

# Die explodierte Zigarre

## Die Galaxie M 82 im polarisierten Licht

M 82 wird auch die Zigarrengalaxie genannt. Sie weist nicht nur von uns aus gesehen die Form einer Zigarre auf, sondern ist auch von dichten unsymmetrischen »Rauchwolken« aus interstellarem Staub und Gas umhüllt. Für Profis wie Amateure war und ist die im Jahr 1774 durch Johann Elert Bode entdeckte elf Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie ein faszinierendes Objekt.

VON NICOLAUS STEENKEN  
UND JAN-UWE NESS

**A**ls ich am 1. April 2005 in meiner Gartensternwarte auf meinem Laptop die Differenzbilder von M 82 im polarisierten Licht aufleuchten sah, dachte ich zunächst an einen kleinen Aprilscherz meiner Elektronik: Im südwestlichen Teil der Galaxis war ein Kegel polarisierten Lichts klar erkennbar, während die Galaxie selbst polarisiertes Licht mit einem anderen Richtungsvektor ausstrahlte. Erwartet hatte ich eigentlich nur eine schwache Polarisierung entlang der dunklen Bänder, welche durch interstellaren Staub verursacht wird.

Bilder, welche ich vier Tage später aufnahm, zeigten jedoch das gleiche Phänomen und ich machte mich mit meinem astronomischen Freund Jan-Uwe Ness an die Aufklärung dieses Phänomens.

### Die Zigarrengalaxie

Warum M 82 so seltsam (»peculiar«) aussieht, konnte in den letzten 50 Jahren mit Hilfe hunderter wissenschaftlicher Studien immer besser verstanden werden: Die »Zigarre« ist demnach schon vor mehreren 100 Millionen Jahren in der Mitte explodiert und wurde damit für die Wissenschaftler zum Prototyp der »Starburst«-Galaxien.

Im Jahre 1953 entdeckte Henbury Brown Radiostrahlung aus der Richtung von M 82 (Ursa Majoris A). Die Suche nach den Ursachen begann, da bei vergleichbaren Galaxien keine Radiostrahlung festgestellt wurde. Spektralanalysen im sichtbaren Licht wiesen auf eine starke Rötung des Lichts von M 82 durch interstellaren Staub hin. 1962 veröffentlichten Elvius und Hall, dass das Licht aus den äußeren Filamenten bis zu 15 Prozent polarisiert ist – und zwar rechtwinklig zu den Filamenten. Sie vermuteten, dass die Filamente mit einem magnetischen Feld im Zusammenhang stehen. [1]

Im selben Jahr untersuchten Sandage und Lynds M 82, unter anderem mit dem

damals größten Teleskop der Welt auf dem Mount Palomar. In einer drei Stunden lang belichteten H $\alpha$ -Aufnahme mit dem 5-m-Spiegelteleskop zeigten sich erstmals die gewaltigen Dimensionen der Filamente, die bis zu 3000 Parsec aus dem Zentrum heraus ragten. 1963 veröffentlichten sie ihre Ergebnisse unter dem Titel »Hinweise auf eine Explosion im Zentrum der Galaxie M 82«. [2]

Auch aufgrund der verblüffenden Analogien zum Krebs-Nebel schlossen sie auf eine gigantische Explosion im Zentrum, die nach ihren Berechnungen eine Energie von mindestens einer Million Supernovae aufwies. Sie war in der Lage, Materie mit bis zu 1000 Kilometer pro Sekunde senkrecht aus der Galaxie auszuwerfen. Die Strahlung der Filamente entstand demnach nicht durch Sterne, sondern durch den zum Leuchten angeregten ausströmenden Superwind. Die Hypothesen von Lynds und Sandage lösten eine Flut weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen aus, welche die Hypothesen weitgehend bestätigten und ergänzten.

### Mögliche Ursachen

Insbesondere die Frage, was im Kern von M 82 eine solch gigantische Explosion ausgelöst hatte, wurde diskutiert. Fred Hoyle vermutete schon 1963, dass es sich um einen gravitativen Kollaps handeln könnte. Später bestätigte sich, dass die größere Nachbargalaxie M 81 bei einer engen Begegnung vor 600 Millionen Jahren aus der vorher vermutlich normalen Spiralgalaxie M 82 ein »Unfallopfer« in

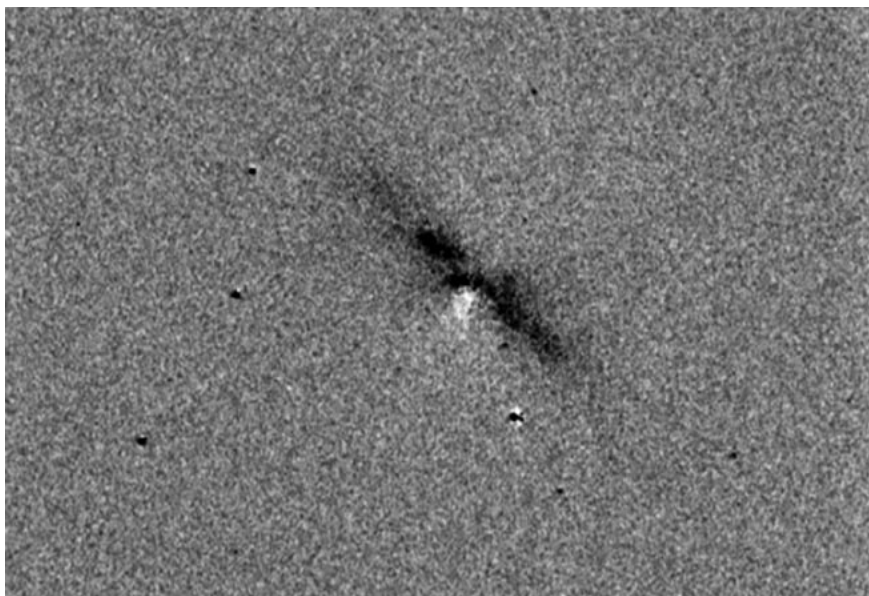
▼ Abb. 1: Kompositaufnahme von M 82. Deutlich sichtbar sind die irregulären Staubbänder und die rötlichen Filamente, die südlich und nördlich des Galaxienkerns austreten. Die Aufnahme entstand am 20.2.2004 mit einem 11-Zoll-Teleskop von Celestron mit  $f/6.3$  (Brennweite: 1760 mm) und einer CCD-Kamera des Typs SXV-H9 mit Astronomik-Filter Typ II.c. Die Einzelaufnahmen des L-H $\alpha$ -RGB-Komposits wurden 13: 11: 5: 5 und 5 min belichtet. (Bild: Stefan Heutz)





▼ Abb. 2: M82 als Differenzbild von Aufnahmen im polarisierten Licht. Zwei Aufnahmen (A) entstanden mit dem Polarisationsfilter in Richtung des galaktischen Äquators, zwei Aufnahmen (B) mit dem um 90° gedrehten Polarisationsfilter in der Reihenfolge A, B, A, B. Aufnahmen am 1.4.2005 um 23:30 MEZ in München. Belichtungszeit:  $4 \times 10$  min mit einer CCD-Kamera Starlight X-Press (MX 516 mit Selfguiding) und Celestron 8. (Bild: N. Steenken)

▲ Abb. 3: Die Nachbargalaxien M81 und M82, aufgenommen durch einen 4-Zoll-Refraktor von Astrophysics mit  $f = 600$  mm und einer CCD-Kamera vom Typ ST10 XME und Filterrad. Gesamtbelichtungszeit vier Stunden und zehn Minuten, davon 40 Minuten durch einen H $\alpha$ -Filter. Der Aufnahmeort war Much im Bergischen Land. M81 ähnelt in ihrem Aussehen sehr unserem Milchstraßensystem, wenn wir es von außen betrachten könnten. (Bild: Stefan Binnewies)

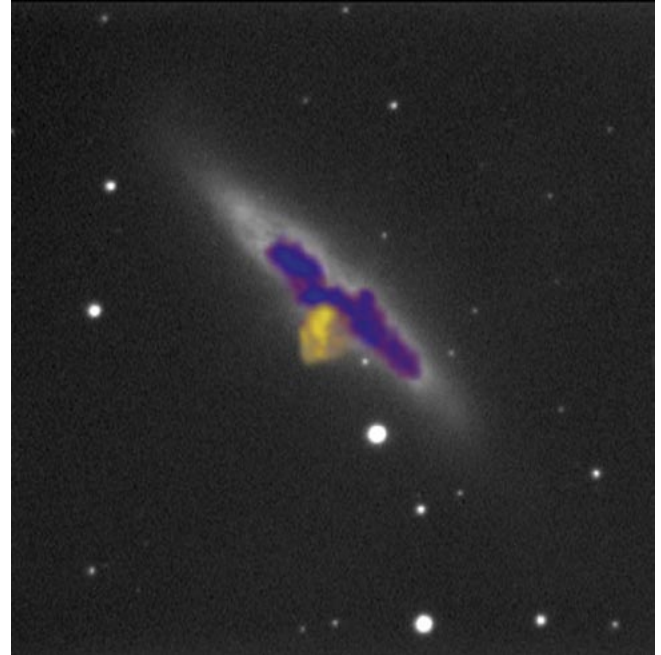
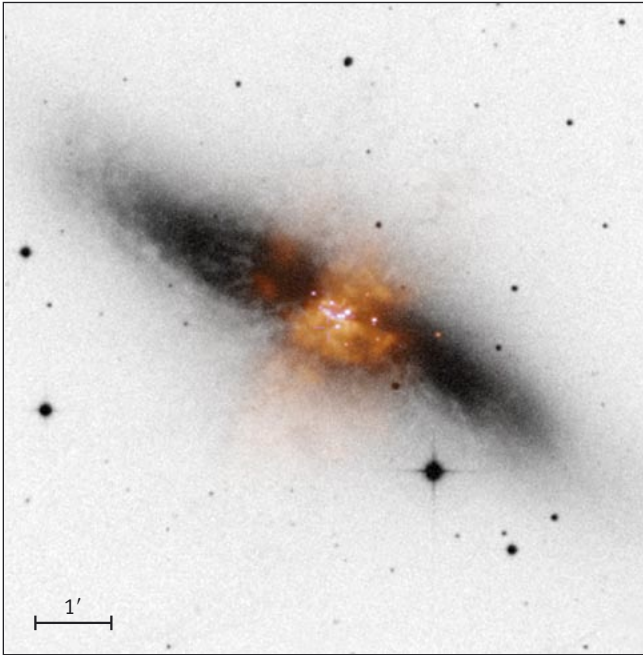


Form einer explodierten Zigarre machte. Auf den hochaufgelösten Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE konnten Richard Grijs und sein Team im Jahr 1997 in der Nähe des vermuteten Kerns 113 große, relativ junge Sternhaufen entdecken, aus deren Altersverteilung sie den zeitlichen Verlauf der Annäherung mit M81 ableiteten. [8]

Die Begegnung löste offenbar vor allem in der viel kleineren Galaxie M82 heftige Turbulenzen aus, in deren Folge es insbesondere in der Nähe des dicht besiedelten Kerns zu einem Ausbruch an Sternentstehung und anschließenden Supernovaexplosionen kam.

In ungestörten Galaxien wie unserem Milchstraßensystem bilden sich Sterne nur relativ langsam, da das vorhandene Baumaterial (das Interstellare Medium bestehend aus Gas und Staub) nicht ohne Weiteres in ausreichender Dichte zusammenfindet, um schließlich zu Sternen zu kollabieren. Kommt es aber zu Störungen, zum Beispiel durch eine Kollision mit einer anderen Galaxie, wird der Gas- und Staubanteil durcheinandergewirbelt und kann sich schneller in Sternentstehungsgebieten zusammenballen.

Simulationen der Bewegung der einzelnen Sterne (Vielkörperrechnungen oder N-body-Simulationen) zeigten, dass eine durch Galaxienwechselwirkung induzierte Sternentstehungsexplosion hauptsächlich im Zentrum der Galaxie stattfindet, der Blick ins Galaxienzentrum ist aber



leider durch Gas und Staub verstell. Dennoch konnten Scarrott et al. [3] einen indirekten Blick ins Zentrum werfen, indem sie die am Staub gestreute  $H\alpha$ -Emission betrachteten. Sie stellten fest, dass das  $H\alpha$ -Licht polarisiert ist und die Polarisationsvektoren an jeder Stelle auf eine bestimmte Position im Zentrum von M82 zeigen, welche sie als Quelle der Beleuchtung ausmachten. Diese Quelle befindet sich allerdings nicht im Schwerpunkt der Galaxie (dem dynamischen Zentrum).

### Ein Blick im Röntgenlicht

Schließlich warf aber das Röntgenteleskop CHANDRA im Jahr 1999 einen tiefen und scharfen Blick in das Zentrum von M82. Die hochenergetische Röntgenstrahlung ist weniger stark von der Absorption durch interstellare Materie betroffen und gelangt deswegen vom Zentrum zu uns. Allerdings durchdringt die Röntgenstrahlung nicht unsere Atmosphäre und muss daher aus der Umlaufbahn beobachtet werden. Bei CHANDRA handelt es sich um ein Satellitenteleskop der neuesten Generation, welches zur Zeit über die beste Winkelauflösung verfügt. Auf dem Röntgenbild lässt sich eine Ansammlung heller punktförmiger Quellen im Zentrum erkennen sowie diffuse Röntgenstrahlung, die sich in zwei Richtungen aus dem Zentrum heraus erstreckt.

Die Punktquellen sind so genannte X-ray-binaries, Doppelsystemen, die aus einem normalen Stern und einem kompakten Objekt (Neutronenstern oder gar Schwarzes Loch) bestehen. Diese kompakten Objekte verfügen über sehr hohe Energie und ziehen mit ihrer enormen Gravitation Materie auf sich. Dabei entstehen hohe Geschwindigkeiten, die zu einem Teil in hochenergetische

▲ Abb. 4: Aufnahme des Röntgensatelliten CHANDRA (orange), die mit einer Aufnahme von M82 aus dem Palomar Observatory Sky Survey (PSS) überlagert wurde. Die diffuse Röntgenstrahlung befindet sich senkrecht zur Scheibenebene, also im Entstehungsbereich des Superwinds. In dieser Region der Galaxie weist das Plasma eine Temperatur bis zu 40 Millionen Grad auf (Bildverarbeitung: N. Steenken, J.-U. Ness, Bild: NASA/CXC/SAO/PSU/CMU)

Strahlung (Röntgen-, Gammastrahlung) umgewandelt werden. Interessanterweise befindet sich keines dieser Objekte im Schwerpunkt der Galaxie. Die am nächsten zum Zentrum gelegene Röntgenquelle ist gleichzeitig auch die hellste. Sie trägt den Namen CXOM82 J095550.2+694047 und gibt einige Rätsel auf. Beispielsweise ist sie extrem variabel [9], was gegen einen Supernovaüberrest spricht (es sei denn, der Überrest breitet sich in ein extrem inhomogenes interstellares Medium aus). Ist sie also auch ein Röntgendoppelsystem, dann muss das kompakte Objekt ein Schwarzes Loch sein, da das Objekt extrem hell ist.

Das heißt, es wäre sehr massereich. Dann ist es allerdings überraschend, dass es sich nicht im dynamischen Zentrum befindet. (Durch dynamische Reibung erwartet man, dass ein Objekt mit etwa 100 000 Sonnenmassen in etwa zehn Milliarden Jahren im dynamischen Zentrum der Galaxie ankommt, [9]). Die Schlussfolgerung ist, dass es sich um ein mittelschweres Schwarzes Loch mit 400 bis 500 Sonnenmassen handelt [7], das sich wegen seiner relativ geringen Masse noch

▲ Abb. 5: Farbiges Differenzbild von Aufnahmen im polarisierten Licht wie in Abb. 1, hier jedoch den addierten Aufnahmen überlagert. Die Farben bedeuten: blau = Polarisationsrichtung senkrecht zur galaktischen Ebene, gelb = parallel zur galaktischen Ebene. Die Belichtungszeit betrug vier mal zehn Minuten mit einer CCD-Kamera des Typs Starlight X-Press (MX 516 mit Selfguiding) in Verbindung mit einem Celestron 8 (Bild: Nicolaus Steenken)

nicht ins Zentrum bewegt hat. Wegen seiner Kompaktheit (sein Radius ist kleiner als der Schwarzschildradius  $2GM/c^2$ ) kann es aber die Energiemenge erzeugen, die zu der hohen Leuchtkraft führt.

Die enorme Leuchtkraft dieser Strahlung kann uns im sichtbaren Licht nicht direkt erreichen, sondern beleuchtet die ausgeblasenen Filamente wie ein verdeckter Scheinwerfer. Es können grobe Informationen aus der diffusen Strahlung gewonnen werden, zum Beispiel welche Elementzusammensetzung der Superwind hat und ob solche »Starburst«-Galaxien generell als Quellen für metallreiches Material im Universum dienen können.

### Starburst-Modelle

Polarisiertes Licht aus den Filamenten war in den sechziger Jahren ein entscheidender Auslöser für die Entwicklung des Starburst-Modells. Damals wurde M82 mit den größten verfügbaren Teleskopen untersucht. Heute ist es selbst für Amateure in der Großstadt mit Hilfe der CCD-Technik möglich, dieses Phänomen zu fotografieren, zu messen und die Entdeckungsgeschichte nachzuvollziehen.



## Literaturhinweise

- [1] **A. Elvius, J. Hall:** »Photoelectric Measurements of Polarization in The Irregular Galaxy M82«, *AJ*, **67**, 271 [1962].
- [2] **C. R. Lynds, & A. R. Sandage:** »Evidence for an Explosion in the Center of the Galaxy M82«, *ApJ*, **137**, 1005 [1963].
- [3] **J. F. Chesterman, W. S. Pallister:** »The wavelength dependance of optical polarziation in the galaxy M82«, *MNRAS* **191**, 349–366 [1980].
- [4] **S. M. Scarrot et al.:** »The scattered H $\alpha$ -emission-line filaments in M82«, *MNRAS*, S. 252 [1991].
- [5] **McLeod, Rieke, Kelly:** »M82: The Saga Continues«, *ApJ* **412**, 111–126 [1993].
- [6] **J. S. Greaves et al.:** »Magnetic field surrounding the starburst nucleus of the galaxy M82 from polarized dust emission«, *Nature* **404**, 732–733 [2000].
- [7] **R. E. Griffiths et al.:** »Hot Plasma and Black Hole Binaries in Starburst Galaxy M82«, *Science* **290**, 1325 [2000].
- [8] **Richard Grijs et al.:** »The Fossil Starburst in M82«, *AJ* [2001].
- [9] **P. Kaaret et al.:** »Chandra High-Resolution Camera observations of the luminous X-ray source in the starburst galaxy M82«, *MNRAS* **321**, L29–L32 [2001].



◀ Abb. 6: Selbstbau einer drehbaren Filterfassung mit Polarisationsfilter. Verwendet wurden für dieses Projekt 42-mm-Zwischenringe für Photoobjektive und Kunststoffringe. Die Filterfassung wird im Cassegrainfokus zwischen Teleskop und CCD-Kamera montiert. Der Polarisationsfilter kann zwischen zwei Aufnahmen gedreht werden, ohne dass sich die übrigen Parameter der Aufnahme ändern. (Bild: Nicolaus Steenken)

### Eigene Beobachtungen von M82

Zur Messung der Polarisation von M82 wurde ein Polarisationsfilter der Firma Antares in einer selbst gebauten drehbaren Fassung verwendet. Die Filterfassung wird hinter ein Celestron-8-Teleskop direkt vor die CCD-Kamera montiert. Dabei ist die Grundüberlegung, die relative Helligkeit der Galaxie zweimal möglichst kurz hintereinander mit exakt der gleichen Apparatur zu messen. Der einzige Unterschied zwischen den Aufnahmen besteht darin, dass der Polarisationsfilter zwischen den Belichtungen um 90 Grad gedreht wird.

Die Nachführung wird während und zwischen den Aufnahmen mit Hilfe einer CCD-Kamera Starlight X-Press MX 516 und der Software AstroArt 3 kontrolliert. Dabei wird das Zentrum des Nachführsterns auf dem selben Pixel gehalten. Der Filter wird bei Aufnahme A parallel zum galaktischen Äquator gestellt, bei der Aufnahme B senkrecht zu diesem. Für Abb. 5 wurden vier Aufnahmen in der Reihenfolge A, B, A, B verwendet. Anschließend wurden die Bilder mit Dunkel- und Hellbild korrigiert und die Diffe-

renzbilder A – B und C – D berechnet und addiert (siehe Abb. 2). Das Differenzbild wurde als Falschfarbenbild in Abb. 5 der Ursprungsaufnahme (A + B + C + D) mit Hilfe von Photoshop überlagert. Dadurch wird deutlich, in welchem Bereich der Galaxie das Licht polarisiert ist. Quantitativ bedeutet gelb eine Polarisationsrichtung parallel zum galaktischen Äquator mit Polarisationsgraden zwischen drei Prozent und sechs Prozent. Blau kennzeichnet die Polarisationsrichtung senkrecht zur galaktischen Ebene mit Polarisationsgraden zwischen einem und drei Prozent.

Die Polarisationsgrade lassen sich errechnen, in dem die Differenzen der Helligkeitswerte eines Punkts der Galaxie von Aufnahme A und von Aufnahme B durch die Summe der Werte von A und B geteilt werden. Man erhält so den durch Polarisation verursachten Helligkeitsunterschied und kann diesen in Prozent ausdrücken. In der Literatur werden für die Filamente Polarisationsgrade von bis zu 15 Prozent angegeben, im Durchschnitt aber nur die Hälfte [3].

Bei einem Vergleich mit den Polarisationswerten in der Literatur ist zu be-

achten, dass durch die einfache und auch nicht präzise Drehung des Polarisationsfilters um 90 Grad bei kreisförmig um das Zentrum verlaufenden Polarisationsrichtungen nur an wenigen Stellen die maximalen Polarisationsgrade zu erwarten sind. Im übrigen ist die Flächenhelligkeit in den Filamenten so niedrig, dass das relativ niedrige Signal/Rausch-Verhältnis eine präzisere Bestimmung der Polarisationsgrade momentan noch nicht erlaubt.

Was den Ursprung des polarisierten Lichts von M82 angeht, basierte die Arbeit von Lynds und Sandage allerdings auf einer falschen Hypothese. Wie sich in späteren Untersuchungen herausstellte, bewegen sich die Polarisationsrichtungen im sichtbaren Licht in konzentrischen Kreisen um den Kern herum. Die Polarisation wird nicht durch Synchrotronstrahlung wie im Krebsnebel erzeugt, sondern durch die Rayleigh-Streuung des Lichts aus dem galaktischen Kern. Dieses wird an den durch den Superwind aus dem Zentrum von M82 herausgeblasenen Gas- und Staubpartikeln gestreut.

Dennoch deuten gerade auch neuere Forschungsergebnisse von Jane Greaves darauf hin, dass in M82 ein zentrosymmetrisches Magnetfeld existiert, welches diesen Effekt möglicherweise noch verstärkt [6]. 1993 gab McLeod einem Beitrag für das *Astrophysical Journal* den Titel, der auch heute noch gelten kann: »M82: Die Saga geht weiter«. □

**Nicolaus Steenken** ist Unternehmensberater und Hobbyastronom. 1980 wurde er Bundessieger bei »Jugend forscht« mit dem Thema »Der Nachweis von interstellarem Staub«.

Ab 2000 stieg er in die CCD-Astronomie ein und baute eine kleine Gartensternwarte. E-Mail: [nsteenken@aol.com](mailto:nsteenken@aol.com)



**Jan-Uwe Ness** ist Berufsastronom und beschäftigt sich mit Röntgenastronomie. Studium in Kiel, Doktorarbeit in Hamburg, seit 2004 an Universität Oxford, England. Verleihung

eines Chandra Fellowships (2005) an der Arizona State University. E-Mail: [j.ness@physics.ox.ac.uk](mailto:j.ness@physics.ox.ac.uk)