

利用宇宙 μ 子来预测自然灾害

(中国科学院国家天文台 杨隽、苟利军 编译自 Michael Allen. *Physics World*, 2023, (9): 23)

科学家和工程师们一直在努力构建更好的预警系统，以减轻由火山等自然灾害造成的人员伤亡和财产损失。研究者们越来越多地转向一种在很多方面都可谓“天赐良机”的技术，该技术涉及使用 μ 子。 μ 子是一种亚原子粒子，当宇宙线(主要是产生于超新星等事件的高能质子)与15至20 km高的大气层中的原子碰撞时就会产生。

我们知道，地球大气层不断受到这些初级宇宙线的撞击，碰撞产生了一系列次级粒子，包括电子、 π 介子、中微子和 μ 子。事实上，每分钟有多达10000个来自这些次级宇宙线的 μ 子降落到每平方米的地球表面上。这些粒子的特性与电子几乎完全一致，但质量大约是电子的200倍。这意味着相比电子， μ 子可以在固体中穿行得更远。

但是，使 μ 子成为探针的有趣之处在于， μ 子与穿越的材料之间的相互作用会影响其流量，更密实的物体能够偏转和吸收更多的 μ 子。正是这种流量差异被用来对火山内部结构成像，被命名为“ μ 子成像技术”。这个术语是由东京大学的Hiroyuki Tanaka教授和他的同事在2007年首次提出的，并且他们首次证明了使用该技术可以检测火山内的空隙和空腔。

该技术也被称为 μ 子层析摄像，它使用探测器产生一幅密度图，展示 μ 子通过的物体。越多 μ 子击中传感器，代表对应区域的结构密度越低，而 μ 子较少的地方则表示密度较高的部分。Tanaka和他的同事甚至尝试将其结合AI深度学习卷积神经网络来预测火山爆发。2020年，他们使用这项技术研究了世界上最活跃的火山之一——位于日本南部的樱岛火山。

在过去十年里，这座火山爆发了7000余次。

μ 子绘图

法国粒子物理学家 Jacques Marteau 表示， μ 子成像技术与X光照相术非常相似。“它将医学成像中的X射线替换为另一种粒子，也就是 μ 子。”

他说：“ μ 子成像技术基本上是一种成像过程，它以与X射线成像完全相同的方式扫描物体的密度。”

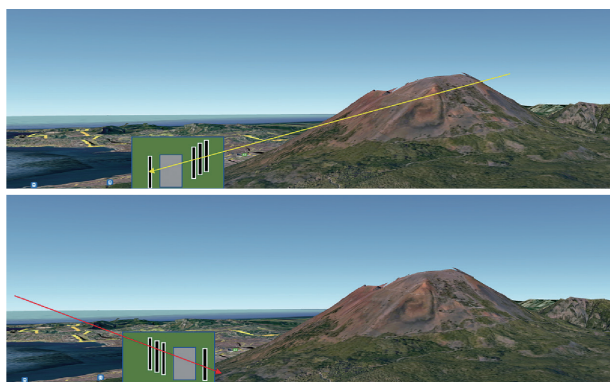
有几种不同的设备可以用来探测 μ 子，其中大部分都是作为粒子物理实验的一部分而开发的，比如在欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机上。但当涉及到火山成像时，最常用的探测器由多层闪烁体组成。当 μ 子穿过探测器时，每经过一层闪烁体都会产生一道闪光，这些闪光可以用来重建粒子的入射轨迹。这些探测器被安装在火山的低处斜坡上，倾斜放置以探测穿过火山的 μ 子。

研究人员不仅使用该技术成像火山的内部结构，还用来检测火山内部因岩浆上涨引起的密度变化，以及岩浆形状、热液活动、空腔和通道内的压力等变化。

一窥火山

意大利的 Giovanni Macedonio 解释说，研究和监测火山主要有三种技术。第一种是使用地震数据，第二种是使用卫星测量地面形变，最后一种是对火山内的流体进行地球化学分析。

μ 子成像技术让我们可以研究火山的流体动力学，因为它能帮我们看到火山上端(尤其是那些较小的火山)的内部结构。该技术不仅能揭示岩浆在以往爆发时经过的路径，还能够对未来潜在的爆发活动建模模拟，例如内部的几何细节就可以告诉我们爆发可能发生的位置以及



闪烁体探测器。MURAVES 实验在意大利维苏威火山进行，该实验旨在捕捉穿越火山上端内部结构的 μ 子图像。该设备由三个相互独立且相同的 μ 子追踪器组成，总的探测面积为 3 m^2 。该图展示 μ 子通过火山的流量(上图)和无遮挡天空的校准流量(下图)。探测器大小并未按实际比例表示

强度。

Macedonio 和他的同事们正在研究使用 μ 子成像技术来研究维苏威火山，这是一个名为 MURAVES 研究项目的一部分。由于摧毁了罗马的城市庞贝和赫库兰尼姆，维苏威火山臭名昭著。如今它仍是一座危险的活火山，尤其是有那么多人住在附近，更加令人感到不安。发生于 1944 年的最后一次爆发，使得火山口的一部分被抛出，如今在火山口的一些浓厚岩浆已经固化了。

MURAVES 项目旨在研究火山在经历了 19 世纪和 20 世纪爆发后的内部结构，以此可以对其未来的行为进行建模模拟。因为火山是动态环境，它们的结构会发生变化(特别是在爆发期间)，未来的行为可能会因此受到影响。

Macedonio 还使用 μ 子研究了斯特龙博利火山，这是一座位于伊奥利亚群岛上的活火山。研究活火山和休眠火山的内部结构可以帮助我们理解火山的行为模式，并解释为何会有小型或大型的喷发。Macedonio 说：“内部的结构与通道的几何形状，都是决定火山动力学的重要参数。”这些从活火山获得的数据能够有助于模拟和预测其他火山的行为模式。

而 Marteau 则利用 μ 子成像技术研究拉苏弗里耶尔火山，该火山位于加勒比海的岛屿“低地”上。Marteau 解释说，这座火山相对较小的穹顶更容易受地震或岩浆移动的影响，这可能会使充满高温、高压蒸汽的空腔失压，导致火山发生“潜水”型喷发。这类喷发涉及高温液体或气体，而不是岩浆。

虽然这类喷发不像岩浆喷发那么知名，但它们同样具有威力，

十分危险。例如在 2014 年 9 月，日本的御岳山西南侧毫无预兆地蒸汽爆发，导致 63 位正在山中徒步的人丧生。爆发产生了高达 11 千米的巨大烟柱。

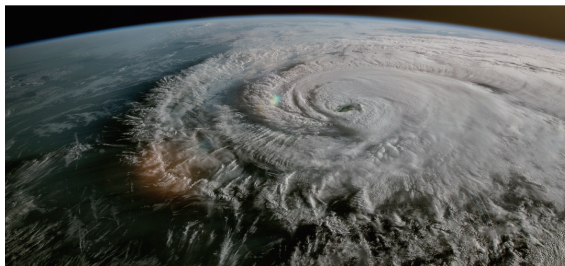
穹丘动力学

像拉苏弗里耶尔火山这样的火山，其喷发与否取决于穹顶的结构。“因此需要 μ 子成像找出穹顶的弱点在哪里、是什么。” Marteau 说道。

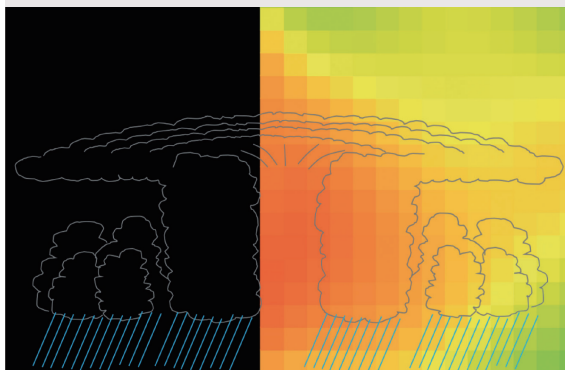
Marteau 还表示，对于拉苏弗里耶尔这类火山， μ 子成像技术还可以用来观察流体动力学。在很多火山内部，有大量的流体在不同的空腔之间循环流动。尽管这些流体可能开始时是液态，随着火山岩浆活动增加、温度升高，它们可能会转变成蒸汽。

利用 μ 子成像技术，就可以观测到穹顶内这种流体动力学的变化。举个例子，如果某个空腔内的液体转化为蒸汽，那么那里的密度就会降低， μ 子的流量就会增加。这样的转变(空腔中充满了高压蒸汽)可能会导致喷发。“ μ 子成像是能够实时跟踪这种变化的唯一技术，” Marteau 说。

2019 年，Marteau 与他的研究伙伴们证明，将地震噪声监测与 μ 子成像技术结合起来，可以探测到拉苏弗里耶尔火山穹顶内的热液活动突变现象。



风暴之眼。 μ 子的先驱性应用正在帮助研究气旋的内部结构，并用于预测它们何时形成



深入洞察。这是一幅气旋的 μ 子图像，其上叠加了一幅线条图，该线条图近似于此气旋的可视化数据形状。红色区域代表低压区，绿色区域代表高压区。此处展示的气旋高度约为 15 km

风暴前的流量

Tanaka 首创了利用 μ 子对火山进行成像的技术，如今他的研究焦点转向了另一个危险的自然现象：热带气旋。这些旋转风暴的时速可达 120 km/h 以上，每年都会造成大量的财产损失，导致许多人丧生。它们起源于热带海域，根据它们出现的位置，被称为飓风、台风或者简单地称为气旋。

热带气旋是在温暖的热带海洋上空、由于低压空气受热而形成的。随着时间的推移，会产生一个温暖湿润且快速上升的空气柱，在海洋表面产生一个低压区。这会进一步加强对流，最终形成一个旋转风暴系统，并且变得越来越强大。

目前，人们使用卫星、雷达和其他天气数据来预测、监视和追踪



海底之下。位于东京湾下方的 μ 子探测器被用于监测海水的水位变化，并辅助观察气象海啸的波浪

这些热带风暴，或者用强化过的飞机穿越它们来收集气压等数据。但是，这些方法都不能提供关于气旋内部的气压和密度的任何变化细节，而这些梯度正是驱动对流和风速的关键因素。

在气旋的重灾区日本九州岛上，Tanaka和他的团队如今正在研究 μ 子流的变化如何反映出气旋中的空气密度和气压的改变，从而提供有关风速和风暴强度的信息。Tanaka表示，他们在九州岛的闪烁体探测器网络能够观测到约150 km外的风暴。虽然一些宇宙线以垂直角度进入大气层，但得益于有些以更为水平的角度进入大气，该过程中产生的 μ 子流以一个非常低的角度飞行，在撞击地面之前可以穿越长达300 km的距离。

空气越密集，吸收的 μ 子就越多。因此，利用 μ 子的流量，可以测量气旋中各个位置的空气密度，进而得知温度与气压。基于这些信息，Tanaka的团队能够绘制出

气旋内部的温度、气压梯度图。Tanaka说：“(通过这种技术)我们可以计算出气旋内部气流的横向与纵向速度。”他们使用 μ 子成像技术观察了8次逼近鹿儿岛县的气旋，这些图像捕捉到了气旋温暖的低压核心，以及其周围的密集高压冷空气。

Tanaka希望能够使用更多的 μ 子探测器，得到更加详细的台风内部能量结构的三维图像。“期待通过 μ 子成像技术，能够预测气旋的强度以及它可能带来的降雨量”，Tanaka表示，“该技术或许可用于早期预警系统。”

潮汐变化

Tanaka还利用 μ 子成像技术测量了与气旋相关的另一种灾害：气象海啸。这种现象发生在封闭或半封闭的水域，例如海湾或湖泊。与地震活动引起的海啸不同，它们是由大气压或气流的突变引起的，例如气旋或气象锋。

气象海啸导致的水面极度振荡可持续几分钟到几个小时不等，并可能会造成巨大损害。例如在1992年7月4日，一个气象海啸袭击了美国佛罗里达州东部的代托纳海滩，造成75人受伤。这次的海啸由快速移动的雷暴系统所引发，掀起了高达三米的巨浪。

东京湾海底超千米海底深度探

测器(TS-HKMSDD)是一组 μ 子探测器，安装在东京湾下方、置于9 km长的隧道内。这些传感器被用来测量穿过上方水域的 μ 子。

2021年9月，一个气旋经过了太平洋、距离东京湾以南约400 km的地方。当风暴穿过时，一股巨浪涌向了东京湾，同时TS-HKMSDD探测到的 μ 子数量发生了波动。水的体积增加会导致更多的 μ 子发生散射和衰变，进而使得达到探测器的 μ 子减少。当研究人员检查他们的 μ 子数据时，发现这与验潮仪的测量结果高度一致。

测量巨浪时，探测器不必放置于水下的隧道内。“只要是在海岸附近的地下空间，我们都可以进行检测，”他解释说。这包括靠近海岸线的地下公路和地铁隧道，以及其他地下空间，例如停车场和商业地下室。

和气旋一样，检测气象海啸依赖于探测 μ 子穿越海水和海岸线的轨迹。Tanaka表示，这种设备可以测量离岸三到五千米远的水位。“我们不希望等到气象海啸到达的那一刻，”他说，“我们想在它到陆地前就了解情况。”

Tanaka认为还可以使用这个探测系统测量潮汐高度，建立一个密集的潮汐监测网。毕竟相对于机械验潮仪， μ 子探测器有一个很大的优点，那就是它们不与水接触，这使得它们更加可靠。它们不会随着时间的推移而磨损，也不会被风暴所损坏。实际上，东京湾的TS-HKMSDD探测器在水下隧道连续测量了一年，没有错过任何一秒的数据。谁能想到，这不起眼的 μ 子对我们的自然灾害预警竟然如此有用！