

Verschlucktes Licht

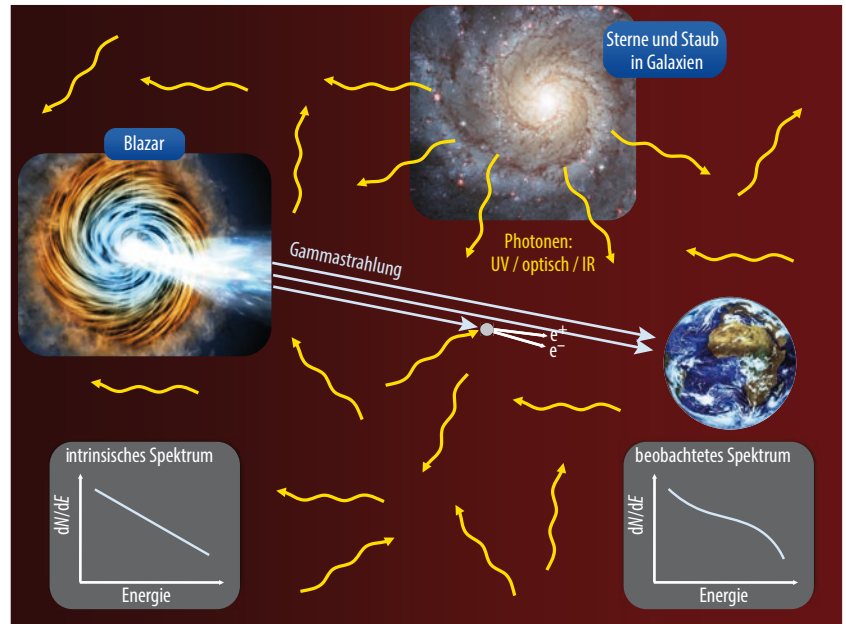
Die Absorption kosmischer Gammastrahlung ermöglicht Einblicke in die Geschichte des Universums.

Frank M. Rieger

Sterne produzieren den Großteil der optischen Strahlung im Universum und spielen eine grundlegende Rolle bei der Entstehung schwerer chemischer Elemente mittels Kernreaktionen im Sterninneren. Daher stellt das Verständnis der kosmischen Sternentstehungsgeschichte ein fundamentales Thema astrophysikalischer Forschung dar [1]. Dazu gehören die Fragen, wie viele Sterne sich im Universum gebildet haben und wann sie entstanden sind. Um diese zu beantworten, muss die Geburtsrate der Sterne als Funktion des Alters des Universums bekannt sein.^{#)}

Die Sternentstehungsgeschichte vollständig zu verstehen, ist schwierig, weil unter anderem systematische Unsicherheiten auftreten, wenn aus dem beobachteten Sternenlicht auf die Gesamtmasse der Sterne in einer Galaxie geschlossen wird. Üblicherweise wird die Sternentstehungsrate aus der direkten Beobachtung des Lichtes massiver, kurzlebiger Sterne abgeschätzt, typischerweise im ultravioletten (UV) Wellenlängenbereich und/oder mit der infraroten (IR) Wärmestrahlung des durch die Sterne aufgeheizten Staubes. Um aus dem UV-Licht auf die totale Massenbildung pro Jahr zu schließen, muss allerdings bekannt sein, wie die Sternmassen einer neu entstehenden Sternpopulation verteilt sind und wie stark der Staub zu Verdunklung führt. Daher ist es notwendig, in groß angelegten Studien viele einzelne Galaxien zu beobachten und tiefe Himmelsdurchmusterungen durchzuführen, um die kosmische Sternentstehungsgeschichte zu enträtseln. Unsicher bleibt dabei vor allem der Beitrag zur Sternentstehung bisher nicht entdeckter Quellen. Dazu gehören beispielsweise Galaxien aus der Frühphase des Universums [2]. Verschiedene Vorgehensweisen sind mit unterschiedlichen systematischen

^{#)} Diese Rate, die „Star Formation History“, besitzt die Einheit Sonnenmassen pro Jahr und Volumenelement ($M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{Mpc}^3$).



Bilder: M. Weiss, CFA / NASA, ESA, Hubble Coll. / ESA

Abb. 1 Die von Blazaren emittierte Gammastrahlung wechselwirkt auf ihrem Weg zur Erde mit den Photonen des Hintergrundlichts im infraroten bis optischen Wellenlängenbereich mittels Paarerzeugung. Die Absorption modifiziert die Spektren entfernter Gammaquellen, sodass sich die Dichte des Hintergrundlichts aus beobachteten Spektren rekonstruieren lässt.

Effekten verbunden. Daher können komplementäre Studien hilfreiche Aufschlüsse erlauben.

Kürzlich hat die internationale Kollaboration Fermi-LAT die Ergebnisse einer solchen Studie vorgestellt [3]. Seit August 2008 befindet sich das Weltraumteleskop Fermi-LAT auf einer erdnahen Umlaufbahn in etwa 600 Kilometern Höhe. Bei einer Umlaufdauer von 96 Minuten detektiert es energiereiche Gammastrahlung im Bereich von etwa 20 MeV bis oberhalb von 300 GeV. Mittlerweile hat das Teleskop mehr als 5000 neue Quellen für Gammastrahlung entdeckt, darunter Schwarze Löcher, Neutronensterne, aktive Galaxien und Gammastrahlenblitze. Den Großteil machen Blazare aus, also aktive Galaxien, bei denen ein gebündelter, relativistischer Plasmastrahl (Jet) auf den Beobachter zeigt und so zur Verstärkung der Strahlung führt. In die neue, umfassende Studie gingen 739 leuchtkräftige Blazare ein, deren Entfernung hinreichend genau bekannt ist. Mit Rotverschiebungen

zwischen $z = 0,03$ und $3,1$ ergibt sich im kosmologischen Standardmodell eine Rückblickzeit von etwa 0,2 bis 11,6 Milliarden Jahren.

Der physikalische Ansatz zur Rekonstruktion der Sternentstehungsgeschichte aus Gammastrahlung beruht auf der Photon-Photon-Wechselwirkung der Gammastrahlen mit dem diffusen, kumulativen Licht aller Sterne. Dieses extragalaktische Hintergrundlicht (Extragalactic Background Light, EBL) liegt im UV- bis IR-Bereich bei Wellenlängen von 0,1 bis 10 μm . Durch die Paarerzeugung gemäß der Reaktion $\gamma + \gamma_{\text{EBL}} \rightarrow e^+ + e^-$ kommt es zu einer charakteristischen Absorption der Gammastrahlung in den Spektren weit entfernter Quellen (**Abb. 1**).

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine solche Reaktion auf dem Weg zum Beobachter auftritt, lässt sich mit der optischen Tiefe $\tau(E, z)$ berechnen und beträgt $[1 - \exp(-\tau)]$. Dabei bestimmt die Teilchendichte des diffusen Lichts integriert entlang der Sichtlinie die

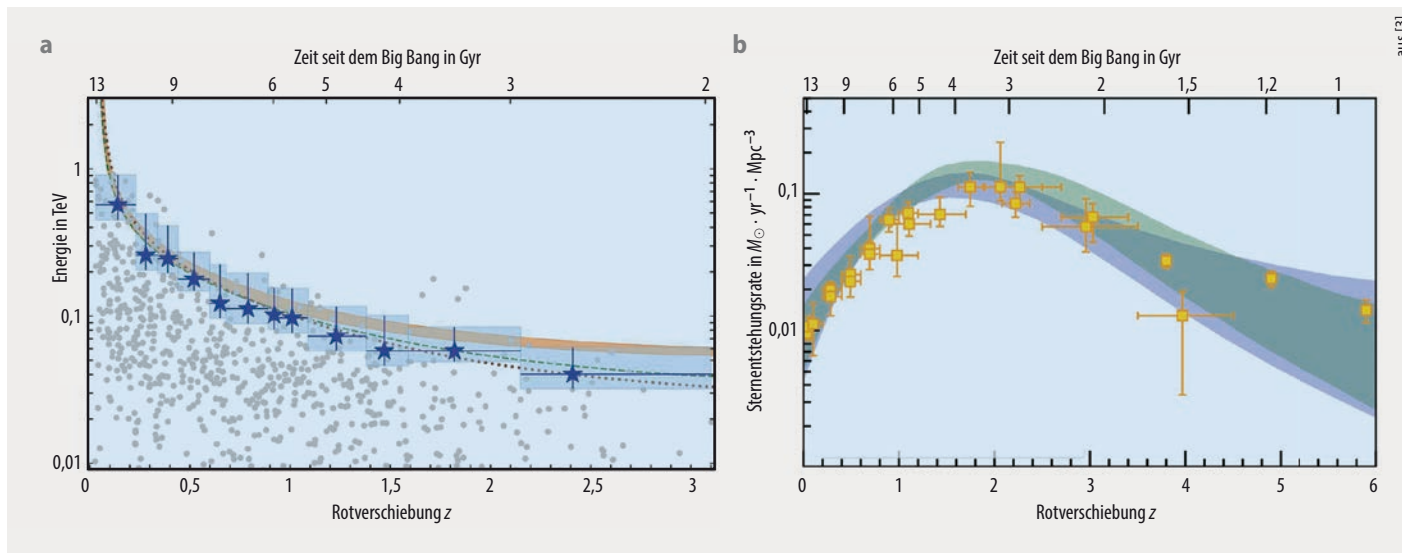


Abb. 2 Aus den energiereichsten Photonen, die von Blazaren bekannt sind (a, grau), lässt sich der kosmische Gammastrahlenhorizont $\tau(E, z) = 1$ bestimmen. Die Daten von Fermi-LAT zu Blazaren (blau) erlauben eine Charakterisierung bis hin zu

relativ hohen Rotverschiebungen und stimmen mit früheren Modellen gut überein (Linien). Mit Hilfe dieser Ergebnisse lässt sich die Sternentstehungsrate als Funktion der Rotverschiebung bestimmen (b). Der Verlauf, der sich dabei aus

einer empirischen Rekonstruktion (blau) und einem physikalischen Modell (grün) des extragalaktischen Hintergrundlichts ergibt, stimmt gut mit UV-Survey-Daten (gelb) überein.

optische Tiefe. Der Wert $\tau = 1$ bezeichnet üblicherweise die Grenze, bei der das Universum für die beobachtete Strahlung undurchsichtig wird. Bei einer bestimmten Rotverschiebung z ist oberhalb einer gewissen Energie E keine Strahlung mehr zu beobachten. Umgekehrt ergibt sich daraus der Gammastrahlenhorizont: Bei einer gegebenen Energie E sind Beobachtungen nur bis zu einer gewissen Rotverschiebung z möglich (**Abb. 2a**).

Aus der Beobachtung der Spektren von Gammaquellen in verschiedenen Entfernungen lässt sich die Photondichte des diffusen Lichts zu unterschiedlichen kosmischen Zeiten rekonstruieren – vorausgesetzt, die intrinsischen Spektren der Quellen sind ausreichend bekannt. In der Regel ist dies nicht der Fall, sodass Idealisierungen notwendig sind. In der vorliegenden Studie wurde ein Potenzgesetz mit einem logarithmischen Krümmungsterm (so genannte Logparabola) für die Blazar-Spektren angenommen. Der physikalische Ansatz wurde vorher schon erfolgreich angewandt, um den lokalen, infrarot-optischen Bereich des extragalaktischen Hintergrundlichts mit Hilfe der Daten bodengestützter Teleskope wie H.E.S.S. zu untersuchen [4].

Die Daten von Fermi-LAT erlauben es nun, mit Hilfe eines Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahrens auch

den angrenzenden optischen und UV-Bereich einzubeziehen, und eröffnen durch die Verteilung der Quellen mit z einen neuen Zugang zur Sternentstehungsgeschichte. Die dabei erzielten Ergebnisse bestätigen vorherige Abschätzungen und stärken damit das Vertrauen in die vorliegenden Modelle. Der Peak in der Sternentstehungsrate bei $z \approx 2$ entspricht im kosmologischen Standardmodell einem Zeitpunkt von etwa 3,3 Milliarden Jahren nach dem Big Bang (**Abb. 2b**). Zusammengefasst ergeben die Daten ein konsistentes Bild für fast 90 Prozent der Sternentstehungsgeschichte [3].

Mit Hilfe der Daten eines neu entdeckten Gammastrahlenblitzes lässt sich dabei die Sternentstehungsrate zu hohen Rotverschiebungen hin eingengen. Das UV-Licht leuchtschwacher Galaxien aus der Frühphase des Universum weniger als 900 Millionen Jahre nach dem Big Bang (Rotverschiebung $z > 6$) ist sehr wahrscheinlich hauptverantwortlich dafür, dass neutraler Wasserstoff reionisiert wird, und beeinflusst damit die beobachtete Strahlung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Wie häufig solche Galaxien bei kleiner Leuchtkraft, also großer absoluter Helligkeit M , sind, ist Gegenstand aktueller Diskussionen. Die nun veröffentlichten Ergebnisse legen nahe, dass ihre Zahl für $M \approx -14$ nicht weiter ansteigt. Das

reicht jedoch aus, um die Reionisierung zu erklären. Allerdings dominiert hier eine einzelne Quelle – der neu entdeckte Gammastrahlenblitz bei $z = 4,35$ – die Daten, sodass eine weitere Konsolidierung wünschenswert wäre.

Weitere Durchbrüche bezüglich der Bestimmung des extragalaktischen Hintergrundlichts und der Sternentstehungsgeschichte rücken mit Hilfe der bodengestützten Beobachtung von Gammastrahlung des im Bau befindlichen Cherenkov Telescope Array und den geplanten Galaxiendurchmusterungen des James Webb Space Telescope für infrarot-optische Wellenlängen in greifbare Nähe.

- [1] P. Madau und M. Dickinson, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **52**, 415 (2014)
- [2] R. J. McLure et al., MNRAS **432**, 2696 (2013)
- [3] S. Abdollahi et al. (The Fermi-LAT Collaboration), Science **362**, 1031 (2018)
- [4] F. Aharonian et al., Nature **440**, 1018 (2006); H. Abdalla et al. (H.E.S.S. Collaboration), A&A **606**, A59 (2017)

Autor

Priv.-Doz. Dr. Frank M. Rieger, ZAH, Universität Heidelberg, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg und MPI für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg