间概念以及对拉格朗日力学自洽性的要求。

9 物理理论的两层次结构

物理学理论表现为一种两层次的结构，结合了严格平衡与极端(combined exact conservation and extremism)，涉及两个不同层面、不同量纲的物理量。力学理论和热力学理论都是明显的这种两层次结构。在力学那里是能量固定加上最小作用原理，而在热力学那里是能量固定加上熵增原理。就量纲而言，作用量高于能量，而熵低于能量。

孤立体系的能量固定常常被说成是能量守恒，笔者坚持强调其是第一个层面上的能量守恒。关于力学中的能量守恒会有其是在某些条件下达朗

伯原理的推论、哈密顿原理的推论等等说法。这些说法具有误导性。这些说法应该理解为在某些条件下那些原理同能量守恒定律相洽。能量守恒定律才是基本的，反映的是“大自然必须保有其资源(nature must conserve her resources)”的信条。作用原理在能量之外的另一个层次上，涉及变动(variation)，虚位移(virtual displacement)，试探性路径(tentative path)等对象，欧拉知道实际运动与作变分的运动都必须满足能量守恒律(…Euler knew that both the actual and the varied motion have to satisfy the law of the conservation of energy)^[35]。相互作用过程中的能量守恒源自不能无中生有以及因果相当的形而上信条。而关于自然是经济的这一信条{Nature is economical with her resources and always acts in the most efficient way possible. That is another grand metaphysical principle. 参见文献[1] p.124}则是另一个重大的形而上原则。这个经济原则的结果就是引入了作用量，作用量追求极小。在路径积分版的量子力学表述中，最小作用量对应最大发生概率的作用量。

在热力学中，孤立体系的能量恒定，孤立体系的熵追求最大，即 $E = \text{const.}$ ， $dS \geq 0$ 。熵概念的发现，也是因为在因果相当的信条之外添加了一个信条，即能量不能在没有任何补偿性平衡的前提下被产生或者消灭(Power or energy cannot be created or destroyed without a compensatory balance)。克劳修斯想到的要达成补偿性平衡态的等价量(equivalent)为 $\frac{dQ}{T}$ ，由此得到了熵这个状态函数^[18, 26]。

物理理论的两层次结构为一个等式加上一个不等式。对于稳态(平衡态)，表示为不等式的条件变成了等式，此等式与能量守恒律一起构成了一个两变量的方程组，让问题有了确定的解。这就是研究稳态(平衡态)的意义。从理论的两层次结构的角度去考察力学与热力学，能看到它们的不同。统计力学是热的力学理论，如何从统计力学出发去实现物理学的和谐统一，是个值得思考的问题。

10 结束语

从哲学层面阐述一个问题是需要勇气和决心的。“什么是能量”是个陈年老问题，但却一直未有合适的答案。对能量概念思考之关键目的，是为了弄清楚能量概念的功用。笔者认为它的功能即在于表征系统的孤立特征。关于目的的另一个表达，是试图定义能量这个概念的核心(to define the locus of the concept of energy)。笔者以为能量这个概念的核心是它的先验的守恒律。

能量概念在物理学理论结构中扮演着关键角色，我们有必要让它成为一个精确的观念(an exact notion)。这个能量概念在科学中的作用是什么？这要由其作用来定义它。Its use is its eventual justification。我们不得不用到一个科学概念的情境来帮助我们确立该概念的意义^[5]。试图理解能量这类科学概念注定会引起一些哲学问题，如果不涉及哲学我们的最终理解是不完全的。能量作为表征孤立系统唯一的普适标签，是笔者能想到的最好的回答。

能量是什么？这是个困扰作者作为一个物理学习者很久的问题，重要的是它是一个长期困扰物理学的问题。现在，我对这个问题的回答是，能(量)是一个表征系统孤立性的普适标签。它是一个简单的实量，具有代数可加性。它从属于一个系统、一个对象、一个载体；如同它之上的作用量和它之下的熵，能量某种意义上是数学的(it is somehow mathematical just as action over it, in the sense of dimension, and entropy below it)。

一个孤立的体系拥有一个固定了的量作为它

的特征标签。可以这样理解，一个与环境无关的系统一定要保持什么不变，否则无法解释什么是与环境无关。这个标签，我们名之为能量。又，针对孤立体系内之不同部分通过相互作用引起变化的过程，我们的哲学是 Nature must conserve her resources，因此必然会有 $\Delta E_1 = -\Delta E_2 \Rightarrow \Delta(E_1 + E_2) = 0$ ，这里 E_1, E_2 是具体的能量项，它们是作为孤立系统之标签的能量 E 的具象化了的元素。我们是在构造了诸多具象化的能量名目，并运用(两个不同意义上的)能量守恒律获得了很多物理认识以后，才有了要理解什么是能量的急迫感。笔者将能量定义为抽象的作为表征孤立系统的普适性标签，它至少具有反映各种能量名目之下的一体性(an underlying unity)的能力。

什么是能量？它是物理现实的一部分吗？笔者的认知是，它不是物理现实，而是事涉一种处理物理现象的方法学(a methodology for dealing with phenomena)。对这个问题的讨论必然引起争议，但是有意义。试看 $E = mc^2$ ，粒子是这个能量的载体，而 m 是粒子之惯性性质的标签(粒子可能还存在别的标签比如 q)，此时 E 是一个和 m 等价的数学的量。当粒子湮灭时，能量守恒，但不是物质转化成了能量；粒子湮灭成了高能光子，此刻光是能量的载体。认识到这一点，关于能量的一些令人困惑的表述就迎刃而解了。

作为孤立体系的特征标签的能量是一个定数，这是最基础的信条。能量是定数的前提，结合另一个层面上作为极端论(extremism)的熵增原理或最小作用量原理，就塑造了物理理论的两层次结构。认识到这一点，物理学的学习会变得容易一些。

参考文献

- [1] Coopersmith J. Energy: the Subtle Concept. Oxford University Press, 2010
- [2] Mott-Smith M. the Concept of Energy Simply Explained. Dover, 1964
- [3] Hoffman E J. The Concept of Energy: a [sic] Inquiry into Origins and Applications. Ann Arbor Science Publishers, 1977
- [4] Coelho R L. What Is Energy? An Answer Based on the Evolution of a Concept. Springer, 2024
- [5] Theobald D W. The Concept of Energy. E. & F.N. Spon Ltd, 1966
- [6] Feynman R, Leighton R, Sands M. Feynman Lectures on Physics, 3 Volumes. Addison-Wesley, 1963—1965, section 4-1
- [7] Rankine W J M. Proceedings of the Philosophical Society of Glasgow, 1853, 3(5): 276; Philosophical Magazine, series 4, 1853, 5 (30): 106
- [8] Young T. A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts, two volumes. Johnson, 1807



光学全产业链生态链展示及交流平台

2025年9月10-12日
深圳国际会展中心(宝安)



精密光学展&摄像头技术及应用展
PRECISION OPTICS EXPO & CAMERA EXPO

同期展会

 信息通信展
INFORMATION & COMMUNICATION EXPO

 激光技术及智能制造展
LASER TECHNOLOGY & INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO

 红外技术及应用展
INFRARED APPLICATIONS EXPO

 智能传感展
INTELLIGENT SENSING EXPO

 光电子创新展
PHOTONICS INNOVATION EXPO

 AR/VR展
AR/VR EXPO

 新型显示技术展
NEW DISPLAY TECHNOLOGY EXPO

第26届中国国际光电博览会

240,000M² 展出面积
130,000+ 专业观众
3,800+ 参展企业



扫码登记 免费参观

- [9] Leibniz G W. Acta Eruditorum, 1686: 161
- [10] Rayner J N. Dynamic Climatology: Basis in Mathematical Physics. Blackwell Publishing, 2000. p.94
- [11] Poncelet J V. Introduction a la mécanique industrielle, physique ou expérimentale (工业的、物理的或实验的力学导论). Bachelier, 1839. p.111
- [12] French S, Krause D. Identity in Physics: A Historical, Philosophical, and Formal Analysis. Oxford University Press, 2006
- [13] du Châtelet É. Principes mathématiques de la philosophie naturelle par feu Madame la Marquise du Châtelet (自然哲学的数学原理). 1st edition, 1756; 2nd edition, 1759
- [14] Arianrhod R. Seduced by logic: Émilie du Châtelet, Mary Somerville, and the Newtonian revolution. Oxford University Press, 2012
- [15] Hagengruber R (ed.). Émilie du Chatelet between Leibniz and Newton. Springer, 2011
- [16] Smith G E. Physics Today, 2006, 59(10): 31
- [17] Mayer J R. Die Mechanik der Wärme: Sämtliche Schriften (热的力学理论文集). J.C. Cotta, 1893
- [18] 曹则贤. 物理, 2009, 38(9): 675
- [19] 曹则贤. 物理, 2015, 44(5): 343
- [20] 曹则贤. 物理, 2015, 44(6): 406
- [21] von Helmholtz H. Über die Erhaltung der Kraft (论能量守恒). Wilhelm Engelmann, 1847
- [22] Plack M. Verh. Deutsch. Phys. Ges., 1906, 8 (7): 136
- [23] Hamel G. Z. Math. Phys., 1904, 50 (1): 1
- [24] Mach E. Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt (力学发展史的历史批判表述). Brockhaus, 1901
- [25] Goldstein H. Classical Mechanics, 2nd edition. Addison-Wesley, 1980
- [26] Clausius R. Annalen der Physik und Chemie, 1865, CXXV (7): 353
- [27] von Neumann J. Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse, 1927: 273
- [28] Boltzmann L. Sitzb. d. Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, 1877, LXXVI, Abt II: 373
- [29] Dirac P A M. The Principles of Quantum Mechancis, 4th edition. Oxford University Press, 1958
- [30] Sommerfeld A. Annalen der Physik, vierte Folge, 1916, 51(17): 1
- [31] 曹则贤. 云端脚下. 北京: 世界图书出版公司, 2021
- [32] 曹则贤. 物理, 2024, 53(8): 551; 2024, 53(9): 626
- [33] Cline D. Variational Principles in Classical Mechanics. 2024, 开放资源
- [34] Born M. Vorlesung über Atommechanik (原子力学教程). Springer, 1925
- [35] Lanczos C. The Variational Principles, 4th edition. Dover, 1970