

## HELIOPHYSIK

# Mehr als nur ein aktiver Stern

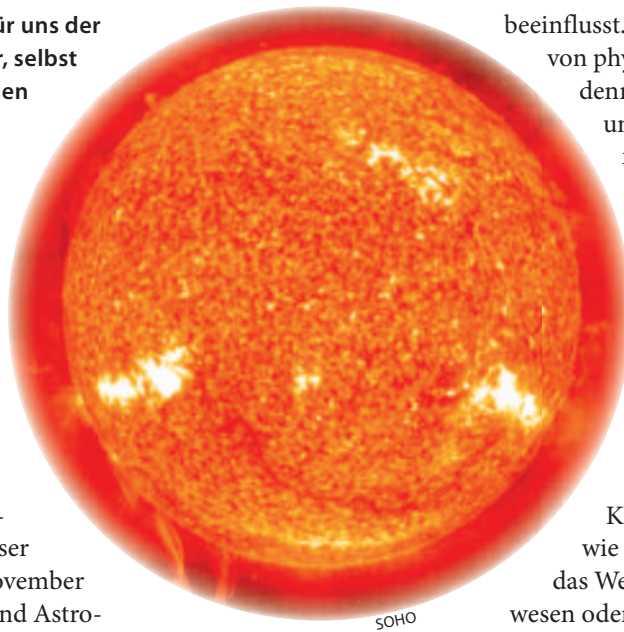
Bei der physikalischen Erforschung der Sonne gibt es noch viele Fragen zu klären.

Horst Fichtner

Die Sonne ist und bleibt für uns der wichtigste Himmelskörper, selbst wenn sie nur einer unter den ca. 200 Milliarden Sternen unserer Galaxis ist. Das Sonnenlicht bildet die unverzichtbare Voraussetzung für Leben auf der Erde, und der Sonnenwind schützt, wie wir mittlerweile wissen, das Leben vor interstellaren Einflüssen.

Jahrtausendlang galt die Sonne als unveränderlicher und makelloser Lichtspender. Doch im November 1611 berichtete der Jesuit und Astronom Christoph Scheiner von einer unerwarteten Beobachtung: „Vor etwa sieben oder acht Monaten richteten wir – ich und ein Freund – das Fernrohr [...] auf die Sonne und wollten deren optische Größe im Vergleich zum Monde messen und fanden beide beinahe gleich. Und als wir dieser Sache nachgingen, bemerkten wir in der Sonne einige irgendwie sich verdunkelnde Flecken gleich schwarzen Tropfen.“ Scheiners Sichtung von Sonnenflecken – um die Priorität dieser Entdeckung entbrannte kurzerhand ein Streit mit Galileo Galilei – bot ein erstes Indiz dafür, dass das Antlitz der Sonne keineswegs makellos und unveränderlich ist. Die Beobachtungen markieren auch den Anfang einer sehr erfolgreichen Tradition der Sonnenforschung in Deutschland, die bis heute Bestand hat. Einige wichtige Stationen dieser Tradition finden sich in der Zeitleiste auf der folgenden Doppelseite.

Die mit Blick auf die gegenwärtige heliophysikalische Forschung vielleicht bedeutendste Entdeckung war die der periodischen Sonnenaktivität durch Samuel Heinrich Schwabe im Jahre 1843. Mittlerweile wissen wir, dass der veränderliche Zustand der Sonne die Wechselwirkung des interstellaren Mediums mit ihr bzw. mit der Erde



beeinflusst. Das ist beileibe nicht nur von physikalischem Interesse, denn die hochkomplexen und oft noch unverstandenen Wechselwirkungen zwischen interstellarem Medium, Sonne und der Erde betreffen uns in vielerlei Hinsicht. Heliophysikalische Prozesse wirken sich auf die irdische Umwelt und damit auf unsere Lebensbedingungen aus. Das betrifft langfristige Klimaänderungen ebenso wie kurzfristige Einflüsse auf das Wetter, das Kommunikationswesen oder die Weltraumtechnik.

Für die Forschung erweist es sich natürlich als unschätzbare Vorteil, dass sich Sonne und Heliosphäre im Unterschied zu allen anderen astrophysikalischen Objekten aus unmittelbarer Nähe – zum Teil direkt vor Ort – beobachten lassen. Somit dienen heliophysikalische Prozesse oft als Vorlagen für nicht direkt beobachtbare Vorgänge in weit entfernten Sternen oder Galaxien.

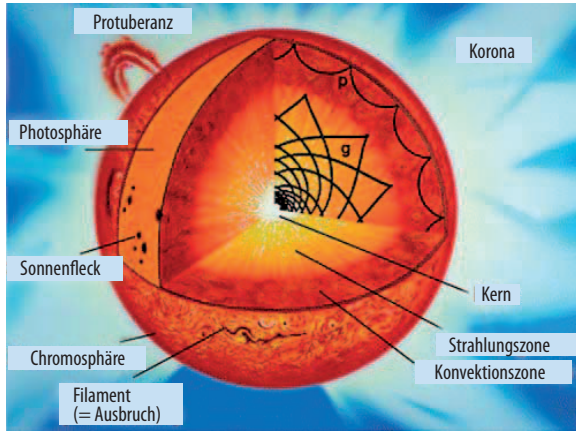
Dabei gilt es noch eine Vielzahl von Fragen zu beantworten. Das im Verlauf einiger Jahrzehnte auf der Basis von „äußeren“ Beobachtungen entwickelte „Standardmodell“ des inneren Aufbaus der Sonne (Abb. 1) hat sich bislang in vieler Hinsicht bewährt. Dazu haben ganz wesentlich „helioseismologische“ Messungen beigetragen. Diese beruhen darauf, dass durch Turbulenz angeregte Schwingungen der Sonne die Sonnenoberfläche oszillieren lassen und damit einen Einblick in die innere Struktur der Sonne erlauben.

Die Helioseismologie hat auch die Existenz eines Kerns mit einer Temperatur von  $15,7 \cdot 10^6$  K bestätigt, von dem aus die Energie bis ca. 0,7 Sonnenradien durch Strahlung nach außen transportiert wird. Ab da geschieht dann der Energietransport durch Konvektion, die eine Zellenstruktur der Sonnenoberfläche, die Granulation, bewirkt.

## Die Sonne in Zahlen

Masse	$1,99 \cdot 10^{30}$ kg
Radius	ca. 696 000 km
Kerntemperatur	$15,7 \cdot 10^6$ K
Photosphärentemperatur	ca. 5800 K
Koronatemperatur	$1 - 2 \cdot 10^6$ K
Leuchtkraft	$3,86 \cdot 10^{26}$ W
Massenverlust durch den Sonnenwind	$1 \cdot 10^9$ kg/s

Priv.-Doz. Dr. Horst Fichtner, Institut für Theoretische Physik, Lehrstuhl IV: Weltraum- und Astrophysik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum



**Abb. 1** Im Kern der Sonne werden Protonen zu Heliumkernen fusioniert. Helioseismologische Messungen an der Oberfläche von Schwingungen im Inneren zeigen, dass die frei werdende Energie als Strahlung bis zum Boden der Konvektionszone transportiert wird. Ab dort übernimmt Konvektion den Energietransport. Hieran schließt sich die aus Photo-, Chromosphäre und Korona bestehende Atmosphäre der Sonne an. Sie ist Ursprung der beobachteten Strahlung und zeigt die zum Teil spektakulären Sonnenflecken, Protuberanzen oder Filamente.

Der Erfolg dieser globalen Helioseismologie lässt sich daran ersehen, dass sie das Standardmodell sehr gut bestätigt hat: Beobachtungen und Modell differieren um weniger als 0,2 %. Mit helioseismologischen Methoden gelang es auch, die „Tachocline“ (griech. für „Geschwindigkeitswendung“) zu identifizieren, eine Region unterhalb der Konvektionszone, in welcher der Übergang von starrer Rotation des Sonneninneren zur direkt beobachteten differentiellen Rotation der äußeren Schichten stattfindet.

Die Energieerzeugung im Sonnenkern durch Fusion von Wasserstoff- zu Heliumkernen ist allerdings nicht mit der Helioseismologie zu überprüfen, sondern anhand der bei diesem Prozess erzeugten Neutrinos. Der niedrige Fluss der auf der Erde detektierten Sonnenneutrinos blieb über lange Jahre rätselhaft, ist inzwischen aber mithilfe von Neutrinooszillationen, welche die Umwandlung von Elektron- in Myon-Neutrinos ermöglichen, befriedigend erklärt. Damit ist das Standardmodell des inneren Aufbaus der Sonne umfassend bestätigt.

Die beobachtete elektromagnetische Strahlung entsteht in der aus Photosphäre, Chromosphäre und Korona bestehenden Sonnenatmosphäre und weist in

sehr guter Näherung ein Schwarzkörperspektrum mit einer Temperatur von ca. 5800 K auf (Abb. 2). Abweichungen vom Planckschen Strahlungsverhalten gibt es lediglich bei sehr großen und kleinen Wellenlängen, wo auch die größten zeitlichen Variationen auftreten.

Diese Variationen sind eine Folge der Sonnenaktivität, die wiederum in der quasi-periodischen Änderung des Magnetfeldes der Sonne begründet ist. Aus Beobachtung der Häufigkeit und Polarität von Sonnenflecken konnte schon früh der 22-Jahres-Zyklus des Magnetfeldes abgeleitet werden: Das Magnetfeld polt sich im Mittel etwa alle 11 Jahre um, was neben großskaligen Feldänderungen auch zahlreiche kleinskalige Effekte zur Folge hat. Diese bewirken summarisch eine mit 11-Jahres-Periode variierende Gesamtstrahlung der Sonne.

### Die Heliosphäre – ein variabler Schutzschild

Die Sonne ist von einer „Atmosphäre aus Plasma“ umgeben, der Heliosphäre. Diese hat ihren Ursprung in der Wechselwirkung des Sonnenwindes, der überwiegend aus Protonen, Heliumkernen und Elektronen besteht, mit dem umgebenden interstellaren Medium. In Phasen geringer Sonnenaktivität unterscheidet man den langsamen Wind (300 – 500 km/s) bei niedrigen und den schnellen Wind (700 – 900 km/s) bei hohen heliographischen Breiten (Abb. 3). Der dann bei etwa 20 bis 30 Grad heliographischer Breite liegende Übergang verschwindet bei hoher Sonnenaktivität, während der langsame, stark fluktuierende Sonnenwind überall vorherrscht.

In beiden Fällen expandiert der Sonnenwind ungestört mit Überschallgeschwindigkeit (ca. 400 – 800 km/s) bis zu einer näherungsweise tropfenförmigen, geschlossenen Fläche, dem sog. Terminationsschock. Jenseits davon adaptiert er an die gestörte interstellare Plasmaströmung, die zuvor an der sog. Bugstoßwelle ebenfalls auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst wurde. Die Trennfläche zwischen beiden Plasmaströmungen ist eine Kontaktdiskontinuität und heißt Heliopause. Sie ist die äußere Grenze der Heliosphäre. Die in Abb. 4 gezeigte Strömungskonfiguration,

**1611** Erste teleskopische Beobachtung von Sonnenflecken durch Christoph Scheiner und Johannes Fabricius



**1814** Joseph Fraunhofer entdeckt die nach ihm benannten Linien im Sonnenspektrum



**1843** Samuel Heinrich Schwabe findet den 11-Jahres-Zyklus der Sonnenflecken



**1896** Johannes Wilsing und Julius Scheiner postulieren Radiostrahlung von der Sonne

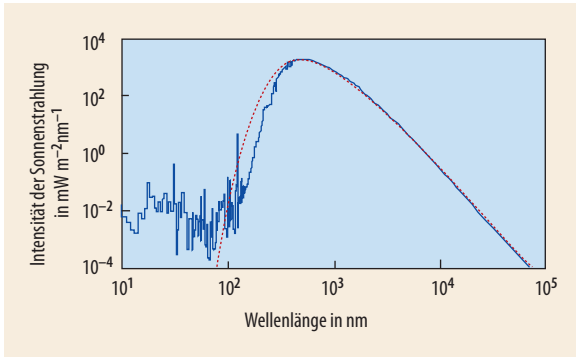
**1905** Das Kriterium für konvektive Instabilität wird von Karl Schwarzschild formuliert



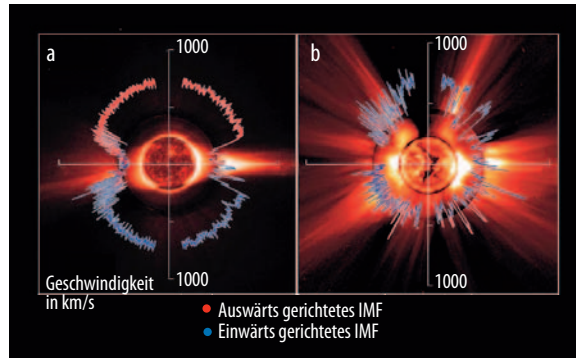
**1930** Julius Bartels identifiziert die Sonne als Quelle regelmäßig wiederkehrender geomagnetischer Störungen



**1930** Albrecht Unsöld begründet die Physik der Sternatmosphären anhand der Untersuchung der Sonnenatmosphäre



**Abb. 2** Das Spektrum der Sonnenstrahlung ist in guter Näherung in einem weiten Wellenlängenbereich ein Planck-Spektrum mit einer Temperatur von ca. 5800 K. Die Variabilität des Spektrums bei kurzen und langen Wellenlängen führt auch zu einer Variation der Gesamtstrahlung.



**Abb. 3** Der Sonnenwind schwankt deutlich in Abhängigkeit von der Sonnenaktivität. Dies zeigen die von der Raumsonde Ulysses gemessenen Geschwindigkeiten und Polaritäten des interplanetaren Magnetfelds (IMF) während des Minimums um 1997 (a) bzw. des Maximums um 2001 (b).

die sich im Ruhesystem der Sonne ausbildet, ähnelt der Strömung um ein Überschallflugzeug mit Mach-Kegel.

Den Terminationsschock konnte die Raumsonde Voyager 1 mittlerweile vor Ort in einer heliozentrischen Entfernung von 94 AE detektieren (1 Astronomische Einheit ist der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne, der 149,6 Millionen Kilometer beträgt). Dagegen lässt sich die Lage der Heliopause (in der Richtung, aus der im Ruhesystem der Sonne das interstellare Medium anströmt) lediglich zu 120 bis 150 AE abschätzen.

Da der Ionisationsgrad des interstellaren Mediums in Sonnenumgebung nicht mehr als 50 % beträgt, gibt es einen wesentlichen Anteil an neutralem Wasserstoff, der im Unterschied zur interstellaren Plasmakomponente in die Heliosphäre eindringt. Durch Ladungsaustausch mit Protonen im Sonnenwind werden insbesondere in der Region zwischen Terminationschock und Heliopause Neutralatome mit kinetischen Energien bis zu einigen keV erzeugt, die sich in der inneren Heliosphäre z. B. am Erdborbit messen lassen. Die entsprechenden Teilchenflüsse enthalten wertvolle Informationen über die physikalischen Eigenschaften ihrer Entstehungsregion. Ab 2008 wird der Interstellar Boundary Explorer (IBEX) entsprechende Messungen machen und ein globales Bild der äußeren Heliosphäre ermöglichen.

Infolge der Sonnenaktivität und des damit verbundenen Wechsels von langsamem und schnellem Sonnenwind bei hohen heliographischen Breiten pulsiert die in **Abb. 4** gezeigte Heliosphärenkonfiguration mit einer Periode von etwa elf Jahren. Die sich bereits darin manifestierende Kopplung von Sonne und Heliosphäre ist vielfältig und findet nicht nur über das Sonnenplasma statt, sondern auch über die Strahlung und insbesondere über das Magnetfeld. So reicht letzteres durch die verschiedenen Schichten der Sonne vom Boden ihrer Konvektionszone durch Photosphäre, Chromosphäre und Korona bis hin zur Heliopause.

### Forschungsobjekt und Labor

Das Ziel der Heliophysik ist es natürlich, alle physikalischen Prozesse im System „Sonne und Heliosphäre“ zu verstehen [2]. Nachdem das Standardmodell des Sonnenaufbaus durch die Neutrinoexperimente und insbesondere durch die Helioseismologie bestätigt ist, steht nunmehr die Erforschung der Sonnenaktivität und ihrer Auswirkung auf die Sonnenatmosphäre (siehe den Artikel von Peter et al.) sowie die Heliosphäre im Vordergrund. Die Heliosphäre selbst wird zum einen als Plasmalabor benutzt, das wertvolle Erkenntnisse über den Transport energetischer, geladener Teilchen in turbulenten Plasmen erlaubt (siehe die Artikel von Büchner et al. und Heber et al.).

**1939** Walter Grotian entdeckt, dass die Korona der Sonne aus einem sehr dünnen und ca. 1 Million K heißen Gas besteht

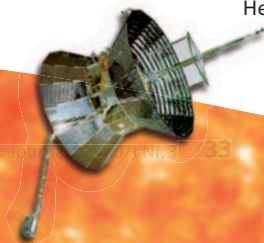
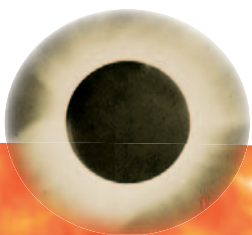
**1949/51** Georg Thiessen und Karl-Otto Kiepenheuer entwickeln den Magnetographen zur Messung solarer Magnetfelder

**1951** Ludwig Biermann sagt die Existenz einer solaren Korpuskularstrahlung anhand von Studien an Kometenschweif voraus

**1964** Fritz Krause, Karl-Heinz Rädler und Max Steenbeck formulieren das Prinzip des turbulenten selbsterregten Dynamos

**1974/76** Start der deutsch-amerikanischen Sonnensonden Helios 1/2, die erstmals die innere Heliosphäre erkunden

**1975** Franz-Ludwig Deubner identifiziert die 5-Minuten-Oszillationen der Sonne und begründet damit die Helioseismologie



Zum anderen wird die Struktur der Heliosphäre in zunehmendem Maße im Hinblick auf ihre Funktion als Schutzschild [3] gegen interstellare Einflüsse auf die Erde untersucht. Hier spricht man von interstellar-terrestrischen Beziehungen (siehe den Artikel von Scherer und Fichtner).

Von besonderem Interesse – auch für die Geo- und Atmosphärenphysik sowie die Klimaforschung – sind seit einigen Jahren diejenigen Vorgänge auf der Sonne, die auf die terrestrische Magnetosphäre (siehe den Artikel von Büchner et al.) sowie Atmosphäre und damit auch auf das Erdklima einwirken. Die entsprechenden solar-terrestrischen Beziehungen sind heute als Aspekt des „Weltraumwetters“ eingeordnet, mit welchem die Gesamtheit der oft starken Änderungen im interplanetaren und insbesondere erdnahen Weltraum gemeint sind. Nicht zuletzt gibt es auch eine enge Beziehung der heliophysikalischen Forschung zur Technologieentwicklung, da die Anforderungen an weltraumgestützte Instrumente auf Raumsonden und an bodengebundene Teleskope sehr hoch sind. Darüberhinaus eignet sich die Heliophysik aufgrund ihrer Vielfalt und den zahlreichen Querverbindungen zu anderen Forschungsgebieten der Physik hervorragend für eine fundierte experimentelle und theoretische Ausbildung von Physikerinnen und Physikern.

### Eine erfolgreiche Tradition in Gefahr?

Allerdings ist festzustellen [4], dass die Heliophysik als wesentlicher Teil der Extraterrestrischen Physik und der Astrophysik in Deutschland nicht mehr in einem zur Vergangenheit vergleichbaren Maße gefördert wird. Angesichts ihrer besonderen Eignung und des üblicherweise großen öffentlichen Interesses an ihren

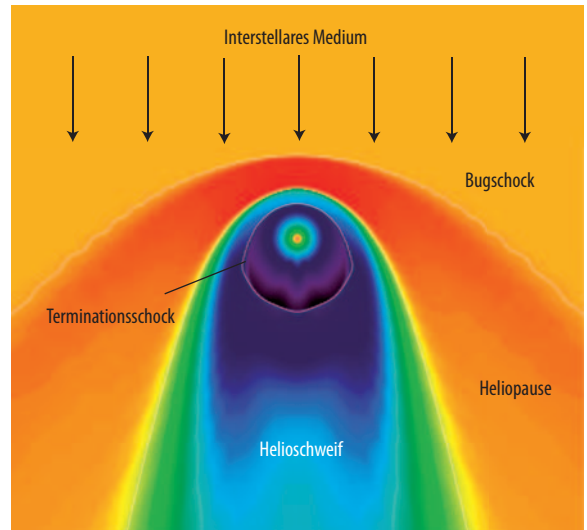


Abb. 4 Jede Sekunde schleudert die Sonne ca. eine Million Tonnen Elektronen, Protonen und Ionen in den Weltraum. Dieser Sonnenwind wird vom interstellaren Medium beeinflusst, durch das sich die Sonne mit 25 km/s bewegt. Die Übergangsregion zwischen ungestörtem Sonnenwind (innerhalb des Terminationsschocks, an dem der Sonnenwind sprunghaft abgebremst wird) und der ungestörten interstellaren Umgebung (außerhalb des Bugschocks) ähnelt der Strömung um ein Überschallflugzeug. Diese Darstellung ist das Ergebnis einer Simulation mit einem hydrodynamischen Modell. Farbkodiert ist die Protonenzahldichte von hoch (rot) bis niedrig (dunkelvioletl).

Ergebnissen sowie der damit verbundenen Chance, die Bedeutung und den Nutzen naturwissenschaftlicher Forschung deutlich zu machen, ist diese Entwicklung bedenklich. Insbesondere sollte die universitäre Forschung und Ausbildung im Bereich der Sonnen- und Heliosphärenphysik wieder gestärkt werden (z. B. durch entsprechende Berufungen oder auch durch Förderung von Nachwuchsgruppen), da den Universitäten die zentrale Rolle bei der Heranbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses zukommt, ohne den auch die außeruniversitären Einrichtungen, an denen der Großteil der Projektentwicklung stattfindet, auf Dauer nicht existieren können.

Die Aktivitäten des Heliophysikalischen Jahres 2007 (siehe Infokasten) können einen wichtigen Beitrag dafür leisten, dieser negativen Entwicklung entgegenzuwirken. Das gilt auch für das vorliegende Schwerpunktheft „Heliophysik“, das natürlich nur einige ausgewählte Themen aus dem breiten Spektrum herausgreifen und beleuchten kann. Die faszinierende Physik unserer direkten kosmischen Umgebung hat noch zahlreiche anderen Aspekte zu bieten – und noch viele Fragen, die es zu stellen oder zu beantworten gilt.

#### Literatur

- [1] C. Fröhlich, Space Science Reviews, DOI 10.1007/s11214-006-9046-5 (2006)
- [2] G. Poletto und S. T. Suess (Hrsg.), The Sun and the Heliosphere as an Integrated System, Kluwer, Norwell (2004)
- [3] K. Scherer et al., Physikal. Blätter, April 2001, S. 55; K. Scherer et al. (Hrsg.), Space Weather – The Physics Behind a Slogan, Springer, Berlin (2005)
- [4] F. Kneer et al., Perspektiven der Erforschung von Sonne und Heliosphäre in Deutschland, Copernicus GmbH, Katlenburg-Lindau (2003); www.mps.mpg.de/de/publikationen/perspektiven

### HELIOPHYSIKALISCHES JAHR

Fünfzig Jahre nach dem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957, das der Erforschung der Erdatmosphäre und dem erdnahen Weltraum gewidmet war, soll das **Internationale Heliophysikalische Jahr** (<http://ihy2007.org>) weltweit eine Periode intensiver interdisziplinärer Erforschung des erd- und sonnennahen Weltraums einleiten. Das umfasst die Sonne und die Heliosphäre, also den Bereich des Weltraums, der durch das von der Sonne ausgehende heiße, ionisierte Gas, dem Sonnenwindplasma, dominiert ist.

In Deutschland beteiligen sich fast alle Forschungseinrichtungen, an denen Sonnen- und Heliosphärenphysik betrieben wird, aktiv am IHJ, unter-

stützt u. a. durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die AG Extraterrestrische Forschung sowie den FV Extraterrestrische Physik der DPG. Die Veranstaltungen reichen von einer internationalen Fachkonferenz im Physikzentrum Bad Honnef (Heliophysics: The Sun, the Heliosphere and the Earth) über öffentliche Vorträge bis zu einer Wanderausstellung, die in verschiedenen Planetarien bundesweit gezeigt wird, beginnend im April 2007 im Planetarium Bochum. Mehr Infos finden sich unter: [www.ihy2007.de](http://www.ihy2007.de).

