

物理学咬文嚼字之七十 纷繁的运—动—力学

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2015-02-09收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150310

深浅随所得，心知口难传
——苏轼《怀西湖寄晁美叔同年》

摘要 Statics, kinematics, kinetics, kinesics, dynamics, 再加上仿佛有关的 cymatics, dianetics, 这些纷乱的学问, 还真让人头疼。

1 四大力学

中国物理教—学界有四大力学的说法, 指的是理论力学、电动力学, 量子力学和热力学与统计力学(简称热统)。倘使只从中文字面来看, 很难不以为这是一路货色, 都是力学。至于何谓力学, 那里面是否有力的角色, 此四处的力学与暴力美学中所涉及的力学是否是一回事, 则少见深入的议论。

如果我们把这所谓四大力学的西文名称翻出来, 会发现它们并不如在中文中那样予人以四胞胎的感觉。理论力学英文为 theoretical mechanics, 更多的时候它是被称为 analytical¹⁾ mechanics (分析力学) 或者 analytical dynamics (分析动力学) 的; 电动力学英文为 electrodynamics; 量子力学英文为 quantum mechanics; 热力学英文为 thermodynamics, 而统计力学英文为 statistical mechanics。容易看出, 这所谓的四大力学是分

成 mechanics 和 dynamics 两类的。尤为有趣的是, 我们所谓的热统, 其两个组成部分分属 dynamics 和 mechanics。似乎是注意到了 statistical mechanics 哪里也有点不妥, 人们在很多时候愿意将之称为 statistical physics (统计物理)。此外, 请注意也有热物理(thermal physics)^[1] 的说法, 愚以为这个称谓其目的也是提醒人们不要把 thermodynamics 和 statistical mechanics 简单地当成什么力学。

Mechanics 在中文中是经常被翻译为力学的。Mechanic, 拉丁语为 mechanicus, 希腊语为 μηχανικός, having to do with, or having skill in the use of, machinery or tools, 跟手艺人掌握了的机械与工具有关。西方古代最令人印象深刻的 mechanics 是抛石机(catapult)。Mechanics 后来衍生的意思, 及其所衍生的其它词的意思, 都与机械、手工艺有关。比如, 物理研究的一个关键内容是弄清楚某事的 mechanism, 如 growth

mechanism of crystals (films), 汉译就是机制、机理; 而哲学概念 mechanical objectivism 就被汉译为机械唯物主义。Mechanics 被译为力学, 有其历史的原因, 但也带来理解上的困难。Mechanics 研究 “how things go”, 不是研究力。即便是在 classical mechanics 中, 人们也逐渐认识到力概念的引入是多余的。Mechanics 不需要力的概念, 这一点在 Hertz 写他的力学书时已经是明确的了^[2]。后来所谓的四种力的统一, 确切地说是四种 interactions 的统一, 这里力的说法不过是一种习惯, 其关键词是拉格朗日量或者拉格朗日量密度。我们死抱着 mechanics 是力学的概念, 对 mechanics 的理解有害无益。此外, 类似把 institute of mechanics 译成力学研究所, 而 institute of fine mechanics 又成了精密机械研究所, 让人非常困惑, 不知那里面的人们困惑也未? Dynamics, 字面上是力的意思, 可偏偏被汉译成动力学(见下文), 不

1) 分析是数学与物理的基本概念。分析力学是真需要分析的能力的。读完实分析、复分析、傅里叶分析和泛函分析这四大分析, 回过头来大约能理解什么是分析力学。欲学分析力学, 请参见拉格朗日的经典著作 *Mécanique Analytique*。——笔者注

免又节外生枝。

力学当然存在。自从力被当作运动的原因，此后又被当成运动改变的原因，人们就一直在为这个力赋予性与形。力，就是为改变物体运动状态所作的努力(effort)。英文的 the theory of force，德文的 die Lehre der Kraft，才是力学。奥斯特有未出版的 *theory of force*，麦克斯韦有 *On Physical Lines of Force*(1861)，这些都是力学曾经的辉煌。随着人们对运动和相互作用的认识不断深入，force 的概念已经退居到无关紧要的位置，把 mechanics 混成 theory of force 已越来越不合时宜。不幸的是，dynamics 和 mechanics 在汉语中已经固化为(动)力学了，把《理论力学》、《电动力学》、《量子力学》和《热力学、统计物理》这些学问望文生义地理解成力学，贻害不浅。可叹！

力学是物理学最早的内容，从力学发展过程中建立起的概念和方法论很大一部分后来被移植到电磁学、热力学等领域。弄清楚那些我们汉语中用“力学”一概而论的各物理学分支的同异，或有益于对这些学科的学习。

2 Statics

Statics，静力学，力学中研究静止或者平衡的那部分学问。这个字和 state，stand 同源，立着的意思(do you understand?)，汉译静力学中的“力”字属于翻译时硬塞进去的。Statics 可能是物理学的源头。当年我学静力学，计算用滑轮拉一个物体需要用多少力这件事时，总觉得哪里不对劲，因为我觉得用多少力去拉取决于你有多少力好使。

后来才明白，这是出静力学题的人根本忘了说明白静力学是研究静止或者平衡的学问，计算用滑轮拉一个物体需要多少力这种题目是假设刚刚好能拉动物体的，即拉动造成的运动过程其加速度几乎为零。其实，更重要的一点是假设摩擦力为零或者摩擦力恒定。摩擦力取决于材料的性质和具体的动态过程，拉动一个物体的实际物理过程，远比静力学所展现的图像要复杂得多。编教科书的专家及照本宣科的物理老师们不懂这些，学生们只好郁闷着。

由 statics 衍生出了 hydrostatics 和 electrostatics 等。Hydrostatics，汉译流体静力学可能是成问题的，因为这里的词头 hydro- 是水的意思，不是广义的流体。流体静力学有专门的名词，fluid statics。巧克力酱的静力学和 hydrostatics 可是有重大区别的。带 hydro- 的词头，还是用水翻译比较准确，象 hydrostatic pressure，人们就把它翻译成静水压。这里的 statics 是要强调在所考虑的情境中，流体其实是不流动的。类似地，electrostatics，静电学，假设电荷是不动的从而计算位置固定的电荷所引起的势能等物理量，或者因缓慢运动(但无加速度)由电流带来的磁效应。有趣的是，水不流动的情形常有，而电荷不运动的情形没有吧。但是，西方人在发展物理学时在有 electrodynamics 之前先得出了 electrostatics。静电学可以说是出自纯抽象的思考，对于电荷可是很难有任何直接的观察的。西欧那一片土地(包括英伦三岛)如何能产生近代科学，实属匪夷所思，鄙人以为关于这个奥秘的科学史、文化史意义上的揭示还远远不够。

3 Kinematics

Kinematics 来自希腊语的 κίνημα (movement, motion), κινεῖν(to move), 汉译成动理学。这个词是安培造的，一开始是法语形式的 cinématique (庞加莱就有以 cinématique 为题的书³⁾)，这肯定提醒了你 cinema/cinéma 这个词是怎么来的。Cinéma，英文为比较粗糙的 movie，德语的 kino 干脆就是希腊语 κινῶ 的转写，中国话称之为电影——静止的照片的投影变得活动了²⁾。按照字典的解释，kinematics 是一门关于运动的 mechanics 分支，不涉及力或者质量，即只谈运动(包括速度和加速度)，不涉及原因。伽利略的力学中是没有力与能量的概念的，他那时无法测量这些量，因此只能以定性的方式谈到它们。伽利略关于运动的描述构成了 kinematics 的大部分内容。动理学包括对质点、物体和物质体系的运动的描述，因此也叫 geometry of motion(运动的几何学)。以时间 t 为几何参数，数学家们还专门发展出了 kinematic geometry 这门学科。这样，就容易理解欧拉关于刚体转动的欧拉角描述方式，相对论时空的洛伦兹变换等内容的几何实质了。

与 kinematics 相关的有 kinematic theory(动理学理论，见下文)，如 the kinematic theory of wave propagation (波传播的动理学理论)，the kinematic theory of rapid human movements (人体快速运动的动理学理论)等，后者是机器人领域要研究的内容。

4 Kinetics

Kinetics，运动学，来自古希腊

2) 电影的前身是拉洋片。把成串的塑料画片拉动，就得到了动画的效果，此即 cinema。——作者注

语 κίνησις (movement or to move), 这在我们看来和 kinematics 应该是同源的。Kinetics 也有汉译为动力学的, 但是其字面上没有“力”字。作为经典力学的分支, kinetics 脱胎于 kinematics (关注运动本身的动理学), 它研究运动及其原因——通过质量及质量二阶矩即惯量张量的概念能建立起运动同力、力矩之间的关系。进入二十世纪, kinetics 在物理学领域已经逐渐被 dynamics 或者 analytical dynamics 所取代, 但我们必须注意到应该是涉及力的那些用法才被 dynamics 所取代。

形容词 kinetic 是个活跃的词汇, 散见于物理学文献中。热力学的主要部分之一为 kinetic theory of gases (气体运动学理论)。Kinetic theory 用气体的分子构成和运动来解释温度、压力、粘度、热导率等宏观性质。原来, 在波义耳和牛顿先后提出过的气体的原子模型里, 气体的各个原子都是静止不动的。注意, 在理解温度概念时, 只涉及分子的速度分布, 从这个意义上来说, kinetic 应按其本意“运动的”来理解; 而压力被解释为器壁散射分子的结果, 这是涉及到力的概念的。用分子碰撞解释压力时, 单个分子同器壁碰撞的时间间隔是不知道的, 时间问题被用单位时间内碰撞数这个统计概念给巧妙地回避了。气体分子的存在及其运动理论不过是假设, 但是对花粉之布朗运动的观测为其提供了依据^[4]。

Kinetic 其本意为运动的, 这在西文语境中不会造成什么问题, 但在汉译时可能会有麻烦。比如 kinetic plasma, 它指的是运动(速度)分布不好用麦克斯韦分布这样的热分布——thermal distribution, 它容易提取出一个称为温度的量——来

描述的等离子体, 译成“动力学等离子体”显然会让人不知所云。我辈用中文理解物理学当适度谨慎才好。

Kinetic 之关于运动的、由运动造成的意思, 准确地体现在 kinetic energy (动能) 一词中, 这个词由 William Thomson 所创。动能, 与运动有关的能量, 因此是速度的函数。动能一开始是写成 mv^2 的形式, 认识到前面还有一个 $1/2$ 因子是物理学历史上的一个伟大进步。莱布尼兹、贝努里等人认识到物理量 mv^2 的重要性, 那时其被名之为活力, vis viva。与动能相对, 势能与物质的空间构型有关, 是关于位置的函数。考虑到描述物质运动的函数哈密顿量的最一般形式为 $\sum_i \frac{1}{2}mv_i^2 + \sum_{i,j} \varphi(x_i, v_j)$, 运动可以被当成 dynamics and geometry^[5]。当然, 愚以为它不应该是简单的 dynamics and geometry, 而应该是 dynamical geometry。

Kinetics (运动学) 研究运动, 不可能不涉及到力的, 不是还有 motive force 的说法吗? 后来, kinetics 被 analytical dynamics 取代, 但 kinetic 和力至少到目前还脱不了干系。象这样的句子 The dynamics of Landau's theory is defined by a kinetic equation of the mean-field type (朗道理论的动力学可由一个平均场型的运动学方程定义), 仅从(汉语)字面上来看是有点不对劲, 正确的理解还是要通过方程和物理图像才能得到。

5 Kinesics

Kinesics 是研究身体运动、面部表情的学问, 汉译身势学。这个词来自希腊语 κινετος, 是 movable 的意思, 因此对它的意义的理解还是要从运动的角度着手, 比如 kine-

siology, 汉语也是翻译成运动学的, 不过这是体育科学的内容, 研究的是人的运动。同源的名词 kinesis, 意为由外界刺激引起的运动; 由它构造的复合词有 photokinesis, 汉译趋光性, 它指的是光诱导的运动。

6 Dynamics

Dynamics, 来自希腊语 δύναμις (dynamis), 意思是力、能力(power, strength, force)。形容词为 dynamic, dynamical (δυναμικός)。除了有“强有力的、有活力的(energetic, vigorous, forceful)”这些与力、运动有关的意思以外, 它还有与变化有关的意思, 汉语翻译成“动态的”, 如 dynamic response (动态响应), 即响应要跟得上刺激的时间变化。

动力学是物理学的重要组成部分。什么是动力学? 《哈密顿爵士传》^[6]明言: 动力学, 或曰力的科学, 乃为研究时空中的定律所显现之威力的学说 (Dynamics, or the science of force, as treating of “Power acting by Law in Space and Time”)。Penrose^[7]指出: “成功的物理理论提供的答案都以动力学的形式, 即给出某个时刻的状态作为初始条件, 确定物理系统是如何随时间演化的——这样的勾当才是动力学。”在没有“力”的概念的量子力学中, 动力学的特征该是什么呢? Dirac^[8]说: “为了构建动力学的完备理论必须考虑不同时刻之间的联系……(量子)系统是由让一时刻的状态决定后来时刻状态的运动方程所描述的, 也就是因果律要起作用 (causality applies)。”如果粒子的运动学是非相对论的, 那其动力学方程是薛定谔方程。

经典力学中的 analytical dynamics (分析动力学), 是研究物体在外力作用下运动的分支, 原也是称为 kinetics 的, 其核心就是牛顿第二定律。带 dynamics 的词, 除了分析力学 (analytical dynamics), 还有热力学 (thermodynamics), 电动力学 (electrodynamics), 色动力学 (chromodynamics), 味动力学 (flavor dynamics), 几何动力学 (geometro-dynamics), 等等。

电磁学的学习是从静电学开始的, 虽然谁也没见过静止的电荷。到电动力学部分, 因为涉及到粒子的质量和电荷两种指标, 且电荷是极性的, 物理图像就复杂多了。动力学的划时代理论是 1865 年麦克斯韦发表的 *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (电磁场的动力学理论)。循着量子电动力学, 人们又引入了色动力学和味动力学, 其对象是基本相互作用, 力的概念就很少再出现了。标准模型统一了电磁、强、弱相互作用, 但同引力的统一却一直悬而未决³⁾。广义相对论用 stress—energy tensor 描述时空的动力学。然而, 空间的几何是偶发的、动态的 (contingent and dynamical), 它不能够为自然的定律提供一

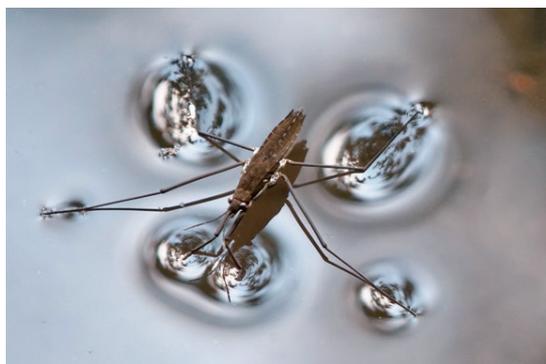


图1 水黾。其日常生活中遭遇的阻力应该在 dyn 量级

个可依之定义的固定的背景。1960 年, 惠勒提出了广义相对论的几何动力学 (geometro-dynamics) 描述 (他认为 Clifford⁴⁾ 是这种思想的发起者), 不知这个方向的发展能否提供大统一的新线索。

与其它的 dynamics 不同, thermodynamics (热力学) 似乎不是研究时空定律或者运动发生

的原因的。愚以为, thermo+dynamics 是热与力的并列组合, 热力学从一开始就是为了从热中得到力或功, $\delta Q \rightarrow Fdx$, 它来自燃烧煤从而从矿井中抽水的努力。在关于简单体系的热力学势——内能——的微分表达 $dU=TdS-pdV$ 中就只有两项, 前一项是热, 后一项是力。Thermodynamics, 历史上称为 theory of heat (热学), 就是 mechanical theory of heat (热的机械说)。热力学先是热质说 (substantial interpretation of heat), 而后是 kinetic theory (运动论)。于 1798 年由 Sir Benjamin Thompson 提出, 1824 年由 Sadi Carnot 充分发展起来的关于热的运动论是对热质说的胜利。

Dynamics 有许多衍生词也值得一提。如 dynamo, 其意思为有活力的人, 它还曾被作为发电机 (generator) 的名字, 记得以前欧洲有足球队就以 dynamo 为名。Dynamo theory 解释星球磁场的产生机制, 它要求存在一个旋转的、对流的、导电的液核维持磁场。这里



图2 杜尚的画《下楼梯的裸女》与 Elisofon 的摄影《下楼梯的杜尚》

的 dynamo 指的是电动力学的内容, 虽然是关于流体的。另外一个词 dynamite, 有活力、威力的东西, 汉译炸药。Dynamite 的商业成功给物理学带来了最大的一笔金钱刺激。

普通物理中有个力的单位, 名为 dyne, 自然也是来自希腊语 δύναμις (dynamis), 汉语直接音译为达因, 符号为 dyn。1 dyn = 10^{-5} N, 这是对 1g 物质产生 1cm/s^2 所需要施加的力, 在人的生活尺度上它太小了。但是, 对于生活在水面上的小动物如水黾 (waterstrider) (图 1), 其涉及的力的大小应该是在 dyne 的量级——水在常温下的表面张力约为 $72\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$, 1 cm 长的线在水面划动时遭遇的阻力可能是几十 dyn 的大小。在以原子力显微镜为主要研究手段的显微力学体系中, dyne 这个力的单位是合适的。

由 dynamics 引出的另一个词为 dynamism, 很文艺范的词, 指动态地表现活力的艺术手法。杜尚 (Marcel Duchamp) 的画作 *Nude Descending a Staircase* (1912) 就是采用的 stopframe dynamism 手法。杜尚的这幅画影响力太大了, 以至于四十年后摄影家 Eliot Elisofon 于 1952 年

3) 与其说未找对达成统一的路径, 我倒以为可能是我们对拟统一认识的对象还认识不足。——笔者注

4) 数学家 William Kingdon Clifford 最先提出引力几何化的思想。——笔者注

用连续曝光的手法创作了 *Duchamp Descending a Staircase* (图2)。

7 Kinematic vs. dynamic

什么是 kinematics, 什么是 dynamics? 这两者间的区别, 学物理的、学工程的人常常弄不清楚。按物理学家的说法, kinematics 在不考虑力的因素的前提下研究运动是如何发生的, 如果考虑力, kinematics 就变成了 dynamics^[9]。相较而言, 数学家的概念就清晰得多。对数学家来说, 一个孤立的系统包括: (a)相空间, 即系统运动之所有可能的瞬时状态的集合; (b)在相空间中描述系统所有可能历史(history)的曲线的集合, 即系统随着时间的推移可以经过的状态之序列。前者是 kinematics, 后者是 dynamics。有必要区分系统的状态和系统之运动的状态^[10]。

作为对物理认识的不同阶段, 自然 kinematics 的出现要早一些。比如就相对论来说, 也是要先有研究时钟、尺子在稳恒、不受力的运动中的 (in constant, force-free motion) 行为的运动学部分^[11], 而后才有研究(时空)动力学的部分。所以说狭义相对论是一种新的运动学, 广义相对论则用几何语言提供了动力学。

力的概念在近代物理中已被相互作用所取代。动力学是不是关于基本相互作用的描述呢? 在牛顿(狭义相对论)动力学中, 欧几里得(闵科夫斯基)(时间)几何(也包括含时间的几何)——其仿射结构是由作为对时空的 kinematic 结构进行数学描述的 kinematic 对称群(伽利略群或者洛伦兹群)所决定的——决定了或者说反映了作为其基本 dynamic 定

律的惯性定律。在这些理论中, kinematic 结构与 dynamics 没有任何关系。因此, dynamic 定律在 kinematic 对称群变换下是不变的。这意味着 kinematic 对称性为 dynamic 定律的形式施加了一定的限制。但是, 对于广义相对论理论来说却不是这样。在广义相对论理论中时空没有先验的 kinematic 结构, 也就没有什么 kinematic 对称性, 没有什么对 dynamic 定律形式的限制。这一段很拗口, 但是理解了这一段大致就能弄清楚 dynamic 定律与 kinematic 结构的关系^[12]。有趣的是, Clifford (1878) 的著作 *Elements of Dynamic*, 其副标题为 *An introduction to motion and rest in solid and fluid bodies*, 可见其不涉及力, 实际上这是一本关于四元数、矢量代数的数学书。看了这本书人们会由衷赞叹 kinematics is the “study of the theory of pure motion” (动理学是关于纯粹运动理论的研究)。爱因斯坦的经典名篇 *On the electrodynamics of moving bodies* 上来第一部分就是 kinematical part, 而后才是 dynamical part。可是, 对于一个学物理的来说, 字面上固然有 kinematical 和 dynamical 之分, 我们头脑中关于物理的图像有必要硬性地去做这样的区分吗?

一些物理分支中关于物理问题的描述时常有 kinematic 和 dynamic 之分, 但未必多么严谨。比如黏度分为 dynamic viscosity (动力学黏度, 或者动态黏度), 即剪切应力与所能维持的速度梯度之比, 和 kinematic viscosity (运动学黏度)——将动态黏度除

以密度就成为运动学黏度。黏度涉及剪切应力(shear stress), 称为 dynamic viscosity 还好理解, 为什么差个密度量纲就成了 kinematic viscosity 呢? 况且, 这除以流体密度的操作也看不出有什么深刻的道理来。又, 在谈论粒子(如电子, X-射线光子)同固体的散射时, 也有 kinematic 理论和 dynamic 理论之分。在 X-射线衍射的运动学理论中, 散射振幅由来自不同的原子或者晶面上的散射振幅简单相加而来, 只需计及光程差即可, 因此它确切地说就是 geometrical theory (几何理论)。而散射的动力学理论则要考虑入射粒子在固体中的实际传播过程, 其间是要遭遇许多不同的相互作用的, 这取决于固体的性质、入射粒子的性质和特征参数(能量、偏振方向等), 以及入射粒子流密度, 等等。情况太复杂, 因此也就很难指望会有统一的动力学理论。

8 Cymatics

与上述几个词无关但字面上很相似的一个词是 Kymatik。这是瑞士自然学者 Hans Jenny 为了描述振动与波的可视化而引入的一个概念, 词根来自古希腊语的波, κῦμα。

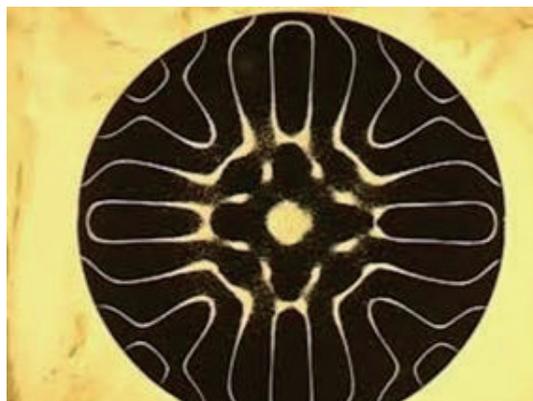


图3 圆盘上振动的沙子所显示出来的 cymatic 图像

Hans Jenny 于1967年出版了一本以 *Kymatik* 为名的书^[13]，如今这个词已经在英语中被改造成了 *Cymatics*。Cymatics，有人将之汉译为音流学，莫名其妙，振动与波不必然表现为声音——一个狭窄波段内的振动作用到动物的耳朵上才表现为声音。就字面和其具体研究内容来看，cymatics 是一门真正的波视学，或者示波学，或者模式显像

学，因为它关注的主体是振动模式所体现的花样 (modal phenomena) (图3)。

9 Dianetics

Dianetics 一词粗看起来和 dynamics 有点相似，但其实无关。这是一本由美国人 L. Ron Hubbard 撰写的所谓关于精神健康之现代科学

的著作。这本书的观点本人实不敢苟同，但它的德语版 *Dianek: die moderne Wissenschaft der geistigen Gesundheit* 却是一本让德语脱离机械 (mechanical) 刻板印象的好书，倒不妨拿来作语言学的教材。那些得以流传的好著作，宗教的、政治的、文学的、艺术的，文字优雅似乎是其共同的特点。科学的著作，难道不也要向这个标准看齐吗？

参考文献

- [1] Kittel C. Thermal physics. New York: John Wiley & Sons, 1969
- [2] Hertz H. The principles of mechanics. Dover Publication, Inc., 1956
- [3] Poincaré H. Cinématique et mécanismes: Potentiel et mécanique des fluides. Jacques Gabay, 2008
- [4] Einstein A. Annal. Phys., 1902, 9:417
- [5] Suisky D. Euler as physicist. Springer, 2009
- [6] Hankins T L. Sir William Rowan Hamilton. The Johns Hopkins University Press, 1980. p.178
- [7] Penrose R. Road to reality. Vintage books, 2004. p.686. 原文照录如下: The answer provided by practically all successful physical theories, from the time of Galileo onwards, would be given in the form of a dynamics—that is, a specification of how a physical system will develop with time, given the physical state of the system at one particular time.
- [8] Dirac P A M. The Principle of quantum mechanics. Oxford University Press, 1982
- [9] Cropper W H. Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking. Oxford University Press, 2004. 原文照录如下: “It (kinematics) shows us how motion occurs without defining the forces that control the motion. With the forces included, as in Newton’s mechanics, kinematics becomes ‘dynamics.’”
- [10] Manin Y I. Mathematics as metaphor. American Mathematical Society (2007) p.115. 原文照录如下: For the mathematician an isolated system consisted of: (a) its phase space, i.e., the set of possible instantaneous states of motion of the system; (b) the set of curves in phase space describing all possible histories of the system, i.e., sequences of states through which the system passes in the course of time. The first of these data is kinematics, the second is dynamics! It is important to distinguish a state of the system from a state of its motion.
- [11] Galison P L. Einstein’s clocks, Poincaré’s maps: empires of time. New York: W.W. Norton & company, 2003. p.18
- [12] Cao T Y. Conceptual Foundations of Quantum Field Theories. Cambridge University Press, 1999. p90. 原文照录如下 “...in Newtonian (or special relativistic) dynamics, Euclidean (or Minkowskian) (chrono)geometry with its affine structure, which is determined by the kinematic symmetry group (Galileo or Lorentz group) as the mathematical description of the kinematic structure of space (time), determines or reflects the inertial law as its basic dynamical law. In these theories, the kinematic structures have nothing to do with dynamics. Thus dynamical laws are invariant under the transformations of the kinematic symmetry groups. This means that the kinematic symmetries impose some restrictions on the form of the dynamical laws. However, this is not the case for general relativistic theories. In these theories, there is no a priori kinematic structure of spacetime, and thus there is no kinematic symmetry and no restriction on the form of dynamical laws.
- [13] Jenny H. Kymatik: Wellenphänomene und Schwingungen. AT Verlag, 2001