

Wie Schwarze Löcher ihren Jet zünden

Mit komplexen Simulationen klären Frankfurter Astrophysiker den Ursprung der gigantischen Teilchenströme auf, die von supermassereichen Schwarzen Löchern im Zentrum von Galaxien ins All geblasen werden.

Schwarze Löcher sind vor allem für ihren ungeheuren Appetit bekannt. Nichts von dem, was diese kosmischen Gierhalse verschlucken, erblickt jemals wieder das Tageslicht. Nicht einmal Lichtteilchen vermögen ihnen zu entkommen – daher ihr Name. Doch nicht alles, was in ihre Nähe gelangt, landet dann auch hinter ihrem sogenannten Ereignishorizont – jenseits dessen es kein Entrinnen mehr gibt. Ein kleiner Teil der einstrudelnden Materie wird mit hoher Energie weit hinaus in die Tiefen des Alls befördert.

Die so entstehenden, eng kollimierten Teilchenströme – kosmische Jets genannt – können riesige Ausmaße aufweisen und zigtausend Lichtjahre hinaus in den Weltraum reichen. Der längste bekannte Jet hat sogar eine Länge von über einer Million Lichtjahren. Über den Ursprung dieser Jets herrschte aber lange Zeit großes Rätselraten in der Astrophysik: Welche eigenartige Kombination von Kräften kann es möglich machen, dass manche Teilchen nicht nur dem Schwarzen Loch entfliehen, sondern sogar auf höchste Energien beschleunigt werden? Ein internationales Team von Astrophysikern mit Beteiligung der Goethe-Universität hat nun das Wirken dieser reißenenden Teilchenströme mit unerreichter Genauigkeit entschlüsselt und erstmals eine Simulation vorlegen können, die viele verschiedene Aspekte dieses Phänomens in bemerkenswerter Übereinstimmung mit astronomischen Beobachtungen erklärt.

Unvorstellbare Masse

„Im Umfeld supermassereicher Schwarzer Löcher herrschen extreme Bedingungen“, sagt Luciano Rezzolla, der in Frankfurt den Lehrstuhl für Theoretische Astrophysik innehat. „Solche Schwarzen Riesenhöhlen im Zentrum von Galaxien können Millionen bis Milliarden Sonnenmassen auf die Waage bringen, und ihr Durchmesser ist so groß wie die Bahn der Erde um die Sonne“, erklärt der gebürtige Mailänder. Mit ihrer gewaltigen Schwerkraft ziehen diese supermassereichen Schwarzen Löcher alle Materie in weitem Umkreis in ihren Bann. Egal ob Sterne, Planeten oder interstellare Gaswolken: Was diesen Massemonstern zu nahe kommt, wird immer stärker angesaugt.

Dabei werden Sterne oder Planeten durch die riesigen Kräfte schon lange vor dem Schwarzen Loch in kleine Stücke gerissen und landen zunächst in einer riesigen Akkretionsscheibe. In diesem präfinalen Stadium heizt sich die rasant einströmende Materie noch einmal

mächtig auf und leuchtet dadurch hell auf, bevor sie hinter dem endgültigen Schleier des Ereignishorizonts verschwindet.

„Durch das Aufheizen ereignen sich sehr komplexe Phänomene rund um das Schwarze Loch“, erklärt Rezzolla. „Die Materie wird ionisiert, verwandelt sich also in ein heißes, turbulentes Plasma, welches wiederum enorm starke elektromagnetische Felder erzeugt.“ Und je näher dieses Plasma in den Einflussbereich des Schwarzen Lochs strudelt, desto stärker

zeichneten Galaxie – kurz M87 genannt – liegt ein ausgesprochenes Schwergewicht, das rund 6,5 Milliarden Sonnenmassen in sich vereinigt. Seinen legendären Status in der Geschichte der Astronomie hat dieses Riesenloch erhalten, weil es als erstes solches Objekt bildlich abgebildet wurde. Die Darstellung mit dem Schwarzen Loch in der Mitte, das von einer hell leuchtenden Akkretionsscheibe umgeben ist, ist im April 2019 um die Welt gegangen. Eine solche Aufnahme eines vergleichsweise

Änderungen in den Parametern“, sagt Osorio. „Wenn wir keine passenden Werte haben, etwa für die Elektronendichte oder die magnetischen Felder, dann ergeben sich sofort unrealistische Berechnungen, die nicht in Einklang mit den Beobachtungen sind.“ Man kann allerdings nicht einfach beliebig viele Modelle entwerfen und schauen, ob dann eines passt: Denn die Berechnungen sind enorm komplex und laufen selbst auf Supercomputern mit tausend parallel arbeitenden Rechenkernen wochenlang. Es ist den Forschern jedoch in jahrelanger Grundlagenarbeit gelungen, einen Computercode zu entwerfen, der sowohl die turbulenten Plasmaströme als auch die Krümmung von Raum und Zeit gleichermaßen berücksichtigt und damit realistische Simulationen ermöglicht.

„Jets von Schwarzen Löchern bestehen aus hochenergetischen Teilchen, die von den enormen elektromagnetischen Feldern aus der Akkretionsscheibe herausgerissen werden und dadurch dem

beteiligt war. Die nun veröffentlichten Simulationsdaten geben sogar die Dichte der Elektronen im Jet korrekt wieder. Die Mühe hat sich also gleich doppelt gelohnt: Denn da die Simulationssoftware nun bewiesen hat, dass sie ein recht stimmiges und realistisches Bild dieser hochkomplexen Vorgänge liefern kann, können die Wissenschaftler erstens Rückschlüsse auf das Schwarze Loch selbst ziehen. Und zweitens machen die Simulationen Zuversicht, weitere Schwarze Löcher mit dieser Methode zu untersuchen.

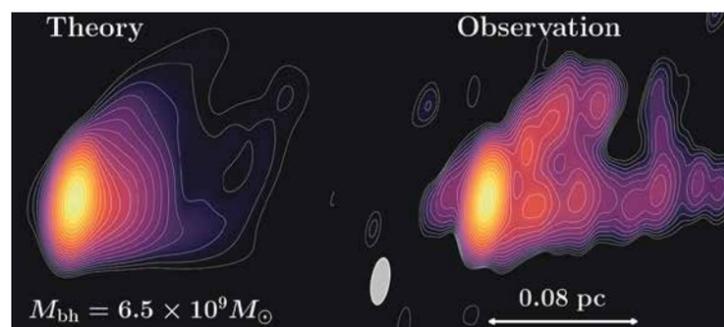
„Wir erhalten in unseren Simulationen nur dann ein mit den Beobachtungen übereinstimmendes Bild, wenn wir davon ausgehen, dass das Schwarze Loch von M87 relativ schnell rotiert“, sagt Osorio. Die Verwirbelung der Raumzeit „zieht“ demnach die Magnetlinien mit, so dass sie zur Ausbildung von Jets führen.

Bei einem ruhenden Schwarzen Loch ohne jegliche Rotation wären nach den Simulationen eher ziemlich schwache Jets zu erwarten, die allein aus der Verwirbelung der elektromagnetischen Felder durch das Plasma der Akkretionsscheibe herrühren. „Es ist zwar noch viel zu früh, um zu sagen, dass alle starken kosmischen Jets, die wir im Weltall beobachten, von schnell rotierenden Schwarzen Löchern verursacht werden“, so Rezzolla. „Aber das ist zumindest eine interessante Arbeitshypothese.“

In Zukunft wollen die Forscher den Detailgrad ihrer Simulationen weiter erhöhen. Bislang werden die Plasmaströme im Computercode noch etwas grobschlüchtig behandelt. Zwar unterteilt die Software sie in viele kleine Parzellen, aber die elementaren Wechselwirkungen der rasanten Teilchen untereinander sollen künftig noch besser berücksichtigt werden. Damit sollten auch die hochenergetischen Prozesse im Jet klarer werden. „In den Jets sind verschiedene physikalische Phänomene dafür verantwortlich, dass einige Teilchen bis hin zu extremen Energien beschleunigt werden – weit über die Energien hinaus, die mit irdischen Teilchenbeschleunigern möglich sind“, so Rezzolla. „Andererseits gibt es auch Abstrahlungsprozesse, die die Teilchenenergie verringern. All dies zusammen in einem Programmpaket zusammenzubringen, soll uns künftig in die Lage versetzen, kosmische Jets und die sie verursachenden supermassereichen Schwarzen Löcher im gesamten beobachtbaren Universum besser zu verstehen.“

Dirk Eidemüller

Prof. Luciano Rezzolla ist auch Sprecher des neuen Projekts ELEMENTS. <https://elements.science/>



Das theoretische Modell (Theory) und die astronomischen Beobachtungen (Observation) der Entstehungsregion des relativistischen Jets von M87 stimmen sehr gut überein. Bild: Alejandro Cruz-Osorio

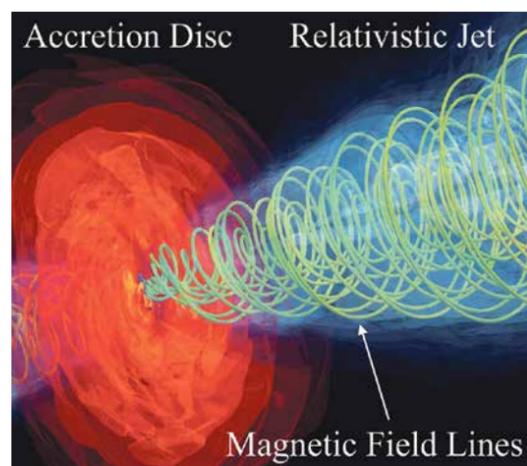
kommen die Gesetze von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ins Spiel. Laut Einstein werden Raum und Zeit durch die immense Masse des Schwarzen Lochs gekrümmt und gestaucht. Und da Schwarze Löcher meistens rotieren, verdrillen sich Raum und Zeit auch noch.

Man kann sich das alles anschaulich nicht vorstellen. „Aber mithilfe von Supercomputern können wir das inzwischen ganz gut simulieren, inklusive der Bewegung der Plasmateilchen und der elektromagnetischen Felder, die durch das Plasma erzeugt werden und die wiederum zurückwirken auf das Plasma“, so Rezzolla. Sein Mitarbeiter Alejandro Cruz Osorio, der an den Simulationen mitwirkt hat, ergänzt: „Auch die elektromagnetischen Felder werden durch das Schwarze Loch mitgekrümmt.“ Denn nichts entkommt dem Einfluss der verbogenen Raumzeit.

Die Rechnungen hierzu sind extrem kompliziert: Sowohl die allgemein-relativistische Verkrümmung der Raumzeit als auch die Plasmaströme mit ihren elektromagnetischen Feldern – magneto-hydrodynamische Strömung genannt – sind jede für sich allein genommen schon hochgradig anspruchsvoll. Beide zu kombinieren, erfordert immense Rechenpower.

Legendäres Riesenloch

Um nun die Entstehung kosmischer Jets zu erforschen, hat sich das Forscherteam ein besonders berühmtes Schwarzes Loch vorgenommen: Im Herzen der in Sternenkatalogen als Messier 87 ver-



Entlang der magnetischen Feldlinien werden die Teilchen so stark beschleunigt, dass sie aus der Galaxie M87 heraus einen Jet von 6000 Lichtjahren Länge bilden. Bild: Alejandro Cruz-Osorio

kompakten Objekts in einer Galaxie in 55 Millionen Lichtjahren Entfernung war nur möglich durch das Zusammenschalten mehrerer großer Radioteleskope zu einem weltumspannenden Verbund. Durch immense Computerpower miteinander kombiniert, agierten diese Teleskope wie ein einziges Riesenteleskop mit ungefähr dem Durchmesser der Erde. Nur dadurch ließ sich die spektakulär gute Auflösung erreichen.

Was medial aber weniger bekannt ist: Natürlich haben es die Astronomen nicht bei diesem Bild belassen, sondern weitere Beobachtungen getätigt, um immer mehr Details aus dem Zentralbereich dieses Schwarzen Loches herauszukitzeln. Inzwischen lassen sich auch die Gasströme dort besser nachvollziehen. Und dies wiederum erlaubt es, mithilfe von Simulationen mehr über das Schwarze Loch im Zentrum herauszufinden.

„In den Simulationen reagieren die Teilchen sehr empfindlich auf

Schwarzen Loch entkommen können“, sagt Rezzolla. Diese z.T. bis in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Teilchen ziehen dabei einen Teil der Magnetfelder mit. Diese wiederum bringen die Teilchen dazu, eine große Bandbreite an Strahlung auszusenden – von Radiostrahlung bis hin zu hochenergetischer Strahlung ist alles dabei. Besonders im Radiobereich leuchten diese Jets hell und lassen sich gut nachweisen.

Simulationen liefern realistische Bilder

Die neuen Simulationen können nicht nur die Entstehung der Jets, sondern auch ihre Form sowie die Emission vom Radio- bis in den Infrarotbereich gut nachzeichnen. „Das ist ein großer Durchbruch für uns, denn frühere Simulationen konnten immer nur bestimmte Aspekte solcher Jets beschreiben, aber nie das ganze Paket“, sagt Christian Fromm von der Universität Würzburg, der an der Arbeit