

Die Materie, das Universum und der ganze Rest

Frei nach dem Titel eines Buches von Douglas Adams bezieht sich »Zum Nachdenken« diesmal auf einige Aspekte der Entwicklung des Kosmos. Siehe dazu auch den Aufsatz »Die Millennium-Simulation« von Volker Springel ab Seite 30 in diesem Heft.

Als das Universum etwa $t_d = 380\,000$ Jahre alt war, wurde es durchsichtig. Deshalb können wir heute Strahlung sehen, die damals in diesem jungen Zustand entstand. Die Temperatur war damals unter die Schwelle von ca. $T_1 = 3000\text{ K}$ gesunken. Durch die Expansion des Kosmos ist die Temperatur der damals emittierten Strahlung auf den mit den Satellitenobservatorien COBE und WMAP präzise vermessenen Wert von $T_0 = 2.728\text{ K}$ gesunken. Diese Strahlung wird kosmische Hintergrundstrahlung genannt. Sie wurde von Ralph Alpher, George Gamow und Robert Herman 1948 in einer theoretischen Arbeit vorhergesagt und 1964 von Arno Allan Penzias und Robert Woodrow Wilson nachgewiesen [1].

Eine qualitative Überlegung macht die Abnahme der Temperatur plausibel: Die Photonendichte sinkt im expandierenden Universum proportional zum wachsenden Volumen ($\propto R^{-3}$). Deshalb nimmt die Energiedichte der Photonen bei Berücksichtigung der Rotverschiebung ($\lambda \propto R$) proportional zu R^{-4} ab. Da das Spektrum der Hintergrundstrahlung derjenigen eines Schwarzen Körpers entspricht, gehorcht sie auch während des gesamten Expansionsvorganges dieser Spektralverteilung. Dann aber nimmt die Schwarzkörpertemperatur wegen der Proportionalität der Energiedichte zu T^4 gemäß $T \propto R^{-1}$ ab. Mit wachsendem Radius muss die Temperatur des Photongases demnach sinken!

Bei der genauen Analyse muss während der Abkühlung des Universums der Übergang vom strahlungsdominierten zum materiedominierten Zustand berücksichtigt werden. So gilt für das frühe, strahlungsdominierte Universum folgender Zusammenhang zwischen Temperatur T und Alter t :

$$T(t) = \left(\frac{3c^2}{32\pi a G} \right)^{1/4} t^{-1/2}.$$

Darin sind $c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit, $a = 4\pi\sigma/c$ die Strahlungskonstante, $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante und $G = 6.6742 \cdot 10^{-11}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$ die Gravitationskonstante. Die Gleichung liefert verlässliche Ergebnisse bis zu einem Alter des Universums, welches in Sekunden misst. Danach frieren aus dem strahlungsdominierten Zustand bei voranschreitender Abkühlung Materieteilchen aus.

Aufgabe 1: Wann war die Temperatur des Kosmos so weit gesunken, dass die Bildung von Elektron-Positron-Paaren aus dem harten Strahlungsfeld nicht mehr stattfinden konnte? Die Ruheenergie E_E des Elektrons beträgt $E_E = m_E c^2 = 512\text{ keV}$, wobei $1\text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$. Die Photonenenergie E_γ ist gegeben durch $E_\gamma = h\nu \approx 3kT$. Die Boltzmann-Konstante k hat den Wert $k = 1.3807 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}$.

Aufgabe 2: Man berechne, zu welchem Zeitpunkt t_1 das Universum durchsichtig wurde und vergleiche mit t_d .

Lösung der Aufgabe aus dem September-Heft 2006

Aufgabe 1: a) Die vom Stern emittierten Photonen verteilen sich im Abstand des Planeten auf die Fläche πr_p^2 . Davon schneidet sich der Planet den Anteil πR_p^2 aus. Da sich der Planet laut Voraussetzung in maximaler Elongation befindet, sehen wir den Planeten als Halbkugel. Bei einer angenommenen Albedo $A = 1$ des Exoplaneten entspricht der Quotient der beiden Flächen zugleich dem Intensitätsverhältnis, unter dem wir die beiden Körper beobachten. Das gesuchte Verhältnis q ist dann:

$$q = \frac{1}{2} \frac{\pi r_p^2}{\pi R_p^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{r_p}{R_p} \right)^2,$$

a) Für einen erdähnlichen Planeten findet man:

$$q_{PE} = 2.76 \cdot 10^8.$$

Dies entspricht einem Helligkeitsunterschied von 21.1 mag. **b)** Im Falle eines Jupiterähnlichen Planeten ergibt sich dann analog:

$$q_{PJ} = 5.95 \cdot 10^7.$$

Dies entspricht einem Helligkeitsunterschied von immer noch 19.4 mag, ist also auch nicht viel günstiger.

Aufgabe 2: Gemäß der Definition des Parsec (pc), der Parallaxensekunde, erscheint der Bahnradius der Erde aus der Distanz eines Parsec unter dem Winkel von einer Bogensekunde. Wegen der Kleinheit des Winkels gilt deshalb:

$$\delta = \frac{1''}{d/\text{pc}}.$$

Demnach entfernt sich ein Exoplanet, der sein Zentralgestirn in einer Umlaufbahn mit Radius 1 AE umkreist, in der Distanz $d = 10\text{ pc}$ von der Erde aus betrachtet allenfalls um den Winkel $\delta_p = 0''.1$ von seiner Sonne.

Aufgabe 3: Befindet sich der Lichtschild in der Distanz $D = 40\,000\text{ km}$ vom Teleskop entfernt zwischen Teleskop und beobachtetem Stern, der seinerseits in der Distanz $d = 10\text{ pc}$ steht, und hat ein Exoplanet um diesen Stern eine Umlaufbahn mit Radius $d = 1\text{ AE}$, dann darf der Schild maximal den Radius

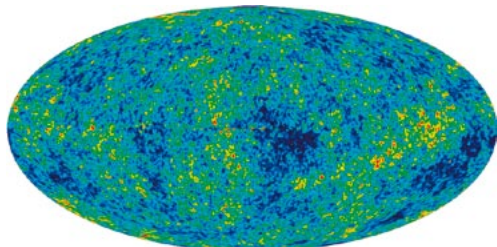
$$r_L = \frac{D}{r} d = 19.4\text{ m}$$

besitzen, wenn der Stern zentral hinter dem Schild sitzt und der Exoplanet nicht

auch verdeckt wird. Eine Obstruktion dieser Größe scheint realisierbar zu sein. Jetzt kommt es natürlich noch darauf an, ob die erforderliche Positioniergenauigkeit erreichbar ist. Eine weitere wichtige Kenngröße des Systems JWST-Lichtschild ist die Schwenkgeschwindigkeit, mit der sich ein anderes Beobachtungsobjekt anvisieren lässt. AMQ

Richtige Lösungen sandten ein:

Physik-LK 12 der Bismarckschule Hannover, D-30173 Hannover; Ulrike Neumann, D-59558 Lippstadt; Ulrike Saher, D-40629 Düsseldorf; N. Becker, D-61462 Königstein i. Ts.; W. Blendin, D-65597 Hünfelden-Kirberg; A. Borchardt, D-86356 Neusäß/OT Steppach; G. Breitkopf, D-13156 Berlin; H. Brockmann, D-78315 Radolfzell; U. Buchner-Eysell, D-86833 Ettringen; W. Christ, D-65824 Schwalbach; K. Clausecker, D-74219 Möckmühl; R.-R. Conrad, D-31275 Lehrte; G. Croll, D-67307 Gölheim; A. Dannhauer, D-38871 Ilsenburg; J. Döblitz, D-70619 Stuttgart; H. Dschida, D-73660 Urbach; H. Duran, CH-5300 Turgi; M. Ebert, D-85435 Erding; E. Edler v. Maljevac, D-70825 Korntal-Münchingen; P. Fischer, D-08223 Falkenstein; R. Fischer, D-50858 Köln; G. Forster, D-69120 Heidelberg; M. Geisel, D-79540 Lörrach; M. Gläsel, D-95445 Bayreuth; J. Glattkowski, D-76571 Gaggenau; H. Göbel, D-79540 Lörrach; S. Griesing, D-66740 Saarlouis-Roden; J. Th. Grundmann, D-52068 Aachen; A. Güth, D-73078 Boll; R. Guse, D-31228 Peine; A. Haag, D-63110 Rodgau; J. Haller, D-51379 Leverkusen; J. Hampf, D-91056 Erlangen; D. Hauffe, D-60431 Frankfurt am Main; H. Hauser, D-89275 Elchingen; U. Hermann, D-89347 Bubesheim; S. Hetze, D-12057 Berlin; A. Heuser, D-53879 Euskirchen; F. Hofmann, D-01069 Dresden; J. Home, D-06844 Dessau; B. Hornisch, D-91238 Engelthal; N. Husmann, D-48155 Münster; B. Hußl, A-4542 Nußbach; Th. Inghoff, D-34355 Staufenberg; H. Kamper, D-89520 Heidenheim; J. E.



▲ Die 3000 K der »letzten Streufläche« erscheinen uns bei 2.73 K, nachdem die Photonen durch Raum und Zeit den Weg zu uns gefunden haben.

Aufgabe 3: Die kosmologische Rotverschiebung z ist definiert als die relative Wellenlängendifferenz zwischen beobachteter Wellenlänge λ und Laborwellenlänge λ_0 : $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$. Im materiedominierten Kosmos lässt sich die Änderung der Temperatur durch

$$T(z) = T_0 (1 + z)$$

beschreiben. Bei welcher Rotverschiebung sehen wir die auch »letzte Streufläche« genannte finale Wand, deren Temperatur T_1 beträgt? AXEL M. QUETZ

Literatur

- [1] Arno A. Penzias und Robert W. Wilson: A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. *Astrophysical Journal* 142, S. 419–421 [1965]
[2] Norbert Schmitz: Neutrinophysik. Teubner Studienbücher [1997]

Keller, D-68775 Ketsch; L. Kirschhock, D-92237 Sulzbach-Rosenberg; F.-G. Knell, D-63457 Hanau; K.-M. Köppl, D-47805 Krefeld; K.-H. Künzler, D-45279 Essen; H.-P. Lange, D-85376 Massenhausen; M. Leinweber, D-35435 Wettenberg; A. Leonhardt, D-90559 Burghann; B. Leps, D-13507 Berlin; A. Lichtfuß, D-93161 Sinzing; R. Lühmann, D-78224 Singen; W. Mahl, D-71254 Ditzingen; P. Matzlik, D-51399 Burscheid; N. Mayer, D-12205 Berlin; M. Mendl, D-85567 Grafing b. München; F. Moser, D-47167 Duisburg; K. Motl, D-82538 Geretsried; S. Mrozek, D-25358 Horst; Chr. Netzel, D-52080 Aachen; J. Nußbaum, D-80689 München; M. Otte, D-59558 Lippstadt; Chr. Overhaus, D-46325 Borken; G. Pannach, D-38124 Braunschweig; M. Plambeck, D-21031 Hamburg; U. Poschmann, D-52351 Düren; R. Prager, A-2230 Gänserndorf; H. Prange, D-57250 Netphen; B. Quednau, D-33397 Rietberg; F. Reinhardt, D-79539 Lörrach; K. Rezapka, D-71149 Bondorf; R. Rohde, D-12277 Berlin; K. Rohe, D-85625 Glonn; A. Schäfer, D-71711 Steinheim/Murr; F. Schauer, D-79199 Kirchzarten; N. Scherer, D-76137 Karlsruhe; J. Schermer, D-12687 Berlin; R. H. Schertler, A-5280 Braunau am Inn; M. Schiffer, D-88662 Überlingen; B. Schmalfeldt, D-21521 Aumühle; J. Schnichels, D-53881 Euskirchen; G. Scholz, D-73457 Essingen; J. Schröder, D-45731 Waltrop; P. J. Schüngel, CH-8105 Regensdorf ZH; S. Schuler, D-66346 Püttlingen; M. Senkel, D-85614 Kirchseeon; D. Spitzer, D-59075 Hamm; R. Stahlbaum, D-38124 Braunschweig; K. Stampfer, D-86486 Bonstetten; A. Thiele, D-52066 Aachen; A. Trutschel-Stefan, D-83714 Miesbach; G. Tyckowski, D-47057 Duisburg; G. Wahl, D-88453 Erolzheim; H.-G. Wefels, D-47239 Duisburg; S. Weiß, A-8010 Graz; H. Wember, D-22525 Hamburg; A. Wendt, D-69488 Birkenau; B. Wichert, D-21629 Neu - Wulmstorf; Chr. Wiedemair, I-39031 Bruneck, Südtirol; H.-U. Wieland, D-73340 Amstetten; A. Zeh-Marschke, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen; M. Ziegler, A-2460 Bruckneudorf; Chr. Zorn, D-70825 Korntal-Münchingen; sowie ein Namenloser »FRITZ!« via ISDN.

Insgesamt 108 Einsendungen, Fehlerquote: 0 %.

Kreuzworträtsel

VON FRED GOYKE

Venus	12	Gravitationswellendetektor (... 600)	Sternbild m. Zuben-eigenubi (lat. Bez.)	Saturn-mond, v. G. Cassini entdeckt	Sternbild Grabstichel (lat. Bez.)	Kamera auf dem Satelliten Spitzer	Einheitenzeichen für Pascal
Entdecker des Krebsnebels	7	Prisma	russ. Venus-sonden	Teleskop des Paranal-Observatoriums	8	Potsdamer Forschungseinrichtung	
Sternbild mit M 65 (lat. Bez.)		Mars-vulkan (... Mons)	9		11	1844 geb. Astronom u. Kometenjäger	seltene Sonnenfinsternis
ital. Experiment suchte n. WIMPS			S von SMART-1	Massenmedium	6		
... Large Millimeter Array		Dunst, Dampf (Vorsilbe)	starker Meteorschauer		10		Flugroute eines Satelliten
			3			Spiralgalaxie (Hubblesequenz)	Kfz.-Kennzeichen f. Böblingen
			Prototyp Veränderl. Sterne (... Orionis)	geplante Mission d. Esa (... Orbiter)			
Menkar (Alpha ...)		Sonnengebiet	5			Spektrallinie des neutralen Wasserst.	4
wiederkehrende Nova	1				Uhrentyp	2	

Lösung des Kreuzworträtsels aus SuW 9/2006

R H T B
F O K U S A S I A G O
T T A U R I I L A
S E B R O N O G O
F R E Y J A O A B T
F T A S A P H U H
A L A N P E A G L E
E A R E S S E M
E C H O R A Y E T I
K S T A U B I R S



Kreuzworträtsel. Die eingekreisten Buchstaben bilden ein Lösungswort. Unter allen, die dieses Lösungswort bis zum

15. November auf einer Postkarte

an die Redaktion einsenden, verlosen

wir ein Zoomspektiv Bresser Zoomar

15-45×60 im Wert von 179 €, gestiftet

von Fa. Meade, mit Tischstativ für den

sicheren Stand im mobilen Einsatz und mit

einem Hartschalenkoffer für den Transport. Viel Spaß beim Knobeln!

Die Lösung des Kreuzworträtsels in Heft 9/2006 lautet: **Thomas Reiter**.

Der glückliche Gewinner des Zoomspektiv Bresser Zoomar 15-45×60 (bei 195 richtigen und 1 Einsendung ohne Lösung :-)) ist: **Jürgen Fährmann**, Steinwiese 84, D-09116 Chemnitz.

Herzlichen Glückwunsch! Red.

»Zum Nachdenken« im Web

Einige Tage vor der Auslieferung des gedruckten Heftes lässt sich das aktuelle »Zum Nachdenken« auf der Homepage von SuW www.suw-online.de als PDF finden. Ältere Fassungen: → SuW-Archiv → Zurückliegende Ausgaben.

Einsendungen

- Lösungen werden nur auf Papier – Brief oder Fax – akzeptiert, auf keinen Fall jedoch per E-Mail.
- Die Redaktion empfiehlt, Namen und Anschrift immer auf dem Lösungsblatt zu notieren.
- Lösungen, die nach dem angegebenen Stichtag eintreffen, können leider nicht berücksichtigt werden.

Die 26. Runde

Mit der Aufgabe im Juni-Heft begann die 26. Runde *Zum Nachdenken*. Alle Löser mit wenigstens neun richtigen Einsendungen aus den zwölf bis inklusive Mai 2007 erscheinenden Aufgaben in »Zum Nachdenken« werden bei der Verlosung im Sommer 2007 berücksichtigt. Zu gewinnen sind als attraktive Hauptpreise ein komplettes Okularset, bestehend aus sechs Okularen vom Typ **Baader-Hyperion**, gestiftet von Fa. Baader Planetarium, sowie ein Fernglas **Mariner II**, gestiftet von Fa. Fujinon. Viel Spaß beim Nachdenken und viel Erfolg beim Lösen!

AMQ

Hauptpreise



Das Okularset **Baader-Hyperion** im Wert von 699 € besteht aus sechs 68°-Weitwinkel-Okularen mit augenphysiologisch optimalem Gesichtsfeld in den Brennweiten: 3,5 mm, 5 mm, 8 mm, 13 mm, 17 mm und 21 mm, jeweils mit 1¼"- und 2"-Steckfassung, sowie zwei integrierten Systemgewinden zur Adaption des Okulars an fast jede digitale Kamera – dazu werden 16 verschiedene digitale T-Ringe optional angeboten. Gestiftet von Fa. Baader Planetarium. www.baader-planetarium.de.



Das Fernglas **Mariner II** vom Typ 7×50 WP/II-CF im Wert von 189 €, mit herausragenden optischen Eigenschaften, gestiftet von Fa. Fujinon (Europe) GmbH. www.fujinon.de.