



## News &amp; Highlights

## 核爆方案能否用于行星防御？

Chris Palmer

Senior Technology Writer

2024年9月底发表在《自然·物理学》期刊上的一篇报告[1]中，桑迪亚国家实验室（Sandia National Laboratories，位于美国新墨西哥州阿尔伯克基市）的科学家及工程师团队通过实验证实，核爆产生的X射线脉冲强度足以改变一颗朝地球袭来的大型小行星的运动轨迹。这项实验表明，这一经典的科幻设定或许并非完全虚构。不过，能否将实验室成果按比例放大为现实世界中有效且安全的太空防御装置，目前仍未可知。该方案还将挑战长期以来禁止向太空发射核武器的国际禁令[2]。

太阳系中遍布大小不一的小行星和流星体（流星体通常指直径小于1 m的小行星碎片），而偶然的引力碰撞会将这些太空岩石抛向地球（图1）。幸运的是，这类天体大多体积较小，会在大气层中燃烧殆尽，形成我们所见的流星或流星雨；而那些能抵达地球表面的流星体，则被称为陨石。值得庆幸的是，小行星撞击地球的概率非常低，但一旦发生，其威力不容小觑。距今6600万年前，一颗直径约10~15 km的小行星撞击地球，据称这次撞击导致当时四分之三的动物灭绝，其中就包括恐龙[3]。

人类在地球上的生存最终可能取决于能否阻止下一场小行星撞击。目前，动能偏转技术是行星防御中最可行的方案，并已在太空中针对真实小行星进行了测试。2022年，美国国家航空航天局（NASA）开展的“双小行星重定向测试”（Double Asteroid Redirection Test, DART）任务验证，通过将是一个非常规的、面包车大小的金属与电子设备组合体撞向小行星，成功改变了这颗在太空中高速飞行的



图1. 如以上概念图所示，绝大多数与地球直接相撞的小行星体积较小，会无害地在大气层中燃烧殆尽。为应对那些体积庞大、足以撞击地表并引发巨大灾难的具有潜在威胁的小行星，研究人员正致力于通过动能撞击器与核爆方式，使它们偏离其危险的运行轨道。图片来源：Alonso-brosmann/Ufon.com（公共领域）。

中型小行星的轨迹[4]。尽管科学家发现，这次撞击改变了这颗直径约160 m的小行星Dimorphos的轨道，但面对更大的天体时，可能需要多次DART式撞击——每次撞击都让小行星略微偏离轨道。不过，若面对体积更大的太空岩石，或是发现小行星时距离其预计撞击地球的时间已不足10年，那么基于能量（如借助核爆炸的威力）的偏转方案或许会是更有效的选择。

理论上，使用核武器摧毁小行星比DART这类动能撞击任务更具优势，而其最大优势在于能量密度——在同等质量下，核爆炸产生的能量远超人类其他任何技术。该报告的第一作者、桑迪亚国家实验室的物理学家Nathan Moore表示：“尽管须考虑诸多因素，但小行星的尺寸和

预警时间至关重要。若目标体积较小或距离撞击地球还有数十年时间，那么像DART这样的动能撞击器即可奏效。反之，面对那些体积庞大或是预警时间极短、突然出现在地球附近的天体，核爆炸将是唯一的应对之策。”

然而，与1998年上映的好莱坞电影《世界末日》(Armageddon)中演员Bruce Willis等所饰演的角色不同，你不能随意地用核武器来摧毁一颗小行星。若将核装置直接在小行星表面(或内部)引爆，可能会导致小行星破裂而不是使其偏转轨道，这将导致无数依然具有杀伤力的碎片如陨石雨般坠向地球。更安全的策略是采用“远距离核爆炸”，即在对地球有威胁的小行星附近一定距离处引爆核弹。理论上，这种方式更有可能推动小行星整体偏转，而非将其击碎。Moore表示：“通过远距离核爆实现小行星偏转时，作用力会作用在更大的区域，这样既能给小行星足够的推力，又不会将其炸碎。但这种方式的实际效果如何，目前仍是一个待解的问题。”

这个悬而未决的问题或许很难找到答案，因为如果像执行DART任务一样在太空中部署核爆炸的任务，会违反1967年的《外层空间条约》[2]。这类试验还面临发射过程中发生灾难性事故、放射性物质可能扩散到地球大气层中的风险。因此，人类或许永远无法在太空中开展试验，来研究核爆对真实小行星的影响。英国北爱尔兰贝尔法斯特女王大学天文学教授、小行星与彗星科学专家Alan Fitzsimmons表示：“尽管有人主张此举具有正当的理由，但核爆炸物的使用本身必须受到极为严格的管控。”

由于这些限制，该领域的大多数研究都通过计算机模拟完成。桑迪亚国家实验室团队设计了一个能模拟在小行星附近进行核爆炸的实验。该实验室的科学家此前已采用类似方法，成功模拟出核爆冲击波——由爆炸附近气体急剧膨胀形成——的动量，进而将其用于推动小行星[5]。但根据桑迪亚国家实验室的最新研究结果显示，核爆产生的X射线所释放的巨大能量，在改变小行星运行轨迹方面发挥的作用，要远超冲击波本身所产生的影响[1]。

Moore及其团队在实验中使用了桑迪亚国家实验室的Z脉冲功率设施——全球最大的脉冲功率设备。该设备发射的电脉冲强度是闪电的1000倍，释放的X射线能量可高达22 MJ[6]。在实验装置的一端，研究团队用13  $\mu\text{m}$ 厚的金属薄片，在真空环境中悬浮了12 mm宽的石英或熔融石英——这两种物质均为小行星中常见的矿物形态。在实验装置的另一端，他们用强电脉冲轰击一团氩气，使气体内爆并转化为温度达数百万摄氏度的带电等离子体。等离子体释放的X射线(其能量爆发近似于核爆炸)会切断金属薄片，让“模拟小行星”进入自由落体状态。与以往

目标静止的实验不同，此次实验中目标处于自由落体状态，这使研究人员能在模拟太空真空的环境中观察X射线对天体轨迹的实际影响[1]。

这项实验仅持续20  $\mu\text{s}$ ，结果显示石英与熔融石英样本的速度分别达到了69.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 与70.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  [1]。X射线本身会给目标施加一定动量，但主要推力源自X射线对模拟小行星表面的加热作用。高温仅使得每个样本表面约4%的物质发生汽化，但由于气体会从样本表面向外扩散，因此这一过程足以产生反向的推进力[1]。这种推进效应与DART撞击小行星Dimorphos时的情况类似，航天器撞击产生的飞溅喷射物为小行星提供的推进力远超撞击本身产生的效果[4]。Moore表示：“通过让模拟的小行星在真空中自由运动来复现外太空的真实条件，我们不仅能直接验证这一概念，还能传递比此前研究预测多30%至50%的动量。”

桑迪亚国家实验室团队正计划采用铁镍混合物进行后续实验，以更精确地模拟小行星的真实构成[6]。劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL，位于美国加利福尼亚州利弗莫尔市)的科学家Mary Burkey表示，其他研究团队也正依托该实验室的国家点火装置(NIF)与罗切斯特大学激光能量学实验室(Laboratory for Laser Energetics，位于美国纽约州罗切斯特)的Omega激光器开展类似物理实验。罗切斯特大学团队将研究不同能量、不同引爆距离和不同样本成分下，远距离核爆炸产生的影响。Burkey说：“通过更全面地探索参数空间，我们能更全面地理解核爆的不同效果，也更便于与此前的模拟结果进行比较评估。”Burkey参与了NIF的研究工作，并作为第一作者于2023年发表论文，报道了针对各种初始条件开展的计算机模拟结果[7]。

桑迪亚国家实验室团队的计算机建模结果表明，核爆偏转策略的有效规模远大于实验室测试水平。他们计算得出，若将1枚百万吨级的核弹在距离小行星表面约2 km处引爆，产生的力量足以成功使直径达4.4 km的小行星的运行轨迹发生偏转[1]。不过，Burkey对这一结论表示怀疑。她指出：“我的模拟结果与他们模型得出的结论并不一致。当能量级持续提升时，小行星岩石表层吸收能量的能力会下降——绝大部分能量会重新辐射至太空。”

在Burkey、Moore及其他研究人员持续探索核动力偏转技术细节的同时，天文学家正全力推进对地球构成威胁的小行星的精准识别与追踪工作。在2023年发表的一项研究[8]中，科罗拉多大学(美国加利福尼亚州博尔德)与加州理工学院(美国加利福尼亚州帕萨迪纳)喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory)研究团队深入分析了

NASA收录的“近地且直径超1 km”的小行星目录。根据《NASA行星防御战略与行动计划》界定[9]，这类尺寸的小行星足以造成全球性破坏，甚至可能瓦解人类文明。研究团队对目录中每颗小行星的轨道进行建模，预测它们未来接近地球的时间，并将预测范围延伸至未来一千年[8]。结果显示，编号1994 PC1的小行星（图2）具有最高撞击风险。这颗岩石质的小行星直径约为1 km，未来千年内有0.0015%的概率进入月球轨道范围。尽管这一概率微乎其微，但已比目录中其他任何大型小行星的威胁风险高10倍。

太阳系中仍有大量高速飞行的小行星未被人类发现，且已有几颗小行星曾与地球擦肩而过。2019年，一颗足球场长度的小行星从距离地球不足72 000 km处掠过[10]；2012年，一颗直径为1 km的小行星近距离接近地球[11]；2021年，一颗直径为70 m的小行星也发生了类似情况[12]；2024年，一颗直径为290 m的小行星再次近距离接近地球[13]。这些天体均在飞临地球前几天才被发觉，所幸最终未造成任何事故。有观点认为，部分体积较大的小行星之所以未被及时察觉，是因为地球自转形成了观测盲区，该区域内，小行星要么无法被探测到，要么会呈现出“静止”的观测假象[14]。

对于直径超过140 m的小行星——NASA划定的“撞击后可能造成严重破坏”（如摧毁整座城市、导致逾200万人死亡）的天体阈值，NASA的小行星目录只完成约40% [15]。智利的薇拉·鲁宾天文台（预计2025年启动太阳系探测[16]）与近地巡天望远镜（NEO Surveyor）旨在为助力NASA达成美国国会所要求目标——发现超

过90%的直径超过140 m的大型近地天体[17]——方面发挥关键作用。NEO Surveyor是一台红外、天基望远镜，计划于2027年发射，专门用于搜寻具有潜在危险的小行星[17]。Fitzsimmons对此表示：“通过鲁宾天文台与近地巡天望远镜的协同观测，未来十年内我们有望解除未来一、两个世纪内所有大型天体撞击地球的潜在威胁。”

尽管小行星撞击导致地球毁灭的风险较低，但威胁始终存在，这使得行星防御成为太空研究的优先事项。在国际合作方面，美国正与欧盟合作开展“赫拉任务”（Hera Mission），将于2026年10月对DART进行事后分析[18]。而中国也计划于2026年启动自主研发的动能撞击器任务，目标锁定为穿越地球轨道的近地小行星2020 PN1。这项任务将融合DART与“赫拉任务”的理念，使用一个模块撞击直径为40 m的太空岩石，另一个模块则负责完成撞击后的全面检测[19]。此外，中国还计划开展另一项小行星轨道偏转任务，拟将23枚长征五号火箭撞向小行星贝努（Bennu），以改变其当前轨道——该小行星预计在2175年至2199年间在距离地球轨道 $7.4 \times 10^6$  km范围内运行[20]。

然而，并非所有潜在撞击都能提前150年、甚至提前10年预测，这意味着拥有核爆偏转方案可能至关重要。Moore表示：“我们已通过真实实验证明，核爆偏转技术可用于应对公里级小行星，也能处理那些突然出现、需要更强推力才能偏转的较小小行星。核爆偏转填补了动能撞击无法覆盖的行星防御空白。双轨并行的方案能确保我们应对任何迫在眉睫的撞击威胁。”

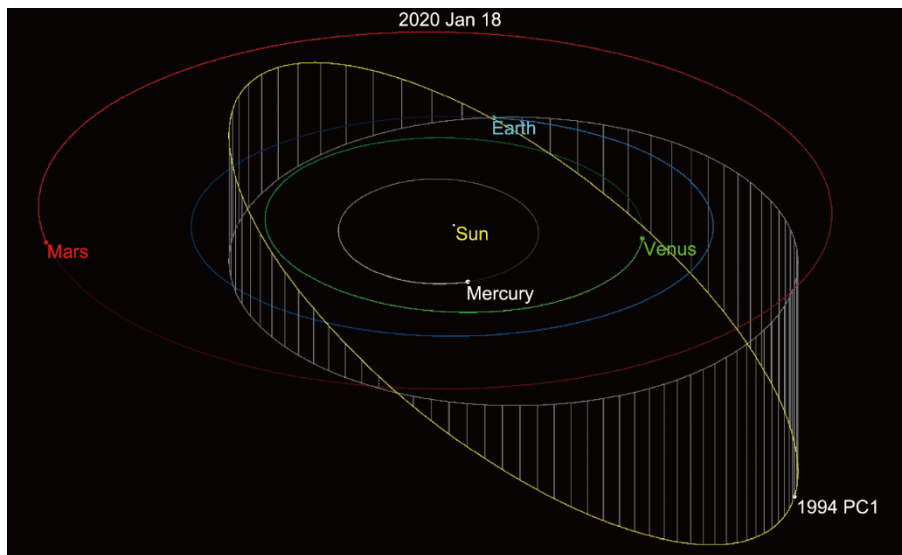


图2. 小行星1994 PC1的运行轨道。这颗岩石质小行星直径达1 km，目前被认为是未来1000年内对地球最具潜在威胁的小行星。图片来源：Tomruen/Wikimedia Commons（CC BY-SA 4.0）。

## References

- [1] Moore NW, Mesh M, Sanchez JJ, Schaeuble MA, McCoy CA, Aragon CR, et al. Simulation of asteroid deflection with a megajoule-class X-ray pulse. *Nat Phys* 2024;20:1833–9.
- [2] United Nations Office for Outer Space Affairs. Treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies [Internet]. New York City: United Nations; 1977 Dec 19 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html>.
- [3] Osterloff E. How an asteroid ended the age of the dinosaurs [Internet]. London: Natural History Museum; [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://www.nhm.ac.uk/discover/how-an-asteroid-caused-extinction-of-dinosaurs.html>.
- [4] Palmer C. DART mission shows potential for planetary defense by smashing asteroid into new orbit. *Engineering* 2023;24:7–9.
- [5] Remo JL, Furnish MD, Lawrence RJ. Plasma-driven Z-pinch X-ray loading and momentum coupling in meteorite and planetary materials. *J Plasma Phys* 2013; 79:121–41.
- [6] Haynes K. Nuclear bombs really could deflect asteroids, lab tests suggest [Internet]. Chattanooga: Astronomy; 2024 Sep 23 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.astronomy.com/science/nuclear-bombs-really-could-deflect-asteroids-lab-tests-suggest/>.
- [7] Burkey MT, Managan RA, Gentile NA, Bruck Syal M, Howley KM, Wasem JV. X-ray energy deposition model for simulating asteroid response to a nuclear planetary defense mitigation mission. *Planet Sci J* 2023;4(12):243.
- [8] Fuentes-Munoz O, Scheeres DJ, Farnocchia D, Park RS. The hazardous km-sized NEOs of the next thousands of years. *Astron J* 2023;166(1):10.
- [9] National Aeronautics and Space Administration (NASA). NASA planetary defense strategy and action plan. Report. Washington, DC: NASA; 2023.
- [10] Chiu A. ‘It snuck up on us’: scientists stunned by ‘city-killer’ asteroid that just missed Earth [Internet]. Washington, DC: Washington Post; 2019 Jul 26 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.washingtonpost.com/nation/2019/07/26/it-snuck-up-on-us-city-killer-asteroid-just-missed-earth-scientists-almost-didnt-detect-it-time/>.
- [11] Space.com Staff. Surprise! Big asteroid that flew by Earth larger than thought [Internet]. New York City: Space.com; 2012 Jun 23 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.space.com/16263-asteroid-2012lz1-size-earth-flyby.html>.
- [12] Reich A. 747-sized asteroid skimmed by Earth, and scientists didn’t see it coming [Internet]. Jerusalem: The Jerusalem Report; 2021 Sep 23 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.jpost.com/science/747-sized-asteroid-skimmed-by-earth-and-scientists-didnt-see-it-coming-680052>.
- [13] Cuthbertson A. NASA issues alert for stadium-sized asteroid approaching Earth [Internet]. London: The Independent; 2024 Sep 17 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.independent.co.uk/space/asteroid-alert-nasa-2024-on-b2610177.html>.
- [14] Wainscoat R, Weryk R, Chesley S, Veres P, Micheli M. Regions of slow apparent motion of close approaching asteroids: the case of 2019 OK. *Icarus* 2022;373:114735.
- [15] Grav T, Mainzer AK, Masiero JR, Dahlen DW, Spahr T, et al. The NEO surveyor near Earth asteroid known object model. 2023. arXiv:2310.20149.
- [16] Mann A. The Vera C. Rubin Observatory is ready to transform our understanding of the cosmos [Internet]. Cambridge: MIT Technology Review; 2024 Jan 1 [cited 2025 Jan 19]. Available from: <https://www.technologyreview.com/2025/01/01/1108643/vera-c-rubin-observatory-telescope-cosmos-universe-space-digital-camera/>.
- [17] NASA Jet Propulsion Laboratory. Near-Earth Object Surveyor [Internet]. Pasadena: NASA Jet Propulsion Laboratory; [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/near-earth-object-surveyor/>.
- [18] Strickland A. European spacecraft launches for ‘crash scene investigation’ of first planetary defense test [Internet]. Atlanta: CNN; 2024 Oct 7 [cited 2025 Feb 7]. Available from: <https://www.cnn.com/2024/10/07/science/hera-mission-launch-dart/index.html>.
- [19] Jones A. China to target near-Earth object 2020 PN1 for asteroid deflection mission [Internet]. Alexandria: Space News; 2022 Jul 12 [cited 2025 Feb 7]. Available from: <https://spacenews.com/china-to-target-near-earth-object-2020-pn1-for-asteroid-deflection-mission/>.
- [20] Turner B. China wants to launch asteroid-deflecting rockets to save Earth from Armageddon [Internet]. New York City: Live Science; 2021 Jul 10 [cited 2024 Nov 10]. Available from: <https://www.livescience.com/china-rocket-fleet-divert-asteroid-bennu.html>.