

Guido Risaliti

Una nuova prova della teoria della relatività generale con i buchi neri rotanti

A new proof of the theory of General Relativity through rotating black holes

INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Sommario. Le osservazioni del telescopio spaziale NuSTAR della NASA hanno permesso di rivelare per la prima volta la “firma” caratteristica di un buco nero rotante nella radiazione X emessa dal suo disco di accrescimento. Il risultato offre informazioni fondamentali per migliorare la nostra comprensione del ruolo dei buchi neri giganti nell’evoluzione delle galassie di cui fanno parte.

Parole Chiave. Buchi neri, relatività generale, telescopi spaziali.

Un buco nero super-massivo (con massa da milioni a miliardi di masse solari) risiede nel nucleo di ogni galassia, e gli astrofisici sono oggi convinti che l’evoluzione di ogni galassia sia intimamente legata all’evoluzione del suo buco nero gigante.

Una proprietà del buco nero che dipende dalla sua storia evolutiva è la velocità di rotazione: se il buco nero acquista la sua enorme massa partendo da un piccolo “seme”, con un flusso continuo e uniforme di materia che accresce su di esso, alla fine avrà una enorme energia rotazionale. Al contrario, se l’aumento di massa

Abstract. Observations performed with the newest NASA space telescope, NuSTAR, have revealed for the first time the signature of a rotating black hole on the X-ray radiation emitted by its accretion disk. This result yields fundamental new insights into the role of giant black holes in the evolution of their host galaxies.

Keywords. Black holes, general relativity, space telescopes.

A supermassive black hole (with a mass ranging from millions to billions of solar masses) is thought to lurk in the center of each galaxy, and scientists now believe that the evolution of a galaxy is inextricably linked to the evolution of its giant black hole.

A key property of a black hole, which depends on its formation history, is its rotational velocity, or “spin”: if a black hole acquires its huge mass starting from a small seed and grows steadily, fed by a uniform flow of matter spiraling in, it ends up spinning rapidly. On the other



avviene attraverso tanti brevi episodi di accrescimento di materia da direzioni casuali, il buco nero avrà una piccola velocità finale.

Questi due scenari riflettono i modi in cui si forma la galassia stessa che ospita il buco nero gigante, dato che una frazione fissa della massa della galassia finisce nel buco nero centrale. Questo è il motivo per cui gli astrofisici considerano fondamentale misurare lo “spin” (cioè la quantità di energia rotazionale) dei buchi neri giganti.

L'altro motivo fondamentale di interesse per questa misura è che essa costituisce un test della teoria della relatività generale. Pubblicata nel 1915, la relatività generale è la descrizione di Einstein della gravità, i cui effetti sono particolarmente forti nel caso di campi gravitazionali estremi, quali quelli prodotti dai buchi neri.

Un modo utilizzato da diversi anni per misurare la rotazione dei buchi neri è l'osservazione dei raggi X emessi dalla regione appena esterna al cosiddetto “orizzonte degli eventi”, cioè la superficie limite intorno ai buchi neri dall'interno della quale niente – luce o materia – può fuoriuscire, per effetto dell'enorme campo gravitazionale.

La teoria della relatività generale di Einstein prevede che la luce emessa appena al di fuori dell'orizzonte degli eventi possa propagarsi nello spazio, e quindi venire osservata, ma con colori profondamente modificati dall'effetto della gravità e dalla rotazione del buco nero.

In particolare, gli atomi di ferro producono una forte emissione ad una precisa frequenza (cioè un preciso colore) nei raggi X. Il cambiamento di questo colore può essere usato per misurare la rotazione del buco nero.

hand, a black hole buffeted by small clumps of material hitting from all directions will end up rotating relatively slowly.

These scenarios mirror the formation of the galaxy itself, since a fraction of all the matter drawn into the galaxy finds its way into the black hole. Because of this, astronomers are keen to measure the spin rates of black holes in the hearts of galaxies.

The other key reason why this measurement is interesting is that it provides a test of the theory of General Relativity. Published in 1915, general relativity is Albert Einstein's description of gravity. It predicts effects that are most easily seen in extremely strong gravitational fields, such as those found near black holes.

A method used for several years to measure black hole spins is the observation of X-rays emitted just outside the 'event horizon', the boundary surrounding a black hole beyond which nothing, including light, can escape, because of the huge gravitational field. Einstein's General Relativity theory predicts that the light emitted just outside the event horizon can propagate in space, and then be observed, albeit with colors that are profoundly modified by the effects of gravity and by the black hole spin. In particular, hot iron atoms produce a strong signature of X-rays at a specific energy (i.e. a specific color), which is smeared out by the rotation of the black hole. The nature of this smearing can then be used to infer the spin rate.

Using this technique, previous observations have suggested that there are extremely rapidly spinning black holes in some galaxies. Unfortunately, confirming the spin rate has been very difficult, because the X-ray spectrum can also be smeared out by absorbing clouds of

Usando questa tecnica, varie osservazioni hanno suggerito la presenza di vari buchi neri con altissimo tasso di rotazione in diverse galassie. Purtroppo questo risultato non è definitivo, perché gli stessi cambiamenti di colore previsti dalla teoria della relatività possono anche essere prodotti da delle nubi di gas che si trovano intorno al buco nero, e che coprono parzialmente la regione di emissione. Fino ad oggi queste due interpretazioni erano state indistinguibili.

La misura che ha consentito di risolvere questa ambiguità è stata effettuata per circa 36 ore nel luglio 2012, dal satellite dell' Agenzia Spaziale Europea (ESA) XMM-Newton, e dal nuovo telescopio della NASA NuSTAR, che hanno osservato la galassia spirale NGC 1365. XMM-Newton ha misurato i raggi X di bassa energia, NuSTAR quelli di alta energia (Risaliti 2013).

I dati combinati dei due satelliti sono stati decisivi per risolvere il problema. Un buco nero rapidamente rotante implica un preciso rapporto fra i raggi X di alta e bassa energia. Questo vale anche per l'assorbimento da parte di nubi di gas. I due rapporti sono però molto diversi nei due casi e i nuovi dati sono in accordo solo con l'ipotesi del buco nero rapidamente rotante.

Questa misura costituisce quindi una conferma della teoria della relatività generale e fornisce una nuova potente tecnica per ricostruire la storia della formazione ed evoluzione delle galassie.

Il risultato è anche un bell'esempio della sinergia che può essere ottenuta combinando le osservazioni di diversi telescopi spaziali: sarebbe stato impossibile effettuare questa ricerca senza le osservazioni simultanee di entrambi i satelliti.

gas lying close to the disc. Up to now, it has been impossible to distinguish between these two scenarios.

This ambiguity has been resolved by a new measurement performed for roughly 36 hours in July 2012, by ESA's XMM-Newton satellite and NASA's newest satellite, NuSTAR – the Nuclear Spectroscopic Telescope Array – which simultaneously observed the spiral galaxy NGC 1365. XMM-Newton captured the lower energy X-rays, NuSTAR the higher energy data. The combined data proved to be the key to unlocking the puzzle. A spinning black hole model makes a clear prediction for the ratio of high-energy to low-energy X-rays. The same is true for an absorbing cloud of gas (Risaliti, 2013).

However, it is important to note that the predictions are very different and the new data agree only with a rapidly spinning black hole. This suggests that the galaxy has grown steadily over time, with material streaming uniformly into the central black hole. This measurement is therefore a confirmation of General Relativity, and provides a new, powerful way of reconstructing the history of the formation and evolution of galaxies.

The result is also a great example of the synergy that can be achieved when complementary space missions are used together. It would have been impossible to complete this research without the two spacecraft working in tandem.

Bibliografia

G. Risaliti et al. (2013), *Nature* 494, 449.

Guido Risaliti è dal 2002 ricercatore presso l'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, e Research Associate presso l'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA (USA). La sua attività di ricerca si concentra sull'osservazione dei Nuclei Galattici Attivi, principalmente nei raggi X e in infrarosso, usando soprattutto telescopi spaziali. Recentemente ha utilizzato tali studi per testare la teoria della relatività generale. Ha pubblicato circa 90 articoli con referree su riviste internazionali.

Bibliography

G. Risaliti et al. (2013), *Nature* 494, 449.

Guido Risaliti is a researcher at the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory and has been a Research Associate at the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA (USA) since 2002. His research activity is devoted to the observations of Active Galactic Nuclei, mainly in X-rays and infrared, using space telescopes. Recently, he has focused on the application of these studies to tests of the theory of General Relativity. He has published about 90 papers in refereed international journals.