

黑洞充当极高能粒子的加速器

(北京大学 徐仁新 编译自 Meredith Fore. *Physics*, December 14, 2018)

大规模数值模拟表明，超大质量黑洞可将粒子加速至极高能。

天体物理学家多年来一直怀疑，地面探测到的神秘的极高能宇宙射线(UHECR)可能来自活动星系核(AGN)，即星系中心超大质量黑洞。然而，那里粒子的加速机制尚不清楚。最近，一个研究小组通过大规模模拟诠释了一种加速机制。该结果支持 UHECR 起源于 AGN，但也有学者提醒说，要说明质子也能加速至如此高的能量，该模拟还有一定局限性。

大多数宇宙线为质子或原子核，能量约 10^8 eV。1960 年代以来地面探测发现能量高于 10^{18} eV 的 UHECR，但不能确定它们的起源。最近发现一个高能中微子和伽马射线耀发同时来源于一颗 AGN；这是 UHECR 起源于 AGN 的有力证据(质子加速至极高能时既可产生高能中微子也能放出伽马射线)。当然，UHECR 仍可能起源于其他场所，如相对论性超新星和伽马射线暴。

天体物理喷流指沿大质量天体(例如 AGN)自转轴方向出射的离子

束。在观测和理论上，相对论性 AGN 喷流(那里的粒子以接近光速运动)都已被较好地研究。磁场储存了喷流的绝大部分能量，并呈现螺旋结构。先前的模拟已经发现喷流等离子体是不稳定的：喷流因跟星际介质相互作用而扭曲(称为扭曲不稳定性)。

人们曾经推测类似的扭曲不稳定性也可以产生足够强的电场让粒子加速至极高能量，甚至认为观测到的 γ 射线或 X 射线就暗示这种结构的存在。不过，理论家们并不清楚具体的加速过程。

美国国家加速器实验室 SLAC 的 Frederico Fiuza 带领的团队决定更大规模地模拟 AGN 喷流。以前的模拟往往将喷流等离子体近似为流体，这是一种粗略的描述；而 Fiuza 等则在单粒子层次上建模。SLAC 团队成员 Paulo Alves 解释说，该项目所需的强大运算能力使得其他研究人员望而却步。

该团队利用超级计算机进行模拟，在所谓的“共动”参考系中跟踪 5 千 5 百亿个粒子。粒子从有序磁场区域出射后，因发生扭曲不稳定性，磁场位型逐渐变形、弯曲。在模拟喷流过程中，研究人员关注不稳定性发生时

等离子体的活动。

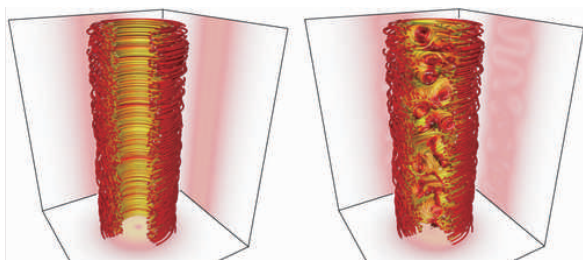
研究小组发现，磁场持续变形将会产生强大的电场。该电场一般沿着喷流的方向，垂直于环绕喷流的有序磁场。不过，因带电粒子运动受磁力线约束，这种电场通常不能有效地加速带电粒子。然而模拟发现，扭曲不稳定性导致磁力线充分缠绕，从而使得粒子可以穿越磁力线加速到足够高的能量成为 UHECR。

“发现 AGN 喷流中存在的某种磁场结构有助于同时解释高能辐射和高能宇宙射线的产生，这是我们最近的研究中特别令人兴奋的一点”，Fiuza 说。

“在将喷流中磁能转化为高能粒子的研究方面，我认为这篇论文是一个重要进展”，马里兰大学等离子体物理学家 James Drake 说。虽然模拟能够产生强电场，但 Drake 并不认为质子会一直加速到 10^{19} eV。他说，要获得这样的能量，必须模拟更实际的电子、正电子和质子混合等离子体，而 Fiuza 等人的模拟只考虑了电子和正电子。

马里兰大学天体物理学家 Marc Swisdak 也对此文印象深刻。他说，“这篇论文令人信服地描述了一种新的加速机制；这种机制也可能在地球磁层或日冕中起作用，因此“该研究工作向前推进了一大步”。

更多内容详见：E. P. Alves, J. Zrake, F. Fiuza. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121: 245101。



喷流的演化。在“共动”参考系中模拟从活动星系核(AGN)中喷出一束粒子。由于存在扭曲不稳定性，有序磁场结构(左)逐渐演化至无序(右)，并产生轴向电场加速粒子