



◀ Wenige Sekunden nach dem Aufschlag des Impaktors entstand nebenstehende Aufnahme des Kerns von Komet Tempel 1. Sehr gut ist die kegelförmige Auswurfswolke zu erkennen. (Alle Bilder: NASA/JPL-Caltech/UMD)

▼ 90 Sekunden vor dem Aufschlag nahm die Kamera des Impaktors diese Ansicht des Kometenkerns auf. Der Durchmesser der beiden runden Krater beträgt etwa 1.5 Kilometer.



Die Kometenbombe

Raumsonde DEEP IMPACT erreicht Komet Tempel 1

Am 4. Juli 2005 erreichte die US-Raumsonde DEEP IMPACT nach 173 Tagen Flug den Kometen 9P/Tempel 1. Diesmal beschränkte man sich beim Besuch aber nicht auf einen raschen Vorbeiflug: Ein Teil der Raumsonde, »Impactor« genannt, wurde mit Absicht auf Kollisionskurs mit dem Kometenkern gebracht und sprengte eine große Explosionswolke ins All.

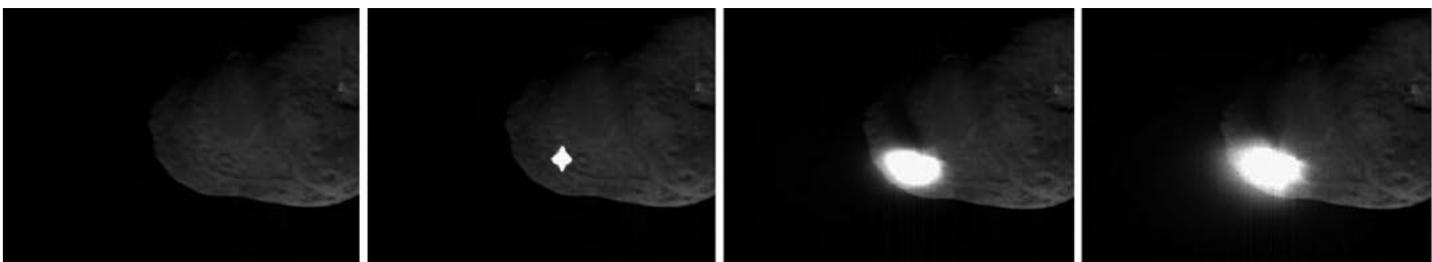
Die Raumsonde DEEP IMPACT war am 12. Januar 2005 mit einer Trägerrakete des Typs DELTA-2 ins All gestartet worden und bewegte sich auf direktem Wege zum kurzperiodischen Kometen 9P/Tempel 1, den sie pünktlich um 7:52 MESZ am 4. Juli 2005 erreichte. DEEP IMPACT bestand aus zwei Hauptelementen: der Vorbeiflugsonde mit drei wissenschaftlichen Instrumenten und einer Einschlagssonde mit der Bezeichnung »Impactor«. Etwa 24 Stunden vor Erreichen des Kometenkerns setzte die auf Kollisionskurs mit dem Kometenkern befindliche Vorbeiflugsonde den 372 Kilogramm schweren Impaktor aus.

Um nicht das gleiche Schicksal wie der Impaktor zu erleiden, zündete die 601 Ki-

logramm schwere Vorbeiflugsonde eine viertel Stunde nach Absetzen des Impaktors die Steuertriebwerke, um vom Kollisionskurs auf eine Bahn zu gelangen, die sie in einem Minimalabstand von 500 Kilometern am Kometenkern sicher vorbeiführen sollte. Der Impaktor war mit einer Kamera für den Anflug und die optische Navigation ausgestattet und verfügte über kleine Steuertriebwerke für Bahnkorrekturen. Diese Korrekturmanöver sollten sicherstellen, dass der Impaktor auch wirklich auf dem Kometenkern auftrifft. Bis zum Einschlag selbst sollte die Einschlagssonde Bilder vom sich nähernden Kometenkern senden.

Die Hauptsonde verfolgte den Einschlag aus einer Entfernung von ca. 8600

Kilometern mit zwei Kameras und einem Infrarotspektrometer. Die beiden Kameras verfügen über unterschiedliche Brennweiten und werden als *High Resolution Imager HRI* und *Medium Resolution Imager MRI* bezeichnet. Beide Kameras lieferten simultan Bilder, die aber überwiegend an Bord gespeichert und erst nach dem Vorbeiflug zur Erde gesendet wurden. Nur ein kleiner Teil der Bilder gelangte sozusagen »live« zur Erde, diese waren aber eindrucksvoll genug. Die HRI-Kamera verfügt über ein 30-cm-Cassegrain-Teleskop mit einer Brennweite von 10,5 Metern. Die Auflösung sollte bis zu zwei Meter pro Bildpunkt erreichen, aber wegen eines Baufehlers leidet der HRI, wie vor 15 Jahren das Weltraumteleskop



HUBBLE, unter sphärischer Aberration, welche die Bildauflösung reduziert.

Das Missionsteam von DEEP IMPACT ist aber zuversichtlich, durch Bildverarbeitung die volle Bildschärfe erreichen zu können, weil die Abweichung sehr exakt bestimmt werden konnte. Die Optik des HRI wurde auch vom Infrarotspektrometer, welches im Bereich von 1.1 bis 4.8 Mikrometern arbeitet, verwendet. Die MRI-Kamera verfügt über ein 12-cm-Cassegrain-Teleskop mit einer Brennweite von 2.1 Metern. Die Kamera an Bord des Impaktors ist mit der MRI-Kamera praktisch baugleich, sie verfügte allerdings nicht über ein Filterrad zur Aufnahme farbiger Bilder.

Der Komet 9P/Tempel 1

Der Komet Tempel 1 wurde am 3. April 1867 von Ernst Wilhelm Leberecht Tempel von der Sternwarte in Marseille, Frankreich, aus entdeckt. Wie die Bezeichnung »P« besagt, gehört Tempel 1 zu den periodischen Kometen. Zur Zeit umläuft Tempel 1 die Sonne mit einer Periode von 5.5 Jahren und nähert sich ihr dabei bis auf 1.5 AE (225 Millionen Kilometer) an. Er gehört zu den Kometen der Jupiter-Familie und erfährt durch die Schwerkraft des Jupiter häufig drastische Veränderungen seiner Umlaufbahn. Bestimmungen der Größe seines Kerns vor dem Vorbeiflug wiesen auf einen Durchmesser von etwa sechs Kilometern hin. Bei seiner größten Erdannäherung erreicht Tempel 1 üblicherweise Helligkeiten von etwa 10 mag. Er lässt sich also nur mit dem Teleskop beobachten und ist ein eher unscheinbarer Komet.

Der Einschlag

Schon Tage vor dem Einschlag hatten die Kameras der Vorbeiflugsonde erste Bilder des Kometen geliefert, der sich immer deutlicher abzeichnete. Gelegentlich ließen sich Helligkeitsausbrüche beobachten, die auf Freisetzung größerer Mengen an Gas und Staub hinwiesen.

Der Einschlag fand weltweite Beachtung, sowohl bei den professionellen Astronomen als auch bei den Amateurbeobachtern. In nahezu allen Gebieten auf der Erde, von denen aus der Komet zum Einschlagszeitpunkt sichtbar war, hatten die Astronomen Teleskope aller Art auf

den Kometen Tempel 1 gerichtet. Zusätzlich nahmen Forschungssatelliten wie die Weltraumteleskope HUBBLE, SPITZER und CHANDRA Tempel 1 ins Visier und lieferten interessante Daten und Bilder.

Auch die Europäische Weltraumagentur ESA unterstützte die Mission von DEEP IMPACT. Sie hatte ihre eigene Kometensonde ROSETTA, die sich auf dem Weg zum Kometen Churyumow-Gerasimenko befindet, aktiviert und ihre Instrumente auf den von ihr aus 80 Millionen Kilometer entfernten Kometen gerichtet. Der Abstand von der Erde zu Tempel 1 betrug am 4. Juli 2005 immerhin 133 Millionen Kilometer. Die ESA ermöglichte außerdem, in ihren Einrichtungen die Direktübertragung des NASA-Fernsehens aus den USA live zu verfolgen. Schon früh hatten sich zahlreiche Journalisten und ESA-Mitarbeiter im Europäischen Weltraumkontrollzentrum ESOC in Darmstadt versammelt, um beim Ereignis dabei zu sein. Zwanzig Minuten vor dem erwarteten Einschlag um 7:52 MESZ begann die Spannung im ESOC zu steigen: Würde es dem Impaktor wirklich gelingen, auf dem Kometenkern einzuschlagen? Und was wären die Folgen dieser Kollision?

Immerhin erfolgte der Einschlag des 372 Kilogramm schweren Impaktors mit einer Geschwindigkeit von 10.2 Kilometern pro Sekunde. Die beim Einschlag freigesetzte kinetische Energie entsprach dabei der Explosion von 4.5 Tonnen des Sprengstoffs TNT. Dennoch waren sich auch die Projektwissenschaftler sehr un-

sicher, was wohl beim Einschlag passieren würde. Würde der Impaktor einfach im Kometenkern verschwinden und nur ein kleines Loch auf der Oberfläche hinterlassen oder würde er einen Krater von der Größe eines Fußballstadions reißen?

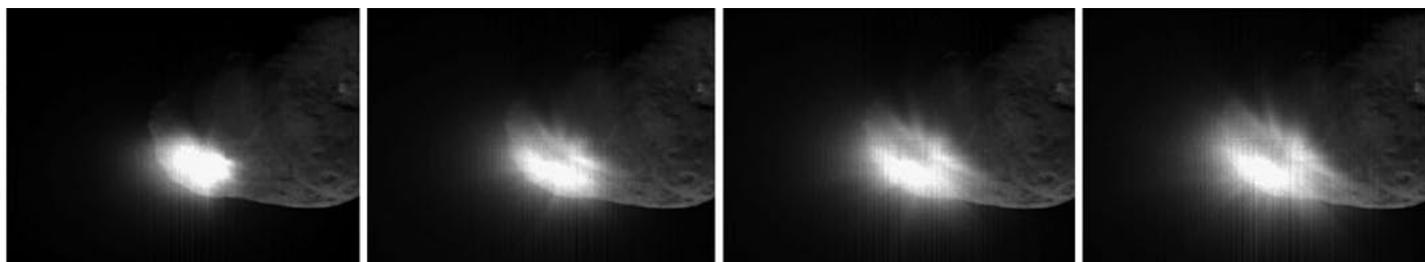
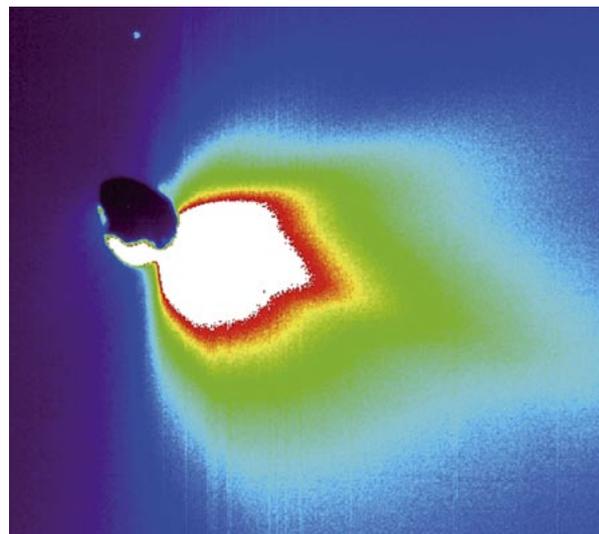
Nun kamen immer mehr Bilder über den NASA-Fernsehsender, immer größer wurde der Kometenkern auf den Bildern des Impaktors. Zwar waren diese Rohbilder stark verrauscht und verzerrt, aber die längliche kartoffelförmige Gestalt des Kometenkerns war deutlich sichtbar. Auch zwei Gebilde, die sehr nach Kratern aussahen, waren zu sehen. Plötzlich aber riss der Bilderreigen ab, und um 7:52 MESZ erfolgte aus dem Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, Kalifornien, welches die Mission steuerte, die Meldung, dass der Kontakt zum Impaktor abgebrochen sei. War die Mission erfolgreich oder hatte der Impaktor versagt? Bange Minuten vergingen, doch dann brandete Jubel in Pasadena auf, als gegen 7:57 MESZ die ersten Bilder der MRI-Kamera der Vorbeiflugsonde auf den Bildschirmen auftauchten. Sie zeigten eine riesige, helle kegelförmige Wolke aus Gas und Staub, welche sich vom Kometenkern ins All erhob. Der Impaktor war tatsächlich, wie erhofft, mit dem Kometenkern kollidiert.

Der Impact und die Folgen

Damit stand fest: die Mission von DEEP IMPACT war ein voller Erfolg. Eine Viertelstunde nach dem Einschlag begab sich die Vorbeiflugsonde in den so ge-

▶ Blick zurück auf Tempel 1, 50 Minuten nach dem Einschlag. Auf dieser Falschfarbenaufnahme ist die Größe der Auswurfswolke gut zu erkennen.

▼ Bildsequenz vom Einschlag des Impaktors von DEEP IMPACT: Auf dem zweiten Bild von links ist der Blitz des Aufschlags zu erkennen, die weiteren Bilder zeigen die Entwicklung der Auswurfswolke im Abstand von wenigen Sekunden.



nannten »Schild Modus«, um ihre empfindlichen Instrumente bei der größten Annäherung an den Kern vor umherfliegenden Kometenbruchstücken zu schützen. Aber auch diese kritische Phase überstand die Vorbeiflugsonde ohne Beschädigungen. Danach richtete die Vorbeiflugsonde wieder ihre Instrumente auf Tempel 1. Insgesamt lieferten die drei Kameras von DEEP IMPACT 4500 Bilder zur Erde, deren Auswertung gerade erst begonnen hat.

Noch nicht klar ist, wie groß der Krater wurde, den der Impaktor auf Tempel 1 geschlagen hat. Die Forscher hoffen, dass sich auf den Infrarotbildern der Sonde die Umrisse des Kraters ausmachen lassen – sie vermuten einen Durchmesser von bis zu 200 Metern. Auf den Bildern im sichtbaren Licht überstrahlt die helle Auswurfswolke die Oberfläche und ermöglicht keine Aussagen über den eigentlichen Aufschlagpunkt. Interessanterweise bestanden die Auswurfsmassen

überwiegend aus feinem Staub ohne größere Mengen an Wasserdampf. Der Staub weist eine Körnung wie Talkpuder auf. Offenbar ist die gesamte Oberfläche von Tempel 1 von diesem Staub bedeckt. Der Kern weist eine Maximallänge von 14 Kilometern auf und ist bis zu fünf Kilometer breit.

Der Einschlag ließ sich auch gut mit erdgebundenen Teleskopen verfolgen, allerdings stieg die Helligkeit nur für wenige Stunden um einen Faktor zwei bis drei an, der Komet blieb damit weiterhin mit dem bloßen Auge unsichtbar. Bereits am Tag danach war keine Aufhellung mehr zu erkennen, der Komet hatte wieder seine alte Helligkeit um 10 mag erreicht. Offenbar war am Einschlagspunkt von DEEP IMPACT keine neue Austrittsstelle für Gas und Staub entstanden. Nun hat die Auswertung der riesigen Datenmengen begonnen, und man darf gespannt sein, welche Erkenntnisse über Kometen dabei gewonnen werden. TILMANN ALTHAUS

der Neutronenstern in den letzten 50 Jahren mindestens einen gewaltigen Energieausbruch gehabt haben. Das zeigen die von Krause und seinen Kollegen vom Steward Observatory in Tucson (Arizona) und am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg entdeckten Infrarotechos um den Supernovaüberrest.

Lichtblitz

Infrarotechos entstehen, wenn ein hochenergetischer Lichtblitz durch das staubhaltige interstellare Medium läuft. Die zufällig verteilten Wolken von Gas und Staub erwärmen sich und emittieren die eingebrachte Energie im Bereich des thermischen Infraroten. Im Laufe der Zeit ergibt sich so eine Spur von aufleuchtenden und wieder erlöschenden Filamenten. Daher lässt sich anhand des Infrarotechos der Weg einer Energiewelle, wie sie zum Beispiel beim Ausbruch eines aktiven Sterns oder auch einer Supernovaexplosion entsteht, verfolgen. Das Echo um Cas A ist das größte, das jemals beobachtet wurde, und das erste um eine verhältnismäßig alte Supernova.

Das Astronomen-Team um Oliver Krause entdeckte zunächst auf einer 24- μm -Infrarotaufnahme des Instruments MIPS an Bord des Weltraumteleskops SPITZER kompakte Filamente in der Nähe von Cas A. Auf einer später gewonnenen Aufnahme mit einem bodengebundenen Teleskop bei einer Wellenlänge von 2.2 Mikrometern (K_s -Band) waren diese Filamente ebenfalls deutlich zu erkennen. Die Aufnahmen hatten mit 0.6 Bogensekunden im Vergleich zu MIPS eine etwa zehnfach bessere räumliche Auflösung und zeigten somit noch feinere Strukturen in dem Gebiet um Cas A. Daraufhin wurden wenige Monate später weitere Beobachtungen mit der neuen Infrarotkamera OMEGA2000 am 3.5-Meter-Teleskop des deutsch-spanischen Observatoriums auf dem Calar Alto durchgeführt. Auf diesen Aufnahmen hatten

»Toter« Stern erzeugt kosmisches Feuerwerk

Ein deutsch-amerikanisches Team von Astronomen um Oliver Krause vom Steward Observatory in Tucson hat ein gewaltiges Infrarot-Echo um den Supernovaüberrest Cassiopeia A entdeckt.

Sehr massereiche Sterne beenden ihr kurzes, intensives Leben mit einer gewaltigen Explosion als Supernova. Die dabei freigesetzten Energien sind enorm und machen dies zu einem außerordentlich hellen Ereignis, das für kurze Zeit eine ganze Galaxie überstrahlen kann. Zurück bleiben eine expandierende Hülle aus Staub und Gas sowie ein Neutronenstern. Dieser ist gewissermaßen das Skelett des ex-

plodierten Sterns. Cassiopeia A (Cas A) ist der jüngste bekannte Supernovaüberrest in unserer Galaxis (vgl. S. 8–9 in diesem Heft). Er befindet sich in einer Entfernung von rund 3.4 Kiloparsec (11000 Lichtjahre) und ist eines der meist studierten Objekte am Himmel. Umso erstaunlicher ist die Entdeckung, dass der Überrest des im Jahre 1680 explodierten Sterns nicht einfach langsam auskühlt. Vielmehr muss

