

ZUM NACHDENKEN

Neutrinos von SN 1987A und ihre Masse



Von der Supernova 1987A erreichten uns nicht nur Photonen, sondern auch Neutrinos – unmittelbare Zeugen des Kernkollaps. Mit ihrer sehr kleinen Masse verhalten sich diese Teilchen im Bezug auf die Fortbewegung fast wie das Licht. Insbesondere werden sie von einer Gravitationslinse abgelenkt, sofern sich eine solche zwischen der Supernova und dem Beobachter befindet.

Die im Jahr 1930 von Wolfgang Pauli postulierten und im Jahr 1956 nachgewiesenen Neutrinos oszillieren zwischen drei Zuständen: Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ und Tau-Neutrino ν_τ . Für den Nachweis dieser Oszillationen wurden im Jahr 2015 der japanische Physiker Takaaki Kajita und der kanadische Physiker Arthur B. McDonald mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Aus der Tatsache, dass Neutrinos oszillieren, folgt, dass sie eine Masse besitzen müssen. Allerdings gibt es bislang keinen Wert hierfür. Eine aus Experimenten abgeleitete Obergrenze liegt bei $m = 2 \text{ eV}/c^2$. Darin steht $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ für die Lichtgeschwindigkeit.

Aufgabe 1: Die Geschwindigkeit v eines Neutrinos hängt ab von seiner Masse m und seiner Energie E_ν gemäß:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{m c^2}{E_\nu}\right)^2}$$

Die beiden kleineren Detektoren LSD und Baksan bestanden aus Szintillatorflüssigkeit. Darin reagieren überwiegend die Antineutrinos mit Protonen unter Bildung jeweils eines Neutrons und eines Positrons und lösen dabei Lichtblitze aus. Sie erlauben keine Richtungsbestimmung. Der Detektor LSD wurde von einem italienisch-russischen Forschergruppe betrieben und war in den italienischen Alpen nicht weit vom Mont Blanc untergebracht, Baksan ist ein Labor im Kaukasus.

Alle vier Detektoren wiesen nur wenige Ereignisse nach (siehe Tabelle S. 28). Deren Zahlen sind nicht sehr gut proportional zur Detektorgröße, da die Nachweis-

Das lässt sich mit Hilfe einer Reihenentwicklung in die Näherung

$$\frac{v}{c} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m c^2}{E_\nu}\right)^2$$

umschreiben. Das energiereichste Neutrino von der Supernova 1987A wurde vom Detektor IMB mit $E_1 = 38 \text{ MeV}$ gemessen, eines der energieärmsten von Kamiokande nach $\Delta t = 15 \text{ s}$ mit $E_2 = 8,9 \text{ MeV}$. **a)** Wie lange (t_c) ist das Licht von der $D_{\text{SN}} = 51\,500 \text{ pc}$ entfernten Supernova zu uns unterwegs? **b)** Welche Verzögerungen Δt_1 und Δt_2 relativ zu t_c ergeben sich für Neutrinos mit den Energien E_1 und E_2 ? Man darf getrost Terme der Form $(1-x)^{-1}$ durch eine Reihenentwicklung annähern und nach dem zweiten Glied abbrechen: $(1-x)^{-1} \approx 1 + x$.

Aufgabe 2: Man bestimme umgekehrt aus der Differenz $\Delta t_1 - \Delta t_2 = \Delta t = 15 \text{ s}$, t_c sowie E_1 und E_2 eine Massenobergrenze für Neutrinos. $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.
AXEL M. QUETZ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **14. Januar 2016** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 101

schwellen sehr unterschiedlich sind. In keinem der Detektoren dauerte das Signal länger als 15 Sekunden. Die Ergebnisse der drei Detektoren IMB, Kamiokande und Baksan sind gut miteinander und mit theoretischen Vorhersagen verträglich. Dabei muss man allerdings bedenken, dass die geringe Zahl der Ereignisse keine detaillierten statistischen Tests zulässt. Der Kamiokande-Detektor hatte keine sehr genaue Uhr, so dass der Zeitpunkt des ersten registrierten Ereignisses um bis zu einer Minute unsicher sein kann. Die große Merkwürdigkeit ist das Ergebnis der LSD-Forschergruppe, die behauptet, das Signal $4^{\text{h}}43^{\text{m}}$ früher als die ande-

ren Detektoren gemessen zu haben. Dies hat natürlich zu heftigen Diskussionen geführt, die auch heute noch nicht ganz verstummt sind.

Die LSD-Forschergruppe hält bis heute den Anspruch aufrecht, dass ihr Signal auf die SN 1987A zurückzuführen ist. Man muss zugeben, dass ihr Messsignal sehr auffällig ist: Bei einem Untergrund von einem Ereignis alle 70 Sekunden wurden fünf Ereignisse innerhalb von sieben Sekunden registriert. Die LSD-Gruppe war deshalb auch die einzige, die etwas Ungewöhnliches bemerkt hatte, bevor sie von der Supernova wusste. Die drei anderen Gruppen haben ihre Messdaten erst genauer analysiert, nachdem sie davon gehört hatten.

Sind die Ereignisse verbunden?

Wenn man eine Verbindung ihres Ergebnisses mit SN 1987A herstellen will, stellen sich zwei Fragen: (1) Können von derselben Supernova zwei Neutrino-Blitze im Abstand von mehreren Stunden an der Erde eintreffen? (2) Und wenn man das glaubt, wieso wurde der erste nur von einem der drei Detektoren gesehen (und noch dazu einem kleinen) und der zweite von allen drei anderen?

Zur ersten Frage gab es von Wolfgang Hillebrandt und Kollegen vom Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in Garching wenige Monate nach der Beobachtung von SN 1987A einen Vorschlag. Er beruht auf der Tatsache, dass der Kollaps aus Gründen der Drehimpulserhaltung zu einer Beschleunigung der Rotation des entstehenden Neutronensterns führt. Das könnte zur Folge haben, dass der Prozess eine Pause einlegt, da der Neutronenstern erst noch Drehimpuls abgeben muss, bevor er weiter in sich zusammenfallen kann. Neuere Untersuchungen der Sternentwicklung haben allerdings gezeigt, dass der Stern im Riesenstadium, das dem Kollaps unmittelbar vorangeht, viel Drehimpuls verliert, so dass diese Möglichkeit heute nicht mehr sehr ernst genommen wird. Im Prinzip wäre es natürlich auch denkbar, dass es dadurch zu einem verzögerten zweiten Blitz kommt, dass die Neutrinos die Erde auf zwei verschiedenen Wegen mit unterschiedlicher Laufzeit erreichen. Dazu wurde aber bisher kein plausibles Modell vorgeschlagen, obwohl die relative Verzögerung nur von der Größenordnung einiger ppb (parts per billion, $1 : 10^9$) ist.