

und die Herkunft der kosmischen Strahlung eines der großen Rätsel der Physik des 21. Jahrhunderts. Die direkte Fahnung nach den Quellen der kosmischen Strahlung – den kosmischen Beschleunigern – wird dadurch stark erschwert, dass geladene Teilchen wie Protonen in den wohl allgegenwärtigen Magnetfeldern im Kosmos und ebenso in unserem Milchstraßensystem abgelenkt werden (siehe SuW 1/2021, S. 21). Daher können sie am Ende ihrer langen Reise bei Ankunft auf der Erde ihren Ursprungsort nicht mehr verraten.

Ein Ausweg aus diesem Dilemma wäre die Beobachtung von Signalen, die sich gradlinig ausbreiten. Sie würden bei Wechselwirkungen der Teilchen der kosmischen Strahlung schon in den Quellen entstehen. Solche Signale gibt es: hochenergetische Photonen und Neutrinos. Bei den Photonen der Gammastrahlung stehen Astrophysikerinnen und Astrophysiker dann allerdings häufig vor dem Problem, dass sie auch durch Prozesse ohne Beteiligung von energiereichen Hadronen entstehen können und sich die Signale nur nach sorgfältiger Analyse voneinander unterscheiden lassen.

Als Quellen der höchstenergetischen Teilchen stehen extragalaktische Objekte wie beispielsweise aktive Galaxienkerne im Verdacht (siehe SuW 2/2020, S. 30). Bei der etwas energieärmeren, mutmaßlich galaktischen Komponente der kosmischen Strahlung waren viele Jahre lang die Stoßfronten von Supernova-Explosionen in der Milchstraße die heißesten Kandidaten. Und in der Tat gelang es, unter anderem mit Luftschauer-Teleskopsystemen wie H.E.S.S., MAGIC und VERITAS, eine nennenswerte Zahl solcher schalenartiger Supernova-Überreste im Gammastrahlenbereich nachzuweisen. Jedoch setzen sich die Energiespektren der beobachteten Gammastrahlung bei Weitem nicht in allen Fällen in Energiebereiche fort, die man erwartet, wenn es sich tatsächlich um die dringend gesuchten Quellen des kosmischen Hadronenhagels handeln würde.

Durchbruch an der Vulkanflanke

Dem HAWC-Team ist nun möglicherweise ein spannender Durchbruch bei der Fahnung nach solchen galaktischen PeVatronen gelungen. Das sind Objekte oder Regionen, die Teilchen auf Energien von Milliarden Elektronenvolt – PeV,

ZUM NACHDENKEN

Hochenergetische Strahlung vom Cygnus-Kokon



Zu den bekannten Quellen der kosmischen Strahlung gesellte sich vor wenigen Jahren eine Region im Sternbild Schwan: der Cygnus-Kokon. Er befindet sich in der Cygnus-Superblase heißen Gases, einer nahen Sternentstehungsregion in rund $d = 1,4$ kpc Entfernung ($1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$). Dort befinden sich auch die Cygnus-OB2-Assoziation, die bei einer Gesamtmasse von rund 16500 Sonnenmassen ungefähr 120 O- und 2500 B-Sterne enthält, der Sternhaufen NGC 6910 sowie G78.2+2.1, der Gamma-Cygni-Supernova-Überrest, der seinen Namen dem nur 25 Bogenminuten entfernten Stern Gamma Cygni verdankt.

Aufgabe 1: Der Cygnus-Kokon erstreckt sich über einen Raumwinkel von $\Omega_{\text{Kokon}} = 4,38 \cdot 10^{-3} \text{ sr}$. **a)** Welchen scheinbaren Winkelradius ϱ_{Kokon} hat der als kreisförmig angenommene Kokon am Himmel? **Hilfe:** $1 \text{ sr} \triangleq \Omega_{4\pi}/(4\pi)$ mit $\Omega_{4\pi} = 4\pi$ ($180^\circ/\pi$)², der Anzahl der Quadratgrad \square° an der Sphäre. **b)** Wie groß ist der wahre Durchmesser $D_{\text{Kokon}} = 2 R_{\text{Kokon}}$ des Kokons?

Aufgabe 2: Die beobachtete Verteilung der kosmischen Strahlung im Cygnus-Kokon gehorcht offenbar einer radialen Abnahme und ist kompatibel mit einem Ursprung in der Cygnus-OB2-Assoziation. Dies deutet darauf hin, dass über die Lebensdauer dieser Sternansammlung von $t_{\text{OB2}} = 1$ bis 7 Millionen Jahren ein Beschleunigungsprozess mehr oder weniger kontinuierlich Teilchen in den Kokon injiziert hat. Das kann nicht durch eine einzelne Supernova-Explosion geschehen sein und spricht eher für die kombinierte und lang anhaltende Wirkung mehrerer starker Sternwinde. Die Zeit, in der die Teilchen im Energiebereich von 10 GeV bis mehrere 100 TeV im Kokon diffundieren, ist

$$t_{\text{diff}}(E) = \frac{1}{2} R_{\text{diff}}^2 / D(E). \quad (1)$$

Dabei ist $D(E) = \beta D_0(E)$ der Diffusionskoeffizient und $D_0(E)$ der mittlere für die Galaxis. Der Diffusionsradius entspreche dem Radius des Cygnus-Kokons: $R_{\text{diff}} = R_{\text{Kokon}}$. Beobachtungen an anderen Quellen der kosmischen Strahlung deuten darauf hin, dass die Diffusion nahe der Beschleunigungsorte im Vergleich zum Durchschnitt der Galaxie um einen großen Faktor unterdrückt sein kann. Diese Diffusionshemmung wird durch das dimensionslose β beschrieben. Man zeige, dass mit $E_G = 10 \text{ GeV}$ und $E_T = 100 \text{ TeV}$ für $D_0(E_G) = 3 \cdot 10^{24} \text{ m}^2/\text{s}$ und $D_0(E_T) = 3 \cdot 10^{26} \text{ m}^2/\text{s}$ gilt:

$$t_{\text{diff}}(E_G) = \tau_G \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_{\text{diff}}}{55 \text{ pc}} \right)^2 \left(\frac{D_0(E_G)}{3 \cdot 10^{24} \text{ m}^2/\text{s}} \right)^{-1}$$

$$t_{\text{diff}}(E_T) = \tau_T \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_{\text{diff}}}{55 \text{ pc}} \right)^2 \left(\frac{D_0(E_T)}{3 \cdot 10^{26} \text{ m}^2/\text{s}} \right)^{-1}$$

Ausgehend von Gleichung (1) ermittle man die Faktoren τ_G und τ_T .

Aufgabe 3: a) Die Diffusionszeit $t_{\text{diff}}(E_G)$ der mit dem Large Area Telescope (LAT) an Bord des Gammastrahlen-Weltraumobservatoriums Fermi nachgewiesenen 10-GeV-Teilchen muss kürzer sein als das Alter t_{OB2} der Cygnus-OB2-Assoziation: $t_{\text{diff}}(E_G) < t_{\text{OB2}}$. Was folgt daraus für den Parameter β der Diffusionshemmung? **b)** Andererseits muss die Diffusionszeit $t_{\text{diff}}(E_T)$ von 100-TeV-Teilchen länger sein als die Lichtlaufzeit $t_R = R_{\text{Kokon}}/c$ (Lichtgeschwindigkeit $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) zu den Rändern des Kokons: $t_{\text{diff}}(E_T) > t_R$. Welche Obergrenze ergibt sich daraus für den Parameter β ? 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 1. Oktober 2021. Alle Leser, die bis einschließlich des Maihefts 2022 mindestens neun richtige Lösungen senden, werden bei der jährlichen Verlosung berücksichtigt; siehe S. 95. Bitte beachten Sie unsere Teilnahmebedingungen auf S. 15! Sie können Ihre Datenschutzrechte nach Art. 15 ff. DSGVO ausüben, indem Sie uns unter service@spektrum.de kontaktieren.