

数学并非科学

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

摘要

数学是一种语言。类比于自然语言, 可以将数学公理视为基本词汇, 运算法则视为语法规则, 而数学定理则可看作浓缩的成语。科学旨在揭示关于世界的真理, 以及获取这种知识的方法论。尽管科学知识可以用自然语言表达, 数学却提供了一种更精确、更简洁的表达方式——并且往往是一种更强有力的工具, 用以扩展已有的知识。从本质上说, 数学并不是科学。数学定理具有绝对的正确性, 而科学理论则必须具备可证伪性。尽管如此, 数学既是阐述科学知识的精确语言, 又是通过抽象与拓展来发现等价知识体系的有力工具。

问题

数学在科学研究中扮演着极其重要的角色, 这引发了一个深刻的问题: **数学能否取代科学?** 更具体地说, 我们是否可以完全依靠数学推理, 而不依赖任何物理观察, 就推导出物理定律和物理属性? 例如, 麦克斯韦方程组预言电磁波以某一特征速度传播, 而我们将其识别为光速。然而, 这一数值是否有可能完全由数学推导得出, 而无需任何经验测量? 若答案是否定的, 那么数学在科学实践中究竟发挥着怎样的作用?

概要

数学对科学至关重要, 但并非必需。虽然数学为科学研究提供了简洁精准的语言和强有力的工具, 但这往往让人误以为科学的根本基石是数学。事实上, 科学的基础在于观察, 而非数学。科学的知识可以用自然语言表达, 尽管这种表达通常不够简练。实际上, 很多科学还无法用数学表达。

数学不是科学。它通过对已有观察和知识进行严密的逻辑推演, 深化了科学的理解。然而, 任何通过数学推导出的科学预测或扩展, 都必须经过进一步的经验观察来验证。所有基本的科学理论、原理和定律均起源于观察, 不能仅靠数学推导得出。因此, 虽然数学对于科学至关重要, 但它自身并不构成一门独立的科学学科。

更重要的是, 数学是逻辑自治正确可靠的, 而科学本质上依赖经验且具备可证伪性。任何科学理论, 无论源自观察还是基于已有知识推导, 最终都必须以经验观察为基础并经过验证, 因此本质上是可被证伪的。

科学不能单纯通过数学推导得出。虽然许多科学发现来自数学的延伸, 但这些延伸始终以经验事实为基础。例如, 光速可以由麦克斯韦方程组推导出来, 但认为这一结果完全源自数学是一种误解。实际上, 它是对已有科学知识的数学扩展, 依据的是通过实验观测获得的真空介电常数和真空磁导率。这些量来自经验测量, 而非数学推演。

数学定理建立在精确定义的公理与运算规则之上，并在此形式化框架内保持内部自治。当数学用于科学推理时，观察所得的数据必须首先转化为相应的假设或公理，数学定理才能在此基础上有效地用于扩展现有的科学知识。事实上，数学本身最初便是从经验观察中抽象出来，并被逐步发展为支撑科学实践与研究的重要工具。

这些认知帮助我们识别等价知识，通过数学推理扩展理解；同时揭示了知识的层级结构，明确了各层知识的可靠性，并提出了一个基础原则集合的概念，其他知识最终可由此导出。本文旨在阐明这些核心理念。

数学总是逻辑自治正确可靠的

数学的目标是建立一个系统且逻辑严密的框架，用以理解和描述抽象系统中的模式、关系与结构。数学基于明确定义的公理和运算规则，通过纯粹推理严格证明定理，这些推理遵循由公理及已有结论导出的规则。因此，数学在其公理和运算定义的范围内保持自治性，确保其结论的可靠性。

以欧几里得几何为例，它是一个建立在少数直观公设(五条公理)基础上的自治数学体系，公理适用于平面空间。所有从这些公理推导出的命题在该平面内均具逻辑有效性。只要条件符合二维平面，这些定理便能应用于科学实践。例如，当两个互相垂直的力作用于物体时，其合力可用勾股定理计算。

尽管欧几里得几何假设空间为平面，这一限制使其在曲面上的应用仅为近似，但其体系内部保持一致性。除此之外，还有多种自治的非欧几里得几何体系被发展出来，其中黎曼几何尤为重要，它构成了爱因斯坦广义相对论中描述曲率空间的数学基础。数学系统的核心在于，只要其假设成立，相关定理便在其应用范围内有效且自治。

数学之所以能够用于扩展科学知识，是因为其证明过程严谨，建立在纯粹推理的基础上，如归纳与演绎等方法。例如，为了证明一个关于自然数n的数学命题对所有n都成立，常用的方法是数学归纳法，其包括两个基本步骤：

- 1. **基础情形**: 证明命题在n = 0时成立；
- 2. **归纳步骤**: 证明如果命题在某个任意自然数n上成立，则它在n+1上也成立。

只要证明了这两个步骤都成立，就确保了这个数学命题对所有n都成立。因为，这时我们可以通过演绎推理来证明命题对所有自然数都成立。具体而言，归纳步骤第二步提供了一个一般性前提:若命题对任意n成立，则对n+1也成立。而第一步基础情形证明了命题对0成立，由此根据一般前提可推出命题对1成立，进而对2、3.....依此类推。通过这种递归的推理过程，命题在整个自然数集合中成立。因此，数学依靠其严密的推理结构，为科学知识的拓展提供了坚实可靠的工具。

例如，要证明某个命题：

(1) $1 + 3 + 5 + \cdots + (2n + 1) = (n + 1)^2$

对所有自然数都成立，使用归纳推理包括以下步骤：

- 1. 首先，证明该命题在n=0时成立。在本例中这是成立的，因为命题 (1) 可化简为： $(2 \times 0 + 1) = (0 + 1)^2$
- 2. 接下来，证明若该命题对任意自然数n成立，则它对n+1也同样成立。

要证明第2步，设：

$$(2) \quad 1 + 3 + 5 + \cdots + (2n + 1) = (n + 1)^2$$

对任意自然数n成立。接下来，我们需要证明它对n+1也成立，即：

$$(3) \quad 1 + 3 + 5 + \cdots + (2n + 1) + (2(n + 1) + 1) = ((n + 1) + 1)^2$$

根据假设(2)，式(3)的左边为：

$$(4) \quad 1 + 3 + 5 + \cdots + (2n + 1) + (2(n + 1) + 1) = (n + 1)^2 + (2(n + 1) + 1) = ((n + 1) + 1)^2$$

这完成了第2步的第二部分，证明命题对n+1也成立。两步皆证，归纳推理即告完成。由此，演绎推理进一步确认命题(1)对所有自然数均成立。此例充分展示了数学推理的严谨与自洽——定理一旦被证明，其有效性便无可置疑。

数学的严谨性和自洽性使其成为科学领域简洁而强大的表达推理工具，然而，数学并非科学实践中必不可少的。例如，卢瑟福发现原子核这一重要科学突破，最初并未以数学形式呈现；同样，牛顿的万有引力定律也可以完全用自然语言准确描述。许多科学概念最初便是通过自然语言阐述，这种做法至今仍广泛存在于多个科学领域。

尽管如此，数学使复杂的科学思想能够更加简洁精准地表达。在条件允许时，科学概念和理论应尽可能用数学语言加以简明阐述，正如以下万有引力定律的公式所示：

$$(5) \quad F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

其中，F表示两个物体间的引力， m_1 和 m_2 分别为两物体的质量，r是它们质心之间的距离，G是引力常数。此例充分体现了万有引力定律用数学语言表达的简洁与精确。更重要的是，这种数学表述使得天体运动和轨道的研究与推广变得更加便捷。正因如此，许多数学分支应运而生，以满足对相关问题的深入探讨。

科学理论必须是可证伪的

人们常常将科学与真理划等号，但科学本身并不是真理，而是一种系统化的探求真理的方法。科学理论必须具有可证伪性，即能够通过观察进行检验，并存在被证伪的可能性。科学的目标是通过观察、实验以及构建对自然运行机制的解释，来理解自然世界。科学通过揭示支配宇宙的基本原理与规律，发展出可用于解释和预测自然现象的模型与理论。只有当这些模型能够提出可检验、可证伪的预测时，它们才具有科学性。缺乏这一特征的理论，不属于科学范畴。

与数学实践类似，归纳推理与演绎推理是科学研究的两大基本方法。科学模型通常基于这两种推理方式构建，可大致分为归纳型或演绎型。归纳推理通过对经验观察的总结，提炼出普遍性原理；而演绎推理则以这些原理为基础，常通过数学推导，推出新的知识。一些科学家更倾向于某一种方法，因此形成了不同的研究取向，例如：实验物理学家侧重于通过观察和实验发现自然规律，而理论物理学家则通过演绎推理在既有知识框架上进行拓展。

虽然数学是逻辑自治正确可靠且对科学至关重要，但它本身并不是科学学科，因为科学的核心在于可证伪性。与数学不同，科学中的归纳和演绎方法无法以同样严格的数理形式加以规范。例如，观察到一只、两只，甚至数十亿只天鹅都是白色的，人们可能通过归纳推理假设所有天鹅都是白色的。继而，借助演绎推理提出“所有天鹅的羽毛都是白色”的理论。然而，发现一只黑天鹅即可推翻这一假设和理论，揭示了这些方法在科学实践中的局限性。

无论当今的科学知识看起来多么坚实，它终究是建立在不完整观察基础上的，无论是通过归纳推理还是演绎推理所得，因此无法被视为绝对确定。这种基础上的不完整性使科学知识体系本质上具有可证伪性。以艾萨克·牛顿为例，他依据当时可获得的观测数据提出了万有引力定律，并归纳成著名的公式(5)。该定律不仅成功解释了开普勒的三条行星运动经验法则，也通过大量观测得到了验证，成为我们理解天体力学的重要基石。万有引力定律的提出，正是归纳推理在科学实践中关键作用的典型体现。然而，牛顿的万有引力定律在解释水星近日点的进动方面遇到了严重挑战，这一长期未解之谜困扰了天文学家达250多年。直到爱因斯坦提出广义相对论，才成功解决了这一问题。广义相对论是演绎推理的经典范例，它在既有知识的基础上建立，并以惯性质量与引力质量等价这一假设为前提。随着该理论中其他预测的陆续被观测验证，广义相对论逐渐被科学界广泛接受，并为我们提供了更为精确的宇宙图景。然而，未来的观测仍可能揭示，该理论并不像我们目前所认为的那样绝对准确。

同样，从已有科学成果演绎而来的定律和理论，最终都依赖于其基础知识的有效性。基础定律和原理本质上具有经验性，无法像数学定理那样得到绝对证明。因此，所有科学知识均建立在归纳推理基础上，具备相同的可证伪性。无论科学理论多么严密，仍然要接受未来观测的检验，且本质上是可被证伪的。

这种内在的可证伪性不仅存在于万有引力定律和广义相对论，也普遍适用于所有科学定律、理论和原理中，包括牛顿第二运动定律、普朗克黑体辐射定律、库仑定律以及麦克斯韦电磁波方程等。这些理论都是基于当时可获得的观测数据提出的，因此仅反映了物理现实的部分侧面。量子物理中大量无法解释的现象，进一步揭示了我们物理世界理解的局限性。尽管科学知识发展不断进步、更接近精准描述现实，但尚未达到完整或终极的真理。同时，观测数据的精度及科学模型中的假设也存在不可避免的局限。

另一方面，基础科学知识是否能完全依靠数学推理，而不依赖任何物理观测？以光速为例，虽然它可以从麦克斯韦方程中推导出来，但将这一结果视为纯粹的数学推演是一个误解。事实上，该推导依赖于两个经验常数，即真空介电常数与真空磁导率，它们均通过实验测量获得，而非由数学本身导出。尽管许多科学突破源于数学的外推，但这些推演始终建立在经验数据的基础之上。同样，像常数 e 和虚数单位 i 这样的数学概念虽然本质上是抽象的，但只有在科学应用中才具有实际的物理意义。因此，任何科学定律或理论都不可能仅靠数学推导成立，必须扎根于基本的实证知识。

科学的终极目标是揭示自然现象背后的物理本质。科学定律和理论来源于观测，既要能够解释已有的观测结果，更重要的是能够对未来的观测作出可检验的预测。预测的可验证性使这些定律和理论可以被检验，并具有被证伪的可能性。例如，万有引力定律指出“所有物体彼此吸引”，若要完全验证这一命题，理论上需观察所有物体的相互作用，这是不现实的。然而，可证伪性只需一个反例即可推翻该理论。例如，光子之间是否存在引力作用？如果不存在，将对该理论构成挑战。可证伪性是所有科学理论的根本特征，也是科学区别于其他知识体系的重要标准。

等效知识

数学在科学实践中的应用极大地推动并加速了科学的发展。其中一个重要优势是通过演绎推理扩展已有知识的能力。“等效知识”指的是利用现有科学认知，通常通过数学演绎，推导出系统的更多属性、原理、理论和定律。数学在此过程中尤为关键，因为它能够基于既有原理，对知识进行系统且精确的延伸。

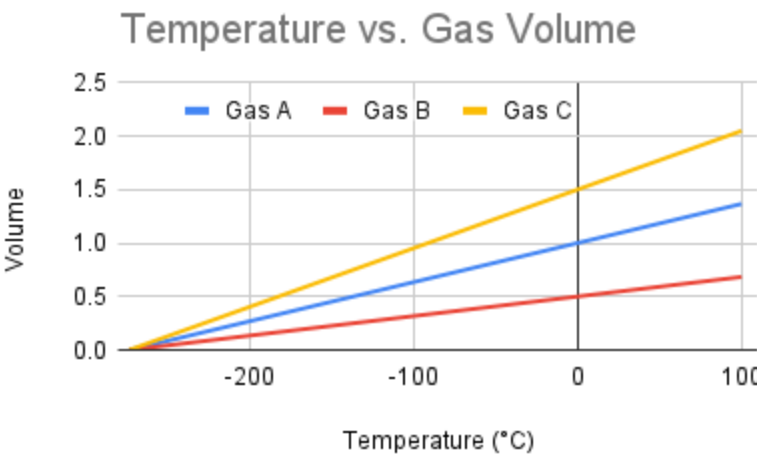
例如，数学中一条直线由两个点唯一确定。在这种情况下，这条直线与这两个点所包含的信息是等价的。比如，点 (0, 1) 和 (100, 1.3661) 可以确定由以下方程描述的直线：

(6) $y = \frac{1}{273.15}x + 1$

方程(6)所包含的信息与由这两个点提供的信息是等价的。直线上任意两点都可以用来确定这条直线，因此，直线上任意一对点在定义该直线时本质上具有等效的知识价值。特别地，这也意味着点 (-273.15, 0) 位于该直线上，且可以与任意一个初始点共同确定同一条直线。从数学角度来看，这个点是由最初的两个点推导出的等效知识。

现在，将这段初中数学应用于物理。如果用x表示气体的温度，y表示该温度下气体的体积，那么方程(6)描述了温度与体积的关系，表明体积随温度的升高而增加。两个初始点分别代表气体在 摄氏0度和100度时的体积。

根据这一数学关系，点 (-273.15, 0) 意味着当温度降至摄氏零下273.15度时，气体体积为零。由于气体体积不可能为负，这一温度应为气体的最低温度，也就是绝对零度。因此，绝对零度是从气体行为观测中推导出来的等效知识。后续对多种气体的观察同样显示，温度与体积的关系预测了体积趋近于零时的这一最低温度，如下图所示，验证了这一数学推理的正确性。



在物理应用中，数学等价的另一个典型例子是函数在时域和频域之间的转换，这一过程通过傅里叶变换实现。函数的特征可以从时域转化为频域，反之亦然，原始函数也能根据频域信息被重构出来。实际上，这两组信息在数学上是等价的，只是同一底层数据的不同表达形式。正是基于这种等价性，人工智能能够通过短语音录音提取频率特征，实现对人声音色的高效模拟。

同样，牛顿的万有引力定律能够预测开普勒行星运动的三条经验定律；反过来，开普勒定律也能推导出万有引力定律，二者通过数学变换表现出等价性。科学知识的许多领域正是通过数学以这种方式得以扩展。事实上，基于已有理论进行预测一直是科学研究的核心，绝大多数知识就是以这种方式被延伸的。

当一个科学理论被数学化表达后，通过数学推导得出的外推结论，实质上是建立在已有知识基础上的预测。数学的严密性和自洽性保证了：只要理论在特定条件下对某个系统成立，那么在相同条件下，通过数学推理得到的推论也同样有效。这是因为这些扩展出的知识在数学上与原始理论是等价的，它们只是同一物理实质的不同表述方式。本质上，数学是一种强大的工具，能够将有限的科学认知扩展为对系统更全面、更深入的理解。

知识的结构

一个系统的知识领域涵盖了对其物理本质的所有理解，其中某个学科的知识只是其中的一个子集。在这个子集中，不同层次的知识其可靠性并不相同。整体上，科学知识可以按可信度划分为多个层级。最底层是直接观测所得的知识。这一层最为可靠，因为它直接反映了系统的物理特性，并且通常在相同条件下具有可重复性。

第二层是从观测中归纳或推导出的科学定律、理论和原理。这些内容虽可用数学形式表达，但通常缺乏像数学定理那样的严格证明，因为它们并非建立在纯粹的数学公理之上。尽管如此，它们的预测可以通过进一步观测进行验证。代表性的例子包括牛顿的万有引力定律、牛顿第二定律、麦克斯韦方程组、欧姆定律和查理定律等。这些基本原理可视为科学体系中的“公理”，构成后续知识构建的基础。

更高层的知识则是在这些基础理论之上，通过数学推理或演绎扩展而来。这些知识虽然同样可被观测验证，但往往涉及更多假设和近似，例如气体动力学理论或超导的BCS理论。因此，这些推导性知识的可靠性通常低于基础层级，因为每一层都依赖于下层的准确性，而任何微小误差都可能被逐层放大。总体而言，科学知识呈现出一个由基础观测向上扩展的层级结构，层级越高，可信度通常越低，但理解的深度和广度也随之增加。

等效知识通常位于第三层或更高层，即在基础知识之上通过数学推导得出。尽管等效知识原则展现了数学在扩展科学理解中的重要作用，但这种等效本质上是数学上的，其有效性完全依赖于原始基础知识的准确性。因此，一旦基础知识存在偏差，由此推导出的扩展知识也将随之失效。

以BCS理论为例，它被广泛用于解释低温下的超导现象。然而，近年来高温超导材料的发现对该理论提出了严峻挑战。BCS理论建立在电阻来源于电子碰撞的模型之上，而这一模型又依赖于金属键、“自由电子海”等概念。该理论的有效性取决于这些基础概念的准确性；如果其中任何一项被证伪，BCS理论本身也将难以成立。

BCS理论与电阻的碰撞模型均无法解释高压条件下材料的行为，这表明问题可能根源于这些理论所依赖的基本概念。近期一项研究提出了一个发人深省的问题：“[金属中是否存在自由电子海？](#)”根据金属键模型，金属结构由自由电子海将阳离子紧密结合在一起。如果该模型成立，那么移除自由电子将导致晶格中阳离子因静电排斥而分离，从而使导体结构崩解。这一点引发了一个重要质疑：既然自由电子作为“黏合剂”本身存在不稳定性，那么在电流通过金属、电子持续流动的情况下，导体的结构为何仍能保持稳定？这一问题不仅挑战了金属键模型的合理性，也对以其为基础的一系列电学理论的有效性提出了质疑。

基础知识虽然通常较为稳固，但并非没有缺陷。事实上，基础理论存在不足之处非常常见。例如，地心说曾在许多古代文明中盛行数千年，认为地球是宇宙的中心。这一观念根深蒂固，以至于哥白尼在16世纪初提出日心说时，最初被视为激进的异端。

尽管科学在过去五百年中取得了重大进展，但这并不意味着我们的基础知识毫无瑕疵。持续的修正与完善是科学发展的必然过程。例如，曾一度认为各大陆彼此相对固定不动。阿尔弗雷德·洛塔尔·魏格纳于1912年提出的大陆漂移学说，最初被主流地质学界所否定。直到20世纪50年代，随着古地磁学等关键证据的出现，大陆漂移学说才逐渐被广泛接受，并成为现代板块构造理论的重要基石。

即使在最基本的知识领域，修正和完善也十分常见。例如，牛顿的万有引力定律建立在当时已有的观测和认识基础上，包括开普勒的行星运动三大定律，但这些定律无法解释水星近日点进动的问题，限制了牛顿定律的预测精度。后来，爱因斯坦的广义相对论对此作出了更全面的解释。

这些例子表明，科学知识永远不可能十全十美。科学家肩负着不断质疑现有理论、构建更坚实知识体系的使命。这也体现了等效知识的两个关键点：第一，数学本身无法替代科学，扩展知识的有效性依赖于原始理论的质量；第二，等效扩展为验证现有知识提供了新的途径，这种验证既可能加强也可能挑战原有认识。例如，水星近日点进动揭示了万有引力定律的局限，成为科学研究中的新观测，最终推动了广义相对论的发展，实现了对宇宙更精准的理解。

知识的数学扩展

尽管如此，许多优雅模型和理论极大地推动了对自然的理解。例如，正电子(或称反电子)最初由狄拉克方程预测，随后通过大量实验和观测得到了验证。虽然表面上看，正电子似乎是纯粹通过数学方程推导出来的，但这是一种误解。狄拉克方程的建立依托于已有的科学知识，而这些知识本身来源于更为基础的观测和理解。实际上，狄拉克方程为这些原有知识提供了新的视角。没有这些基础知识，狄拉克方程就无法被提出。

同样，光速作为电磁波的固有属性，可以通过麦克斯韦方程组从其他物理性质中推导出来的，特别是真空介电常数 ϵ_0 和真空磁导率 μ_0 ：

$$(7) \ c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

这一结论已通过大量实验得到了强化和验证，其中最著名的是迈克耳孙—莫雷实验。狭义相对论本质上是基于光速恒定这一性质的数学扩展。由于速度定义为距离除以时间，保持光速恒定需要对空间和时间进行相应调整：

$$(8) \ speed = \frac{space}{time}$$

因此，空间收缩和时间膨胀的性质，是基于光速恒定这一基本属性，通过数学变换得出的延伸结果。数学上，方程(8)等价于：

$$(9) \ space = speed \times time$$

尽管爱因斯坦的相对论通常通过洛伦兹变换来解释空间收缩和时间膨胀现象，方程(9)则为这些现象提供了更简明的理解。根据该方程，为了保持光速恒定，随着时间膨胀，空间必须相应收缩。这引出了一个问题：这种推理可以延伸到什么程度？当速度接近光速时，时间膨胀趋近于零，依据方程(9)，空间也必须收缩到零。这种潜在的奇点纯属数学上的预测，目前尚未被实验证实。

进一步思考：如果时间变为负值(在数学上是合理的)，这会意味着什么？空间是否也可能取负值？负空间又意味着什么？这些预测虽基于数学推导，但其真实性仍需依赖科学中的实验证据确认。它们代表数学所引入的等价知识，尚待科学验证。

必须明确的是，如果基础知识存在缺陷，那么建立在其上的任何扩展知识也必然是不准确的。因此，科学研究必须以坚实且准确的基础知识为前提。科学家不仅承担着扩展知识的使命，更肩负着严格质疑和验证现有知识的责任，以确保其准确性和延伸知识的可靠性。

知识的最小集

将电磁波所有性质视为一个集合，麦克斯韦方程组可被理解为作用于该集合的运算，将一个子集映射到另一个子集。例如，公式(7)展示了光速如何从这些方程中推导而来，这实际上是基于其他已知信息的等价知识。同样，空间和时间也是这个知识域中的属性，光速作为一个常数属性存在其中。爱因斯坦的狭义相对论和洛伦兹变换可以看作该知识域内的运算，因此时间膨胀和空间收缩是由光速常数投射出的该领域内的等价知识和延伸。

将电磁波的属性、空间与时间纳入更广泛的知识域，以麦克斯韦方程组和洛伦兹变换作为运算规则，光速的常数属性由麦克斯韦方程描述的电磁波性质推导而来，而空间收缩与时间膨胀则是基于光速不变性通过洛伦兹变换推导出的结果。因此，狭义相对论是从电磁波属性的一个小子集中导出的等价知识，也就是说，狭义相对论是对电磁波理解的数学延伸。由此可见，这个知识域的整体广度源自一个基础的最小子集，代表该领域的最小知识集合。

一般而言，自然规律和理论充当某一知识域内的运算规则，使得知识能够从一个子集扩展或预测到另一个子集。虽然数学似乎帮助我们拓展了知识，但本质上它是同一知识域中等价子集之间的转换。在任何知识域中，都存在一个最小子集，借助科学理论和规律等运算可以推导出该域内的所有其他知识。以之前的例子为例，最小知识集包含洛伦兹变换、麦克斯韦方程组及电磁波属性。对光速常数、空间收缩和时间膨胀的理解，均是从该最小知识集延伸出的等价知识。

我们的宇宙认知似乎划分为若干不同的知识域，随着科学的发展，这些领域的界限日益模糊并开始交叠。例如，化学与物理曾被视为独立学科，但现在发现它们在许多方面相互关联，成为更大知识体系中的交叉域。

我们设想对整个宇宙的理解是一个紧密相连的知识域，且可由一个最小的基础知识集导出。这个基础知识集体现了宇宙的本质属性和基本运算规则。

版本更新

- 10/15/2024: 本文在斯坦福初始发布
- [11/02/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, [PDF](#)
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, [PDF](#)

相关文献

- [热力学中的错误概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [布朗运动的原动力 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [温度是分子平均动能的标志吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [绝对零度的本质 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [能量转换三角 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [超流体不是流体 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [为什么相变温度保持恒定 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [摩擦为何会产生热量? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [简明熵概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [熵可以减少 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [回归原理 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [金属中是否存在自由电子海? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [电子通道: 导体超导统一论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [低温和高温超导统一理论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [LK-99的局限和意义 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [地球磁场超导起源说 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [关于质量的本质问题 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)