



Neutronenfluss und der r-Prozess

Bei Supernova-Explosionen und bei der Verschmelzung von Neutronensternen kommt es zur Freisetzung von Neutronen mit extrem großen Neutronenflüssen. In diesem Medium ist der mittlere Zeitabstand zwischen den Neutroneneinfängen kurz im Vergleich zur Halbwertszeit des Betazerfalls. Deswegen können darin befindliche Atomkerne zahlreiche Neutronen einfangen und größer werden. Dieses rasche Wachsen bezeichnen Astrophysiker als r-Prozess.

Aufgabe 1: In einer grundlegenden Arbeit haben das Ehepaar E. Margaret Burbidge und Geoffrey R. Burbidge zusammen mit William Fowler und Fred Hoyle im Jahr 1957 unter anderem den Neutronenfluss bei einer Supernova-Explosion berechnet. Sie kommen auf die Anzahldichte $n_n \approx 10^{24} \text{ cm}^{-3}$. Die Neutronen baden dabei in einer Strahlungstemperatur von $T \approx 10^9 \text{ K}$ und haben eine Energie $E_n = k T$. Wie groß ist die Energie der Neutronen in Einheiten von eV? Die Boltzmann-Konstante ist $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ und $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Aufgabe 2: a) Man bestimme die Geschwindigkeit v_n der Neutronen, wenn $E_n = E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_n v_n^2$. Die Masse eines Neutrons ist $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

b) Man vergleiche das Ergebnis mit der Geschwindigkeit thermischer Neutronen in Kernreaktoren bei einer Energie von $E_K = 100 \text{ meV}$.

Aufgabe 3: Der Neutronenfluss F_n berechnet sich mit $F_n = n_n v_n$. a) Wie groß ist er? b) Wie groß ist dann der Materiefluss μ_n der Neutronen, also die Masse, die pro Sekunde einen Quadratmeter durchströmt?

Aufgabe 4: Die Gravitationswellen-Observatorien (GWO) haben seit der Inbetriebnahme von LIGO zwei Beobachtungsläufe durchgeführt: O1 (12.9.2015 bis 19.1.2016) und O2 ($\Delta t_{O2} = 30.11.2016$ bis 25.8.2017); derzeit läuft der dritte, O3 ($\Delta t_{O3} = 1.4.2019$ bis t_R). Im Verlauf von O2 empfingen die GWO ein Signal von der Verschmelzung zweier Neutronensterne ($n_{O2} = 1$). Die Forscher bezeichnen dies als BNS (binary neutron star). Während O3 wurden bis Redaktionsschluss am $t_R = 27.1.2020$ insgesamt vier BNS-Signale aufgezeichnet ($n_{O3} = 4$). Die Empfindlichkeit der GWO bei O2 entspricht einer Nachweisreichweite von $d_{O2} = 75 \text{ Mpc}$ und $d_{O3} = 130 \text{ Mpc}$ bei O3. Welche Volumendetektionsrate $\eta_{Oi} = n_{Oi}/(\Delta t_{Oi} V_{Oi})$, $i = 2$ und 3, lässt sich für O2 und O3 pro Jahr und pro $(\text{Gpc})^3$ folgern? $V_{Oi} = (4\pi/3) d_{Oi}^3$. Man vergleiche die beiden Ergebnisse miteinander.

AXEL M. QUETZ

Ihre Lösungen senden Sie bitte an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. E-Mail: zum-nachdenken@sterne-und-weltraum.de. Einsendeschluss ist der 6. März 2020.

Alle Leser, die bis einschließlich des Mai-Heftes 2020 mindestens neun richtige Lösungen senden, werden bei der jährlichen Verlosung berücksichtigt. Die Preise der neuen Runde werden auf S. 95 vorgestellt.

Bitte beachten Sie unsere Teilnahmebedingungen auf Seite 16! Sie können Ihre Datenschutzrechte nach Art. 15 ff. DSGVO ausüben, indem Sie uns unter service@spektrum.de kontaktieren.

ZUM NACHDENKEN: Unser Sonnensystem



Das Buch enthält 119 Aufgaben und Lösungen der Rubrik »Zum Nachdenken« zum Sonnensystem.

368 Seiten. Preis: € 25. Bestell-Link: <https://amzn.to/2s1Yh6L>

Grafik S. 22 unten). Auf dieser Grundlage gelang es ihnen, die gemessenen Spektren der Kilonova zu modellieren und physikalisch zu erklären. Dadurch lieferten sie den bislang fehlenden eindeutigen Nachweis, dass schwere Elemente in verschmelzenden Neutronensternen entstehen.

Multi-Messenger-Astronomie

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind ein wichtiger Schritt bei der Entschlüsselung der Entstehung von schweren Elementen und ihren kosmischen Brutstätten. Dies war nur durch die Verknüpfung der erst jungen Disziplin der Gravitationswellenastronomie mit präziser Spektroskopie elektro-

magnetischer Strahlung möglich. Die neuen Messmethoden geben Hoffnung auf weitere bahnbrechende Erkenntnisse über die Eigenschaften des r-Prozesses.

MARKUS NIELBOCK ist promovierter Astrophysiker am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg und widmet sich heute dort und am Haus der Astronomie der Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit.

CAMILLA J. HANSEN promovierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Sie ist ausgezeichnete Fellow des Niels-Bohr-Instituts der Universität Kopenhagen und arbeitet jetzt am MPIA in Heidelberg.

Literaturhinweise

Pian, E. et al.: Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. *Nature* 551, 2017

Watson, D. et al.: Identification of strontium in the merger of two neutron stars. *Nature* 574, 2019

Lexikon der Astronomie: r-Prozess. www.spektrum.de/lexikon/astronomie/r-prozess/387