

FWU – Schule und Unterricht



DVD 46 02348 / VHS 42 02725 24 min, Farbe



Der Urknall

**FWU –
das Medieninstitut
der Länder**



Lernziele

Kenntnis der Beweise, die zum Standardmodell des Urknalls führten; Beschreibung und Verständnis der Evolution des Kosmos unter der Voraussetzung dieses Modells

Vorkenntnisse

Grundkenntnisse der Astronomie und Astrophysik (Entfernungsmessung, Gravitationsgesetz, Elementarteilchen, Spektroskopie)

Zum Inhalt

Vergangenheit und Zukunft des Universums

Seit Tausenden von Jahren beobachten Menschen Sterne und denken über die Welt als Ganzes nach, insbesondere über ihre Entstehung. Dabei wurden unterschiedlichste Auffassungen entwickelt. In den letzten 70 Jahren jedoch haben wir mehr über den Kosmos gelernt als in den Jahrtausenden davor.

• Edwin Hubble:

Entdeckung eigenständiger Galaxien, Fluchtbewegung ferner Galaxien

Der Astronom Edwin Hubble fand 1923 durch Beobachtungen am Mount Wilson-Observatorium in Kalifornien, dass zahlreiche Lichtpunkte am Nachthimmel nicht Sterne unserer Milchstraße sind, sondern ferne eigenständige Galaxien. Die zweite sensationelle Entdeckung glückte Hubble 1929 mit der Rotverschiebung der Linien in den Spektren ferner Galaxien. Bei der Spektralanalyse konzentrierte er sich besonders auf die Wasserstoff-Kalzium-Linien. Er fand diese Linien umso stärker nach rot verschoben, je weiter die Galaxie entfernt war. Dieses Phänomen kann durch den Doppler-Effekt erklärt werden: Wellenfronten von einer Licht-

oder Schallquelle, die auf uns zukommt, drängen sich zusammen; die Spektrallinien verschieben sich nach blau, der Ton wird höher. Wellenfronten von einer Licht- oder Schallquelle, die sich von uns weg bewegt, lockern sich auf; die Spektrallinien verschieben sich nach rot, der Ton wird tiefer. Dabei ist die Größe der Verschiebung der Geschwindigkeit der Quelle proportional. Die Rotverschiebung in den Spektren ferner Galaxien bedeutet demnach, dass sich die Galaxien von uns weg bewegen. Die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien beträgt zwischen wenigen Hundert bis mehreren Tausend Kilometer pro Sekunde. Sie ist umso größer, je weiter diese von uns entfernt sind. Diese Erkenntnis war sensationell, denn sie widersprach der Annahme, dass der Kosmos statisch sei. Bei der Expansion vergrößern sich die Abstände zwischen den Galaxien. Von jeder beliebigen Galaxie ist dabei das Gleiche zu beobachten. Geht man in die Vergangenheit zurück, kehrt man also die Bewegung und die Zeit um, schrumpft der Raum. Denkt man dies konsequent zu Ende, verdichten sich alle Sterne und Galaxien in einem Anfangspunkt. Das Universum entsteht aus dem Nichts, vorher gibt es weder Raum noch Zeit. Seit dem Beginn des Universums dehnt es sich bis ins Unendliche aus. Wodurch die Expansion ausgelöst wurde, können wir nicht erklären. Die Anfangszustände waren extrem: unendlich hohe Temperatur und Dichte, sehr großer Druck; es gab nur Strahlung. Wenige Minuten nach dem Urknall bildete sich Materie. Dieses Urplasma bestand hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium. Nach wenigen Millionen Jahren entstanden daraus die ersten Sterne, die sich - bedingt durch die Gravitationskraft - zu Galaxien formten. Die Galaxien wiederum bildeten Gruppen und Haufen. Es entstanden großräumige Strukturen. Die unendlich hohe Strahlungstemperatur zu Be-

ginn der Expansion kühlte sich durch die Expansion des Raumes ab und hat jetzt im gesamten Kosmos fast den absoluten Nullpunkt von 0 Kelvin bzw. -273 °C erreicht. Das Universum dehnt sich weiter aus, die heute erreichbare Größe wird auf einen Durchmesser von 15 Milliarden Lichtjahre geschätzt.

• Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

Ein wichtiger Beweis für das Standardmodell des Urknalls wurde in der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung gefunden.

1964 entdeckten A. Penzias und R. Wilson beim Test einer Antenne rein zufällig ein Rauschen. Dieses Rauschen ähnelt dem, was wir auf einem Fernsehbildschirm sehen würden, wenn wir von diesem Bild die Beiträge abziehen, die durch das Empfängerrauschen und Störungen der Erdatmosphäre bedingt sind. Die beobachtete Hintergrundstrahlung war homogen und isotrop, konnte also nicht von einer lokalisierbaren Quelle aus dem Universum kommen. Als Strahlungsquelle dieses Phänomens ließ sich weder ein Stern noch eine Galaxie orten. Ohne Quelle stammt sie wohl direkt aus dem Urknall, sie ist das Echo des Urknalls.

• Entstehung der Elemente

Von den 92 verschiedenen chemischen Elementen haben die beiden einfachsten Elemente Wasserstoff und Helium mit 98 % im Universum den höchsten Anteil der Materie im Kosmos. Nach der Theorie ist ein solches Ergebnis zu erwarten, denn nach dem Urknall sind fast ausschließlich nur diese beiden Elemente entstanden. Danach waren Temperatur und Druck so rapide abgefallen, dass sich keine weiteren Elemente bilden konnten. Erst nach einigen Millionen Jahren, als aus Nebeln Sterne entstanden, waren wieder durch die stabilen hohen Druck- und Temperaturverhältnisse im Inneren der

Sterne über lange Zeiträume die Voraussetzungen gegeben zur Bildung der übrigen Elemente. Die Elemententstehung dauert Millionen oder Milliarden Jahre; bis heute sind erst 2 % des bei dem Urknall gebildeten Wasserstoffs und Heliums in weitere Elemente umgewandelt. Je älter das Universum wird, umso größer ist der Anteil der schweren Elemente. Je jünger das Universum war, umso geringer war dieser Anteil. Durch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes sind unsere Beobachtungen ferner Galaxien ein Blick in die Vergangenheit. Wir sehen die Galaxien, wie sie damals waren. Beobachten wir beispielsweise das Licht einer Galaxie, das schon ca. 14 Milliarden Jahre unterwegs ist, sehen wir heute die Galaxie in einem Zustand in dem sie noch sehr jung war, nämlich 1 Milliarde Jahre. Dabei nimmt man an, dass das Weltalter 15 Milliarden Jahre beträgt. Tatsächlich zeigen die Spektren so junger Sterne außer Wasserstoff und Helium kaum weitere Elemente an. Die Sterne hatten einfach noch keine Zeit, höherwertige Elemente zu bilden. Diese Tatsachen bestätigen das Standardmodell des Urknalls.

• Gravitation

Die Alternative zur Expansion wäre ein statisches Universum, wie es selbst Einstein zunächst noch in der Allgemeinen Relativitätstheorie postulierte. Aufgrund der Schwerkraft aber würden sich Sterne und Galaxien gegenseitig anziehen. Ein solcher Kosmos wäre in sich zusammengefallen. Ihm würde die kinetische Energie der Expansion fehlen, die der Gravitationskraft entgegen wirkt.

• Entstehung der Welt

Das Universum entstand aus dem Nichts. Danach folgte eine Strahlungsära mit unendlich hoher Temperatur. Die Expansion des Raumes erfolgte mit Überlichtgeschwin-

digkeit und zwar so schnell, dass sich in den ersten Sekundenbruchteilen die Temperatur auf wenige Milliarden Grad reduzierte. Dabei bildeten sich Quarks und Antiquarks, die sich sofort wieder vernichteten. Nur dadurch, dass es mehr Quarks als Antiquarks gab, waren bereits wenige Stunden nach dem Urknall die Bausteine vorhanden, aus denen sich die einfachen Elemente Wasserstoff und Helium bilden konnten. Der Kosmos war erfüllt von einem heißen, undurchsichtigen Plasma. Durch die weitere Expansion sank die Temperatur nach 300 000 Jahren schließlich auf 3000 K. Es gab geringe Dichteschwankungen, die zur Folge hatten, dass sich Wasserstoff an bestimmten Stellen konzentrierte. Nebel die sich verdichteten erreichten im Kern eine höhere Schwerkraft. Immer mehr Materie wurde aus der Umgebung angezogen, Reibung und chemische Vorgänge erhitzen den Wasserstoff derart, dass er zu leuchten begann und die einsetzende Strahlung die restlichen Nebel weg blies. Dabei kam es zu riesigen Leerräumen. Die ersten Sterne haben sich wenige Millionen Jahre nach dem Urknall gebildet. Sie wurden in Gruppen geboren und wuchsen durch die Gravitation zu Haufen von mehreren Millionen Sternen. Nach 1 Milliarde Jahren waren die ersten Galaxien entstanden, so genannte Zwerggalaxien. Es waren Gebilde mit unregelmäßigen Formen. Das Weltall war noch klein und die jungen Galaxien nahe genug, um von der Schwerkraft angezogen zu werden. Bei der Verschmelzung der Galaxien berührten sich die Sterne kaum, ihre Gaswolken prallten jedoch aufeinander. Dabei entstanden Stoßwellen, wodurch neue Sterne geboren wurden. Aus den Zwerggalaxien waren riesige Kugelsternhaufen mit mehr als 100 Milliarden Sternen entstanden. Durch den Zusammenstoß wurden die Sterne auf ihren Kreisbahnen in den Galaxien derart beschleunigt,

dass ihre Fliehkräfte sie nach außen schleuderten. Die Kugelform flachte ab und wurde elliptisch. Staub und Gaswolken wurden Tausende Lichtjahre weit nach außen geschleudert und formten sich zur Scheibe. Im Kern ist die Sterndichte wesentlich höher, daher rotieren die Sterne dort auch schneller als außen, es bilden sich Arme. Über mehrere Milliarden Jahre hatten sich Spiralgalaxien gebildet mit einem Durchmesser von durchschnittlich 100 000 Lichtjahren. Von der Seite erscheinen Spiralgalaxien als flache Scheiben. Galaxien sind selbst auf große Entfernungen gravitativ miteinander verbunden. Sie bilden kleine Gruppen und große Haufen. Durch die ständige Expansion entstehen immer großräumigere Strukturen. Beobachtungen machen es wahrscheinlich, dass die Expansion ewig fort dauert, das Universum wird immer leerer, dunkler und kälter.

Das Alter des Universums wird heute auf 15 Milliarden Jahre geschätzt

Ergänzende Informationen

Außer den bereits im Film aufgeführten Belegen (siehe „Zum Inhalt“) für das Standardmodell des Urknalls lassen sich noch weitere anführen:

• Paradoxon von Olbers

1826 stellte H. Olbers die Frage „Warum ist es nachts dunkel?“ Olbers ging von einem statischen, euklidischen, unendlichen, gleichmäßig mit Sternen erfüllten Universum aus. Müsste nicht bei einem solchen Universum jede Sichtlinie an einem Stern enden? Müsste nicht dadurch der Nachthimmel ähnlich hell sein wie unsere Sonnenscheibe?

Mit folgender Überlegung lässt sich dieses Problem etwas genauer erfassen: Um die Er-

de liegen lauter Kugelschalen mit dem Radius r und sehr kleiner (differentieller) Dicke. Die Sterne seien homogen verteilt. Die Leuchtkraft nimmt dann mit größer werdender Kugeloberfläche, also mit r^2 , zu. Die Intensität im Zentrum jeder Kugelschale nimmt mit r^2 ab. Die Intensität ist also in jeder Kugelschale gleich. Umgeben wir das Zentrum mit einer unendlichen Folge von Kugelschalen unendlich kleiner Dicke, erhalten wir bei Summation aller Intensitäten einen unendlich hohen Wert für die Intensität im Zentrum. Beachten wir außerdem, dass das von einem Stern emittierte Licht von einem anderen Stern absorbiert wird, erhalten wir einen endlichen Wert für die Intensität. Olbers nahm an, dass das Licht von interstellarer Materie absorbiert würde. Doch dies ist nicht der Fall, denn diese Materie würde sich solange aufheizen, bis sie genau so viel Licht absorbiert wie emittiert (thermisches Gleichgewicht). Mögliche Lösungen für das Paradoxon sind ein endliches Alter des Universums, sodass beispielsweise erst seit zehn Milliarden Jahren Sterne leuchten. Wenn das Universum zusätzlich expandiert, gibt es ab einer bestimmten Entfernung, bedingt durch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts, noch keine Sterne. Zusammenfassend können wir sagen, es ist nachts dunkel, weil der Urknall stattgefunden hat.

• Alter des Kosmos

Die Analyse des Zerfalls langlebiger radioaktiver Nuklide (vor allem aus Altersbestimmungen von Kugelsternhaufen) führt zu einem Alter zwischen 10 und 20 Milliarden Jahren. Dies steht in Übereinstimmung mit dem vom Standardmodell vorausgesagten Alter.

• Hubble-Konstante

Hubble beobachtete, dass die Geschwindigkeit der Galaxien proportional zum Abstand

r wächst: $v = H \cdot r$. (Gleichung 1). H , die Expansionsrate, bezeichnen wir als Hubble-Konstante. Dreht man die Bewegung der Galaxien um, geht in der Zeit zurück, gelangt man schließlich zum Ursprung U , in dem die Galaxien miteinander verschmolzen waren. Betrachten wir nun die Explosion zweier beliebiger Galaxien, die zur Zeit $t = 0$ miteinander verschmolzen sind. Zur Zeit t haben sie von U den Abstand R_1 bzw. R_2 . Für den Abstand r der beiden Galaxien voneinander folgt:

$$r = R_2 - R_1 \text{ (Gleichung 2)}, R_1 = v_1 t, R_2 = v_2 t,$$

$$r = v t = (v_2 - v_1) t \text{ (Gleichung 3)}$$

Hieraus folgt für die Expansionszeit $t = r/v$ (Gleichung 4). Durch Vergleich mit Gleichung 1 erhalten wir $t = 1/H$ (Gleichung 5). H lässt sich aus Gleichung 1 nur bestimmen, wenn wir die Entfernungen der Galaxien voneinander wissen.

Diese Messungen sind jedoch ungenau, deshalb können wir für H nur angeben: $50 \text{ km/s / Mpc} < H < 75 \text{ km/s / Mpc}$ (Gleichung 6) oder für das Alter t unseres Universums: $13 \text{ Milliarden Jahre} < t = 1/H < 20 \text{ Milliarden Jahre}$ (Gleichung 7). Mpc bzw. Megaparsec stellt ein Maß für die Entfernung dar, 1 pc sind $3,26$ Lichtjahre. Gleichung 3 gilt für zwei beliebige Galaxien und somit auch für alle Galaxien, die wir uns gleichmäßig über das ganze Universum verteilt denken müssen. Ein Beobachter wird von jeder x -beliebigen Galaxie die Expansion nach Gleichung 1 beschreiben. Jeder Beobachter auf irgendeiner beliebigen Galaxie hat denselben Anblick: unser Expansionsmodell ist homogen und isotrop (kosmologisches Postulat). Wir können uns die Expansion so vorstellen, als würden wir einen Luftballon aufblasen, den wir gleichmäßig mit Pfennigstücken, unseren Galaxien, beklebt haben. Von jedem Pfennigstück fliehen alle anderen „Galaxien“ in gleicher Weise mit einer Fluchtgeschwindigkeit, die proportional zum Abstand ist.

• Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

Die entdeckte Hintergrundstrahlung von 2,73 K ist identisch mit der Strahlung eines so genannten schwarzen Körpers. Von dieser Strahlung ist die spektrale Intensitätsverteilung, d. h. die Abhängigkeit der Intensität der Strahlung von der Wellenlänge, bestens bekannt. Durch den COBE-Satelliten (Cosmic Background Explorer), der 1989 gestartet wurde, konnte die spektrale Verteilung sehr genau vermessen werden. Die Übereinstimmung mit der Strahlung eines schwarzen Körpers war perfekt. Für die Temperatur T der Strahlung eines schwarzen Körpers gilt bei adiabatischer Ausdehnung (also bei einer Ausdehnung ohne Wärmezufuhr und -abfuhr): $T \sim 1/R$ (Gleichung 8). Bei jeder Abstandsverdopplung sinkt die Temperatur um die Hälfte. Je mehr wir uns dem Urknall nähern, umso höher wird die Temperatur. Geht der Weltradius R gegen Null, streben Dichte und Temperatur nach unendlich (Urknall-Singularität). Hat sich das Universum auf 3000 K abgekühlt, können sich beim Unterschreiten dieser Temperatur neutrale Atome bilden. Strahlung und Materie entkoppeln sich, das für elektromagnetische Wellen „undurchsichtige“ Universum wird „durchsichtig“. Aus dieser Zeit muss die kosmische Hintergrundstrahlung stammen. Mit der Hintergrundstrahlung haben wir demnach einen „Fingerabdruck“ aus der Frühphase unseres Universums. Es wurde eine Himmelskarte von Restfluktuationen erstellt, die nur 0,0002 K betragen. Temperaturschwankungen haben Dichte-Fluktuationen zur Folge, die schon am Anfang des Universums vorhanden gewesen sein müssen, wenn durch Expansion Sterne entstehen sollen.

Das Horizontproblem des Standardmodells

Wir stellen uns vor, ein Beobachter würde zwei gegenüberliegende Gebiete G1 und G2

der Hintergrundstrahlung in der Zeit zwischen Urknall und Strahlungsentkopplung beobachten. Der Ereignishorizont des Beobachters ist $c t$ (t : Zeit, die das Licht braucht, um vom beobachteten Objekt zum Beobachter zu gelangen, c : Lichtgeschwindigkeit). Auch die Gebiete G1 und G2 haben für Beobachter dort einen Ereignishorizont, jedoch überlappen sich die Horizonte von G1 und G2 nicht. Es kann also keine Wechselwirkung zwischen den Gebieten stattfinden. Wie aber kann es ohne Wechselwirkung zwischen entfernten Gebieten zu einer homogenen und isotropen Strahlung gleicher Temperatur kommen? Dieses und andere Probleme lassen sich nur mit einem inflationären Weltmodell lösen, in dem sich unmittelbar nach dem Urknall der Raum „inflationär“ mit Überlichtgeschwindigkeit ausdehnte und der Temperatureausgleich schon früher stattfinden konnte. Das Universum ist durch die Inflation größer als unser Ereignishorizont.

Weltmodelle

Schon eine einfache Betrachtung auf Grundlage der Newton'schen Mechanik führt zu verblüffenden Ergebnissen. M sei die Gesamtmasse aller Galaxien innerhalb des Volumens einer Kugel mit dem Radius R , m die Masse einer Galaxie mit der Geschwindigkeit v in sehr großer Entfernung R zur Erde. Dann folgt aus dem Newton'schen Gravitationsgesetz für die Potentielle Energie der Galaxie: $E_{\text{pot}} = -G M m / R$ (Gleichung 9; G : Gravitationskonstante) und für die kinetische Energie: $E_{\text{kin}} = 1/2 m v^2$ (Gleichung 10). Für die Gesamtenergie E gilt der Energie-Erhaltungssatz $E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 1/2 m v^2 - G M m / R$ (Gleichung 11).

Ist die Gesamtenergie $E > 0$, überwiegt die kinetische Energie. Die Galaxien werden, wenn auch gebremst, ins Unendliche fliegen. Ist jedoch die Gesamtenergie $E < 0$,

würde auf eine maximale Expansion eine Rekontraktion folgen, d. h. die Galaxien kollabieren. Ist die Gesamtenergie $E = 0$, sind also kinetische und potentielle Energie genau gleich, wird die Galaxie mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit weiterfliegen. Für diesen Fall fragen wir nach der kritischen Massendichte ρ_k . Aus Gleichung 11 folgt für $E = 0$: $v^2 = 2GM/R$ (Gleichung 12). Unter Beachtung von $v = HR$ (vgl. Gleichung 1) und $\rho_k = M / 4/3 \pi R^3$ erhalten wir aus Gleichung 12: $\rho_k = 3H^2 / 8 \pi G$ (Gleichung 13). Numerisch ausgedrückt, ergibt sich $\rho_k = 4,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$. Die durch Schätzung ermittelte mittlere Dichte ρ_0 unseres Universums beträgt: $\rho_0 = 9,4 \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$. Aus $\rho_0 < \rho_k$ folgt, dass $E > 0$ ist. Das Universum expandiert also ewig. Alle Beobachtungsdaten scheinen darauf hin zu deuten. Unsere Zukunft hängt von ρ_0 ab, die nur mit großer Unsicherheit geschätzt werden kann, schon wegen der unbekanntem Zahl Schwarzer Löcher, Neutrinos und eventueller intergalaktischer Materie.

Herausgabe

FWU Institut für Film und Bild, 2002

Produktion

Gerald Kargl Ges.m.b.H. Filmproduktion, Wien
im Auftrag des bm:bwk

Buch und Regie

Gerald Kargl

Begleitkarte

Peter Stilijanov

Bildnachweis

IFA Bilderteam, Ottobrunn

Pädagogische Referentin im FWU

Dr. Christine Fischer

Verleih durch Landes-, Kreis- und Stadtbildstellen,
Medienzentren

Verkauf durch FWU Institut für Film und Bild,
Grünwald

Nur Bildstellen/Medienzentren: öv zulässig

© 2005

FWU Institut für Film und Bild
in Wissenschaft und Unterricht
gemeinnützige GmbH
Geiseltalsteig
Bavariafilmplatz 3
D-82031 Grünwald
Telefon (0 89) 64 97-1
Telefax (0 89) 64 97-240
E-Mail info@fwu.de
vertrieb@fwu.de
Internet <http://www.fwu.de>



FWU Institut für Film und Bild
in Wissenschaft und Unterricht
gemeinnützige GmbH
Geiseltalstraße
Bavariafilmplatz 3
D-82031 Grünwald
Telefon (0 89) 64 97-1
Telefax (0 89) 64 97-240
E-Mail info@fwu.de
Internet <http://www.fwu.de>

**zentrale Sammelnummern für
unseren Vertrieb:**

Telefon (0 89) 64 97-4 44
Telefax (0 89) 64 97-2 40
E-Mail vertrieb@fwu.de

Laufzeit: 24 min
Kapitelwahl auf DVD-Video
Sprache: deutsch

**Systemvoraussetzungen
bei Nutzung am PC**
DVD-Laufwerk und
DVD-Player-Software,
empfohlen ab WIN 98

GEMA

Alle Urheber- und
Leistungsschutzrechte
vorbehalten.
Nicht erlaubte/genehmigte
Nutzungen werden zivil- und/oder
strafrechtlich verfolgt.

**LEHR-
Programm
gemäß
§ 14 JuSchG**

FWU - Schule und Unterricht

- VHS 42 02725
- DVD-VIDEO 46 02348
- ■ **Paket 50 18005** (VHS 42 02725 + DVD 46 02348)

24 min, Farbe

Der Urknall

Seit mehreren tausend Jahren beobachten die Menschen die Sterne. 1929 machte der Astronom Edwin Hubble eine Entdeckung, die eine Revolution in der Welt der Wissenschaft auslöste. Er wies nach, dass sich die Galaxien mit einer Geschwindigkeit von bis zu mehreren 1000 km pro Sekunde von uns entfernen. Das Universum ist nicht statisch, sondern erweitert sich ständig. Wenn das Universum wächst, was war dann in der Vergangenheit? Die einzige logische Folgerung ist die Annahme, dass das Universum einen Anfang haben musste - den Urknall. Beeindruckende Bilder zeigen, wie der Urknall entdeckt wurde, was dabei und kurz danach geschah, und liefern die Beweise für die Theorie des „Big Bang“.

Schlagwörter

Kosmos, Universum, Galaxie, Sternentstehung, Spektrallinien, Doppler-Effekt, Wasserstoff, Helium, Hintergrundstrahlung

Physik

Astronomie • Astrophysik, Geophysik

Allgemeinbildende Schule (9-13)
Kinder- und Jugendbildung (14-18)
Erwachsenenbildung

Weitere Medien

42 01485 Von jungen Galaxien und alternden Sternen,
Arbeitsvideo/6 Kurzfilme. VHS 12 min, f
42 00491 Das Universum. VHS 26 min, f
42 02397 Die Suche nach den neuen Sternen und Planeten,
Methoden der Radioastronomie. VHS 22 min, f