

弗雷德里克·舒勒：从电磁学推导出引力的物理学家

作为一名理论物理学家，我感到非常震惊。我们现在相信，至少已经解决了三个最突出问题中的两个。弗雷德里克·舒勒教授完成了一件本应不可能的事情。他仅从麦克斯韦的电磁学理论就推导出了爱因斯坦的广义相对论。不是假设，不是假定，而是推导。你从任意背景上的电磁场出发，要求理论具有可预测性，结果不仅得出了几何必须是洛伦兹几何，而且动力学也必须是爱因斯坦的。然而，舒勒教授的特立独行的结论不止于此。他从工程学中找到了一种形式体系，可能有助于从一个极不可能的领域阐明测量问题。这次播客对我产生了巨大的影响，这在我这个频道上的数学和物理播客中是很少见的。那些发自内心的感动往往来自于对意义甚至意识的探索。但在今天，弗雷德里克首次揭示了他的教学哲学，以及为什么从命题逻辑开始，一路通过集合论构建到微分几何的教学方式能与数百万人产生共鸣。舒勒教授展示了物理学的本来面目：一个概念上的杰作，每一个部分都像达芬奇的画作一样环环相扣。这次播客不仅会给你一个关于物理学的新视角，还将从根本上改变你对物理学的思考方式。

欢迎，教授。

弗雷德里克·舒勒：非常感谢你，科特。我们为此准备了很长时间，对吧？

科特·杰蒙格尔：是的，好几个月了。是的，是的。那么，告诉我，你最近在忙什么？研究方面，你脑子里在想些什么？

弗雷德里克·舒勒：研究方面，我最近在思考量子力学的基础问题，我以前从不想碰这个，因为这是一个非常非常棘手的话题。当然，有一些显而易见的问题困扰着我，尤其是测量问题，但它们是从一个新的角度困扰着我。这个新角度来自于工程学，我最近在特温特大学和很多工程师一起工作。他们有一个非常强大的机器人实验室，有很多研究小组。我在2020年学到了一些东西。我受邀参加在巴黎举行的一个小型会议，其实后来发现也不算小。我见到了他们的工程师，他们谈论一种叫做“端口哈密顿动力学方法”的东西。这本质上是哈密顿理论的扩展。它不仅仅是提供一个形式体系来讨论一个没有能量流入或流出的封闭系统。你讨论的是开放系统，能量可以流出，但你不用说明它是如何流出的。有一个开放的端口让它有可能流出。如果你有两个这样的系统，你可以通过一种叫做“狄拉克结构”的东西将它们连接起来。这之前已经被研究过了。这是对一个由哈密顿量、经典力学、经典场论支配的物理系统的不同分解方式，与我们通常的方式不同。

我们通常会把它描述成一个大的系统，我们会大量讨论能量从系统的一部分流向另一部分，特别是当你考虑动能和势能的时候。即使在入门讲座中，我们也会谈论能量从动能流向势能，来回流动，以至于总能量是守恒的。我们对此讲得头头是道，对吧？但最终，这只是说说而已。它并没有反映在我们描述理论的形式体系中。这有什么用呢？这只是一种重写，对吧？但是工程师们需要控制能量流。例如，如果你有与人类互动的机器人，机器人有关节等等。当机器人互动时，当然会有能量从人类身上传递过来等等。你如何捕捉这一点？机器人对此如何反应？如果你想研究这个，而且你需要研究这个，因为那个机器人否则可能会因为不希望的能量流而把你斩首。

科特·杰蒙格尔：这还挺重要的。

弗雷德里克·舒勒：如果你想活下来，这还挺重要的，但谁知道我们是否真的想活下来呢。不开玩笑，工程师们明白这个需求。还有像法国电力网络这样的大型网络。如果某些发电厂突然关闭，出现其他问题，会发生什么？他们需要正确地让能量在系统中路由。如今，这是通过对所有这些问题采用端口哈密顿方法来完成的。作为一名理论物理学家，我感到非常震惊，因为我想，哦，是的，这是一个很好的形式体系。每当你在形式体系中反映一些东西，你就可以用它来计算。如果你只是对此有一个好主意，你说，“是的，是的，我们都知道那个，”和“当然，当然。”但如果它没有反映在形式体系中，你就不能真正地将数学应用于它。所以，根据你想做什么，像这样重新表述理论是很重要的，或者可能是重要的。

好吧，长话短说，在经典领域，这已经由我认为是 Arjan van der Schaft 和 Bernhard Maschke 开创，并由许多其他人发展了几十年。现在在德国，有一个关于这个的大型研究中心。所以这个端口哈密顿的观点是一个非常有趣的观点。它不会解决所有问题。也许它什么也解决不了，但它给了你一个新的视角。好吧，就是这样。我和合作者开始思考这在量子力学中会如何发展或发挥作用。在量子力学中，我们表面上也在谈论能量。我们有一个哈密顿量。我们可以进行能量测量。只要你不测量，哈密顿量仍然是时间演化的生成元，对吧？所以对于么正演化。那么我们能谈论量子系统中的这些能量流吗？答案是，如果你仔细观察，不，这似乎没什么意义。但是在那里流动的是别的东西。是概率在量子系统的子系统之间流动。这就是下一个棘手的问题。你如何在量子力学中处理子系统等等？我们现在相信，我们至少已经解决了三个最突出问题中的两个。

这是如何运作的？那里到底在流动什么？你如何正式地把它付诸实践？还有，你如何处理复合系统？因为量子系统著名地通过张量积来复合。所以一个复合系统的希尔伯特空间是我们认为是构成系统的希尔伯特空间的张量积。但是当然，张量积包含许多永远无法用一个子系统和另一个子系统的状态来理解的状态。那些当然是纠缠态。所以任何关于分解成系统和概率流的想法，所有这些都必须协同工作。我们现在认为我们取得了很好的进展。还有一件事我们还没做，当然也是最困难的事情，我们想把量子力学中的测量公理表述出来。正如你假设的那样，它们至少可以说是有点神秘的。但最重要的是，它们包含了很多空谈。你说你进行一次测量。为此，你有一个厄米算符。让我们谈谈有限维，否则是自伴算符。好吧，让我们考虑有限维。量子信息技术证明了我们这样做是合理的，对吧？你有一个厄米算符，然后你找到本征值。当然，你可以从谱分解中计算出，如果你现在测量，某个测量结果出现的概率。

但是你说的“会发生”和“如果你现在测量”是什么意思？这一切又意味着什么？这只是空谈。我们知道，这种空谈的效果惊人地好，对吧？量子力学，在某种意义上，它的效果惊人地好，但是很多这种空谈，特别是围绕测量的空谈，根本没有反映在形式体系中。当然，很多人都研究过这个问题。很多非常聪明的人都研究过这个问题，试图解释测量，退相干可能起作用的想法。我猜它确实起作用，但这是测量问题的全部答案吗？不，不是。你知道，所有这些事情。但是，我们正在尝试做的事情非常谦虚，但也许因此它能成功。我们试图给出一个扩展的形式体系，不偏离量子力学，但尽可能地在形式体系中捕捉到大部分的空谈。而这种端口的想法，但现在不是能量端口，而是概率端口，起了很大的作用。所以这是一个很自然的想法。每个人都可以有。我们花了很长时间才真正把它付诸实践，因为有很多小事情你可能会绊倒。现在我认为我们取得了一些很好的进展。好吧，一旦我们确信，我们到了一个值得把它公之于众的地步，以便其他人如果愿意也可以开始思考它，你就会听到它的消息。就是这样。所以，但这就是我从量子力学的角度思考的问题。这是一个非常棘手的问题，因为，你知道，我的意思是，谈论测量问题也很容易，因为，是的，是的

，已经谈论了很多。这在某种程度上是一个相当戏剧性的问题，对吧？罗杰·彭罗斯当然也谈论它。这可以说不是什么秘密。我们试图对此采取一种谦虚的新方法。但是，它的成名之处，好吧，不是成名，但你明白我的意思，对吧？我认为它可能有用的原因是，它有目的地使用了一种新技术和一个新的形式体系。所以这就是我在这方面思考的问题。

科特·杰蒙格尔：好的，所以你之前说本科生，好吧，你没有用“本科生”这个词，但是本科生被教导动能和势能，以及只要能量守恒，它们之间就可以流动。但后来你说那都是空谈。你说的“都是空谈”并且没有反映在形式体系中是什么意思？还有端口，因为人们一直在听这个词。端口的拼写是 P-O-R-T，指的是边界端口。

弗雷德里克·舒勒：是的，有边界端口，还有其他端口。如果我们把它写下来，就很容易解释了。我们现在做不到。有一些简单的例子。好吧，关键是，没有反映出来的是.....你有一个守恒的总能量，当然你可以定义一个势能和一个动能，你说它在它们之间流动，因为它们是和是守恒的。对吧？所以，是的，我的意思不是说这是错误的说法。我说的“只是说说”的意思是，你是否把这种见解融入了你所使用的形式体系中？不，你只是说你在观察两个可观测量，动能和势能。是的，好的。随着你的系统经典地演化，它们的值会改变。在某种意义上，你可以经典地监测它。但正如我所说，我们并没有以任何方式利用这一点。我们没有。然后问题是，动能真的构成了一个概念上的子系统，有什么东西从那里流向别处吗？你知道，这一切听起来不错。我想在一些你谈论的视频中也有，数学.....人们混淆了物理上发生的事情和数学等等。就是这种类型。我想真的，我现在可以试着用语言解释什么是端口，听起来会很花哨，有对偶变量，它们相互作用得到可测量的量，但实际上把它写下来要好得多。也许我可以在播客之后写一个小文件。

科特·杰蒙格尔：那太好了。我想人们会喜欢的。

注意：我会把这次播客的笔记放在我的 Substack 上，你可以通过搜索我的名字和 Substack 这个词找到它，或者访问 CurtJaimungal.com。
C-U-R-T-J-A-I-M-U-N-G-A-L.com。我知道这很拗口。

弗雷德里克·舒勒：是的，是的，是的。但这并不是我的想法。这在很久以前就已经做过了。只是，我认为它值得，让我这样说，它也值得理论物理学家的关注，以便应用。也许在基础物理学中。我们至少应该思考一下这是否能帮助我们做我们正在做的事情。所以这是.....

科特·杰蒙格尔：是的，是的。这里我有几个问题。所以你说了这句话，“这是一个谦虚的提议，因此，它可能会成功。”现在这很有趣。不是“这是一个谦虚的提议，而且它可能会成功。”而是“这是一个谦虚的提议，因此，它可能会成功。”我对措辞很挑剔，我注意到了这一点。

弗雷德里克·舒勒：是的，是的，是的。

科特·杰蒙格尔：请告诉我你那句话是什么意思？为什么谦虚与成功联系在一起？

弗雷德里克·舒勒：好的，至少对我来说，我总是认为如果我对像测量问题或其他什么事情有一个想法，一个想法，你知道，在我们这个领域，想法很廉价。我们可以有很多很多想法，对吧？然后我们可以找到第五个和第六个想法。如果我们把这10个想法放在一起.....我相信尝试把一个想法付诸成功是可行的，因为你有这一个想法，然后这个想法，如果它有什么好处，如果你尝试实现它，它会引导你获得更多的见解。然后问题会告诉你你的下一个想法必须是什么，诸如此类。好吧。

看，这是一个非常哲学的话题，对吧？我当然不声称这对这是真理。但是如果你问，我不知道，你可以把，比如说，从麦克斯韦理论开始到广义相对论的整个发展看作是爱因斯坦盯着麦克斯韦方程。他盯得越久，想得越多，他意识到光速在其中存在是有问题的。我的意思是，常数， C 常数，它是什么， ϵ 乘以 μ 在里面。这怎么可能在那个方程里呢？因为如果你去一个移动的系统，难道不应该是 $C+V$ 吗，其中 V 是移动的系统，对吧？

所以爱因斯坦研究了麦克斯韦的理论。在某种意义上，你可以看到爱因斯坦非常认真地对待麦克斯韦的理论。好的？并且非常认真地对待麦克斯韦的理论，这个理论，他被促使去改变空间和时间的概念，甚至改变像空间和时间这样东西的独立存在。只有时空。所以这是一个非常简单的想法。说有一个理论告诉你电磁信号如何传播——现在海因里希·赫兹，我想是1888年，他证明了实际上你可以通过电磁波传输信号。你可以发送信号。是的。诸如此类。我想麦克斯韦大概是1850年，1860年左右，提出了他的方程组。在88年，这被证明了。所以预测的电磁波，它们确实存在，而且它有效等等。所以在某种意义上说，好吧，那行得通，然后我们有了收音机，收音机……所以说，让我们非常非常认真地对待麦克斯韦理论，这是一个谦虚的想法。然后它导致了狭义相对论，然后为了包含引力，无论你想采取什么方式，比如说爱因斯坦的方式，它导致了时空的曲率。如果你愿意，那个理论中的一个预测，那个观点中的一个预测，就是大爆炸的预测，对吧？所以在某种意义上，这是一个非常谦虚的想法被贯彻到底。你通过这个想法看透了，你说麦克斯韦理论是正确的。对吧？所以我认为看透一个想法可以打开大门。是的，这就是我说的“这是一个谦虚的想法”的意思。人们可以做出很多构造、想法和直觉等等。我总是认为我们需要依靠大自然给我们一个提示。

科特·杰蒙格尔：嗯哼。

弗雷德里克·舒勒：因为理论空间是无限维的。如果你用手指在某个地方点一下，你说，“哦，度规可能是不对称的。”爱因斯坦就这么做了，对吧？我的意思是，爱因斯坦在他晚年，他狂热地寻找将麦克斯韦理论纳入广义相对论的几何框架的方法。当然，我们有卡鲁扎-克莱因理论，所有这些东西，都很好，但最终它行不通。到目前为止，我们是这么认为的。爱因斯坦没有找到它。所以，一旦爱因斯坦，让我们也把爱因斯坦作为一个反例，在某种意义上，一旦他开始以这种形式化的方式思考，并有了一个想法，我们可以把这个包含在这里，那就不那么奏效了。我认为因为他没有像以前研究麦克斯韦理论时那样有大自然站在他这边。

科特·杰蒙格尔：是的。我不知道我是否说清楚了。显然，这不是一个可以作为严格规则遵循的智慧。这有点像我的指导……

弗雷德里克·舒勒：这是一个做研究的迷人原则，不管好坏。

科特·杰蒙格尔：对。好吧，我的优势是我已经看过你的工作了，所以我知道你在预示建构引力。

弗雷德里克·舒勒：也是，是的。

科特·杰蒙格尔：我会在屏幕上放一个链接。作为预告，我们将讨论那个，关于你如何从物质动力学推导出引力，而不是把引力和物质看作是独立的假设。我们会讨论那个。

弗雷德里克·舒勒：好吧，对，是的，是的。所以我可以告诉你这整个事情的来龙去脉。所以，与我

刚才说的过去完全相反，我也因为这个原因和那个原因研究过修正引力理论。当然，这些都是凭空想出来的理由。有很多修正引力的想法。我们怎么知道哪一个是正确的呢？在某个时候，我为自己得出了一个结论，当然，这并不贬低任何其他人在任何其他方向上的尝试。仅仅试图认为你想出一些半半拉拉的东西，然后写下一个新的拉格朗日量，这有点没希望。那很容易。你可以做到。每个人都可以写下一个拉格朗日量，一个理论的修正拉格朗日量。

我想，如果我们不只看引力本身，什么能给我们一个修正引力的提示呢？好吧，我们对物质做了很多观察，对吧？我们对物质做了非常精确的观察。问题是，你是否真的必须同时假设引力的动力学和物质的动力学？在某个时候，我们偶然发现了这个，我们认为不，这是一个疯狂的想法，但也许如果你给定一个.....你能不能在一个假定的背景上确定一个物质拉格朗日量，我指的是背景的几何结构，而不是具体的，比如说，你可以说在一个洛伦兹背景上，或者在一个允许双折射之类的背景上。你能不能从物质作用量中确定这个背景必须如何获得它的动力学才能与这个物质作用量兼容？我们看到的唯一联系是物质作用量和引力作用量，它们必须一起演化。比如说，如果你用数学的语言说，从相同的柯西面，它们必须获取初始数据，这些数据必须被演化到再次一个共享的柯西面或一整族共享的柯西面。如果你想要一个可预测的经典理论，这似乎是一个最低要求。

科特·杰蒙格尔：可预测性是关键。

弗雷德里克·舒勒：并且可量子化，不是对引力，而是对物质。是的，可量子化。这是作为一个技术性的.....但让我们暂时把可量子化放在一边。它是为了证明一个显然是经典条件的、技术性的条件是合理的。这就是为什么我们.....为了清晰起见，让我们把它放在一边。所以，现在你可能会认为这是一个非常弱的联系，它们必须有相同的柯西面，可以这么说。你给我的背景上的物质动力学，以及背景可以获得什么动力学来与物质动力学一起演化。结果发现这是一个非常强的联系，实际上。事实上，你可以写下你需要解决的方程，以便得到一个结果.....所以，作为这些方程的解，你得到了你必须赋予那个几何结构的引力作用量。是的。那是在物质理论的背景中。

科特·杰蒙格尔：好的。抱歉，稍等一下。我只是想确保我理解了。所以，让我们把这个具体化。你如何从麦克斯韦方程组得到爱因斯坦和希尔伯特的作用量？详细说明一下。

广告时间：你知道在物理学中，我们喜欢把复杂的東西简化成更优雅、更高效、更简单的东西吗？事实证明，你可以用晚餐来做到这一点。HelloFresh 会把你需要的确切食材寄给你。它们是预先测量好的。它们是预先分份的。所以，你就不必每天晚上在厨房里上演香菜太多和为什么没有香菜的叠加态坍塌了。他们每周真的有40种不同的食谱。素食、低卡路里食谱、高蛋白食谱，这是我的最爱。无论你的饮食函数是什么样的。而且它们都大约需要15分钟到半个小时。这比我弄清楚时间是否是基本的时间还要短。我一直在用它。这是我生活中唯一一个总能得到可重复结果的实验。它很美味。它很简单。它节省了我凌晨2点编辑剧集时靠喝黑咖啡度日的時間。不过，我个人最喜欢的部分是，这是我可以和我妻子一起做的活动。因此，它不仅是晚餐，也是一种联系.....一种相应的企业。所以，如果你想让晚餐成为你一天中最可预测的部分，请访问 [HelloFresh.com/TheoriesOfEverything10FM](https://www.hellofresh.com/theoriesofeverything10fm)，即可获得10份免费餐食外加终身免费物品。每个盒子一个，需有效订阅。免费餐食适用于第一个盒子的折扣。仅限新订阅者，因计划而异。再说一遍，那是 [HelloFresh.com/TheoriesOfEverything10FM](https://www.hellofresh.com/theoriesofeverything10fm)。全部一个词。HelloFresh。最好的烹饪

方式变得更好了。

科特·杰蒙格尔：你如何从麦克斯韦方程组得到爱因斯坦和希尔伯特的作用量？详细说明一下。

弗雷德里克·舒勒：好的。所以，问一下这个更大的方案在特殊情况下是如何运作的，如果你愿意的话，比如说，从物质开始，也就是麦克斯韦电动力学，对吧？

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：在某个度规背景上。我们甚至不说洛伦兹度规，任何度规，任何号差。好吧，你要做的第一件事是……所以，你会找出对于什么样的背景号差，如果你从这样的一个度规开始，你会有一个定义明确的麦克斯韦理论的柯西问题。然后马上就会发现只有对于洛伦兹号差才行。对吧？所以，但接下来的问题是，啊哈，所以一个洛伦兹度规是这个理论的背景，从我们看到的现象学来看也很清楚。啊哈，但是那个背景度规的动力学现在是什么？这是个问题。当然，教科书的答案是爱因斯坦方程。为什么？因为爱因斯坦告诉我们是这样，而且有很好的理由，而且它行得通。但实际上，你可以推导出，如果你解这些我们称之为构造方程的方程，你只用从物质作用量中提取的信息来建立它们。你建立这些构造方程，你解它们，它们的解就给你了作用量，那就是带有宇宙学常数的爱因斯坦作用量，当然引力常数是未定的。所以你可以说，啊哈，好吧，我们没学到什么新东西。不，我们没有。但我们新学到的是，如果你只说麦克斯韦理论，并且你希望背景和它一起演化，那它必须是爱因斯坦理论。它必须是爱因斯坦-希尔伯特作用量。

科特·杰蒙格尔：那么，对于其他场，其他标准模型场，不仅仅是麦克斯韦场，这也是真的吗？

弗雷德里克·舒勒：是的。我们也研究了其他标准模型场。当然，如果那也没有产生爱因斯坦理论，那要么是我们的构造出了严重问题，要么是我们所做的物理学出了问题。不，确实，一切都行得通。即使你采用非阿贝尔规范理论。我实际上有一个非常优秀的硕士生，亚历山大·维尔茨，他研究了那个，我们搞清楚了，不，没有出现什么新东西。我们也尝试用同样的方法来打破……因为你看，如果你说有物质作用量，比如说你保持背景不变，像一个 $\eta_{\mu\nu}$ 和一个闵可夫斯基度规，对吧？平坦空间。那么你可以把这些 $\eta_{\mu\nu}$ 算作一个常数。但引力的想法是让它变得动态。然后我们所做的是，我们说，好吧，但是在物质作用量中还有其他参数。也许对于它们，我们也可以预测动力学。那当然会很有趣，对吧？如果是一些中微子质量之类的东西。但是不行。这些是我们抱有很大希望的事情。所以，在实际的东西起作用之前，我们想做的是从一个新的物质理论来预测引力或者推导引力理论。好的。

所以，看，事情会是这样的。让我给你讲一个幻想故事。好吗？

科特·杰蒙格尔：好的。

弗雷德里克·舒勒：幻想故事是，明天我们看向宇宙，我们在某个地方，直接或间接地，看到一道光线分裂。对吧？就像在双折射介质中一样。好吧，再说一遍，直接或间接地，我们可能会看到一道光线分裂。对吧？就像在氢光谱和类似的东西中一样。但为了简单起见，我们说光线在空间中分裂，就像它在空间中弯曲一样，你知道。

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：在爱因斯坦之前，如果有人说光线会绕过某个东西弯曲而那里没有透镜，他会说不，在材料中这是可能的。这叫做眼镜，对吧？但是没有任何材料，它怎么会发生呢？好吧，再说一遍，这是一个幻想故事。假设光线会在真空中分裂。所以一个光子来了，一个光子在移动，然后，比方说经典光线，一道光线，一道激光，类似这样的东西。我的意思是，反正都是幻想。但是如果那被直接或间接地看到了，广义相对论，而且你可以确保那是真空之类的东西，对吧？广义相对论就完蛋了。因为一个洛伦兹度规不支持光线分裂成不同的偏振。对吧？所以，通过一次观测，你就可以宣告广义相对论的死亡。

科特·杰蒙格尔：当然。我的意思是，在通常的警告条件下，是否还有我们没有考虑到的其他效应？

弗雷德里克·舒勒：是的。你知道，你是在和一个理论家说话，对吧？所以，我可以做梦。所以，比方说像这样的事情。但是如果发生了那么戏剧性的事情，或者另一种情况。所以，很多年前，当我在马克斯·普朗克引力物理研究所发展这个理论时，在格兰萨索实验室有一个小组。他们进行实验。所以，那是一个著名的小组。它显然是一个著名的小组。他们测量到了超光速的中微子。那被宣布了。那很令人兴奋。那是一个严肃的小组。我想最终，是有人忘了拔掉什么东西或者插上什么东西。那是原因。所以，有.....最终，事情澄清了。但是，我的意思是，如果那是真的，实际上那天，赫尔曼·尼古拉，当时马克斯·普朗克研究所的主任，他走进我的办公室说，你能用你正在研究的理论做到这个吗？我，好吧，当然，他是我的主任，所以我说，当然可以做到。我们可以做到。我们可以做到。但是我们需要的的是一个粒子现象学家，对吧？就像，我的意思是，所有的物理学都是现象学。一个粒子现象学家，来为它写下一个真正好的模型。而那个好的模型不能建立在，如果它真的是在真空中等等，不能建立在一个洛伦兹度规上。它需要一个更精细的结构。例如，你可以取一个四阶张量作为几何背景，具有像黎曼张量那样的对称性，你知道，反对称对等等。这只是模型。

关键是，我们为一些尚未发生的事情做好了准备，对吧？如果有人看到物质，由于它们的行为，不能有一个洛伦兹背景，但你那时，现象学家会很快弄清楚可能能做到那一点的最简单的背景是什么，那么问题就来了，但是那个背景的作用量是什么？它不可能是爱因斯坦的，对吧？爱因斯坦的是针对洛伦兹度规或者一般的度规。但是那时你会尝试解我们的方程，它们很难解。在麦克斯韦情况下的爱因斯坦方程，我们可以解它们，我们得到爱因斯坦理论。它们很难解。但是结果会是那个背景中几何的作用量，那个背景可以支持那个新的、奇异的但又是新的、必需的物质。所以，在某种意义上，我们把物理问题，即什么引力理论可以支持这样的物质，转化成了一个数学问题？解这些方程，这些方程的系数是以各种方式从物质作用量的性质构造出来的。这就是想法。这就是想法。还有很多技术问题。总之，那是我们的想法。我们如何才能真正对修正引力说些什么，同时认真对待我们对物质所做的其他一些物理观察。这在第一种情况下是可能的，这是相当了不起的。是的。我的意思是，所有这些都建立在库恰尔和泰特尔鲍姆以及 ADM 的早期工作之上。我的意思是，有很多前辈，但我们在某种意义上，把它推到了那里，因为，在某种意义上，我猜以前人们没有动力去看这个，但是是的。这是个问题。

科特·杰蒙格尔：所以，我能理解你如何得到号差。你刚才用麦克斯韦理论谈到了它。构成洛伦兹度规的不仅仅是它是一个零二张量，它还有一个特定的号差，然后它是非退化的，等等。但是你如何得到它与联络兼容的条件？那是主多项式的一个条件吗？

弗雷德里克·舒勒：是的。所以，这也是另外一回事。它非常优雅。实际上，薛定谔做到了，对吧？

薛定谔有一个修正引力的想法。再说一遍，薛定谔有一个修正引力的想法。他说，“不，不，不，不。爱因斯坦做这些非对称度规。但实际上，一个比度规更深层的结构概念是联络。”有些联络来自于度规，还有更一般的联络，对吧？所以，那是薛定谔的想法。实际上，薛定谔写了一本很棒的书，《时空结构》。一本非常漂亮的、薄薄的关于广义相对论的入门书。但在那里他遵循了这条路线，而且它在技术上和概念上都很棒。然后他赋予这个联络比度规更深的意义，你可以这么说。他试图为联络而不是为度规建立一个理论，作为基本结构。我想他甚至在《纽约时报》或类似的地方宣布了这一点。爱因斯坦很生气。我不知道这在历史上是否正确。这是传闻。总之，它没有成功，对吧？我的意思是，我们会知道的。你可以说，好吧，所有关于帕拉蒂尼作用量的想法，所有这些东西，都来自那里并与此相关。但它不是新的物理学。所以，如果你脱离度规，通过联络来推广相对论的想法是薛定谔的一个旧想法。但这不是这里的想法。这里的想法是，我们为什么首先要谈论时空度规？好吧，因为麦克斯韦。记住，比如说在闵可夫斯基度规中的正号和负号，是正号和负号。本科生必须在写得不好的3+1分解的麦克斯韦方程组中学习，对吧？但是如果我们有具有不同因果关系的物质，那么规则的锥体就会是像这样折叠得更多一点的锥体，等等。

科特·杰蒙格尔：我会在此时在屏幕上放置一张图片。

弗雷德里克·舒勒：好的，好的，好的，好的，好的。是的，是的，是的。再说一遍，这些都是理论上的考虑，对吧？抱歉，你之前问了什么？

科特·杰蒙格尔：哦，我是说，好的，所以在主多项式中，我可以想象有很多理论上的考虑。我可以想象你如何得到对称或反对称条件。我可以想象你如何得到号差。我可以想象你如何得到它是非退化的或退化的。但我不明白你如何得到与联络的兼容性作为主多项式的一个条件。

弗雷德里克·舒勒：但是根本没有联络。所以，好吧，我们所谓的度规中的号差，如果从柯西面的角度来看，是说具有洛伦兹号差度规的底层背景的物质理论，这个理论是双曲的，全局双曲的。你有一个柯西面等等。对于一个度规，它转化为具有特定号差1,3的代数条件，一个洛伦兹号差。对于一个非度规结构，比如说一个可以作为麦克斯韦理论背景产生双折射的四阶张量。在那里，物质理论的全局双曲性仍然是我们需要的条件，但它并不直接转化为一个号差条件。还有很多其他的代数类。所以关键是，好吧，这是一个需要解决的整个事情。但正是物质作用量的全局双曲性告诉你如何为物质作用量构造柯西面。并且值得注意的是，这个物质作用量必须是什么样子。归根结底，这是一个执行起来非常简单的想法。它中间有一些技术障碍，但这是一个很可爱的想法。就是这样。我的意思是，我们没有声称它在自然界中实现了。但在某种意义上，如果明天真的有人发现了像我说的那样的事情，一些会是.....

科特·杰蒙格尔：超光速中微子。

弗雷德里克·舒勒：是的，超光速中微子可能是一种可能性，或者真空中的双折射。整个物理学理论或者爱因斯坦物理学就完蛋了。

科特·杰蒙格尔：如果我们看到超光速粒子，我们不知道明天该怎么办。

弗雷德里克·舒勒：完全正确，完全正确。我的意思是，广义相对论不可能是对的，对吧？我的意思是，它建立在洛伦兹度规之上，这根本不可能。但如果那时，再说一遍，我不是说我能立刻说出引力理论是什么样子。但如果某个现象学家为这种物质建立了一个真正好的模型，现在，比如说，标

准模型级别的模型，对吧？所以我们纳入了标准模型，让我们幻想一下。然后我们有一个带有超光速中微子的标准模型。比如说，好吧，比如说。然后我会说现在是时候投入时间和金钱来建立我们的构造方程了。好吧，那可以在一个周末完成，可以这么说。但然后去解它们。在那里你可能真的，我的意思是，你知道，这是非常复杂的方程。但如果你解了它们，你就会得到能够支持新的完整物质模型的引力作用量。所以，我们是这么认为的。我们认为我们证明了这一点。

科特·杰蒙格尔：好的，我想谈谈你的思想。几个月前我们私下交谈时，我们谈到物理学中有玩具模型，你在想，好吧，是什么驱使一个理论家朝这个方向走？这是你会问他们的问题。如果你变得太抽象，你只想说，好吧，是什么驱使你？你能谈谈那个吗？以及它如何指导你自己的研究，也许是你的教学，也许是你的哲学？

弗雷德里克·舒勒：是的，是的。你看，在研究中，我们总是小心翼翼地走在已知和未知的边界线上，对吧？如果我们坚定地停留在已知领域，我们就不是在进行研究。我们说，那就是理论。我们就是这么看的。没什么可改变的。是的，有问题，但谁知道那是什么，好吧？我在这里简化一下。但特别是作为一个理论家，我们小心翼翼地走在这条线上，我们总是有一只脚在确定性中，不确定性中，一只脚在未知中。所以如果你想做研究，我们需要在一个东西里引入一个新的想法。否则，至少作为一个理论家，你在做什么？里面需要有一个新的元素。正如我之前提到的，我相信如果你说，“哦，我对于事情如何可能不同同时有五个新想法，”我认为这是无法处理的。至少我会为自己这么说。所以让我们说一个想法。你知道，如果你有两个绝妙的想法并且它奏效了，我祝贺你。我只是，你知道，这是一个指标，对吧？

所以小心翼翼，小心翼翼地走在这条线上。但现在你有一个新想法，你还有旧的。首先，它们兼容吗？好吧，如果它们不真的兼容，你就有个问题要解决，因为你必须把这个新想法融入进去，而不能.....因此你通常也必须改变旧的理论，对吧？

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：如果新想法不完全兼容。好的。通常，这会导致旧理论中的矛盾，或者在三行内(我夸张了)对修正理论的预测，你会说，“是的，但自然不是那样的。”好吧，那会发生什么？好吧，你扔掉你的.....所以，你的新想法，对吧？

科特·杰蒙格尔：希望如此。

弗雷德里克·舒勒：希望如此。是的，你应该。你应该。哦，有时候人们不这么做，对吧？有时候人们一直说，“哦，但是这个想法是对的。只是还没被证明而已。”而且这可能是真的，你看。但是如果你有一个新想法，如果你开始根据这个想法或者融入这个想法或者融入这个技术来融入或者修改旧理论或者旧理论的某些方面，你会得到一些稍微新的东西，它不会马上就明显是错的。然后问题是，你接下来做什么？答案是，好吧，我希望至少通常是，你在那里做什么，如果你一直看着它，一直用它工作，你会被迫，你会被迫也许去做下一步。例如，你可能有一个新想法，让我们做这个和那个。然后它告诉你，哦，但是除非你选择这个对象是这个和那个类别的，而不是另一个类别的，一个它可能有的类别，否则就会有一个直接的矛盾。好吧，你已经学到了你需要这个另一个类别的对象等等，另一个代数类别或者别的什么。

科特·杰蒙格尔：是的。你能更具体一点吗？你能给一个具体的例子吗？也许你是在小心翼翼，想

保持外交和不冒犯人？

弗雷德里克·舒勒：不，不，不。不，不是真的。你看，这就是这个问题的所在。我所说的都是一些模糊的想法，关于如何不跑偏到一个毫无结果的理论方向。对吧？这很容易，你看。我认为很多物理学也许一直都是，也许现在也是，包括我过去的一些工作，就是有一个想法，然后往这里走，往那里走，然后试图在这里和这里实现它。这有点像我们需要，什么在指导我们？我们使用的指导原则是什么，对吧？是的，更具体一点。是的，比方说我一开始说的那些端口哈密顿理论，你重新表述经典理论，使得能量流，基本变量直接与子系统之间的能量流相关。这是哈密顿力学的重新表述。我说，让我们把它应用到量子力学中。好吗？

科特·杰蒙格尔：好的。

弗雷德里克·舒勒：但后来我们玩了几个月量子力学中的能量流。最后，我们放弃了这个想法。嗯，基本上，因为在量子力学中，你没有一个连续的能量变量来描述系统。你有一个哈密顿量。但是你看，如果你有一个哈密顿量，比方说你取两个态，它们是那个哈密顿量的两个不同的本征态，对吧？两个不同的能量本征态。然后你取一个叠加。嗯，那么你就有了一个新的态，对吧？两个态的叠加是一个新的态。但是对于这个哈密顿量，在测量时，你会得到一个值或另一个值，对吧？你会得到一个本征值或另一个本征值。你不会得到本征值的平均值，对吧？所以这个态本身，两个不同能量本征态的叠加态，我不知道我们该怎么说它有这个和那个能量。它没有。所以这意味着希尔伯特空间中的大多数态，几乎所有态，比方说一个有限维的，一个有限维希尔伯特空间中的几乎所有态，对于一个给定的哈密顿算符，都没有能量，对吧？

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：这是事实。所以，然后这个构造端口的整个想法，由于现在不清楚的原因，失败了，因为你需要一个连续的，显然是随时间演化的，甚至是随时间微分演化的量，不管它应该是什么，你需要它来创建这些部分。但是能量不是正确的东西。虽然能量在量子理论中也扮演着时间演化生成元的角色，就像在经典理论中，能量是时间演化的生成元一样。但在量子理论中，它不是引入这些部分的正确量，对吧？所以我说，你需要，你不能只是强推一个想法。我想要能量流。我想研究能量流。你需要对理论在你试图那样修改它时反馈给你的东西做出反应。这就是大概的想法。

看，我想我们谈论我如何认为一个人可以，可以，应该约束自己以取得良好进展而不会失控地跑偏，谈得有点太多了。但这是非常私人的。你看，如果我认为我说的这些有深刻的哲学价值，我早就把它写下来发表了。好的。但这是我经常和我的，和我的研究生讨论的事情。我告诉他们，嗯，想法很廉价，很容易有，如果它们似乎行不通，就扔掉它们。或者把它们放在一边，对吧？然后试着有一些标准来推动想法前进。我想就是这样。每个研究人员都应该有自己的一套规则，因为否则我们都在做同样的事情。那不好。对吧？所以是的，多样性是好的。对吧？

科特·杰蒙格尔：是的，是的，是的。所以，所以，所以，所以，所以如果我，我想限定我所说的，这不是出于不冒犯任何人，而是，我认为这是事实，对吧？这些是关于如何定位自己研究的基本想法，但那是非常私人的。

弗雷德里克·舒勒：是的。好的。所以这些是你的。你不是在提倡如果人们不遵循它，那么他们就

做错了什么。

弗雷德里克·舒勒：哦，不，不。看，我的意思是，那会，你怎么说，我的意思是，看看20世纪的物理学史，对吧？我的意思是，那里的革命以及人们之前对它的预测，说，因为它现在不在我的雷达上，或者我无法想象这是一个好方法，说没有人应该这样做，那将是完全荒谬的。当然不是。不过我告诉我的学生。我的，我，我，我把这个强加给我的学生，我的理由是，嗯，他们不必听我的。

科特·杰蒙格尔：对。

弗雷德里克·舒勒：他们可以把它当作可以考虑的一个因素，希望他们能添加一些别的东西，或者他们拒绝它，或者他们接受它。他们也从其他同事那里学习，从其他来源学习。所以我认为我们应该公开谈论这些事情。这些是微妙的事情，你知道吗？可能一个不做研究的人根本不知道我在这里谈论什么。是的。但是，这些是想法，我们应该把它们强加给我们的研究生，但不是强迫他们接受，而只是作为，作为，因为否则我们无法教他们。你可以通过告诉人们你对某件事的自己的想法来教他们，他们对这些想法的依恋程度较低。他们可能会稍微改变它们，并取得更大的成功，例如。

科特·杰蒙格尔：是的。所以说到教你的工作。作为一名中产阶级教师，你赢得了好几个奖项，一些最负盛名的奖项。

弗雷德里克·舒勒：是的，不，我很幸运，因为我，这有点像历史。我告诉你其中一个奖项的历史。我很幸运被德国物理学会邀请，他们有一个青年组织。实际上，德国物理学会是世界上最大的物理学会。这有点好笑，但他们有很多很多成员，他们有一个青年组织。他们在2015年邀请我做关于广义相对论的大型系列讲座。所以我做了。我们在奥地利做了这个，他们给了我们一个很棒的地方来做。由此产生了YouTube上的那些关于引力和光的讲座，我们把它们放在YouTube上，我们没想太多，它们相当受欢迎。然后还有在埃尔朗根大学上的其他讲座，关于基础物理学的几何解剖学或者我叫它什么来着。

科特·杰蒙格尔：理论物理学的几何解剖。

弗雷德里克·舒勒：是的，是的，是的。是关于微分几何的。是的，是的。这是他们在德国做的那些很棒的事情之一。时不时地，你可以进入.....你可以开设一门你想开设的讲座课程，对吧？你当然要开设需要开设的讲座课程。它们是课程的一部分。但然后还有选修课程，如果你有想法并且想做，你就去做。我只是想从头开始教人们微分几何，就像它后来在理论物理学中被使用的那样。所以它更像是一门应用数学课程，而不是一门理论物理学课程。一旦大学把这个放在YouTube上，或者首先是iTunes上之类的，它就开始流行起来了。而且，是的，那给了我一些国际追随者，也给了我国内追随者。然后在某个时候，我被提名为 Ars Legendi 奖，嗯，这可能是德国顶尖的大学教师教学奖。而且，是的，他们很友好地发现那年我是最佳候选人。他们至少喜欢最好的。是的。是的。是的。是的。是的。

科特·杰蒙格尔：所以你有这个几何解剖学课程？

弗雷德里克·舒勒：是的。是的。

科特·杰蒙格尔：在你提出这个课程之前，它没有课程大纲吗？

弗雷德里克·舒勒：没错。没错。是的。

科特·杰蒙格尔：你还有其他课程的想法吗？

弗雷德里克·舒勒：是的，一直都有，一直都有。但问题是你能不能开设它们，对吧？大学是否给你机会开设这些课程，或者他们说，不，我们已经忙于课程了，对吧？

科特·杰蒙格尔：但是你脑子里在想什么？我很好奇。所以例如，对于那些懂微分几何的人来说，什么极其重要？你的课程真正有趣的地方在于，你在第一节课就从命题逻辑开始。

弗雷德里克·舒勒：对，对。

科特·杰蒙格尔：然后你在第二或第三节课建立了空集。

弗雷德里克·舒勒：是的，是的。

科特·杰蒙格尔：没有一门微分几何课程是从空集开始的，更不用说命题逻辑了。

弗雷德里克·舒勒：是的，是的。

科特·杰蒙格尔：你从头开始。那非常有趣。你异常清晰。异常清晰。我绝对喜欢那个。

弗雷德里克·舒勒：是的，我想我重看了那些。我可能重看那个的次数和我重看《宋飞正传》的次数一样多，也就是很多次。哦哇。

科特·杰蒙格尔：是的，是的。好吧，好吧，我的意思是，看，那是一门课程，因为它是一门课外课程，我有一些数学家，一些物理学家等等。如果你愿意，我可以告诉你原因很简单。如果你想告诉人们什么是流形，你需要告诉他们一个光滑流形。你需要告诉他们什么是拓扑流形。他们需要知道什么是拓扑空间。好吧，拓扑空间是一个非常简单的东西。如果你知道你有一个集合，然后这个集合有一个幂集。你怎么知道这个集合有一个幂集？你怎么知道幂集是一个幂集？啊哈，你需要有一些集合论。现在，如果你做朴素集合论，你会在两行之内遇到各种矛盾。如果你说一个集合是元素的集合。那听起来不错，但那没有任何意义。首先，我没有告诉你什么是集合。其次，我没有告诉你什么是元素。所以把一个集合定义为元素的集合并不是特别有见地。事实上，众所周知，朴素集合论在第二行就是矛盾的。

所以最终，如果我想告诉来自更广泛背景的人们，包括物理学和数学等等，我们到底在谈论什么？我必须也告诉他们集合论的公理。现在这是一个棘手的问题。如果你真的深入研究，这是一个非常复杂的问题。但是如果你想做，你可以做。实际上，如果你想解释什么是集合论，你需要写下公理。如果你想写下公理，你需要一个形式体系来表述这些公理。因为如果我然后用其他华丽的词语来表述它们，我就和以前一样糟糕。所以就有了这个想法，好吧，我们必须做一些量词之类的东西，还有一些，一些，一些命题逻辑。好吧，那实际上可以被推得更深。我在这门课里没有做到一阶逻辑之类的。所以，所以有很多步骤。最终，我的意思是，现在已经知道了，那是希尔伯特的梦想，但现在已经知道了。最终，很难找到一个真正从无到有的基础性开端。即使你说你有一个

字母表和符号等等。

但我想要做的是，至少我想要超越通常的本科生甚至硕士生水平的关于什么是集合的想法。对于这些学生，他们当时在埃尔朗根都是非常优秀的学生。他们也有那个精英研究生项目等等。我的意思是，超级学生，顶尖，顶尖，顶尖的学生。所以我可以把那个传授给他们。这是对某种类型的完整性的一种尝试，从几乎一无所有开始。然后你看到数学中的严谨性当然极其重要。但对我来说，最好的严谨性是概念上的严谨性。现在我的意思是当然你可以用 ϵ 和 δ 写下东西，可以把它做得非常非常非常非常严谨。在那之前，实际上你需要概念上严谨。你需要，如果我说集合，我们只是有一个集合，我对此有一个模糊的想法，然后我在上面建立一个大的大厦，然后在每一个其他交叉点，我必须说，好吧，现在你可以证明无论什么，一个向量空间总有一个基，即使是无限维的。好吧，我们怎么知道那个？好吧，最终这来自于选择公理，对吧？好吧，你为什么有选择公理？因为在某个时候我要求它。你看，所以我想给它一个完整的画面，而不声称这同时是一个基础逻辑，一个基础集合论课程，因为你可能要花一辈子时间如果你想填补所有细节。但至少我想对所有的假设更清楚一点。这是一个普遍的，因为你问到了教学。这在教学中非常重要。

我总是和人们开玩笑，当他们问我时，我说我在教学中的假设，基础假设有两个。A，学生，不管是谁来找你，初学者，硕士，硕士生，他们什么都不知道，什么都不知道。第二，他们是无限聪明的。好的。好的。所以这两个假设都稍微有点错，对吧？学生确实知道一些事情，他们不是无限聪明的。但我呈现我的课程有点像那样。我喜欢从头开始发展事物，因为我不知道他们知道什么，我也不知道他们是以什么方式知道的。所以我喜欢从头开始。

科特·杰蒙格尔：是的。你甚至告诉我，你不会从教科书开始，你会走进一个房间，一个空房间，拿着白纸，然后想，我该如何教这门课？

弗雷德里克·舒勒：对。对。好吧，我的意思是，我认为那是，所以那是另一回事。我认为，好吧，这都不是我的原创想法，一个非常古老的想法，你知道，研究和教学的统一。我认为在大学里，只有那些能带来一些研究级别思考的人才应该真正教授重要的讲座，至少对于那些非常认真对待这门学科的学生来说。让我们这样说。现在，所以如果你，如果一些生物学学生有一门物理课，那可以被出色地教授，而不需要大惊小怪，但是如果你说你想教育下一代理论物理学，也许你希望他们中的一些人可能会做出突破性的发现或什么，好吧，我们最好，我们最好给他们我们最好的，而不仅仅是重复什么，什么，什么在一般的，我们是如何学习它的。对吧。而且，而且所以你怎么做这个，你怎么不只是遵循教科书上写的东西？

我想你在你的一个视频里说了这个，你说，“哦是的，我们常常只是重复我们听到的。”是你说的吗？

科特·杰蒙格尔：是的。你采访的其他人。

弗雷德里克·舒勒：而且，而且，而且，而且你可以认出这个。如果你在别的地方永远不会用这个短语。

科特·杰蒙格尔：完全正确。是什么来着，在平等的立足点上，我想是。

弗雷德里克·舒勒：是的。有很多这样的短语。我有一个它们的目录。

科特·杰蒙格尔：“所有可能的路径”似乎是由于教条的继承而被重复，没有思考。就像“平等的立足点”这个词一样。时间和空间是相对的，并且在平等的立足点上被对待。时间和空间应该在平等的立足点上进入。我们应该在同一个立足点上思考空间和时间。什么是平等的立足点？你见过平等的立足点的数学定义吗？我们应该严谨。

弗雷德里克·舒勒：是的，是的，是的。空间和时间在一个平等的立足点上。哦是的，确实。那到底应该是什么？好的。尽管如此，我们都那么做。但确实，我会说一种让你的研究变得更好的方法是尝试检测你在哪里使用这样的短语来证明某件事是合理的。好吧，它们当然是更好解释的占位符。

科特·杰蒙格尔：有趣。

弗雷德里克·舒勒：有时你有一个更好的解释。每个人都知道更好的解释。然后你把它称为在平等的，在一个平等的立足点上。然后每个人，然而，如果被追问，会给你一个精彩的解释，那么你就可以使用这个短语。是的。但是如果它只是用来掩盖你自己的无知，有意识或无意识地，人们应该消除它。但我们都这样做。所以首先，如果人们问我，我如何教得更好或非常好，我会说类似的话。对。然后说我，我的意思是，广义相对论是我的，我的，我的，我的专业之一。所以如果我教一门广义相对论的课程，我可以以任何数量的方式，用两种或三种不同的方式来教。好的。不是任何数量，用两种或三种不同的方式。然后我，首先，思考对于这个，对于这个群体来说，什么是最好的方式？嗯？例如，我曾经教过，我有一个任务是教物理给材料科学家。他们不是硬核物理学家，但他们需要一些好的量子力学。那是一门量子力学课程。我决定因为他们需要能带，你知道，在固体中等等，我教他们缓变分布理论，对吧？施瓦茨空间，缓变分布等等，一个分布理论，你会说这是一个非常高级的科目。我的意思是，大多数物理学家在他们的本科学习中没有听说过这个，对吧？对。但我决定为了我们想要做的应用，我们只需要这个。我教了他们这个。毕竟不是那么难。他们都做得很好。

对。所以有时候我们不能回避使用非常先进的方法，当然是从底层开始很好地解释，也对那些会说，“哦，通常他们不会用这个理论”的人，但我认为他们应该用。对。所以，而且，而且，然后我通常教科书，很多教科书不提供你想要采取的确切路线。我认为这对讲课风格也有好处。如果我不采用一本特定的教科书，当然是在我非常了解的科目中，是的，我在暑假拿一叠纸，然后我开始勾勒一个好的故事情节，但我的意思是科学上概念上严谨的故事情节，就像今天人们为了让它在一个非常好的期刊上被接受而必须呈现的那样。如果这是一个发现，可以这么说。对。所以，是的。所以，所以我尝试，把研究级别的思考应用到设计或重新设计上。那是更好的词。重新设计，也包括非常成熟的课程。而且很多时候你改变了你教授科目的顺序。你认为是一个高级科目的东西通常是你后来学到的东西。而一个不那么高级的科目或主题是你自己早些时候学到的。但那不是一个特别有意义的对高级和不高级的分类，对吧？

例如，在埃尔朗根，我教了经典力学课程。我决定用半个学期的时间来发展微分几何。然后我做了力学，在最后一节课我可以告诉他们什么是广义相对论。好的。那效果很好。同事们说你疯了，对吧？我的意思是，你的及格率很差。不是真的。我们有出色的及格率或者非常好的及格率，至少是通常的水平。而且这些学生中的一些人做得绝对惊人，因为一旦你做得恰当，你看，你永远不应该因为某件事看起来很花哨而去做它。“哇，我们做了微分几何。”不，如果我想谈论动量，我需要告诉你什么是余向量，对吧？因为动量，正则动量，是余向量。它们不是向量。我怎么告诉你？我是在向量空间里告诉你这个吗？我可以，但那样人们会想到位置向量。但位置不是一个向量。你

无法摆脱这个结构上概念上错误的想法，除非你立刻把它放在流形的背景下。然后当然如果你做拉格朗日力学之类的，无论如何，广义坐标不过是微分几何学家所说的坐标。它们不是广义的。它们是坐标。实际上是笛卡尔坐标，它们是在非常特殊的 circumstances 下存在的非常非常特殊的坐标。然后你不必非得选择它们。对吧？所以你把整个概念基础放对了，而不是给人们错误的想法。因为一旦你以一种最终不正确的方式教了某样东西，最终不能带你走很远，你以后反正要替换它，你就不应该用错误的方式教人。

科特·杰蒙格尔：这就是为什么成为一名研究人员很重要的原因，因为你知道它将被带到哪里。而如果你只是一名普通教师，你就不知道这个领域的前沿。

弗雷德里克·舒勒：我想很多，两者，两者都有，是的，这是因为你需要知道你想去哪里。而且，不，但另一件事是，你看，在研究中，你学到了这个。哦，我能用另一种方式解释这个吗？哦，这是一个新的看法，让我们，让我们用那种方式解释它。而且，但是如果它几乎只是稍微有点错呢？如果你用一种新的方式做某件事，你需要对它应用批评，一些研究人员的批评，来说，这真的是一个有效的推导吗？它真的像你用其他方式得到的那个一样普遍吗，你知道吗？所以，我是一个教学方法的一刀切方法的怀疑论者，关于你如何教得更好，不管你教钢琴还是教广义相对论。我不相信那是真的。我永远不敢向一位钢琴老师推荐我的教学方法，因为我认为，哦，天哪，我的意思是，你是一位音乐会钢琴家。我的意思是，人们学习的那些真正好的钢琴老师，他们是音乐会钢琴家，对吧？他们不只是有一个花哨的教学方法。他们能以一个真正伟大的水平演奏它。然后他们有方法来教他们，这是你无法从一般性的考虑中得出的。

所以在物理学中，教学也是这样。我认为好的教学总是源于对学科的深刻理解，再加上对你已经解释了什么和没有解释了什么的认识。现在有时人们说，“哦，那个人是一位非常杰出的科学家，但他教得不好。”这种情况经常发生。

科特·杰蒙格尔：在多伦多大学，以拥有伟大的研究人员但他们不关心教学而臭名昭著。

弗雷德里克·舒勒：也许如果他们.....好的，好的。那当然是一种可能性。你不关心它或者你讨厌你的学生。不，但我认为一个更仁慈的观点可能是他们想解释它。好吧，让我们假设那些真正伟大的人，他们真正了解他们的学科，并且真的想解释得很好但没有做到。我认为在那些人中，最可能的原因，而且我知道这样的例子，但实际上不多，我认为在那里，是他们没有完全意识到他们已经解释了什么。他们解释了一些东西。哦，我忘了这个。然后，好吧，你忘了。好吧。我把这个放在一边，那发生在我们所有人身上，但然后是下一件事。哦，我做了这个。而且，而且，而且，而且正如我们所知，而且正如你可以证明的，但是你知道，那就一团糟了。那就到处都是了。

科特·杰蒙格尔：留作家庭作业练习。

弗雷德里克·舒勒：有一个家庭作业练习。是的。是的。是的。是的。是的。是的。好吧，那是一个简单的选择退出。现在我说你证明这个，年轻人或年轻女士。是的。不，说真的，我相信这当然是蕴涵错误的方向。我认为你需要非常了解你的学科，非常深入，非常广泛，才能为它设计一个非常好的讲座课程。

科特·杰蒙格尔：这是一个必要条件。

弗雷德里克·舒勒：这是一个必要条件。而且，是的，而且，而且我们都会犯错，对吧？我的意思是

，我认为我从这个学科的教学根除了这些和那些问题，以及它是如何奇怪地和类似这样的事情。但然后我知道吗，对吧？我的意思是，然后必须有其他人来做得更好，但至少我们做得越来越好。如果我认为如果我把我学习一个学科的方式改进5%，而且这是一个真正扎实的，一个扎实的5%的改进。我认为我们，是的，我们可以拍拍自己的肩膀，对吧？然后说，你知道，但那是我们欠学生的。所以这是我们欠学生的，要真正改进它，因为否则他们必须.....所以，你可能有一个比我们更好的起点，虽然我们的，我的起点非常出色。我到处都有出色的老师。

科特·杰蒙格尔：生活中的一些特权，嗯，对我来说，我想对任何人来说，都是自来水、空调，如果你是物理系学生，那就是上你的一门课。

弗雷德里克·舒勒：哦，哇。

科特·杰蒙格尔：紧随水和空调之后。我甚至不是在开玩笑。这绝对是一种享受。我不知道。所以你为什么这么在乎？你为什么这么在乎教学？

弗雷德里克·舒勒：这是一个非常好的问题。你看，我想，然后我想这对，对也许那里的年轻人来说是一个很好的教训。当我上大学学习时，我只是非常想理解物理学，也想做出新的发现，数学也是如此。我同时学习了两者。那是我的目标。如果我现在回想起来，甚至在那之前，当我还是个更年轻的人的时候，我做了很多运动，我实际上在很早的时候就开始做教练了，我自己很活跃，但也教青年团体等等。如果我回顾我的一生，我想从15岁起，我总是在这样或那样的身份下，在体育或其他地方，我一直在教学。我一直在教学。或多或少，我告诉你的就是我今天的教学哲学，也是我当时的教学。我想让他们变得非常好。我想让他们成为非常好的竞赛运动员等等，诸如此类。我有了这个想法，我在所有这些领域都有很好的老师。我把这个传递下去，但不是出于一种反思的道德命令或什么。它，它只是在回想起来，我看到了这个。

当我在大学第一学期时，我在图书馆里开了一些小会，在那里我告诉我的同学一些我们当时正在讨论的事情，以及我之前理解的事情。我在图书馆的黑板上教他们，在大学里。所以，所以我总是这样做，当我在大学和研究机构时，这很自然，我也被邀请。好吧，德国有一个非常复杂的.....所以，我们有一个，我们有一个叫做奖学金基金会的东西。这是一个国家组织。他们挑选任何学科中0.1%的最好的高中生，大学生。在那里他们得到顶尖教授的特殊暑期学校等等。我们对最后一年的高中生也有类似的东西，德国的每所高中都可以派他们最好的一个学生去这些学院之一。他们可以事先选择，他们可以事先选择课程。很多年来，我一直在那里教他们关于广义相对论的课程，给最后一年的高中生。我做了什么？好吧，教他们微分几何，教他们不同的，广义相对论。对吧？哇。

所以我想，所以我一直都那么做。我的目标总是让人们尽善尽美。所以我有点，我不知道，有点精英主义。我想，看，你来这里学习。我给你真正的东西。我只是不像一个好人，但真正的东西是困难的。我尽我最大的努力，我把它交付给你，这样你就能达到我对你提出的要求。对吧？所以我提出高要求，但同时我知道我有责任教他们。最后，如果失败了，如果没有相当一部分人从中获得很大的好处，从你的客气话来看，我猜很多人都做到了，对吧？现在通过YouTube很明显。那么我，在大学里也是，当然我总是得到好的评价或者非常好的评价，毫无疑问，但我认为我成功了。我成功了。我曾经有一个学生，我在埃尔朗根的街上遇到了他，在他上完我的经典力学课几年后。我告诉过你那个从微分几何开始的课，他拦住我，他很客气。他说，因为你，我放弃了物理。我想，哦真的吗？他说，不，不，那是有史以来最好的事情。你的课很棒，但我只是意识到我不够好。我说，

也许你应该多试试。不，不，不，绝对不是。我非常感谢你，因为我意识到我应该理解它。所以我的课上很多人说它很棒。我认为它很棒，但我不够好。我就是做不到。所以这是一个奇怪的赞美，但，但它是真诚的。我认为它是真诚的。他是真心的。我再次道歉。我说，我希望我没有做错任何事。等等。他说，不，不，不，不。他现在对他所做的事情很满意，等等。

所以，无论如何，就是这样。我认为提出高要求很重要，也是为了激励人们，对吧？今天，我们在教学界有很多关于人们因高要求而失去动力的讨论。我认为高要求，如果你作为老师自己所提供的来看是合理的，是所有激励因素中最大的。因为好的学生被推到了他们的舒适区之外。而没那么好的学生看到有相当数量的学生非常成功。所以这是可能的。

科特·杰蒙格尔：是的。是的。

弗雷德里克·舒勒：也许他们需要提高自己的水平。也许他们需要花更多的时间在上面。我就像，我要更自信，或者更勇敢，或者不那么灰心，或者，你知道，总之，那是我的，我的，我的观点。而且我，是的，所以也许那是我从所有这些奖项中得到的最美好的结果，或者一个结论。我得到了其他的，而且，而且，而且，而且我收到的成千上万封电子邮件，当然，不是当然，但是我亲切地收到了，很多我甚至没能读，因为在某个时候实在太多了。有一年我收到了6000封关于这些YouTube讲座的电子邮件。我不可能读完。它们都进了一些文件夹，但我对此感到非常内疚，因为有些人写了非常好的东西。如果我看一下，但我就是无法处理这些大量的电子邮件。所以也许在这里我感谢所有写信并向我致以非常亲切话语的人。但对我来说，最美好的结论是，我认为我的方法，方法至少是合理的，对吧？所以要高要求，并努力提供满足它们所需的東西。

科特·杰蒙格尔：是的。我与你和你的讲座产生共鸣的原因之一，我关心数学的严谨性，虽然你不仅仅是为了严谨而严谨，或者为了形式而形式。你关心它是因为要理解学科X需要什么，你必须深入到Y点。所以你不在乎Z点和ABC点。你关心的是与X相关的Y点，而不仅仅是Y周围的东西。

弗雷德里克·舒勒：是的。是的。是的。虽然你也看到了，连贯性实际上就是我们所说的。嗯，是真的吗。我们所说的真的有说服力吗？它令人信服吗？对吧？所以我们建立一个理论。我们从假设开始。它们可能是对的或错的。就我所说，我不确定。就物理学而言，对的或错的。不，是的。就物理学而言，真或假。但是一旦我们设定了我们的假设，我们所说的其他一切，它真的有说服力吗？它至少与我们所说的兼容吗？在那里你需要非常小心，因为很多事情是貌似合理的，但就是不正确。如果我们开始信口开河，那总是很酷，对吧？这有点，有时我把它归咎于费曼，他当然是一个相当有魅力的人物。对吧。然后物理学家，嗯，也像我一样，对吧？所以我知道这是这样的，你可以这样那样地思考它，等等。是的，你可以这样思考它，但它正确吗？它与其他一切都吻合吗？最后，没有办法超越严谨性，对吧？事物如何联系的严谨性。所以，你知道，如果你在这里的理论中拉一根小绳子，它在那边的理论中是如何移动的？你知道吗？

科特·杰蒙格尔：是的。你为什么 not 具体一点？你为什么 not 给一个通常是信口开河，但当你审视它时，却是错误的例子？

弗雷德里克·舒勒：哦天哪，一百万件事，一百万件事。例如，谈论两个粒子的质心很容易，对吧？两个粒子绕着质心飞。现在从相对论的角度考虑它，等等等等。例如，从相对论的角度来看，没有质心，因为质心，当然，要求你取它的位置。我想在平坦空间，甚至不是弯曲空间，平坦空间。你需要取两个粒子的位置，比如说闵可夫斯基空间，那里可能有引号里的位置向量。好的。然后你找

到中点，对吧？但是对于同时的粒子，你找到中点，对吧？同时的位置，但我们知道在狭义相对论中甚至没有客观的同时性。所以在狭义相对论中，没有质心。这是一个康德的概念，我想这很有趣，因为康德说这是一个什么，先验综合判断之类的东西。我想是这样的东西，甚至是分析的，一个分析真理。不，那根本不是真的。自然不是这样的。自然没有同时性作为一个基础性的东西，你可以谈论它并且它有意义，对吧？

所以，所以如果你不非常精确地定义它，然后检查它在任何.....是的。你必须非常小心。所以信口开河的东西非常非常危险。我的意思是，即使是写下来的，严谨的东西也非常危险。我们都知道这个，对吧？我们称之为符号错误或其他一些概念错误。所以不是因为它是用数学写的就必然在概念上是连贯或一致的。当然，那么最终在某个地方有一个错误，不，但是如果开始信口开河，它就变成了纯粹的空谈。当然，如果你做形式主义，而你又不偶尔把它带到生活中，比如说对学生，对吧？那也不行。但我们真的要小心我们说话的方式。

科特·杰蒙格尔：我明白我们没有黑板，你现在也没有能力画画，但如果你要向观众解释，他们受过物理和数学教育，量子引力的问题是什么？你会怎么说？

弗雷德里克·舒勒：哦，嗯，那是.....

科特·杰蒙格尔：为什么把引力量子化这么难？引力应该是一个量子理论吗？

弗雷德里克·舒勒：完全正确。完全正确。完全正确。我想听听你的观点。

弗雷德里克·舒勒：嗯，我的意思是，好吧，我，我不认为我有什么新的东西要补充，但我想如果你把我当作一个小小的考试，我会有义务回答。

科特·杰蒙格尔：博士答辩。

弗雷德里克·舒勒：好的。我们有一个很好的引力理论。广义相对论是我们拥有的最好的一个。我们使用它。它受制于我们得到的数据的解释等等。它有形式。 $G_{\mu\nu}$ 是 $T_{\mu\nu}$ ， $G_{\mu\nu}$ 是时空曲率， $T_{\mu\nu}$ 是物质的、令人讨厌地包含度规的能量动量张量。所以物质是，度规也在 $T_{\mu\nu}$ 中，但非常粗略地说， $T_{\mu\nu}$ 当然主要由宇宙中的物质含量和分布决定，比如说。现在有很多问题需要讨论。嗯，这已经是对所有时空的一种上帝般的视角了。你实际上必须进入三加一来谈论演化等等，但让我们把这些都放在一边。

问题在于物质方面，只要你有经典场，比如麦克斯韦场，经典的，这个 $T_{\mu\nu}$ 就是一个经典场。它是一个光滑流形上的张量。它可以完美地等同于流形上的 $G_{\mu\nu}$ 爱因斯坦曲率张量。这在数学上是有意义的。然后你解那个。那里有一个大象，但你解这些方程，你得到引力和物质最终如何协同工作的预测。你还需要物质场方程。但不幸的是，普朗克给了我们这个想法。然后人们说，哦是的，那是真的。似乎没有经典物质。所有的物质，光和粒子等等。它们都是量子的。我不认为这有什么可怀疑的，至少我们是这么看的。很好。但是你如何在这个方程 $G_{\mu\nu}=T_{\mu\nu}$ 的右边建立这个 $T_{\mu\nu}$ 张量呢？因为现在突然那里有量子场了。好的。大问题。然后最简单的，所以，然后你可以说，哦，所以在某种意义上，这个 $T_{\mu\nu}$ 也更像一个作用于某个向量空间，希尔伯特，抱歉，希尔伯特空间，福克空间不是，不管你怎么，有很多很多问题，微扰理论等等。

无论如何，你在 $T_{\mu\nu}$ 这一边有这个。然后你说那不合适。你不能把一个经典张量等同于某个

算符。等号不再有意义了。对吧？你想放在右边的物质是量子的，但右边只为经典场制定。

科特·杰蒙格尔：嗯哼。

弗雷德里克·舒勒：你可以尝试很多事情。哦，我们取期望值。所有这些都不起作用，对吧？所有这些显然都不起作用。所以然后，在某种意义上，最懒惰的想法，我在这里不必要地挑衅，但最懒惰的想法是说，为什么我们不让左边也成为算符，或者更严肃地表述，也许引力也应该被量子化。然后我们就有两个理论，物质和引力都在同一个形式体系中。然后我们可以在这个新的形式体系中写下一个新的方程，粗略地说，现在物质和时空说同一种语言，或者我们在看待它们时说同一种语言。这就是我们应该量子化引力的想法的起源。至少从形式的角度来看。还有其他很好的理由。黑洞会发生什么？奇点呢？大爆炸？有大爆炸吗？这个理论真的可以外推到大爆炸吗？很多问题。海森堡的想法。把时空作为一个光滑流形来谈论，以及度规测量得如此精确，这到底意味着什么？你会如何测量？你会用越来越高的频率来更精确，比如说用光子来检查某样东西，但那样会扰乱时空，你想要测量的那个时空。有很多很多理由，你可以编造出一大堆理由，为什么你认为量子引力，量子，量子，引力的量子表述可能会解决，解决，启发我们关于所有这些问题。

好的。但这最终来自于我们一开始看待事物的方式。我认为没有真正令人信服的理由说明为什么引力必须被量子化。也许正在发生一些非常不同的事情。嗯？对吧？所以这是第一件事。我知道吗？不。嗯，我不知道。我不知道得比任何人都多，但我们想要量子化引力并不是那么清楚。看，我的意思是，有很多事情，有很多问题可以问，可能没有一个是原创的。如果你做量子理论，普通的量子理论，在三维空间，比如说在欧几里得空间，你做，我不知道，量子信息处理量子比特，你的量子系统是什么，至少它的组成部分，相反的，它们必须来自表示。如果它是基本的，对称群的泛覆盖群的不可约表示，你思考这个量子系统的经典空间的对称群。对吧？所以这就是你如何得到自旋。所以它们来自三维欧几里得群，你观察欧几里得群的所有么正，射影么正表示，或者技术上你也可以观察泛覆盖群。那会是，是的，比如说没有平移的 $SU(2)$ ，对吧？所以如果你只取 $SO(3)$ ，泛覆盖群是 $SU(2)$ ，你找到那些的么正表示。然后你知道你如何建立你的量子系统，它们生活在，抱歉，生活在这样的空间里。

科特·杰蒙格尔：当然。

弗雷德里克·舒勒：好的。然后同样的方法也适用于庞加莱群，维格纳发现了这一点。 $SL(2, \mathbb{C})$ 的可能表示实际上是什么？哦好吧， $SO(1,3)$ 是 $SL(2, \mathbb{C})$ ，是物理空间对称群的泛覆盖群。我为什么这么说？嗯，整个标准模型都建立在这个之上。如果你像这样做了，它有非常明确的概念上的理由说明为什么必须如此。这不是一个抽象的东西。但那意味着物理的，经典的，空间，无论是时空还是空间，你都需要有一个经典空间的概念，才能以我们现在的方式谈论量子物质。

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：啊哈。如果你现在说，我想量子化这个经典几何，或者，你知道，你可能会有的任何想法，它的动力学，几何。嗯，你在某种意义上，破坏了把你带到量子物质的那个基础。对。你看，所以那对我来说不是马上就貌似合理的。当然你总是可以说，是的，那只是我们用来上到理论的梯子。最后它都行得通。然后我们扔掉空间的原始想法。但是，但是你知道，关键是，我不知道。可能没人知道，但这也是，我想可能对我们大多数人来说，所以引力应该被量子化的想法。

人们至少可以提出聪明的反驳意见，说明为什么那是一个有趣的想法。

好的。所以也许有别的东西在起作用。有奥本海姆和合作者关于这个想法的提议，即引力不应该被量子化，而应该被视为一个随机理论，经典理论。所以统计随机理论，与物质相互作用。我发现这是一个有趣的想法，因为量子公理，我从来没有，是的，量子公理是这样说的。你说你不能测量，你不能预测测量结果是什么，但你可以给出一个概率分布，一个经典概率分布。所以公理告诉你经典地，你不是连接到一个纯态的经典理论，你连接到一个经典的概率分布。我认为这有点像他们的想法。我希望我没有歪曲它。你应该问他们。但你看，这先验地也是一个非常貌似合理的方式，这是否行得通以及那是否行得通，那不是问题。问题是还有很多其他的，我不知道很多，那例如是一个貌似合理的事情。我们从量子公理中看到，量子公理在任何时候都没有指示我们去量子化它背后的时空。

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：对吧？也许这个表示论构造，除了构造之外，都反对它。所以不，不，你需要这个经典空间的想法。否则我们也不知道我们在量子理论中在谈论什么。所以，但是量子公理谈论量子……所以，而且我的意思是，把这个量子化引力的想法付诸成功已经失败了这么久。但是我的意思是，谁知道呢？我的意思是，现在对弦理论有很多批评，嘿，我也同意，但是你知道吗？也许他们能成功。你知道，我们不知道。我们不应该非常确定。我对此没有那么多的评判。我的意思是，非常聪明的人花了很多时间，而且过去非常聪明的人对他们想做的事情是错的，虽然他们非常聪明，有时人们很幸运。我也不会抛弃那些继续追求它的弦理论家。我不会，但我有什么资格说呢？谁有资格说呢？我认为这是科学的好处，每个人都可以而且应该做他们认为应该做的事情。所以一切都是对的，的想法是对的，一切都是对的。一切都是对的。而且它不那么，不那么个人化，不那么个人化，比我们通常认为的。现在，当然，是的，我想赢得诺贝尔奖，但我们都不会，对吧？我们都不会，但这是一个很棒的，科学的项目很棒。每个人都做他们认为他们应该做的事情。嗯？

而且，而且你看，我的意思是，在某种意义上，那已经改变了一点。也有一些评论员，在德语区也有，我想是萨宾·霍森菲尔德等等。她对科学系统如今的运作方式提出了一些非常强烈的批评等等。其中一些观点是完全正确的。是的，绝对正确。

科特·杰蒙格尔：比如什么？

弗雷德里克·舒勒：嗯，旧的想法是教学和研究的自由。这是一个洪堡式的想法，不是吗？洪堡，我有这个想法，当他被要求，我想是为普鲁士创建一个教育系统时。哦天哪，我的历史，但我想是类似的事情。好的。他说，大学教育不是职业培训。不是为了让你找到一份工作。是为了让你学会思考。如果你学会了思考，如果你深入挖掘，嗯，我不知道他是否是这样说的。让我说如果他今天还活着，他想说什么。好的。如果你在物理学领域深入挖掘，你成为一个真正优秀的物理学家，然后你和一个真正深入研究法律思维的法学学者交谈，你会认出一个优秀的思想家，因为你在你的学科中学到了很好的思考方式，反之亦然。对吧？如果你能做到这一点，你走向世界，对于一个拥有大量技能并学会了深入思考、批判性思考的优秀思想家的公司来说，你无限地更有用。从长远来看，那会为公司带来增长。对吧？至少平均而言。

我们教育人们以符合当前雇主期望的想法。嗯，当前的雇主不知道10年或20年后世界会是什么样子。我不知道。没人知道，对吧？对。但是800年来，大学实际上为我们提供了思想家，他们随后

承担了他们那个时代的问题。你必须受过教育才能做到这一点。而进展不顺利的是，就是那个。教学和研究自由的想法以及多样性，用那个触发词，但是大学的多样性，大学的大学的多样性。但在那里它实际上是合适的。不同思想家的多样性，因为我们都天生是多样的，我们都不同。我们应该被允许做我们想做的事情。然后社会必须决定，这个特权，这个特权被给予哪些人。然而，目前正在发生的事情，比如说如果你在欧盟，大学，当然，他们希望你获得资助。而最大的资助是来自欧盟的欧洲资助。他们决定主题。哦，有开放的资助，说句公道话。有开放的资助。你可以带上你的主题，但一些非常大的资助，他们决定主题，关于什么进行科学研究会很重要。而它们是政治决定的。

那是如何运作的？嗯，你认为在当前的情况下，能源情况等等，能源会是这样一个话题吗？当然，这样的能源是这样一个话题。这样的一个话题。能源是这样一个话题。好的。这意味着如果你做能源研究，你很好。你可以申请这些大额资助。我的意思是，我有点夸张了整个事情，但就是这样。

科特·杰蒙格尔：当然。

弗雷德里克·舒勒：最终我们研究什么是由官僚和政客决定的，他们认为那貌似合理。当然做能源研究貌似合理。但即使我们回顾过去，核能是由政府寻找能源研究的项目发明的吗？它来自蓝天研究。对吧？所以如果你看财务状况，研究人员真的完全自由地决定他们研究什么已经不再是真的了。这是事实。这是事实。而这个问题在于单一文化。

科特·杰蒙格尔：解释一下。

弗雷德里克·舒勒：嗯，如果人们去争取大额资助，要么他们已经很有名了，他们已经做了一些很棒的事情，那么我也会说，再给他们一笔资助，很高的概率。他们会继续做很好的工作。但是新的想法，有点跳出框框的想法，再说一遍，它们也得到资助。我只是给出总体的想法。要困难得多，因为一旦，看，研究不是通过你告诉我我需要你研究这个这个来运作的。如果我必须为你研究一次旅行，那就可以。我可以为你做到。我可以交付那个。但是如果你说我需要你找到量子引力问题的解决方案，你认为它重要或者任何人认为它重要，这很好。我认为这是一个很好的研究领域。但这并不意味着下一个突破会在那里。

科特·杰蒙格尔：所以你认为学术界应该更自由？

弗雷德里克·舒勒：哦是的。哦是的。哦是的。哦是的。当然。自由。看，看，是，是的，看，是一样的。让我们回到教学，因为这是一个类似的论点，不是吗？我认为每个有正确背景的教授，受过教育，是专家等等，他应该被给予完全的自由来教一门，比如说，量子理论课程。对于观众X，完全的自由。这个原则会给你一些你上过的最差讲座课程。嗯，那很不幸。但我也相信它会给你你上过的最精彩的讲座课程。我认为在你的学生生活中，有两三个不同的讲座更好。所以，是的，我敢打赌。我认为三四个或五个会是一种奢侈，精彩的讲座课程。我想我上过同样多的精彩课程。感谢我的老师们，对吧？但然后有一些不那么好的。那也来自自由，但自由是发展新事物，做得更好，做得不同的必要条件。你知道，就是这样，没有一个总的委员会可以决定。我的意思是，我们应该，非常简单的课程，我们应该教动量向量吗？当然我们应该，我们需要它。没有动量向量。它是一个余向量。

科特·杰蒙格尔：嗯哼。

弗雷德里克·舒勒：所以你知道，即使一个委员会同意这是重要的东西，但如果你说，“是的，但这在更深层次的分析中并不真正吻合”怎么办？我应该教它吗，因为委员会决定了，你知道，课程的认证委员会？我不这么认为。我不这么认为。嗯？看，如果我们有一个教学的狂野西部，每个人都讲糟糕的课，每个人都做他们想做的事，而且没有任何东西能凑在一起，我会主张一些结构。目前我们有，至少在欧洲，有越来越多的结构，越来越多的中央认证课程和核心系统等的想法。你得到的是一个平均好的东西。嗯。但是如果你想得到真正好的东西，你需要给予自由。我承认，这是一种信念，但这是一个古老的洪堡思想。它肯定为德国服务得非常好，很长一段时间，在教育一个极其广泛，极其广泛的社会部分，非常非常积极地教育他们。你知道，你在工程学方面做得非常出色，在数学和物理学方面也是如此。我的意思是，20世纪初，我的意思是，德国是所有这些领域的相当大的强国。现在这些，这些，这些，我的意思是，看，我能用，用社会学的，你怎么说，科学的确定性来陈述这个吗？不，但我认为这是洪堡原则的流出，关于你如何，你如何在大学水平上高水平地教学。不要首先看职业用途。职业用途和公司和经济从这些人中获利，这事后是毫无疑问的。

科特·杰蒙格尔：不要太短视。

弗雷德里克·舒勒：不。所以，是的，方法的多样性很重要，而你只有在自由的情况下才有多样性。我把这个陈述真正地限制在我在这里谈论的内容上。是的。不同的研究人员应该遵循他们的方式。然后这是一个问题。你会成为一个研究人员吗？对吧？这是一个公平的问题。是的。嗯，一个老师，在大学里。

科特·杰蒙格尔：是的。所以让我问你。我已经问过你你在追求什么，但我也很好奇，有一些时髦的科目，流行的科目，比如 AdS/CFT 或量子信息或黑洞信息，弦理论等等。你为什么 not 追求更时髦的那些？仅仅是因为你对它不感兴趣吗？是什么？

弗雷德里克·舒勒：那不是真的。其中一些我感兴趣，其中一些我有一些接触。其中一些我理解，其他的我没有看过或者没有。我的意思是，有很多东西。我喜欢遵循我和我的合作者的想法，我试图以那种方式做出我的贡献。所以主流科目，已经有成千上万的人在研究，我会产生影响吗？我喜欢管理，但你可以，那也完全没问题。所以我当然很了解这些东西中很多的基础，而且有些比其他的更吸引我。所以弦理论没有那么吸引我。当时有种说法，“哦，最好的学生去研究弦理论。”那是真的。最好的学生去研究弦理论。我想我当时是一个相当好的学生，对吧？但它，我有点没有，没有真正感觉到它。我没有真正感觉到它。我不是说我有先见之明，我知道它不会成功。当然不是。当然。但是，你知道，你做一个选择。做这个选择也是情绪化的。现在你说，嗯，我觉得那很有趣，我会朝那个方向走。而且.....

科-特·杰蒙格尔：你没感觉？

弗雷德里克·舒勒：我没感觉。不，不，不。嗯，我不明白。有一次我实际上和，我想是和彼得·戈达德讨论了一小会儿，我问他，所以我们为什么在我们的，是的，那是什么？26维空间里取闵可夫斯基度规？我的意思是，基本的弦。

科特·杰蒙格尔：嗯哼。

弗雷德里克·舒勒：他告诉我们，他告诉我，“嗯，因为爱因斯坦告诉我们是这样。”我说，是的，但是他告诉我们的是四维空间，而且使用它的原因不是因为你有在那里移动的点粒子，你想通过曲线的长度得到时钟假设之类的东西吗。但这是一个基于点粒子的想法。但是现在如果你认为弦是第一件事，是基本对象而不是点粒子。你难道不宁愿有一些从根本上测量面积而不是长度的东西吗？很久以后，我写了一篇关于这些东西的论文。

科特·杰蒙格尔：有趣。

弗雷德里克·舒勒：他说，是的，这是一个貌似合理的想法。好的，没关系。这是一个貌似合理的想法。我也做了一些事情。我不认为它解决了任何问题。但是你看，关键是，这个设置，我觉得它在某种程度上太随意了。在某种意义上，唯一的想法，至少在当时传达给我们的时候，后来当然，人们改变了看法。我不是专家。就像是，让我们从小的弦开始，闭合的或开放的，然后量子化它们，这足够困难了，量子化它们而不是点粒子，作为第一次量子化。然后让我们看看会发生什么。有一些了不起的结果。至少在当时，我认为爱因斯坦作用量如果你以某种方式看待它，它会自然而然地出现，这是了不起的。等等。后来，我想，嗯，这不那么了不起，因为如果你从微分几何的角度或者从计算的角度没有做错任何事，你还能得到什么呢？但是在最低阶，广义相对论，也许里奇标量前面的因子可能是零或者什么。对吧？所以，看，我的意思是，这些是拒绝它的成熟理由吗？当然不是。我当时是个学生，对吧？而且，但是我没有，它没有拉动，我没有被拉向那个方向。所以我们都这样做，我很高兴很多其他人也做了，对吧？到目前为止它没有成功，这也许只是非常不幸。我更希望那些做了它的人成功了，并且在理论上令人兴奋的新发现。然后我会说，是的，看，看，我傻了。是的。但是，是的，是的，是的，是，是，是，我们不知道，对吧？就像投资股票市场一样。股票会上涨吗？所以，上涨和下跌，没人知道。没人知道。对吧？

而且，而且在这里也是一样。我们只能尽力而为。我认为在学术生活中，这是件好事。你做研究，你真的试图推动一些事情，做一些事情。但是，同时，你教育下一代。如果你然后把他们教育到更高的水平，如果你把你呈现给他们的东西改进5%，我们也做了一件很棒的事情。不是吗？所以，所以那是，我认为，关于学术工作的好处，对吧？我的意思是，你不仅依赖于赢得或做诺贝尔奖或类似的有价值的工作，当然，那会很好。但我们在社会中还有另一个非常非常重要的任务，因为如果我们不至少传递我们所拥有的，并让它变得更好一点，以便可以传递更多，它更有效率，那么我们会失去那些知识。那也将是灾难性的。所以我，我睡得很好。我睡得很好。

科特·杰蒙格尔：我想你在传递东西。

弗雷德里克·舒勒：那非常重要。并且尝试做新的事情。是的。尝试新的事情是一件值得称道的事情，而且它很令人兴奋。而且它也是对学生的一种训练，让他们自己去做研究。现在我的意思是你可以做那么远的研究，但也许你的学生在内容和方法上学到了很多东西，他们把别的东西带到了成功。对吧？所以那就是一个学者的生活。我们经常谈论最神圣的圣杯，对吧？有大的开放性问题。我也在思考其中一些事情。但我认为通往那里的道路是，是更谦虚的步骤。更谦虚的步骤。

科特·杰蒙格尔：哦。所以，是的。你刚才在弦理论的例子中做了一件心理学上很有趣的事情，当他们用闵可夫斯基度规扩展到26或10维时。他们说这是因为爱因斯坦告诉我们的。然后你说，嗯，爱因斯坦的动机是什么？是四维空间中的点粒子和光钟。好的。即使在你的建构引力方法中，你说爱因斯坦试图反对称度规，或者至少不让它对称，度规对称，如果你这样做，那么上升和下降

就不会一样，但你只能从你的方法中看到这一点，因为有一个高斯映射和一个勒让德映射，如果我没记错的话。

弗雷德里克·舒勒：哦是的，没错。好吧，好吧。那是其中之一，好吧。好吧。是的。是的。是的。是的。我想在某个时候，但是，但是关键是，

科特·杰蒙格尔：这个想法是，你刚才在那里做的非常有趣。你说，看，我们不能在不理解这里来自的原因的情况下，随心所欲地修改上面。因为如果你修改这里，也许你不仅要修改这个。你认为你做了，但实际上是所有这些。

弗雷德里克·舒勒：哦是的。我的意思是，或者只有这个。你为什么不谈谈那个呢？

弗雷德里克·舒勒：嗯，我的意思是，那是，那是，那是，那是，所以，所以你所描述的，可以抽象地概括如下。形式上的推广通常会失败。那就是爱因斯坦所做的。我有一个对称度规。现在我做一个非对称的。有一个动机，因为 $F_{\mu\nu}$ 不是对称的，对吧？今天，当然，我们，我们对此有点微笑，因为 $F_{\mu\nu}$ 是场强，而不是势，诸如此类。但他有一些理由让它非对称，对吧？但是如果你形式上说我们推广了这个，所以如果你形式上思考这个，那么你不知道你在做什么。你需要从概念上推广。所以你必须问，为什么它在那里是对称的？为什么它是度规？然后你可能有一个起点，来说在什么情况下，同样的“为什么”问题会有不同的答案？

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：对吧？所以，所以是的，你必须从概念上思考，而不是形式上。形式上是好的，一旦，一旦，看，我的意思是，物理学中的每一个方程都只是一个次要产物。让我们拿第一个东西。所以什么是能量？爱因斯坦做了什么？爱因斯坦说能量是 mc^2 加上然后是 P 的所有高阶项。不，是.....的平方根。你有所有这些，你可以说爱因斯坦，牛顿写了 P所以你有 $P^2/2m$ 项，比如说，动能。但是如果你做相对论，你也有一个 P^3 ，一个 P ，嗯，至少一个 P 的平方，一个 P 的四次方，六次方，六次方。你有来自平方根的整个展开，对吧？在相对论中。所以你说，啊，看这里，牛顿没有看到或者没有考虑 P 的高阶项。那是正确的，对吧？它们在相对论中，如果你用这种形式写出来。但是牛顿也没有看到零阶项， mc^2 。

科特·杰蒙格尔：嗯哼。

弗雷德里克·舒勒：你明白我的意思吗？所以关键是，如果你说能量，它在相对论中是一个与经典物理学中不同的概念。如果你认为你通过添加高阶项从一个理论到下一个理论，因为那只是唯一可能发生的事情，测量上或者别的什么，你犯了，我不知道是不是范畴错误，但是类似这样的东西，你想要一个新的能量概念，那么你必须首先对那个有一个概念，而不要纯粹形式地去做。你明白我的意思吗？所以，所以这个，这就是为什么你需要从概念上思考。一旦你有了概念，对，我稍微简化了一下，那么方程就从想法中流出来了。不是先有方程。是先有概念。

科特·杰蒙格尔：是的，是的。好的。因为否则那个雄心勃勃的本科生会说，嗯，也许能量里有一个五阶项。让我试试那个。但然后你就会想，嗯，那个五阶项从哪里来，二阶项的动力又来自哪里？

弗雷德里克·舒勒：类似那样。类似那样。你总是，为了推广一个理论，你必须首先在更深的概念层面上理解待推广的理论。而在那里，那已经是有歧义的了，因为你可以从不同的概念层面上看

待事物, 对吧? 你可以描述, 拿引力来说。好的。高中问题。高中老师问学生这里, 期末考试的及格与否将由你对以下问题的正确回答来决定。学生说, 好的, 引力是一种力吗? 我们指的是牛顿引力, 因为高中只有牛顿引力。牛顿引力是一种力吗? 学生会说, 是的, 它是一种力。他说, 太棒了, 你及格了。但如果学生说, 不, 它不是一种力, 他也应该及格, 因为你可以把牛顿引力重写为牛顿式时空的曲率, 不是吗? 牛顿式时空在时间方向上也是弯曲的, 现在有一个唯一的时间方向。而且完全等价, 对引力是什么的完全不同的概念化, 不是一种力, 而是空间的曲率。你知道, 自由落体是测地线, 在那种背景下是自平行的, 因为你必须用牛顿式时空中的联络来做。

科特·杰蒙格尔: 当然。

弗雷德里克·舒勒: 所以这意味着问题的答案是, 引力, 牛顿引力是一种力吗? 是或否? 两个答案都是正确的。如果你用不同的概念来理解, 预测是相同的。那告诉我们什么? 嗯, 引力就是引力, 它做什么, 我们对它的形式体系可以有很多不同的伪装, 而且它可以给出相同的结果。所以我们不应该把形式体系与物理学混淆, 或者把形式体系中的对象。我的意思是, 力是牛顿力学中的一个概念, 引力也就在那里了。但是你可以争辩说, 嗯, 引力在牛顿理论中也应该是.....所以我们把牛顿式时空做成了曲率。然后第一个公理开始有意义了。

科特·杰蒙格尔: 对。

弗雷德里克·舒勒: 第一个公理说, 一个不受力影响的粒子会沿直线运动。好的。所以你可以说, 你知道一个例子吗? 没有力。你会说, 嗯, 至少在我们生活的地球上, 第一个公理是没用的, 对吧? 它失业了, 因为总有引力。它就在那里。它就在那里。所以你说的“一个不受力影响的粒子”是什么意思? 如果你曾经说过没有引力, 牛顿理论也是牛顿式时空的曲率, 那么它就会意味着, 啊, 任何不受引力以外的力(我们不再认为引力是一种力)作用的粒子, 都会沿直线运动, 那定义了直线, 对吧? 操作性的方式。然后第二个公理说, 如果你曾经看到一个粒子不那样运动, 对吧? 那些不受力作用的粒子运动的线, 那么那些, 那些其他粒子受到了力的作用。

科特·杰蒙格尔: 是的。否则第一个公理是第二个的特例。

弗雷德里克·舒勒: 完全正确。那没有意义。牛顿不傻。他不说, 我先为初学者做。我说没有力, 然后为那些不能把 $ma = f$ 的右边设为零的人用有力的情况做, 对吧? 我的意思是, 不, 不, 对吧? 他不傻。不, 第一个定义了什么是直线。

广告时间: 大家好。希望你们喜欢今天的节目。如果你渴望更深入地探讨物理学、人工智能、意识、哲学, 以及我的个人反思, 你会在我的 Substack 上找到所有这些。订阅者可以优先观看新剧集、新帖子, 以及幕后见解, 并有机会成为一个由志同道合的朝圣者组成的 thriving 社区的一员。通过加入, 你将直接支持我的工作, 并帮助保持这些对话处于前沿。所以点击屏幕上的链接, 点击订阅, 让我们一起继续推动知识的边界。谢谢你, 祝你观看愉快。顺便说一下, 如果你在听, 网址是 CURTJIMUNGAL dot org。Curt Jaimungal dot org。

科特·杰蒙格尔: 你是如何学习一门学科的? 你, 弗雷德里克·舒勒, 是如何学习一门学科的? 你说你有很好的老师等等, 但让我们去掉那个, 自学。你是如何把一门学科学得这么好的? 你做了什么来从概念上学好一门学科?

弗雷德里克·舒勒：嗯，如果你是绝对的初学者，你确实需要一个老师，因为在教科书和讲座的洪流中，你需要一个向导。你需要一个好的向导。但是如果你现在说，忘了老师，你怎么学？嗯，在不同的时间是不同的。作为一名学生，我学习讲义。我学习教科书，意思是我试图理解每一个等号。我仍然告诉我的学生，每一个蕴涵错误。我必须能够说出为什么这恰好是一个有效的步骤。这是一种被动的方法，对吧？伟大的人们建立了这个。如果它被恰当地呈现，我可以检查。我可以检查所说的有意义，吻合。这与发现它相去甚远，对吧？而且，然后材料的质量就显现出来了。如果你能从第一页开始，而且你装备齐全，你知道，如果你能从第一页开始，你真的努力去理解它，但一次又一次，有跳跃和空白以及你不理解的东西。可能是你，但我总是，是的，但实际上好的材料是循序渐进的。我总是告诉我的学生我的质量保证或者我的希望是，如果你在第23讲不理解什么，那么答案应该在第1到22讲。否则我需要提高我的水平。看，我是否在最严格的意义上满足了这个？当然不是。我是人。就像每个人都是人一样，对吧？我们都会犯错。正如我们之前所说，我们都用一些思考方式，人们最好三思而后行，这是否真的一个好的论点等等。但至少我们应该尽可能地消除它。

但是，正如你从学生的角度问的那个问题，我判断，我判断材料。是，我能详细理解每一步吗？好的。然后你作为学生有很多事情要做。现在，当然，有了这么多年的经验，我看东西，我大概读一下，我读一下它们的要点，然后我说，好吧，他们到底做了什么？然后我把我所有的知识都用上，就其存在而言。我试着重新发展它。因为我认为他们实际上想说但可能没有说的话。而且至少有一半的时间，不，让我们把那个，让我们把那个更谦虚一点。80%的时间我意识到我只是没理解。好的。他们做了正确的事情，他们做了正确的事情。我只是没理解。我真傻。但我不知道是不是20%。我显然是在编造这些百分比，但我会认为20%的时间我说，哦，拜托，那真是幼稚的论点。不，不，不，不，不。哦，那更像是，然后我试着重新建立它。所以在某些情况下，我真的成功了。然后我把这个带到我的讲座中。我从那里完全重新发展一门课程。当然，我作为学生时是怎么做的和我后来是怎么做的有区别。然而，我作为研究生时，作为博士生时，我经常在周五坐在自助餐厅里，我也只拿白纸。所以那是在那里开始的事情。我想，好吧，现在我在这里做理论物理学的博士。让我为自己写下什么是实际上是基础科目，量子力学，经典力学，量子力学，麦克斯韦力学，它到底是什么？如果我现在必须写一些它的摘要，我会怎么写？然后我意识到我所有的空白和我所有的不理解。有时这种不理解仅仅是因为它没有被恰当地说和教。好的。所以我，我做了，我让自己面对需要，如果我没有教科书，我应该写一个科目会发生什么。我定义科目，你知道，一个讲座课程类型的科目，就像我们知道的经典力学，拉格朗日力学从头开始，包括它的理由，整个设置，它的范围是什么等等。那非常令人谦卑。那非常令人谦卑，但这是一个非常好的训练。我想同时我能从中得到更多。然后我能让它变得更好。

科特·杰蒙格尔：好的，让我看看我是否能把它形式化。你在一个房间里，你一个人，你有白纸，你在思考，你随意选择一个主题吗？还是只是下一个是什么？

弗雷德里克·舒勒：嗯，那时候，不。那时候我想，让我复习一下四门基础课程，经典力学，电子学，量子力学，统计物理学。你知道，这些是标准的大学讲座课程，比如说在德国，但在任何地方都是，对吧？在理论，理论思维，理论方面。而且是的，然后我说，好吧，这又是怎么回事？整个拉格朗日业务，实际的设置是什么？想法是什么？形式体系是什么？它是如何开始的？概念是什么？我如何把这些按一个有意义的顺序排列起来？A, B, C, D, E, 而不是另一个顺序，对吧？所以，如果一个人真的尝试这个，即使作为一个非常，我的意思是，我是一个非常好的学生，非常好的研究生，我意识到，哦我的天哪，我的意思是，这里，漏洞比什么都多，对吧？我意识到，然后你会认识到

去填补漏洞，然后你可以开始填补它们。在某种意义上，我仍然在某些点上填补它们，对吧？是的。

科特·杰蒙格尔：我也注意到，当你在讲课时，有时你会在黑板前停顿，你会推导，你会确保你当时就能推导出来。我的意思是，甚至在学生面前。

弗雷德里克·舒勒：哦，是的。

科特·杰蒙格尔：我不确定那是为了你，为了你自己的自尊，你需要能够推导出来，还是为了你自己的智力满足，还是为了给学生做榜样，因为在我看来很清楚，你身后有讲义。你实际上可以看，嗯，最终的公式是什么？我想得到什么，并以此为提示？但你没有。

弗雷德里克·舒勒：是的。嗯，原因是以上所有，外加一个理智检查，我，凭我做这个的所有经验，我想我为你做。为了什么？30年？我当然在早上想了四个小时之后，不能自由地做。我总是在早上提前四个小时准备我的讲座。然后我去了，我用非常详细的细节写下来，有标题和所有东西，以便给它们结构。然后我把纸放在大桌子上。然后我只看标题。通常在极少数情况下，我需要再看一个公式。我搞混了，但我基本上，但我基本上真的认为A，我早上想过之后不能自由发展的东西，当然这是一个大事，一整个讲座课程，那只是其中一讲，对吧？所以最后一切都需要有意义。我不能自由地、精确地、有说服力地、一步一步地讲的东西，我怎么能期望学生在学期末做到呢？

科特·杰蒙格尔：是的。

弗雷德里克·舒勒：他们应该能做到。所以我必须能做到。所以这不仅是，也是自尊。我想能做到那个，但这是一个理智检查。如果我做不到，我要求学生做什么？我对他们要求太多了。好的。第一。第二，只有我现场推导这个，学生，学生才能跟上？这让我慢下来。我不确定如果我从我的纸上抄。如果我拿，有时我在极少数情况下那么做。我拿了我在那里的那张纸，因为有点复杂，我开始写纸上的东西。我的教学质量下降了70%。这不是一件好事。就好像你之前把你的问题发给我一样。我会思考你的问题，现在会有一张纸，上面有我对你问题的非常聪明的答案。至少听起来聪明的答案。我现在会把它们读出来，然后说，“哦是的，科特，那是一个非常有趣的……”我们就不再有对话了，对吧？那会感觉很奇怪。只有最好的演讲者才能从一张纸上读并且讲得很好。好的？所以它也服务于，我想说的是，它也服务于与学生的交流。这是一次真正的对话。就像我在篝火旁给你讲一个故事。它非常真实。我可能不会理想地完成每一个句子等等，但你的注意力在上面。

科特·杰蒙格尔：是的。这又与另一件事有关。如果你有200人坐在那里，你想让他们不打开他们的笔记本电脑，你该怎么办？他们都有笔记本电脑。你不想让他们打开笔记本电脑。你想让他们听你做什么，写你写什么，看或者也许抄你写什么，并且把他们的眼睛放在你希望他们打开笔记本电脑的地方。我想让他们把他们的眼睛或者用黑板。在黑板上，有一出戏正在上演，有演员，我的手指，粉笔，有时我敲黑板，然后在这里等等。人们看着那里，没人打开他们的黑板。我想在过去的六七年里，我曾经有一次不得不请一位年轻女士，她可能因为很好的理由在玩手机。我告诉她，请把它拿走。我不能这样讲课。这真的是真的。我有一种无能。如果人们不注意，我会紧张。好的。是的。但是当然我不能强迫人们注意。我必须玩我的游戏，让人们不想把目光移开。如果你去电影院，你看一部制作精良的电影，你不会把目光移开。所以我必须呈现一部制作精良的电影，它也必须科学上是合理的。其中一件事就是用黑板，和人们说话，实时和他们说话，让他们参与

你的思想，你知道，粗略地说。所以所有这些，我看不到用黑板的替代方案。没人会跟着屏幕上的一个小激光点，在一个投影墙上。如果你投影，然后你可以有你的小激光笔，然后你指着东西，你指着下一个东西。老实说，你想跟着那个跳跃的小红点吗？你不想。很难集中注意力，但是黑板讲座是自然的。方程在演变。

最美好的事情是讲师会犯错。然后学生可以说，你的第二个方程，有点问题。应该是负号。我说，不。然后我看，我老实说，我老实说，我很惊讶，老实说对此很确定，对此很有信心，但还是错了。而且这不应该发生得太频繁，对吧？在每节课你都犯一个错误。如果每节课你都犯一个学生更懂的错误，他们会认为你是个傻瓜。也许那是对的。但偶尔你就是搞不定。我说，没错。然后我看它。有时，非常非常少见，但有时我会在一节课花20分钟来纠正一个我犯的错误，我，哦，那不是它应该的样子。然后我说的第一件事是对学生，非常诚实地说，你看到了我没看到的東西。很好。我看看我能不能挽救这个。然后是自尊。而且是自尊。但对学生来说也是一个声明，就像，你知道，我不是说，是的，是的，是的，我回家查一下，然后你下次会看到我说，哦，有一个小错误。不，错误就是错误。数学和我们的学科总的来说让你非常谦卑。你知道，如果你犯了一个错误，你可以是最聪明、最机灵或者最傲慢或者别的什么。如果这是一个错误，它就是一个错误。你最好立刻承认它。你立刻承认它，然后试着看看你是否真的能搞定它。有时你不能。所以所有这些都只是这是生活。我认为在YouTube视频中，一些这些东西仍然能体现出来，这很了不起。所以那些上过我的课并且也看视频的学生说，那仍然能以某种方式体现出来。好的，很好。我必须说，我没有预见到这一点。我以为它需要教室的即时性。但也许，是的。所以也许这也是为什么。虽然也许看它们可能不仅仅是个不愉快。

所以这些都是，你看，这些都是一些小想法。它们本身没有一个是铁板钉钉的原则。而且每个做得不同的人做得不对。我不是这么说的。有些人用非常不同的方式讲课。我说，哦天哪，我永远都不会这么做。我最近遇到了这位非常优秀的同事，皮姆·范德霍恩。他在一起上的一门课上讲了一节课，他解释了一些东西，他说，“哦，如果你这样做会怎么样？”我说，“哦不，你把他们引上歧途了。别那么做。”我的意思是，我想，我没有做这个手势，但我内心做了。不，我不这么做。不，这么糟糕的主意。然后他以一种如此精彩的方式扭转了局面。我想，哦，做得好。佩服。我永远都不会这么做，但是佩服，你知道。所以如果作为一名老师，你能让你的方法飞起来，太棒了，太棒了。我有我的方法让它飞起来。是的。

科-特·杰蒙格尔：那么，他那个你不会那样教的坏方法或者主题是什么？

弗雷德里克·舒勒：我想，我想如果我没记错的话，我们谈论了.....我们对高中生讲了量子力学，非常有才华的高中生，我们每年在大学都会邀请来自德国和荷兰的100名顶尖人才参加一个天才课程，我们在三天内教他们量子理论，从无到有，一直到隐形传态协议，但包括基础，我的意思是，公理和技术以及所有这些。无论如何，让我不要过多地谈论这门课程。无论如何，在那里，第一天我们做复数，但我们不说复数。我们把它们做成实数的元组，带有一个非常特殊的附加乘法，因为那样它们就完全被揭开了神秘面纱。好的。复数。他说，好的，你像这样加它们，你知道，分量相加，可以这么说。然后乘法，当然，不是分量相乘。它需要混合。然后他问他们，所以你们怎么乘它们？然后当然把他们引上歧途了，因为他们也会说分量相乘，你把这两对实数的各个分量相乘。我原则上不那么做，因为你猜不到你怎么乘实数的元组，如果你想把它们变成复数，因为它是一个定义。只有在你做了之后，你才能开始研究它是什么。

科特·杰蒙格尔：是的。好的。这里的重点是定义代码。所以我没有，我永远都不会那么做。这是一个

微观的事情。你看，我想过它。所有这些事情都很好。

弗雷德里克·舒勒：有趣。

弗雷德里克·舒勒：我永远不会那么做。我想，啊不，别那么做。因为那样他们就会有这个坏主意，然后你说那是错的。啊不，不，不这样。但他做得如此巧妙。他是一位出色的老师。他做得如此巧妙。该死，做得好。我还是不会那么做。但你做了。好家伙。我的意思是，我想我坐在那里看着。好的。所以我想说这些都是.....例如，我还有一个执念，就是没有激励性的例子。嗯，那听起来很奇怪，对吧？我的意思是，一个激励性的例子不是一件很棒的事情吗？我是在严格的意义上说的。如果我说我想教你们向量空间或者向量，但从不教你们向量，因为没有这样的东西。有向量空间，但没有向量。然后人们说，嗯，看，你在这里。然后你可以通过把这个移到这里来把它们加起来。然后你把这个作为加法，你可以缩放它们。一旦你开始用小箭头或者手指或者别的什么，你就有一个非常特殊类型的向量空间，对吧？为什么加法是通过移动东西来实现的？你到底在说什么？

如果你给人们这种动机，几乎我们每个人在第一次看到向量时都得到了这种动机，那么你就会得到这样的想法，A，有一些对象是向量。如果我看到一个向量，我就会认出一个向量。嗯，这都不是真的。因为游戏中唯一的数学对象是向量空间。它是一个带有两个运算的集合，加法和缩放。对于这些，在这个集合和这些运算中，只有当以下八个公理成立时，我们才称整个结构为一个向量空间。是的，然后我们可以给那个集合的元素起个绰号。如果那个集合带着这两个作为伴侣，我们可以给这样一个集合的元素起个绰号叫向量，一个向量。我们的意思是从那个集合中来的一个元素。但正确的说法应该是从构成向量空间的那个集合中来的一个元素。向量空间是一个三元组 V 加点。好的。但是没有向量这样的东西。如果我在纸上写一个元组 $1,2$ ，对吧？ $1,2$ 作为一个带括号的元组。我问你，那是一个向量吗？你无法回答那个问题。你知道还有其他的可以和这个相加并且被缩放吗，用哪种加法，哪种缩放？你可能认为那很清楚是什么。不，不是。你可以用，例如，正实数做出漂亮的向量空间。它们可以被做成 R^+ 到 n 次方。有点像一个八分圆之类的。它可以被做成一个 R 向量空间，其中加法是逐点乘以分量，缩放是取分量到缩放因子的幂。那个向量空间，那个向量空间中的零，所以加法的中性元素是 $1,1,1,1,1$ 。不是 $0,0,0,0,0$ 。诸如此类。

但是如果你从这些小向量开始，你永远得不到一般的.....如果你给一个激励性的例子，你总是引入特殊情况，特殊结构，人们永远不会忘记。他们总是会以某种方式参考这些，也许是在极端情况下或者以某种方式。所以如果你不只做极端情况，为什么不给一个激励性的例子，它本质上对于任何不知道这个概念的人来说都是不可理解的，它可能更模糊。然后你给定义，但定义不是从例子中得出的。当然不是。它是一个更一般的东西。它不可能得出。为什么不做一点交换，先给定义，然后再给15个例子，非常非常不同的例子。那是一个更好的教学。因为那是我们想要谈论的对象。这是非常数学的思维。然后我向你展示各种疯狂的情况都包含在这个一般结构中。所以我们最好研究一般结构，而不是所有这些疯狂的例子。你看，所以我有执念。一个执念是没有激励性的例子。有时你开始一个主题，特别是在物理学中，它太好了。我认为不给这个激励性的例子太好了。但我总是后悔。我总是后悔。我的意思是，我可以做到。听起来很好。但最终，我总是意识到，它会给学生造成困惑。激励性的例子是魔鬼的。好的。

所以无论如何，你看，无论是谁巧妙地，就像我之前提到的我的同事，在我的另一个原则中，无论是谁巧妙地和大师般地，如果你不违反这些原则，太棒了。但这些是我的原则。我尽量不那么做。所以我想，是的，所以我想过很多这些事情。当然，有很多经验，尝试这种方式，尝试那种方式，并且不满意。最高的评判标准总是，我说的对吗，还是胡言乱语？几乎是构造出来的，激励性的例子

是胡言乱语。除非它真的来自于你之前做的事情，并且导致你不想做它，导致一个问题。不是基于之前的讲座。我做这个计算或者这个构造或者什么，所有东西都可以详细理解。然后我说，但是这里有一个问题。那激励了这节课。那会很好。那会更像是一个推导，而不是一个激励性的例子来引入一个新的想法。所以我可能有，我不知道我是否有50个这样的原则，但我对很多事情有非常强烈的看法。而且它们非常个人化。

科特·杰蒙格尔：当然。我的意思是，那是很多人问你的原因之一，嘿，我能采访你关于你如何教学吗？你不太愿意这么做。

弗雷德里克·舒勒：没错。我接受过一些采访。通常如果我自己的大学问，我不想说不。不，我曾经被介绍过。这很有趣。这很有趣。我想甚至音频，我刚刚在网上放了一个片段，我被问到这个，这些在线讲座在国际上疯狂地流行起来。他们从埃尔朗根的一个教育研究中心问我，通过制作这些视频，我是否也想推广新的在线教学媒体或类似的东西到社交媒体或类似的东西。我非常不外交地说，我说那一点也不让我感兴趣，对吧？所以，不，我不是，我不想推广。我不想做YouTube。我不想推广远程教学，学习。这些我都不想。我想做好物理。当时，他们实际上，在埃尔朗根，学生总是可以选择谁的讲座被录制。那就是网上的一些埃尔朗根讲座被大学录制的时候。所以我只是试着，正如我所说，我试着给学生一些真正有价值的东西，试着让他们尽可能地好。那是我唯一的目标。其他的事情是副作用。当然，我喜欢它。当然，我喜欢这些讲座如此受欢迎。

科特·杰蒙格尔：是的。所以，等等。我糊涂了。你不喜欢你的讲座在网上，还是你不喜欢远程教学？你是什么意思？

弗雷德里克·舒勒：不，我不喜欢.....我既不喜欢也不讨厌远程教学。不。嗯，首先，一个小轶事。网上的讲座没有一个是我自己放上去的。所以，有一个YouTube账户叫弗雷德里克·舒勒，上面有这些讲座。那不是我。有人拿了我的照片。有人拿了我的名字，下载了这些讲座，我想主要是从埃尔朗根大学下载的，然后放在YouTube上。很棒的服务。我想，好吧，是个粉丝。随便。好的。几年后，当观看量真的达到数百万，总数等等，我想，好吧，我有点害怕了。万一这个人有一天发点什么？我想那是不恰当的东西，对吧？我的意思是，可能是任何东西。而且是我的名字。然后我通过YouTube给他们写信。我从未收到回复。然后同时，突然那是一个我不认识的名字。然后又变回了我的名字。我决定，算了吧。我的意思是，我现在可以告诉YouTube这件事，然后也许他们会把讲座下架，我想，哦算了吧，但人们现在正在看它们。我不想那样。你知道，所以我也在某个时候，中间有一些商业广告。我想，好吧，有人在使用它赚钱。但我想，是的，好吧，没关系。好的，对他们好。所以我，所以这些不是我的账户。引力和光，我同意了引力和光的讲座，但其他的都是从，无论多么公开，这不是那种版权侵权或任何东西，大学的公共服务，在那里它们被录制。

不，我的意思是，看，我认为，当然，有这么多在线资源很棒。我的意思是，那是互联网的积极一面。我们都能查到的东西很棒，好吧？如果人们喜欢这些东西，而且我认为它没有错或者没有大错，那么我就把它留在上面。一切都好。但我想最终，心理学家会告诉你，你只能被塑造，孩子肯定如此，但年轻人也是，在另一个人在场的情况下，你可以在最弱的意义上，模仿他。所以，这可以追溯到高中老师，令人印象深刻的高中老师。所有这些人，没有尝试，“哦，我想像他或她一样，”但在某种程度上你模仿，你模仿自己。所以，我认为我们需要个人接触。然后，当然，在所有这些课程的辅导课上，我，当然，有辅导老师，助教，现在也是很好的人，他们自己，很好的人。我参加很多这些辅导课，我坐在那里，如果我看到学生不够投入，因为他们可能太害羞或者太嗯，我开始催促辅导老师，说，嗯，你怎么能这么说，诸如此类。那然后就把整个气氛搞得有点乱，对

吧？有时我质问学生，对吧？所以，没准备好。我说，哦，你打篮球吗？无论如何，我催促他们一点，我说，嗯，我的意思是，这里是专业的企业。我的意思是，你想成为专业人士。然后你成为专业人士。你说的“你没准备好”是什么意思？我不明白。你旁边有大生意在做吗？因为否则，我的意思是，拜托，对吧？所以有时质问人们一点，对吧？我们总是，我的意思是，好吧，我总是好意的，但有时我有点.....我试图让他们面对在那里，坐在那里，做事情，但不是认真地做意味着什么。嗯，那就根本别做。然后面对你没在做的事实，对吧？因为那能带给你什么？

所以无论如何，所以我的意思是，我大多数时候都试着友好。不，我认为我友好，但我催促人，我有时在辅导课上挑战人一点。所有这些都不在视频里，不。但这也是因为我相信是的，有一些，你看就像如果我是一个艺术教授，我会带我的学生去画廊，我会给他们看毕加索和所有其他人。我会和他们讨论这些画，然后说，这不是.....看它。首先，看它。就看它。好的？所以，有点像这样。你说，看经典力学。我的意思是，看这个。当然，为了让他们看，我必须揭示理论，对吧？我必须一步一步地走。但是，这真的是，我认为我们教的经典科目，我给他们看，怎么说，就像一个艺术家的杰作，就像一个世界，理所当然地世界闻名的艺术，世界闻名的艺术家。是的。看这个东西，这个理论，看这是多么了不起的文化成就。我从不用这些词，对吧？我只是做我所做的。我做你在视频上看到的。但本质上，我做那个。我给他们看。然后我给他们看一个理论，它是最发达的理论之一，经典力学也是。看，在我们拥有的所有理论中，最发达的理论，我怎么能期望他们以后自己创造理论，那要求很高，或者修改自由，如果我没有给他们看杰作？研究的最终产品是什么样的？如果10个天才，比如说在经典力学中，让我们说10个天才发展了它，也许是5个。10个超级天才和一千个几乎是天才的人，我认为这是天才的目的，他们不断地塑造它。你今天得到的是，无论什么，5个或10个天才和一千个几乎是天才的人的产物，他们把它塑造成这种形式，你得到了这个。这是我给你的礼物。天才的思想，你理解它。那是什么？我认为那是某种东西。我认为那是某种东西。这与，哦，我能计算这个，非常不同。不，它很棒。这是我们有幸做到的一个很棒的东西。其他的更年轻，广义相对论，量子场论研究，其他的还在发展中。但我们想创造出不像旧杰作那样的杰作，就像毕加索不像伦勃朗一样，对吧？但是新的杰作，与旧杰作并列，并且都被认为是杰作，对吧？所以那也是在理论物理学或数学中高水平教学的一部分，同样的逻辑。

但我认为你需要到场。所以那是你的问题。我，如果看，可能有一天只有很少的非常富有的人能负担得起去剩下的几所大学。我不知道这是一个反乌托邦还是乌托邦的场景。那会是最糟糕的吗？我不认为那会是最糟糕的，但从长远来看可能不会那么好。我想我们每个人都有一些火花，也许，也许。我不知道。那不是一个好的陈述。一点点。我认为每个人身上都有最微小的天才火花。每个人都应该去他能看到其他人参加讲座的地方，正如我之前所说，对吧？学生需要看到你作为老师来模仿自己。他们需要看到教室里还有很多其他人在为此挣扎。但他们也看到，所以我不是那个笨蛋，但他们也看到有些人显然轻松地通过了材料并表现出色。所以，他们说，这是可以做到的。如果你能做到，你显然很特别。但其他人也做不到，但有些人实际上做到了，我会试试。你知道吗？你需要两方面。你需要看到这是可以做到的。你需要看到。这不那么容易。我不是笨蛋，因为我还没学好。你知道吗？所有这些只有在场时才会发生。在新冠疫情期间，我们有初学者开始，我给了，我想那是一节课，那是一节辅导课，我想那是一节课。我讲课，我没看到学生。当然没有，对吧？是在线的。他们看到我的脸，我在屏幕上有一些东西。他们是初学者，对吧？效果不好。效果不好。我尽力了。我想我讲了一堂好课。但太遥远了。是，我需要看到他们的脸。他们需要看到我的。他们需要看到我的手势。他们，你知道，他们需要看到其他人在做同样的事情。我想他们主要是迷失了方向，因为他们没看到谁成功了，谁没有，或者其他成功和不成功的人。你知道，我们需要这个。所以，不，我不是在线或远程学习的支持者。但当然，它本身不是一件坏事。对

吧？但这些都并非我的意图，你知道，我很高兴其他地方的人没有，很多人给我写信，写了很多积极的东西。然后他们说，这些讲座免费在线提供很好。在我住的地方，我永远无法接触到这样的教学。好的。我相信那些写非常亲切的电子邮件的人，我很高兴。我很高兴他们从中得到这么多，不仅是快乐，也可能是未来的发展等等。但我对此没有议程。我认为科学家无论如何都不应该有议程。我认为我们，我们唯一应该做的是，是把我们的事情做好。

科特·杰蒙格尔：是的。嗯，你把你的事情做得非常好。说到杰作，你的讲座是杰作。我会把所有讲座的链接，你所有的播放列表，放在描述里。能和你说话是我的荣幸。对观众来说也是一种荣幸。观众，嗯，我很感激，我相信观众也很感激。非常感谢你，教授。

弗雷德里克·舒勒：非常感谢你，科特，邀请我。谈论这个非常愉快，因为我们确实谈论了很多我通常不谈论的事情，因为它们，你知道，它们不是科学。它们是关于科学的观点和看法。我认为谈论这个也非常重要。我真的，非常喜欢这个。我喜欢你的播客。我看了很多集。所以我想这个也会成为一个杰作。我想你在某些，某些地方说过这个，你喜欢至少偶尔深入技术细节，或者至少是伪技术细节，对于那些更了解的人，那些了解事情真实背景的人。

科特·杰蒙格尔：非常感谢。谢谢你。

弗雷德里克·舒勒：是的。在某些部分，我认为它就像是无意中听到办公室里的两个同事在门开着的情况下交谈。我认为你的播客在这方面做得特别好。

广告时间：大家好，我是科特。如果你想从《万物理理论》中获得更多内容和最佳收听体验，请务必查看我的 Substack，网址是 CurtJaimungal.org。一些顶级福利是，每周你都可以提前获得全新的剧集。你还可以获得专为我们会员准备的额外书面内容。那是 C-U-R-T-J-A-I-M-U-N-G。然后他们会进入同一个页面。再说一遍，我喜欢看到我的学生，我喜欢在谷歌上看到我的名字和 Substack 这个词。自从我开始那个 Substack 以来，它不知何故已经成为科学类别的第二名。现在，对于那些不熟悉的人来说，Substack 就像一个时事通讯，一个格式精美的时事通讯。没有垃圾邮件。这是关注这个频道其他任何地方都没有的内容的最佳场所。它不在 YouTube 上。它不在 Patreon 上。它是 Substack 独有的。它是免费的。如果你愿意，有办法在 Substack 上支持我，如果你这样做，你会得到特殊的奖励。有几个人问我，比如，“嘿，科特，你和理论物理学、哲学、意识领域的这么多人交谈过。你有什么想法，伙计？”嗯，虽然我在采访中保持中立，但这个 Substack 是一个窥探我对这些主题的当前思考的方式。这是直接支持我的完美方式。CurtJaimungal.org 或者在谷歌上搜索 CurtJaimungal.org Substack。哦，我收到了几条来自教授和研究人员的消息、电子邮件和评论，说他们向他们的学生推荐《万物理理论》。那太棒了。如果你是教授或讲师或别的什么，并且有学生或你的朋友可以从中受益的特别出色的剧集，请务必分享。当然，非常感谢我们的广告赞助商《经济学人》。访问 economist.com/TOE，T-O-E，即可获得他们年度订阅的大幅折扣。我订阅了《经济学人》，你也会喜欢的。TOE 实际上是他们目前合作的唯一播客，所以这对我来说是巨大的荣誉。对你来说，你将获得独家折扣。那是 economist.com/TOE，T-O-E。最后，你应该知道这个播客在 iTunes 上。它在 Spotify 上。它在所有音频平台上。你所要做的就是输入《万物理理论》，你就会找到它。我知道我的姓很复杂。所以也许你不想输入 Jaimungal，但你可以输入《万物理理论》，你就会找到它。我个人从重看讲座和播客中获益。我也读，我在评论中读到

TOE 的听众也从重播中获益。那么，不如你在 iTunes、Spotify、Google Podcasts 等平台上重听，无论你用什麼播客 catcher，我都在那里陪着你。谢谢你的收听。