什么是冲力说？它与惯性理论有何异同？

1. 运动的原因

然而，在亚里士多德的物理世界里，仅仅说物体在空间和时间中运动是不够的，还必须对运动进行因果解释。虚空中的运动能否通过物体日常运动的动力学原理而得到说明？如果将物体实际置于真实的虚空中（假定虚空存在），它会自然上升或下落吗？如果从它的自然位置将其掷出，它会作连续的受迫运动吗？虽然亚里士多德否认在虚空中运动的可能性，也没有为提出这些问题的人提供任何指导，但中世纪学者在回答这些问题时却秉持着亚里士多德的物理学原理。于是，自然哲学家们认为，凡运动者皆由一个特定的、分离的、可以确认的东西所推动，且任何运动都要有起反抗作用的阻力起作用。倘若虚空本身既不充当推动力也不充当阻力，这些功能由谁来实现呢？什么东西可以充当推动力或阻力呢？

（1）内阻力与虚空中的自然运动

自然运动的答案来自13世纪末14世纪初引入的一个新的概念——“内阻力”。它的引入只有在对亚里士多德的“复合物”概念作出新的解释之后才有可能。亚里士多德区分了纯元素物体（土、气、水、火）与复合物。纯元素物体是假想的东西，在自然界中实际观察不到，而复合物则是由所有四种元素以不同比例混合而成的，即自然界中实际观察到的物体。亚里士多德认为，在所有复合物中，占优势的元素决定了该物体的自然运动，即自然上升或自然下落。尽管在中世纪这种解释被许多人所接受，但也有一些人开始认为，不仅复合物可以由两种、三种或四种元素组成，而且它的自然运动也并非由占优势的元素决定。他们认为，轻元素的合力共同对抗着重元素方向相反的合力，如果轻占优势，就会产生向上运动；如果重占优势，就会向下运动。复合物中轻元素和重元素就好像由各个部分或各种程度组成，各部分的总和会显示重的或轻的运动性质在多大程度上占优势，从而决定自然运动的方向。重的部分与轻的部分之比越大，下落速度就越大；类似地，轻的部分与重的部分之比越大，上升速度就越大。

这种解释距离“内阻力”概念也就只有一步之遥了。既然重元素和轻元素依其本性会沿相反方向运动，而且复合物中各元素的程度也可以被指定，那么进而设想重和轻在同一复合物中充当相反的作用力或性质也就顺理成章了。轻重之中程度最大的性质是推动力，另一性质则为阻力。现在，假设两个复合物中重与轻之比分别为8：3和8：5，那么就可以合理地认为，在同一种介质中，轻的程度较小的物体会以较大速度下落，这是因为，运动较快的物体含有较少的轻或内阻力。如果两个物体有同等程度的轻，且下落速度有所不同，那么下落较快的物体就含有较大程度的重。一般而言，在下落落体中，重被认为是推动力，轻则被看作阻力；在上升物体中，轻是推动力，重则是阻力。

由于月下世界中所有可能观察到的物体都是复合物，因此用内阻力就可以解释地界的所有自然运动。然而，内阻力最大的用途在于证明，假想的虚空中的运动是合理的，因为现在，这种运动的前提条件（即推动力和阻力）得到了满足。在起阻碍作用的外部介质不存在的情况下，比如在虚空中，物体的内阻力将会使瞬时速度得以避免。由于每一个复合物都包含着自身的推动力和阻力，因此它可以在虚空中运动。

然而，纯元素物体又将如何呢？尽管我们已经指出，自然界中并不存在这样的物体，但经院学者依然思考了这些假想的实体能否在虚空中运动。根据以上的分析，答案是显然的：纯元素物体不可能在虚空中运动，因为它们不像复合物那样含有内阻力。由于虚空中也没有外部阻力，推动力与阻力之比不存在，所以纯元素物体在虚空中将以无限大的速度运动。未经混合的纯元素物体，如水、气、土，只能在物质介质中以有限速度下落(绝对轻的元素火在任何介质中都不可能下落)。虽然偶尔有人试图猜测纯元素物体在虚空中如何作自然运动，但一般认为，这种运动在动力学上是不可能的。

在中世纪物理学的背景下，要证明复合物能够在虚空中作自然运动，内阻力似乎是最合理的方式。这一点一旦确立，就会导出一个有趣而重要的结论。布雷德沃丁、萨克森的阿尔伯特等人指出：具有不同大小和重量的两个同质物体将以相同速度在虚空中下落。从亚里士多德物理学的观点来看，这一结论是惊人的。因为根据亚里士多德的物理学，速度与重性或绝对重量成正比，因此物体越重，速度就越大。当然，只有假设物质是同质的，这个结论才能成立。由于在任何同质的复合物中，每一相等的物质单元都相同，所以每一单元的物质所含的重元素与轻元素之比必定相等，即推动力与内阻力之比F/R相等。尽管一个物体可能比另一个物体含有更多同质的物质单元，因而更大更重，但这两个物体将以相同速度下落，因为速度被认为仅仅由强度（intensive）因素（这里是每单元物质的推动力与阻力之比）决定，而不是像亚里士多德所认为的那样由广度（extensive）因素（如总重量）所决定。

两个多世纪后，面对同一问题的伽利略在其《论运动》（约写于1590年）中用类似的方法反驳了亚里士多德对自然下落的解释。只不过伽利略用的是比重或每单位体积的重量，而不是每个物质单元的推动力与阻力之比。他认为，大小不同因而重量不同的同质物体，在介质和虚空中将以相同速度下落，只不过在虚空中的下落速度将会大于在介质中的下落速度。伽利略认为，最终决定速度的是有效重量而非总重量。在他看来，有效重量等于物体比重与介质比重之差。因此，实际上是比重之差决定了速度。下落物体的速度可以表示成：Vμ物体的比重-介质的比重），上升物体的速度可以表示成：Vμ（介质的比重-物体的比重）。在虚空中，介质的比重为零，因此物体的下落速度将直接正比于它的比重或每单位体积的重量。显然，如果两个不同物体的比重相等，那么在同一介质或虚空中，它们将以相同的速度下落。在其名著《关于两门新科学的对话》（Discorsi e Dimostrazioni Matematiche，intorno àdue nuove scienze，1638）中，伽利略将这一定律作了推广，在这里，所有的物体，无论大小和物质构成如何，在虚空中都将以相同速度下落，这 一推广注定会成为牛顿物理学不可分割的一部分。

尽管伽利略使用的方法与他的中世纪先驱惊人地相似，得出的结论也近乎相同，但这也许只是巧合。虽然伽利略可能对中世纪的讨论有所了解，但这一点还没有什么确凿的证据。的确，中世纪的亚里士多德主义者用具有动力性质的绝对轻和绝对重来解释运动方向，而伽利略依据的则是物体比重与介质比重之间的关系，再也没有必要将纯元素物体的行为与复合物的行为区分开来。根据中世纪广泛认同的观点，只有某些物体（复合物）能够在假想的虚空中以有限的速度运动，而所有其他物体（纯元素物体）则不能，这一观点在伽利略《论运动》的物理学中已经变得毫无意义。借助比重这一基本概念，伽利略对所有物体一视同仁，不论其组成为何。他断言，所有物体都可以在虚空和介质中下落或运动。在伽利略这里，同质的阿基米德量取代了中世纪晚期的纯元素物体和复合物。由于这种区分不适用于伽利略对运动的分析，而且伽利略否认有绝对的轻和重，因此内阻力概念也就变得毫无意义。中世纪使用内阻力概念是为了用动力学术语来解释虚空中有限速度的运动，这个概念依赖于复合物中轻重元素的两种相反倾向：在下降时，重和轻分别充当推动力和阻力；而在上升时，它们的角色则相反。而在伽利略这里，要想产生虚空中的有限速度，既不要求内阻力，也不要求外阻力，落体的速度直接正比于它的比重。推动力与介质的外阻力都由比重客观地度量。尽管事实证明，用比重来解释自然下落并不恰当，但16 世纪末的伽利略和较早前的贝内代蒂对“比重”的应用却标志着对中世纪含混的、定义不明的推动力和阻力概念的改进。但中世纪的理论本身又是对西欧早先接受的观点的重要发展。它们讨论了亚里士多德物理学中曾经受到忽视的方面，试图得出一些更为全面和一般的解释。

然而，尽管伽利略关于物体在虚空或介质中下落的描述更为一致和简洁，但这决不能掩盖一个历史事实，那就是他从传统中继承了虚空中的有限运动是可理解的这一观念。这一传统可以直接上溯到拉丁中世纪、阿维帕塞，甚至是菲洛波诺斯。事实上，伽利略间接承认过这一点。正是经由这种反亚里士多德传统，他得出了这样一种观念：物体下落时介质仅仅起阻碍作用，物体真正的自然运动只发生在虚空中，尽管是一种假想的虚空。

通过断言同质物体将以相同速度在虚空中下落，并把其范围拓展至一切物体（不论其构成为何），伽利略最终提出了一条新的物理定律。他的中世纪先驱也得出了同一结论，但只是针对同质物体，而没有将其进一步拓展。这一重要结论对中世纪自然哲学的运动观念是否产生了显著影响？就像与亚里士多德的其他偏离一样，它对于整个体系似乎影响甚微。中世纪的自然哲学家从未想到要去研究它对亚里士多德自然哲学其他方面的可能影响，这种反应在当时很是典型。

（2）虚空中的受迫运动和冲力理论

与关于虚空中自然运动可能性的长篇累牍的探讨相对照，虚空中受迫运动的可能性很少被考虑。这个问题着实令人生畏，因为受迫运动的两个必要条件——外在的推动力和外阻力在虚空中都不存在。在缺乏气、水等物理介质的情况下，无法像亚里士多德解释受迫运动时那样援引外部的推动力或阻力。轻和重虽然可以充当复合物作自然运动时的内在推动力和内阻力，但在解释受迫运动时几乎毫无用处。根据定义，一个重性占优势的复合物在受迫运动中必须被向上（偏离其自然位置）或水平地推动，这样其占优势的重性才能不作为推动力。倘若不否定虚空中受迫运动的可能性，那么与中世纪晚期物理学原理相一致的唯一合理回答可以体现在尼古拉•波内图斯（Nicholas Bonetus，？－1343？）的一个陈述中：“ 在 受 迫 运 动中，某种非永久的、短暂的形式被印入到运动物体之中，只要该形式持续存在，虚空中的运动就是可能的；当它消失时，运动便停止。”1

波内图斯这里提到的被印入的力是中世纪晚期最重要的物理概念之一。早在数百年前，在反对亚里士多德关于受迫运动的解释的过程中，这个概念就已出现。亚里士多德把外部空气当作受迫运动中连续起作用的推动力在古代晚期就已遭到质疑。菲洛波诺斯注意到，如果按照亚里士多德的说法，与物体直接接触的空气能够引起物体的运动并使之维持一段时间，那么仅仅通过搅动石头后面的空气就应该能够使石头开始运动，而这明显与经验相抵触。因此，菲洛波诺斯拒绝把空气作为推动力，而是认为初始的推动者赋予石头或抛射体一种无形的推动力，这种力才是使石头持续运动下去的原因。既然这种被印入的力可以充当推动力，石头或物体为阻力，受迫运动的条件便得到满足，周围的空气对这一过程几乎没有或完全没有贡献。事实上，空气是连续运动的阻碍。菲洛波诺斯的结论是，受迫运动在虚空中要比在介质中更容易发生，因为虚空中没有任何外部阻力能够阻碍这种被印入的力发生作用。

穆斯林学者又进一步详细阐述了菲洛波诺斯的解释。他们称这种被印入的力为“倾向”（mail）。阿维森纳是支持“倾向”理论的主要穆斯林学者之一，他把“倾向”看作初始推动力的一种中介，当初始推动力不再起作用时，“倾向”还能继续在物体中起作用。阿维森纳区分了三种类型的“倾向”：精神的、自然的和受迫的。撇开与我们讨论无关的第一类不谈，他试图用自然的和受迫的“倾向”来分别为亚里士多德区分的两种相应运动提供因果解释。在阿维森纳看来，物体能够接受与其重量成正比的受迫“倾向”，这就解释了为什么能把一个小铅球掷得比一块轻木或一片羽毛更远。在本体论上，阿维森纳把“倾向”当作一种永恒的质，如果没有外阻力，它将无限期地存在于物体之中。由此他得出结论：如果物体在具有无限广延的虚空中作受迫运动，它将一直无限运动下去，因为没有任何理由可以让它停下来。在没有诉诸被印入的力的情况下，亚里士多德也得出了这一结论，并因此否认虚空存在。由于没有证据表明有这种运动存在，阿维森纳同样否认了虚空的存在。

在接下来的一个世纪，阿布尔•巴拉卡特（Abu’1 Barakat，？－约1164）又提出了一种自行损耗的“倾向”， 即波内图斯后来描述的那种类型。在这种情况下，受迫运动的物体即使在虚空中也将最终停止，因为被印入的力不可避免要自然耗尽，这一推论不能被用作反驳虚空存在的严肃证据。于是，阿拉伯学者描述了两种不同形式的被印入的力，或者说冲力：一种是永久的，除非被外力和阻碍耗尽；另一种是短暂的和自行损耗的，即使在没有外力的情况下也会逐渐消失。这两种类型的被印入的力最终在拉丁西方都有了自己的对应。至于它们是通过阿拉伯著作的拉丁译本传播过去的，还是在拉丁西方独立发展的，目前还不太清楚。

西方在13世纪就已经知道了这个理论，因为罗吉尔·培根和阿奎那等少数几位拉丁学者否认能够用一种无形的被印入的力来解释物体持续的受迫运动。然而到了14世纪，这种被印入的力的理论最终以某些形式流行开来，特别是在巴黎。早在1323年，弗朗西斯科·德·玛齐亚（Franciscus de Marchia，约1290－1344后）就提出了该理论的一种版本。他把这种无形的被印入的力称为“遗留之力”（virtus derelicta）， 认 为 它 将 自 行 损 耗 ， 是暂时的，能够沿着与物体自然倾向相反的方向推动物体运动。在这一过程中，空气仍然起辅助作用，因为弗朗西斯科认为，当物体被发动时，周围的空气也会接收到一种被印入的力，使之能够协助物体运动。

形式最完善的理论是布里丹提出的，“冲力”（impetus）也许就是他引进来指代那种无形的被印入的力的专业术语。布里丹把冲力设想为初始推动者传给物体的一种推动力，引起运动的冲力的强度通过物体的速度和物质的量（quantity of matter）来量度。布里丹正确地假设，重而致密的物体要比同样体积和形状的轻而稀疏的物体含有更多的物质，并且在此基础上解释说：如果同样形状和体积的铁和木头以相同速度运动，那么铁将走过较长的距离，因为它的物质的量较大，能够接受更多冲力，在对抗外部阻力的过程中能将冲力保持得更久。布里丹用物质的量和速度来确定冲力的大小。在牛顿物理学中被用来定义动量的正是这些量，尽管在牛顿物理学中，动量通常被当作运动的量，或者对物体运动结果的量度，而冲力则是运动的原因。事实上，冲力被视为亚里士多德外部推动力的一种内在化。它似乎更好地坚持了亚里士多德本人的说法：凡运动者皆为他者所推动。

和阿维森纳一样，布里丹也赋予了冲力一种永恒的质，认为它将一直持续下去，除非被外阻力所减弱或耗尽。一旦推动者把冲力传给物体，使物体运动起来，并与初始的推动力失去接触，那么如果没有什么特定的原因，就不可能产生额外的冲力。冲力初始的量将保持不变，除非被作用于物体的外阻力、或者物体朝着它的自然位置运动的自然倾向所损耗。布里丹暗示，如果将运动的所有阻力撤除，那么物体一旦开始运动，很可能将永远沿直线匀速运动下去。它没有任何理由改变自己的运动方向或初始速度，因为如果撤除对受迫运动的一切阻碍，那么甚至连物体落向其自然位置的倾向都不会起作用。的确，当冲力使物体作受迫运动离开其自然位置时，物体落向其自然位置的倾向很可能不会起作用。布里丹未能对冲力理论的这个潜在的惯性推论详加阐述，这也许是因为在一个有限的亚里士多德世界中，在上述理想条件下永远直线运动下去这一观念似乎很荒谬。即使他认为这样一种无限的直线运动的确是可能的，他大概也要设计一种机制来遏止它。事实上，布里丹通过否认虚空中有限连续运动的可能性而避免了这个困境。然而，作为1277 年大谴责的一个后果，他承认上帝能够超自然地产生虚空中的这种运动。假如布里丹采用了波内图斯所描述（伽利略也曾一度接受过）的那种暂时的或自行损耗的冲力观念，他也许会接受假想的虚空中的运动。在这种暂时的冲力作用下，虚空中的运动只可能维持有限的时间。

无定限的（indefinite）匀速直线运动概念是惯性原理的一个本质要素。它虽然与中世纪物理学不相容，但却可以从布里丹的持久冲力中包含的一些特征和属性中导出来。在牛顿把惯性当成阻碍物体改变其静止或匀速直线运动状态的一种内在力量之前（在中世纪，静止与匀速直线运动从未被视为相同的状态；静止与运动被认为是相反的属性或状态），他所理解的惯性非常接近于布里丹的冲力，即一种内在的力量，在缺少外部推动力或阻力时，能够引起无定限的直线运动。

布里丹还用冲力来解释落体的加速，所用方法与早期穆斯林“倾向”理论家类似。直到伽利略，包括伽利略本人，落体问题一直都是用两种方式处理的：一种是一般地解释下落的原因而不考虑其公认的加速；第 二 种 是关注它的加速。我们在前面看到，亚里士多德暗示“产生者”是物体自然下落的原因，但在实际讨论时，他却强调重量是重物均匀下落速度的决定因素。物体的加速实际上被忽视了。在中世纪的拉丁西方，一些学者把物体的实体形式看作下落原因，而另一些学者，特 别 是在14 世纪，则把物体的重性或重量看作下落的主要原因。为了解释加速，有时还会加上第二种完全不同的原因。

布里丹还用冲力来解释落体的加速，所用方法与早期穆斯林“倾向”理论家类似。直到伽利略，包括伽利略本人，落体问题一直都是用两种方式处理的：一种是一般地解释下落的原因而不考虑其公认的加速；第 二 种 是关注它的加速。我们在前面看到，亚里士多德暗示“产生者”是物体自然下落的原因，但在实际讨论时，他却强调重量是重物均匀下落速度的决定因素。物体的加速实际上被忽视了。在中世纪的拉丁西方，一些学者把物体的实体形式看作下落原因，而另一些学者，特 别 是在14 世纪，则把物体的重性或重量看作下落的主要原因。为了解释加速，有时还会加上第二种完全不同的原因。

布里丹是这样来处理落体问题的。由于物体的重量在下落时保持恒定，他将物体的重性或重力（gravitas）看作其自然匀速下落的原因。在排除了经常用来说明加速的几个可能原因（比如与自然位置的接近、落体产生的热稀释了空气、物体下落时空气阻力减弱等等）之后，布里丹用积累的冲力增量解释了加速。按照他的解释，重性不仅使物体开始下落，而且在下落过程中的每一个相继瞬间都会产生一个冲力增量，即有时所谓的“偶有重性”（accidental heaviness）。冲力的这种连续积累使得速度连续累积增长，从而产生不断加速的运动。下落过程中可以区分三个要素：（l）物体的重性W；（2）冲力I；（3）速度V。一开始，在第一个时间段∆t结束时，重性或重量W产生了一个初速度V。在这一时间段内，物体恒定的重性又同时产生了一个冲力的量I，它将在第二个时间段内起作用，并产生一个速度增量∆V。于是在第二个∆t结束时，物体的重性和冲力增量W+ I将使物体的速度增加到V+ ∆V。在第二个∆t内又产生了第二个冲力增量，加在第一个之上。因此，在3∆t内，W+ 2I将产生速

布里丹是这样来处理落体问题的。由于物体的重量在下落时保持恒定，他将物体的重性或重力（gravitas）看作其自然匀速下落的原因。在排除了经常用来说明加速的几个可能原因（比如与自然位置的接近、落体产生的热稀释了空气、物体下落时空气阻力减弱等等）之后，布里丹用积累的冲力增量解释了加速。按照他的解释，重性不仅使物体开始下落，而且在下落过程中的每一个相继瞬间都会产生一个冲力增量，即有时所谓的“偶有重性”（accidental heaviness）。冲力的这种连续积累使得速度连续累积增长，从而产生不断加速的运动。

下落过程中可以区分三个要素：（l）物体的重性W；（2）冲力I；（3）速度V。一开始，在第一个时间段∆t结束时，重性或重量W产生了一个初速度V。在这一时间段内，物体恒定的重性又同时产生了一个冲力的量I，它将在第二个时间段内起作用，并产生一个速度增量∆V。于是在第二个∆t结束时，物体的重性和冲力增量W+ I将使物体的速度增加到V+ ∆V。在第二个∆t内又产生了第二个冲力增量，加在第一个之上。因此，在3∆t内，W+ 2I将产生速6度V+ 2∆V。在第四个时间段内，W+ 3I将把速度增加到V+ 3∆V，以此类推。布里丹的解释完全属于亚里士多德传统，因为这里力总是与速度成正比，而不是像在牛顿物理学中那样与加速度成正比。这是显然的，因为速度的每一个增量都来自于冲力的成比例的增量。于是，如果在力W+ 3I产生了V+ 3∆V之后，再没有额外的冲力增量加入进来，那么速度将保持V+ 3∆V不变，一直与此时恒定的力W+ I成正比。只有当重量被当成直接产生速度增量而非冲力增量的恒定推动力，才可以说布里丹接近了力与加速度成正比这一观念。但这种解释并没有多少根据，因为物体的重量必须先产生冲力增量，然后才能相应地产生速度增量。作为恒定推动力的重量与速度增长之间充其量只有间接的关系。

冲力理论的影响一直持续到16 世纪（尽管对此看法尚存分歧），伽利略早年在比萨大学就曾热情支持过这个理论。在其未曾发表的《论运动》中，伽利略试图解释重物的受迫上升和随后的加速下落。他以遗留之力（residual force）作为解释的基础，这一观念来自希帕克斯，辛普利丘在中世纪广为人知的《关于亚里士多德<论天>的评注》中描述了希帕克斯的看法。在遗留之力的基础上，伽利略又引入了一种自行损耗的、无形的、被印入之力或冲力的机制，这种灵感很可能是从中世纪的文献中获得的。开始的时候，推动者将一种被印入的力传给向上抛掷的石头。随着这种力的减弱，物体逐渐放慢向上运动的速度，直到被印入的力被石头重量向下的冲压所抵消，这时石头就开始下落。开始时很慢，随着被印入的力不断损耗减弱，下落速度越来越快。随着石头重量与不断减弱的被印入的力之间的差别持续增大，加速就产生了。因此，在下落过程中，被印入的力实际上充当了阻力。假如物体下落了足够长的距离，那么所有被印入的力都将消失，这时物体将匀速下落。伽利略最终还是抛弃了自行损耗的被印入的力这一概念，转而用一种自我保存的累积的冲力来解释加速下落，这与布里丹的解释几乎没有什么不同。