



夸克还可以继续拆开吗？

David Gross*

加州大学圣芭芭拉分校, 卡弗里理论物理研究所 (美国, 加利福尼亚州, 圣芭芭拉)

少年审稿人



EDOARDO

年龄: 8



ILYAN

年龄: 8



MATTIA

年龄: 9



WHITCHURCH

小学

年龄: 10-11

理论物理学 (Theoretical physics)

物理学的一个分支, 使用数学方程来构建描述世界的模型。

在粒子物理中, 我们试图揭示宇宙是由什么构成的。我们研究物质的基本属性, 描述构成物质的基本粒子, 并试图理解各种粒子是如何协同构建出这个世界的。在这篇文章中, 我们将深入探讨原子的核心——物质的构成单元 (building blocks)——并尝试回答一些关于宇宙的有趣的基本问题, 如: “组成原子核的质子和中子是由什么构成的”, 以及, “这些构成单元是否可以被分解成更小的粒子”。

戴维·格罗斯教授因发现强相互作用理论中的渐近自由, 与休·戴维·波利策 (Hugh David Politzer) 教授和弗兰克·维尔切克 (Frank Wilczek) 教授共同荣获 2004 年诺贝尔物理学奖。

理论物理——我的中学挚爱

我从小就对科学充满好奇。在中学时, 我非常喜欢阅读科普书籍, 如乔治·伽莫夫的《从一到无穷大》, 这本书探讨了数学和物理中的概念。在我 13 岁生日时, 我收到了一本非常特别的书, 上面有阿尔伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein) 的亲笔签名。这本书是爱因斯坦的合作者利奥波德·英费尔德 (Leopold Infeld) 的一位亲戚送给我的, 他们两人共同撰写了这本《物理学的进化》。就在那时, 我爱上了理论物理。我对利用数学和思维来理解宇宙的方式很着迷。此后, 我就想成为一名理论物理学

家，后来我的确做到了。多年来，我对理论物理的热爱越发成熟，但基本上与十几岁时感受到的那份热爱无异。我仍然热衷于探索我们宇宙的基本谜题，其中之一是：宇宙是由什么构成的？

利用粒子物理研究真正重要的问题

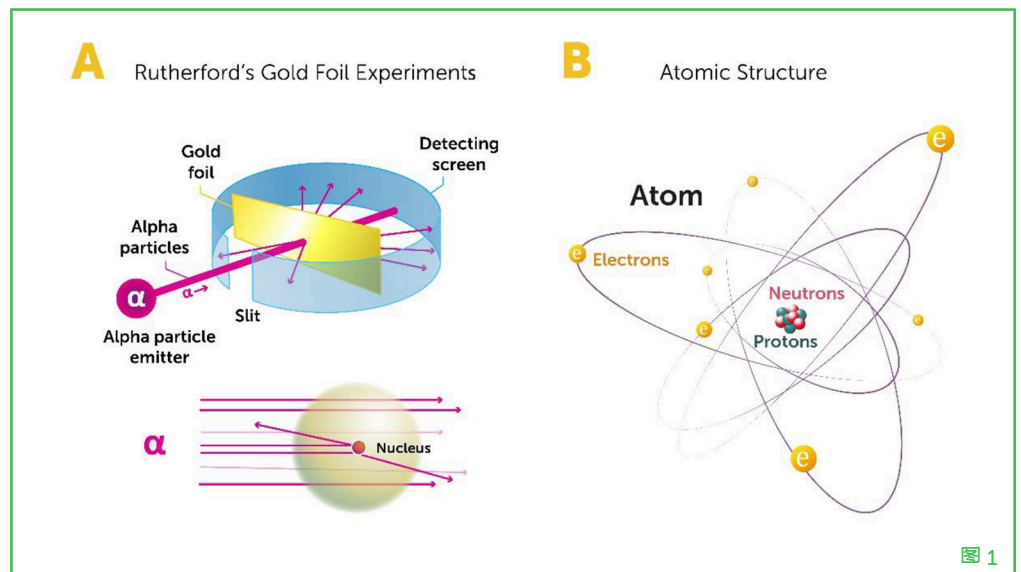
物质究竟是什么？它是由什么构成的？这些是我们在粒子物理学中试图解决的问题。众所周知，所有的物质——从恒星到我们的身体——都是由原子组成的，而原子本身又是由质子、中子和电子组成的。直到 20 世纪初，人们还不了解原子的结构。1908 年至 1913 年间，新西兰物理学家欧内斯特·卢瑟福 (Ernest Rutherford) 和他的学生进行了一系列的实验来探索原子的结构 [1]。他们采用了名为阿尔法粒子 (α) 的微小粒子，并将它们撞击到金箔中的原子上。一些 α 粒子毫无阻碍地穿过了金箔 (点击[这里](#)和[这里](#)阅读更多关于 Ernest Rutherford 和这个实验的信息)，而另一些粒子似乎撞到了坚硬的物体并朝各个方向散开 (图 1A)。这个著名实验的结果表明，原子内部的大部分都是空的，大部分质量和所有的正电荷都集中在其中心一个非常小的体积中，称为原子核。这是一个伟大的发现，标志着粒子物理学的开端。

粒子物理学 (Particle physics)

物理学的一个分支，主要研究物质的组成部分。

图 1

原子结构的早期研究。
(A) 卢瑟福 1919 年的金箔实验揭示了原子中心的固态原子核。当使用 α 粒子探测金箔中的原子时，一些粒子直接穿过，而另一些则和某些物质碰撞并被反射。这些障碍物最终被证实是原子核。
(B) 1932 年的研究表明，原子具有类似太阳系的结构，其中电子围绕原子核运行。



几年后，卢瑟福发现原子的正电荷是由被称为质子的粒子产生的，而且原子中的质子数量等于围绕原子核的电子数量 [2]。之后，人们花了十多年的时间才朝着了解原子核的结构迈出了下一步。1932 年，著名物理学家詹姆斯·查德威克 (James Chadwick) 发现原子核包含质子和中子 [3]。查德威克的发现完善了我们对经典的“太阳系”原子模型的基本理解，该模型中电子绕着原子核轨道旋转 (图 1B)。但质子和中子是由什么构成的呢？

加速器加速我们的理解

自卢瑟福的开创性金箔实验以来，粒子物理学家已经做了许多类似的实验，将一个粒子（称为探测粒子）轰击另一个粒子（称为目标粒子）上，从而研究目标粒子的属性。探测粒子以不同角度、不同能量发射出，我们只需测量粒子（例如电子）离开目标粒子（例如质子）的散射信息。这些信息能帮助我们推断出目标粒子的结构。为了进一步理解测量过程，可以类比一下：想象一个挤满人的房间。你想知道人们在房间里的什么位置，但你不能进入房间。你能做的就是向房间里扔球。你扔一个球进去，什么也没发生。接着你以稍微不同的角度再扔一个球，听到一声“哎哟！”，这样一来你就知道这个方向有人。如果你以不同的速度向不同的方向扔很多球，你最终就会知道房间里的人是如何分布的。当我们将一个粒子散射到另一个粒子上时，同样的原理也适用——我们从探测粒子的散射反馈中了解到目标粒子的结构。

亚原子粒子 (Subatomic particles)

构成原子的粒子，因此尺寸比原子小。

加速器 (Accelerators)

将粒子加速到非常高的速度并与目标粒子碰撞的装置，旨在研究目标粒子的结构。

为了探测原子核的结构，卢瑟福用 α 粒子对其进行了散射，这是他在实验室里就可以做到的。如果我们想更深入地了解物质，探测像质子和中子这样的亚原子粒子的结构，或者我们想发现新的亚原子粒子，我们必须使用比卢瑟福使用的能量高得多的探测粒子。原因是亚原子粒子通过强相互作用力结合在一起，所以我们必须使用巨大的能量来将它们分开，来研究它们的结构。为此，我们使用加速器——这些设备可以使探测粒子加速到非常高的速度。

20 世纪 60 年代和 70 年代，我的科学生涯开始时，新的加速器正在被建造和使用。对我的职业生涯产生影响的两个加速器分别是位于加州大学伯克利分校（我是该校的研究生）的 Bevatron 加速器和位于斯坦福大学的斯坦福直线加速器中心（SLAC）的直线加速器（图 2）。与至今最强大的加速器（特别是 CERN 的大型强子对撞机）相比，Bevatron 和 SLAC 无法将探测粒子加速到非常高的速度。事实上，它们只能产生大约 6 吉（1 GeV=10 亿电子伏特；1 电子伏特等于一个电子被 1 伏特的电压加速时所具有的能量）的电子伏特，大约是现在加速器能量的千分之一。然而在当时，这些加速器足够强大，科学家们每周都能发现新的粒子。这是粒子物理学中极其激动人心的时期，我知道我想要参与其中。尽管实验方面正蓬勃发展，但在理论方面，我们对亚原子粒子的结构和决定其行为的相互作用知之甚少。因此，我选择了专注于一个非常基本的问题：质子是由什么构成的？

质子的构造

在 SLAC 的直线加速器，采用电子这种简单的点粒子（即集中在极小的体积中的粒子）来探测质子的结构。当时还没人知道质子是由什么构成的。一种假设是，质子和电子一样都是点粒子，没有更小的构成单元。另一种假设则是质子由均匀分布的未知物质组成。令人惊讶的是，SLAC 加速器的实验结果并不符合这两种假设，但似乎表明质子是由其他点粒

图 2

斯坦福大学的 SLAC 直线加速器。SLAC 加速器 (粉红色框出部分) 建于 1966 年。长 2 英里 (3.2 公里), 能够使电子加速到 50 吉电子伏特的能量。

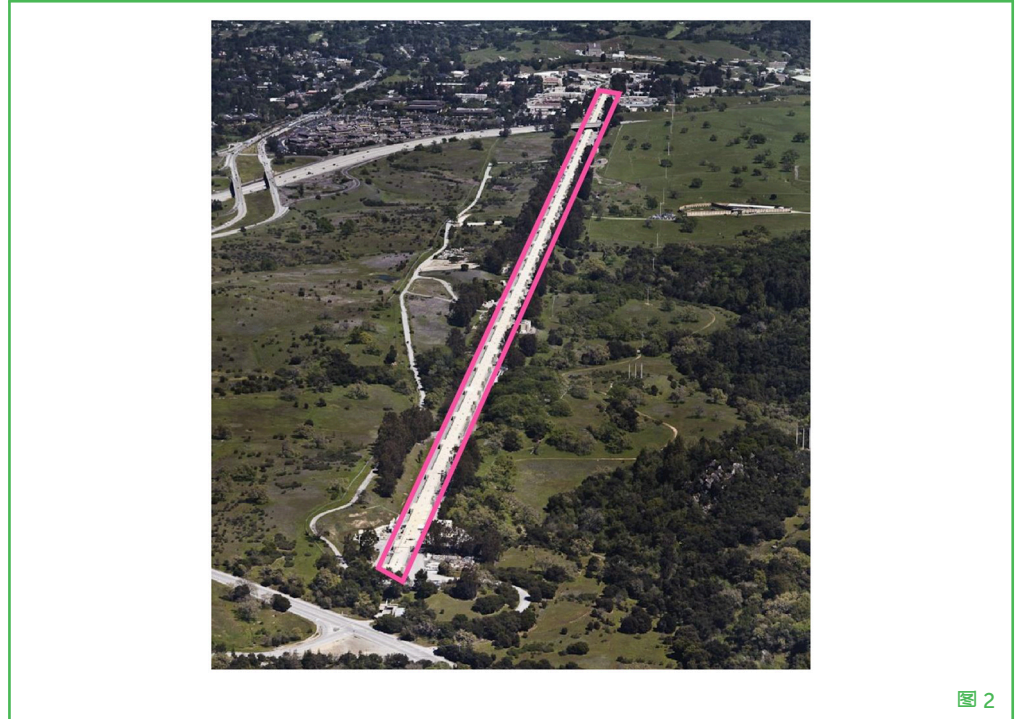


图 2

子组成的。然而, 没有人见过所谓构成质子的点粒子, 无论我们多么努力地用探测粒子撞击质子, 都没有任何点粒子射出 (相比之下, 将原子撞击在一起时, 它们的电子会四散飞出)。此外, 探测结果似乎表明质子中的点粒子在四处弹跳, 就好像它们之间没有任何作用力。这非常奇怪, 因为我们知道点粒子会被紧紧地束缚在质子内——但我们无法解释是什么将它们束缚在那里。

在我尝试解释这些令人惊讶的现象时, 我借助了两个已有的理论。一个理论由物理学家默里·盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 和乔治·茨威格 (George Zweig) 在 20 世纪 60 年代初提出 [4, 5]。盖尔曼和茨威格发现, 如果假设强相互作用的亚原子粒子是由三种更基本的粒子 (盖尔曼称之为夸克, 图 3A) 组成的, 这些亚原子粒子的测量数据就可以通过数学解释。起初, 这个假设被认为只是一个与现实无关的数学“技巧”。但是, 随着时间的推移, 这个模型的一些预测被证明是相当准确的, 再加上加速器实验的新结果, 夸克的想法似乎值得更深入地探索。我使用的另一个理论是麦克斯韦电磁学理论的推广。麦克斯韦理论基于单一类型电荷 (称为电荷) 的存在来解释电力和磁力。

将麦克斯韦理论进行推广, 就可以引入其他种类的“荷”来解释其他相互作用。物理学中有四种基本相互作用: 电磁力 (产生电力和磁力)、弱相互作用力 (产生放射性现象; 点击[这里](#)了解更多关于放射性的知识)、强相互作用力 (将原子核中的质子和中子结合在一起)、引力 (让质量较大的物体互相吸引)。我尝试解释将质子和中子结合在一起的强相互作用力。

放射性 (Radioactivity)

非稳态原子发射粒子和/或能量的过程。

强相互作用力 (强力) (Strong force)

将原子核中的质子和中子结合起来的力。

图 3

研究亚原子粒子。(A) 在 20 世纪 60 年代，物理学家默里·盖尔曼和乔治·茨威格提出，像质子和中子这样的亚原子粒子是由一种称为夸克的基本粒子构成的。夸克被称为强相互作用粒子，因为它们受到强力的束缚。(B) 在 20 世纪 70 年代，我和我的同事发现了夸克行为的数学解释——这种现象称为渐近自由。渐近自由描述了夸克之间的相互作用如何随着夸克靠近而变得更弱，而随着夸克远离而变得更强。这解释了为什么夸克会“锁定”在质子内部，这种现象被称为夸克禁闭。

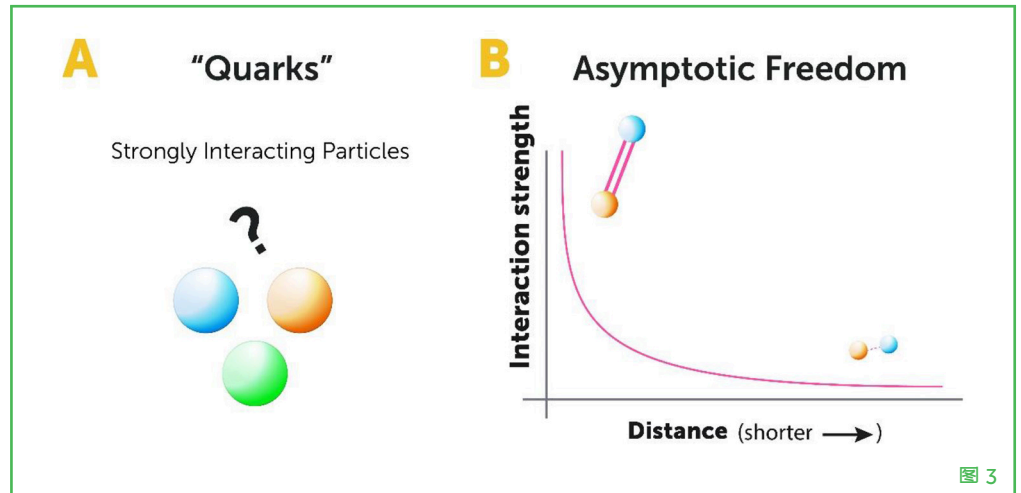


图 3

基于这两个理论，在进行了一些复杂的数学计算之后，我发展出一个新的理论，叫做量子色动力学 (Quantum Chromodynamics, QCD)。量子色动力学解释了夸克的性质以及作用在它们上的力。在量子色动力学中，存在三种类型的“荷” (经典电磁学中只有一种类型的“荷”——电荷)，以及在它们之间作用的八种类型的力。量子色动力学的最大成就之一是它能够解释夸克在质子内部表现得像自由粒子这一令人惊讶的发现。我和我的同事们找到了一个数学解释，说明了为什么夸克之间作用的强力随着夸克靠得越来越远而变得越来越弱，这种现象称为渐近自由 [6, 7] (图 3B)。渐近自由的发现导致了粒子物理学的重大进展，因此，我与休·大卫·波利策 (Hugh David Politzer) 和弗兰克·维尔切克 (Frank Wilczek) 共同获得了 2004 年的诺贝尔物理学奖。渐近自由是一个令人惊讶的发现，因为自然界中的其他作用力会在粒子相互远离时变弱。渐近自由也解释了我们为什么看不到自由夸克——我们试图将它们分开的越远，把它们拉回到一起的力就越强。这意味着夸克会“锁定”在质子内部——这种现象被称为禁闭。

渐近自由 (Asymptotic freedom)

一种物理现象，夸克在相距较近时就像自由粒子一样，但随着距离的增加而反对开始互相吸引。

禁闭 (Confinement)

夸克在质子 (或其他粒子) 内保持“锁定”的属性。

强子 (Hadrons)

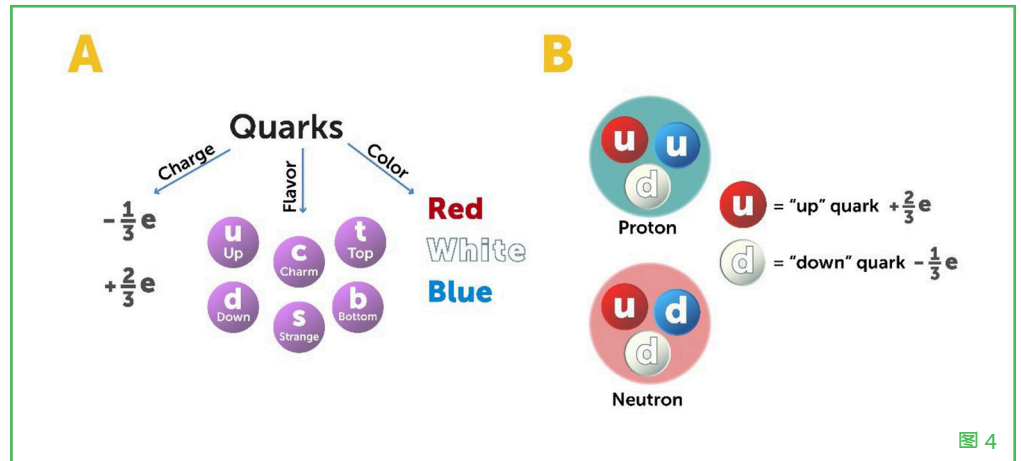
由夸克构成并通过强力相互作用的粒子。

古怪的夸克: 奇妙的物质构成单元

我们目前认为，夸克是组成质子、中子以及一整类被称为强子 (强相互作用粒子) 的点粒子。正如我们所看到的，夸克被限制在它们构成的粒子内部，它们就像小球在大球内部弹跳一样。夸克有三种类型的荷：电荷、味荷 (flavor) 和色荷 (color)。就电荷而言，夸克只能携带电子或质子的部分电荷：要么是 $-1/3$ (电子电荷的 $1/3$) 或 $+2/3$ (质子电荷的 $2/3$)。夸克有六种味荷 (六种类型)，我们称之为上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、顶夸克和底夸克 (图 4A)。夸克的味与负责放射性的弱力有关。质子由两个上夸克和一个下夸克组成；中子由两个下夸克和一个上夸克组成 (图 4B)。除了电荷、味荷，夸克还有三种色荷：红、白、蓝。色是将夸克结合在一起的强相互作用力的来源，这也是“色动力学”名称的来源——“chromos”在希腊语中的意思是“颜色”。

图 4

夸克种类 (A) 夸克有好几种电荷、味荷和色荷。它们的电荷是电子或质子电荷的分数倍。它们具有三种色中的一种，这是将它们结合在一起在一起的强相互作用力的来源，以及与弱力相关的六种味之一。(B) 质子由两个上夸克和一个下夸克组成，而中子由两个下夸克和一个上夸克组成。



读到这里，你可能会想知道夸克本身是否是由更小的粒子组成的。在物理学史上，在寻找物质的构成单元的过程中，我们一步步地发现了更小的粒子：原子是由电子和原子核组成的，原子核是由质子和中子组成的，质子和中子是由夸克组成的……也许夸克也是由其他东西组成的？

到目前为止，还没有实验证据表明夸克是由更小的粒子组成的。为了获得夸克确实不可分割的确凿实验证据，我们的加速器需要极高的能量——达到 100 万亿万亿电子伏特的数量级，这大约是我们目前可使用能量的 1 万亿倍。这非常困难且成本高昂，而且实现这一目标的技术路线仍不明确。从理论方面来说，我们可以将我们目前对自然基本力的知识外推到非常短的距离。当这样做时，我们发现在极短的距离上，引力应该起到与强力相当的重要作用。在目前的理论框架内，我们不了解引力与强力之间的相互作用，所以在非常短的距离上可能会发生一些意想不到的事情。实验表明，我们的理论中仍然缺少一些东西，对夸克的研究可能会帮助我们补全目前在了解宇宙基本组成单元方面存在的一些空缺。

弦论：另一种研究物质的视角

弦论 (String theory)

一种物理理论，用以不同方式振动的弦来描述自然的基本粒子。

许多科学家 (包括我自己) 已经研究了几十年的弦论，是另一个有趣的理论，可以为我们提供了一种理解宇宙的新方法。弦论在数学上极为复杂，其细节超出了本文所能描述的范围。但从原则上讲，弦论是试图理解包括夸克在内的所有基本粒子如何由一种称为弦的物体构成的。这根弦可以许多不同的方式振动，每种振动模式都对应一种特定的基本粒子。例如，如果弦以某一特定模式振动，我们得到一个夸克；如果它以另一种模式振动，我们得到一个电子，以此类推 (图 5)。如果弦论是正确的，那么夸克和其他基本粒子不包含更小的亚粒子，而是由振动的弦构成的。通过实验手段验证弦理论将需要比我们目前拥有的更强大的能量，因此可能需要一段时间，但我认为这是一个值得期待的令人兴奋的发展。

图 5

弦论。(A) 弦论指出所有基本粒子都是由称为“弦”的物体组成的。(B) 当弦以不同的方式振动时，就产生了特定的粒子。目前还没有技术来测试弦论的正确性，但希望我们将来能够做到这一点。

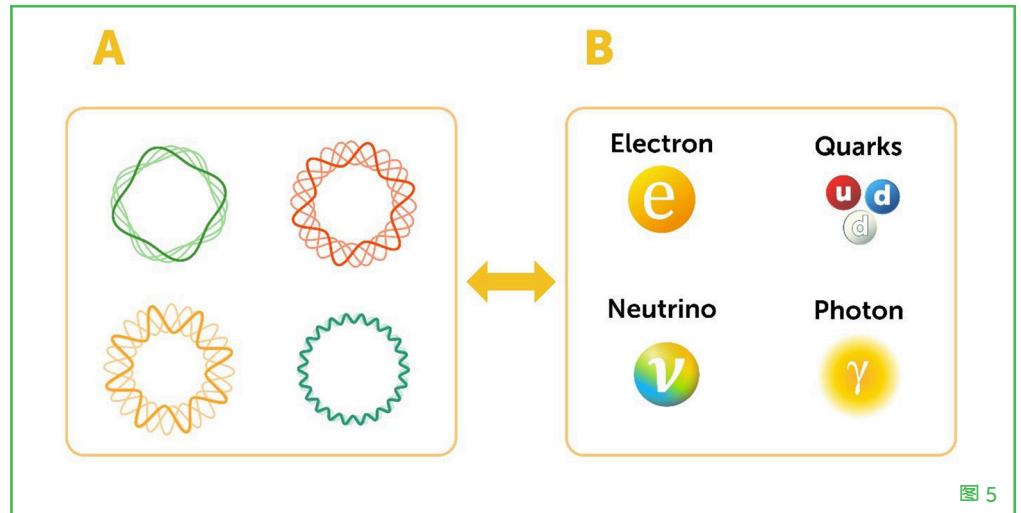


图 5

给年轻人的建议

在物理学乃至所有的科学领域，对于科学家来说，创造性是非常重要的。遗憾的是，我们不知道如何教导人们发挥创造力，但我们可以充当发挥创造力的榜样，成为鼓舞人心的导师。学生们所能做的就是观察有创造力和成功的人是如何工作的，并学习他们的“技巧”。我将我的学生视为同事，并喜欢与他们作为平等的贡献者一起工作。这对于一些学生来说可能是个挑战，但另一些学生在这种关系中蓬勃发展。弗兰克·维尔切克教授是我的第一个正式学生，他因我们在渐近自由方面的共同工作而与我一起获得了诺贝尔奖——他是一个因受到平等对待而蓬勃发展的学生的一个很好的例子。

要成为优秀的科学家，尽快开始做研究也很重要。研究与上课和学习完全不同。在物理课堂上，习题集是我们帮助学生做好研究的最佳方法。我们给学生很多问题，他们必须解决这些问题，并通常会在此过程中获得见解。但在课堂上，即使是最好的问题也是编出来的。相比之下，研究是基于真实的、尚未解决的问题，而且没有人事先知道如何解决。研究中最大的挑战是提出正确的问题。在你真正解决一个科学问题之前，你首先要确保这个问题是一个好问题（图 6）。提出好的问题也是我们无法直接教授的一种技能——我们只能提供例子和展示富有成效的思考方式。一旦你设法提出一个好问题，你可能无法立即回答它，但至少你可以朝答案的方向努力。

在我看来，成为一名科学家可以带来幸福生活的原因有很多。一方面，社会普遍尊重成为科学家所需的才能，因为科学对我们的生活至关重要。因此，科学让你既能得到社会的支持和尊重，又能谋生，这是一种极大的乐趣。一个能将娱乐、激情和兴趣结合在一起的工作真的很棒。成为科学家的另一个益处是，你属于一个全球的、国际性的组织，里面的人有着和你相同的热情和兴趣。你可以去世界上的任何地方，找到对

图 6

给年轻人的建议：做好研究所需的最重要技能之一是提出好的研究问题。



同样的话题感兴趣的人，并与他们进行有趣的讨论。科学是一种你可以选择加入的家庭。

我认为人们应该做他们喜欢做的事。不一定是科学，它可以是任何事情。如果你能用你真正喜欢的方式度过你的一生，那你就是非常幸运的。这是我对如何决定生活方向的最好建议——找出你喜欢的事情和你擅长的事情。然后，要有雄心壮志，努力尝试并愿意失败。如果你选择了一条你喜欢的道路，你所获得的喜悦是值得冒失败的风险的。

致谢

感谢诺亚·塞格夫 (Noa Segev) 作为采访人以及本文的共同作者，并感谢亚历克斯·伯恩斯坦 (Alex Bernstein) 提供的数据。

感谢“赛先生”公众号及其译者赵金瑜、陈晓雪对本文中文翻译的贡献。

扩展阅读

1. [Quantum chromodynamics - David Gross.](#)
2. [Quantum Chromodynamics \(QCD\) - Professor Dave Explains.](#)

参考文献

1. Rutherford, E. 1911. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Lond. Edinburgh Dublin Philos. Magaz. J. Sci.* 21:669–88. doi: 10.1080/14786440508637080

2. Rutherford, E. 2010. Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen. *Philos. Magaz.* 90:31–7. doi: 10.1017/CBO9780511707179.010
3. Chadwick, J. 1932. The existence of a neutron. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, Contain. Papers Math. Phys. Charact.* 136:692–708. doi: 10.1098/rspa.1932.0112
4. Gell-Mann, M. 1961. *The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry. Synchrotron Laboratory Report CTSL-20.* California Institute of Technology. doi: 10.2172/4008239
5. Zweig, G. 1964. *An SU_3 Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking (No. CERN-TH-412).* CM-P00042884.
6. Gross, D. J., and Wilczek, F. 1973. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. *Phys. Rev. Lett.* 30:1343. doi: 10.1103/PhysRevLett.30.1343
7. Gross, D. J., and Wilczek, F. 1973. Asymptotically free gauge theories. I. *Phys. Rev. D* 8:3633. doi: 10.1103/PhysRevD.8.3633

线上发布: 2024 年 12 月 31 日

编辑: [Idan Segev](#)

科学导师: [Matteo Lorenzini](#) 和 [Chris North](#)

引用: Gross D (2024) 夸克还可以继续拆开吗? *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2023.1080918-zh

英文原文: Gross D (2023) The Quirky Lives of Quarks: A Close Look Into Matter. *Front. Young Minds* 11:1080918. doi: 10.3389/frym.2023.1080918

利益冲突声明: 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2023 © 2024 Gross. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有者, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

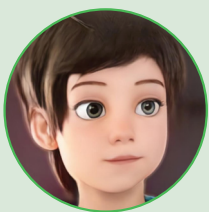
少年审稿人

EDOARDO, 年龄: 8 岁

大家好, 我叫 Edoardo, 我非常喜欢宠物小精灵。我今年 8 岁, 住在罗马附近的 Monte Porzio Catone, 我有一个非常可爱的小妹妹。我对星座很感兴趣, 特别是射手座, 因为那是我的星座。我很喜欢跳跃、攀爬和奔跑, 所以我练习跑酷。

ILYAN, 年龄: 8 岁

大家好, 我叫 Ilyan, 我今年 8 岁, 来自离罗马很近的小镇 Borghesiana。我的学校是 GermogliAmo。我喜欢踢足球、踢踏舞、弹钢琴和唱歌。我也喜欢礼物和惊喜。我最喜欢的动物是大猩猩。我的好朋友有 Edoardo、Yuri、Leonardo 和 Flavio。





MATTIA, 年龄: 9 岁

大家好, 我叫 Mattia, 我喜欢滑板、篮球和画漫画。我觉得如果科学文章用漫画气泡写会更有趣。也许有一天我会成为一名科学漫画家!



WHITCHURCH 小学, 年龄: 10-11 岁

我们是一组来自威尔士加的夫的 16 名六年级学生, 热爱探索周围的世界。我们很喜欢在这个项目中学习各种科学, 发现前沿的知识, 并且我们学到了很多新词汇! 这些经历对于我们升入高中非常有价值!

作者



DAVID GROSS

大卫·格罗斯教授是一位美国物理学家。格罗斯教授在以色列希伯来大学获得物理学和数学学士学位。他在加利福尼亚大学伯克利分校获得物理学博士学位, 师从杰弗里·丘 (Geoffrey Chew) 研究强相互作用。1966 年毕业后, 格罗斯教授加入了哈佛大学研究员协会, 并于 1969 年成为普林斯顿大学的助理教授, 在此工作了 27 年。在普林斯顿, 格罗斯教授与他的第一位研究生弗兰克·威尔切克 (Frank Wilczek) 一起工作, 1973 年, 他们发现了渐近自由。这一发现推动了量子色动力学理论的发展, 后来格罗斯和威尔切克获得了 2004 年诺贝尔物理学奖。1984 年, 格罗斯教授开始研究弦理论, 这也是他此后的主要研究方向。在普林斯顿大学工作多年后, 格罗斯教授来到加州大学圣巴巴拉分校卡弗里理论物理研究所, 并 1997 年至 2012 年担任所长。格罗斯教授与第一任妻子舒拉米丝·托夫 (Shulamith Toaff) 育有两个孩子, 分别是阿里拉·格罗斯 (Ariela Gross) 和埃莉舍娃·格罗斯 (Elisheva Gross), 还有两个孙子。目前, 他与第二任妻子杰奎琳·萨瓦尼 (Jacquelyn Savani) 生活在一起, 并育有继女米兰达·萨瓦尼 (Miranda Savani)。*gross@kitp.ucsb.edu