

Jacopo Soldateschi, Niccolò Bucciantini

Teorie alternative della gravità e stelle di neutroni

Alternative theories of gravity and neutron stars

Dipartimento di Fisica e Astronomia - Università degli Studi di Firenze
INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri
INFN - Sezione di Firenze

Riassunto. La relatività generale è la teoria correntemente accettata che descrive il funzionamento della gravità. Nonostante i suoi incredibili successi, negli anni sono emersi alcuni problemi che essa mostra, sia nello spiegare alcuni fenomeni astronomici, sia dal punto di vista puramente concettuale. In questo articolo mostriamo come una particolare classe di teorie che estendono la relatività generale modifichi la struttura e le caratteristiche delle stelle più estreme, le stelle di neutroni.

Parole chiave. gravitazione, stelle di neutroni, campo magnetico, teorie alternative della gravità.

Il funzionamento della gravità, la più debole delle quattro interazioni conosciute in natura, è correntemente descritto dalla teoria della relatività generale, ideata da Albert Einstein durante gli inizi del Novecento. Questa teoria ha finora riscontrato incredibili successi, riuscendo a spiegare correttamente fenomeni così differenti come la fusione di buchi neri in altre galassie, o la più familiare caduta dei gravi. Tuttavia, col passare del tempo sono anche sorte alcune problematiche che la relatività generale non sembra essere in grado di risolvere. Dal punto di

Abstract. General relativity is the currently accepted theory describing how gravity works. In spite of its incredible success, over the years some problems have emerged, both in explaining some astronomical phenomena and in grasping the theory from the purely conceptual point of view. In this work, we show how a particular class of theories which extend general relativity modify the structure and the features of the most extreme stars, neutron stars.

Keywords. Gravitation, neutron stars, magnetic field, alternative theories of gravity.

Gravity, the weakest of the four fundamental interactions known to exist in nature, is currently explained by the theory of general relativity, conceived by Albert Einstein at the start of the twentieth century. This theory has so far proved to be greatly successful, managing to explain phenomena as different as the coalescence of black holes in other galaxies or the more familiar physics of falling bodies. However, as time went by, some problems arose that general



vista puramente teorico e concettuale, essa non sembra poter fornire la base della cosiddetta gravità quantistica, ossia la teoria che dovrebbe essere in grado di unificare i diversi domini della gravità e della meccanica quantistica. Dal punto di vista sperimentale, la curva di rotazione delle galassie, così come l'evoluzione dell'universo stesso, richiedono, per essere spiegate, l'introduzione di una forma di materia-energia totalmente sconosciuta, la materia oscura e l'energia oscura. Una possibile soluzione a questi problemi, alternativa anche all'introduzione di materia ed energia oscura, sono le "teorie alternative della gravità": teorie che estendono la relatività generale in modo da sopperire alle sue mancanze. Tra le molte teorie alternative che sono state proposte, quelle più promettenti sembrano essere le "teorie scalar-tensor". Secondo queste, l'interazione gravitazionale è mediata sia da una particella chiamata gravitone, che per le sue caratteristiche fisiche viene detta "tensoriale", che da una ipotetica particella "scalare".

Nel nostro lavoro abbiamo studiato come gli oggetti materiali più estremi dell'universo conosciuto, le stelle di neutroni, si comportano all'interno di alcune teorie scalar-tensor. Infatti, una classe di queste teorie contiene un effetto fisico chiamato "scalarizzazione spontanea", il quale prevede che l'effetto del campo scalare diventi via via più importante con l'aumentare della compattezza della materia in cui si trova. Dato che le stelle di neutroni sono gli oggetti materiali più compatti dell'universo conosciuto, è chiara la loro importanza nel testare le teorie alternative della gravità. Inoltre, questo effetto permette alle stelle di neutroni di mostrare evidenti, ossia potenzialmente osservabili, modifiche rispetto alla loro controparte in relatività generale, e al tempo stesso permette a questa classe di te-

relativity does not seem to be able to solve. From the purely theoretical and conceptual point of view, it does not seem suitable to form the basis of quantum gravity, that is, the theory that should unify the domains of gravity and quantum mechanics. From the experimental point of view, the rotation curve of galaxies as well as the evolution of the universe itself require the existence of a completely unknown form of matter-energy, dark matter and dark energy. A possible solution to these problems, which also represents an alternative to the introduction of dark matter and dark energy, is that of "alternative theories of gravity": theories which extend general relativity in such a way as to resolve these issues. Among the many proposed alternative theories of gravity, the most promising ones seem those belonging to the "scalar-tensor" category. In these theories, the gravitational interaction is mediated both by a particle known as the graviton, which is called "tensorial" because of its physical properties, and by a hypothetical "scalar" particle.

In our work, we have studied how the most extreme material objects in the known universe, neutron stars, behave in some scalar-tensor theories. In fact, a particular class of these theories contains a physical phenomenon called "spontaneous scalarization", according to which the effect of the scalar field becomes more important as the surrounding matter becomes more compact. Since neutron stars are the most compact material objects in the known universe, their importance in testing alternative theories of gravity becomes clear. Moreover, this phenomenon allows neutron stars to display evident – that is, potentially observable – modifications with respect to their counterparts in general relativity, while allowing this class of theories to remain

orie di rimanere accettabile secondo i più stringenti limiti provenienti dalle osservazioni astronomiche. In Figura 1 e Figura 2 mostriamo la sezione di una stella di neutroni contenente un campo scalare al suo interno per due diverse configurazioni del campo magnetico: puramente toroidale e puramente poloidale, rispettivamente. Una stella di neutroni reale, per quanto l'esatta geometria del suo campo magnetico interno costituisca un'incognita, ci aspettiamo che contenga un campo magnetico con una configurazione intermedia tra queste due, che quindi ne costituiscono i casi limite. Partendo da sinistra vediamo l'intensità del campo magnetico, la distribuzione di densità della materia e il valore del campo scalare. Vediamo come la distribuzione del campo scalare rimanga sostanzialmente sferica, anche per stelle la cui distribuzione di densità risulti notevolmente deformata dal campo magnetico. Questo implica che il campo scalare agisce in senso opposto al campo magnetico, tendendo a rendere la stella più sferica e riducendone la deformazione. Una stella di neutroni deformata e ruotante emette onde gravitazionali, in quantità tale da essere proporzionale alla sua deformazione. Per questo motivo, studiando la riduzione della deformazione dovuta alla presenza del campo scalare, abbiamo dimostrato come le stelle di neutroni "scalarizzate" emettano meno energia sotto forma di onde gravitazionali "standard" rispetto alla loro controparte in relatività generale, con una conseguente difficoltà nella loro potenziale osservabilità. D'altra parte, le teorie scalar-tensor permettono anche l'emissione di un particolare tipo di onda gravitazionale, non presente in relatività generale, che quindi, se rivelata, dimostrerebbe in maniera inequivocabile come la teoria di Einstein non costituisca la spiegazione ultima dell'interazione gravitazionale.

viable according to the most stringent constraints coming from astronomical observations. In Figures 1 and 2 we show the section of a neutron star containing a scalar field for two different magnetic field configurations: purely toroidal and purely poloidal, respectively. Although the geometry of its internal magnetic field remains unknown, a real neutron star is expected to contain a magnetic field with an intermediate configuration between these two, which thus constitute the limiting cases. Starting from the left, we see the intensity of the magnetic field, the distribution of the matter density and the value of the scalar field. We see how the distribution of the scalar field remains more or less spherical, and this also holds true for stars that exhibit a strong deformation in their density distribution due to the magnetic field. This implies that the scalar field acts in an opposite way with respect to the magnetic field, making the star more spherical and reducing its deformation. A deformed, rotating neutron star emits gravitational waves, their amount being proportional to the neutron star deformation. For this reason, studying the decrease in the deformation caused by the presence of a scalar field, we showed how "scalarized" neutron stars emit less energy in "standard" gravitational waves with respect to their counterparts in general relativity, thus limiting their potential observability. On the other hand, scalar-tensor theories also allow the emission of a particular kind of gravitational wave, which does not exist in general relativity, and which would, if discovered, constitute the smoking gun that Einstein's theory is not the definitive theory of the gravitational interaction.

Finally, yet another unknown complicates the scenario: the composition of the innermost part of neutron stars, encoded in the "equation of state", is not known. The effects that a dif-

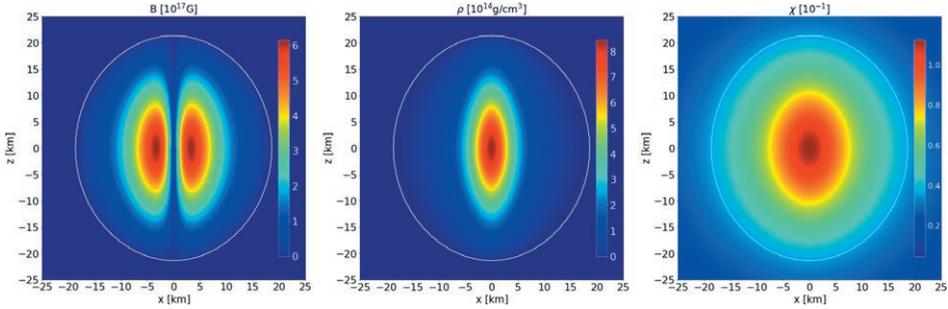


Figura 1. Intensità del campo magnetico (grafico a sinistra), della densità di materia (grafico centrale) e del campo scalare (grafico a destra) in una stella di neutroni caratterizzata da un campo magnetico puramente toroidale. La linea bianca demarca la superficie della stella

Figure 1. Intensity of the magnetic field (left plot) and scalar field (right plot) in a neutron star endowed with a purely toroidal magnetic field. The white line indicates the star's surface.

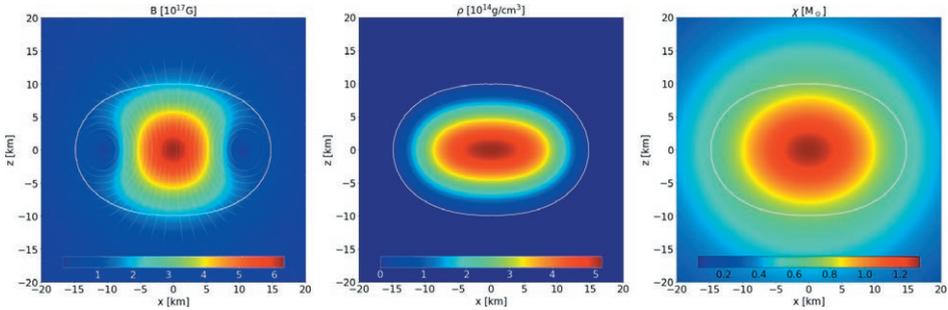


Figura 2. Intensità del campo magnetico (grafico a sinistra), della densità di materia (grafico centrale) e del campo scalare (grafico a destra) in una stella di neutroni caratterizzata da un campo magnetico puramente poloidale. La linea bianca demarca la superficie della stella.

Figure 2. Intensity of the magnetic field (left plot), matter density (center plot) and scalar field (right plot) in a neutron star endowed with a purely poloidal magnetic field. The white line indicates the star's surface.

ferent equation of state has in the observable features of a neutron star are, unfortunately, similar to the effects caused by the presence of a scalar field. Our work has shown that there exist some “quasi-universal relations” between some of these observable quantities. The main importance of these relations is that they are valid for almost any equation of state, thus allowing one to extract information from observations on the main unknowns regarding neutron stars, such as the geometry of their internal magnetic field or the presence of a scalar field, without knowing their equation of state.

Jacopo Soldateschi is a Ph.D. student at the University of Florence. He graduated first from the University of Siena and then from the University of Florence. He now works on numerical simulations of neutron stars in general relativity and its extensions.

Niccolò Bucciantini is a research scientist at INAF-Arcetri Astrophysical Observatory and was the third Italian to win the prestigious Hubble Fellowship. His scientific interests include high-energy astrophysics, numerical relativistic plasma physics and Pulsar Wind Nebulae. He is also a proponent of the Magnetar model for Gamma-Ray Bursts.

Infine, è noto come un'altra incognita complichino la situazione: la composizione della parte più interna delle stelle di neutroni, riassunta nella cosiddetta "equazione di stato", è tuttora sconosciuta. Gli effetti che una differente equazione di stato ha nelle caratteristiche osservabili di una stella di neutroni sono, sfortunatamente, simili agli effetti dovuti alla presenza di un campo scalare. Nel nostro lavoro abbiamo dimostrato come esistano delle "relazioni quasi-universali" tra alcune di queste quantità osservabili. La caratteristica fondamentale di queste relazioni sta nel fatto di valere per quasi qualunque equazione di stato, dunque permettendo di estrarre dalle osservazioni informazioni sulle principali incognite riguardanti le stelle di neutroni, come la struttura del loro campo magnetico interno o l'eventuale presenza di un campo scalare, senza conoscere la loro equazione di stato.

Jacopo Soldateschi è dottorando presso l'Università degli Studi di Firenze. Laureato prima all'Università degli Studi di Siena e poi all'Università degli Studi di Firenze, si occupa attualmente di simulazioni numeriche di stelle di neutroni in relatività generale e sue estensioni.

Niccolò Bucciantini è un ricercatore presso INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, ed è stato il terzo italiano a vincere la prestigiosa Hubble Fellowship. I suoi interessi scientifici includono l'astrofisica delle alte energie, la fisica numerica dei plasmi relativistici, le nebulose da Pulsar, ed inoltre è fra i proponenti del modello a magnetar per i Gamma-Ray Bursts.