

# Planetarische Nebel

von Frank Giesecking

## Etwas Entdeckungsgeschichte

Als im Jahre 1779 Antoine Darquier von Toulouse im Sternbild Lyra ein trüb schimmerndes Scheibchen etwas größer als Jupiter und im Aussehen wie ein schwach leuchtender Planet sichtete, wußte er nicht, daß er den Prototyp einer Klasse von Objekten entdeckt hatte, die in unserem Jahrhundert außerordentliche Bedeutung erlangen sollten. Dieser erste „Planetarische Nebel“ (im folgenden PN abgekürzt) wurde von Messier mit der Nummer 57 bedacht, ist heute auch als „Ringnebel in der Leier“ bekannt und als NGC 6720 in der kleinen Bildergalerie der Abb. 1 zu finden. In der zunächst recht langsam fortschreitenden Entdeckungsgeschichte dieser Objekte haben die Namen William und John Herschel einen wichtigen Platz, die zwischen 1780 und 1800 bzw. 1820 und 1840 die ersten 3 Dutzend PN entdeckten. Ihnen stand als einziges Erkennungsmerkmal das von den Sternen deutlich unterscheidbare flächenhafte optische Erscheinungsbild der PN zur Verfügung.

Dieser, wie wir heute wissen, irreführende Begriff der „Planetarischen Nebel“ festigte sich in jenen frühen Tagen, da neben der „planetarischen“ Gestalt dieser mehr oder minder symmetrischen leuchtenden Gebilde viele unter ihnen zudem in einem auffallend grünlichen Licht erschienen, wie es besonders bei den Planeten Uranus und dem bald im Jahre 1846 entdeckten Neptun beobachtet wurde. Bei Uranus und Neptun wird dieses grünliche Aussehen durch selektive *Absorption* des Sonnenlichtes in ihren Atmosphären bewirkt. Das grüne Licht der PN blieb geheimnisvoll, bis es seit Ende des vorigen Jahrhunderts mit Hilfe von ersten Spektrographen bei gleichzeitiger Anwendung der sich in jener Zeit rasch verbessernden photographischen Emulsion gelang, Spektren der PN zu erzeugen: Jene zeigten offensichtlich zahlreiche Emissionslinien (Abb. 2, 3 und 4) mit besonders kräftigen charakteristischen *Emissionen* bei den Wellenlängen 4959 Å und 5007 Å, die uns in kräftigem Grün erscheinen.

Ein erstes Rätsel der PN war gelöst.

Die Weiterentwicklung der photographischen Emulsion und das neben die Morphologie tretende weitere Erkennungsmerkmal eines charakteristischen reichhaltigen Emissionslinienspektrums haben die Entdeckungsgeschichte der PN im 20. Jahrhundert dramatisch beeinflusst. Dennoch ließen die großen Entdecker noch einige Zeit auf sich warten. So umfaßte denn auch der erste Katalog der PN von Curtis im Jahre 1918 erst 102 Objekte. Die ersten wirklich großen Fortschritte wurden erreicht, als man sich zu

ersten systematischen spektroskopischen Durchmusterungen der Milchstraße entschloß. Hierbei erzielte man mit Objektivprismen (siehe auch Abb. 2 und 3) besonders hohe Entdeckungswahrscheinlichkeiten, so daß der Nachweis von PN selbst bis in die Nähe des galaktischen Zentrums und in den Magellanschen Wolken möglich wurde. Diese Entwicklung wurde eingeleitet durch Minkowski (vgl. SuW 21, 188 [1982]), der in den vierziger Jahren allein 208 neue PN entdeckte. So enthält der erste neuere umfassende Katalog von Perek und Kohoutek aus dem Jahre 1967 bereits 1036 galaktische PN. Zwei Ergänzungen von Kohoutek aus den Jahren 1978 und 1982 bringen diese Zahl auf 1315. Eine neue umfangreiche Datensammlung über galaktische PN steht am „Centre de Données Stellaires de Strasbourg“ zur Verfügung und umfaßte im Jahre 1981 einschließlich auch sämtlicher zweifelhafter Fälle insgesamt 1455 Objekte. – Die Suche nach PN ist außer auf die beiden Magellanschen Wolken (in denen bis heute 188 Objekte bekannt sind) in neuerer Zeit auch auf andere extragalaktische Sternsysteme ausgedehnt worden. So kennen wir neuerdings PN in mehreren Galaxien der Lokalen Gruppe wie etwa in M 31, M 32, NGC 185, NGC 147, NGC 205, M 33, NGC 6822 und im Fornax-System.

Heute wissen wir, daß die PN keineswegs „planetarische“ Eigenschaften besitzen: Wir fassen noch einmal ihre 3 wichtigsten gemeinsamen Merkmale zusammen:

- Sie zeigen ein für hoch angeregte interstellare Gasnebel charakteristisches reichhaltiges Emissionslinienspektrum, an dem sie sich auch noch in großen Entfernungen erkennen lassen.
- Bei genügend geringer Entfernung läßt sich ein im Gegensatz zu gewöhnlichen ionisierten interstellaren Wasserstoffwolken (HII-Regionen) relativ regelmäßiger, meist symmetrischer mehr oder minder kompakter leuchtender Nebel auflösen.
- In allen Fällen, in denen dafür eine angemessene Nachweisgrenze zu erwarten ist, wird ein im optischen Wellenlängenbereich meist überraschend schwaches zentrales stellares Objekt beobachtet, das wir Zentralstern des planetarischen Nebels oder im folgenden ZPN nennen wollen. (Nur in einigen wenigen Fällen wird noch immer nach ihnen gesucht.)

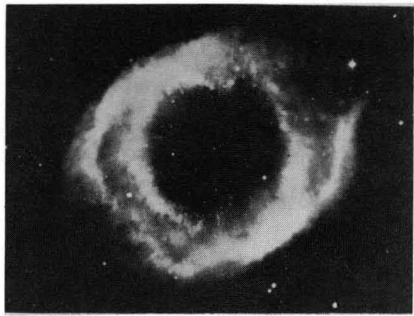
Im August 1982 kamen die Astronomen aus aller Welt im Rahmen des Symposiums Nr. 103 der Internationalen Astronomischen Union zum vierten Mal innerhalb von nur 15 Jahren zusammen, um die neuesten wissen-

schaftlichen Erkenntnisse über Planetarische Nebel zu diskutieren. – Warum nehmen wir die Planetarischen Nebel so wichtig?

## Warum wir die Planetarischen Nebel so wichtig nehmen

Vor allem die beiden oben erwähnten bei den PN immer beobachtbaren Emissionslinien bei 4959 Å und 5007 Å haben die Astronomen lange Zeit beschäftigt. Alle Versuche, diese mit Spektrallinien bekannter chemischer Elemente zu identifizieren, mangeln. Offensichtlich hatte man ein neues Element entdeckt, das man naheliegenderweise „Nebulium“ nannte. – Großes Aufsehen erregte es dann, als im Jahre 1927 Bowen zeigen konnte, daß die fraglichen Emissionen „verbotene Linien“ des zweifach ionisierten Sauerstoffs, des  $O^{++}$  oder wie meistens bezeichnet  $O III$ , sind: Emissionslinien, die ihre Ursache, wie wir noch genauer sehen werden, in Energieübergängen innerhalb der Elektronenhülle dieser Ionen haben, die nur mit winzigster Wahrscheinlichkeit unter Emission elektromagnetischer Strahlung ablaufen. Diese Übergänge verlaufen unter normalen terrestrischen Laborbedingungen daher strahlungslos durch Energieübertragung bei den genügend häufigen Stößen der Teilchen untereinander. Entsprechende Emissionslinien sind daher „verboten“. Bei den später noch genauer zu begründenden offensichtlich extrem geringen kosmischen Dichten der Hüllen planetarischer Nebel (die wir im folgenden HPN nennen wollen) von meist weniger als nur 10000 Teilchen pro Kubikzentimeter jedoch konnten erstmals solche bisher unbeobachtbaren Strahlungsübergänge untersucht werden. (Derartige Teilchendichten sind zwar 10000 mal so groß wie im mittleren interstellaren Medium, und doch so klein wie im besten auf der Erde erzeugten „Vakuum“, welches nach mehr als 3 milliardenfacher Luftverdünnung, also unterhalb von 10000000000 Teilchen pro Kubikzentimeter, bereits „Ultrahochvakuum“ heißt.) So wurden die PN zu wichtigen Laboratorien, in denen die empirischen Grundlagen erarbeitet werden konnten, die zur Weiterentwicklung der Atomphysik führten.

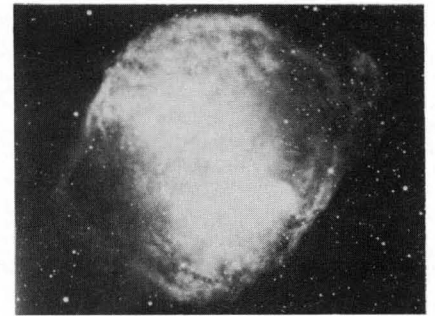
Eine ähnlich unerwartete Überraschung boten dann die Spektren der unscheinbaren ZPN bereits in dem zunächst allein zur Verfügung stehenden optischen Wellenlängenbereich: Im Falle, daß überhaupt Absorptionslinien nachweisbar waren, zeigten sich nämlich sogar solche des ionisierten Heliums, des  $He II$ . Die Energie von 25 Elektronenvolt (eV) jedoch, die zur Ionisation des Helium benötigt wird, fordert für die Effektivtemperatur der anregenden Strahlungsquelle bereits mehr als 50000 Grad Kelvin und ist mithin so groß, daß sie in den Sternatmosphären der meisten gewöhnlichen Sterne nicht mehr zur Verfügung steht. Bereits dieser erste Befund erhebt nun die ZPN mit einem Mal aus ihrer offensichtlich unverdienten bescheidenen Rolle und bringt sie in die Nähe der gewaltigsten stellaren Energie-



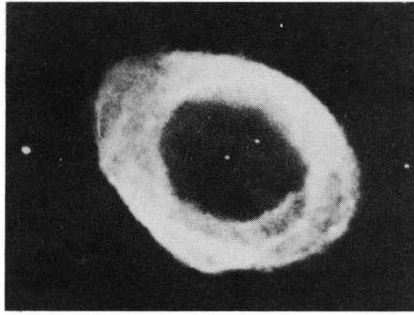
7293 36 - 57 ° 1



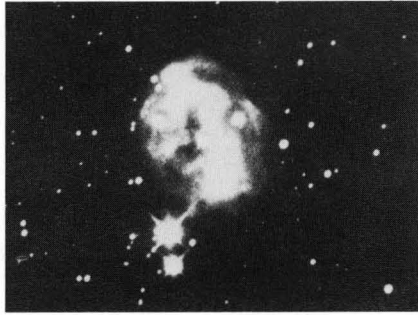
7009 37 - 34 ° 1



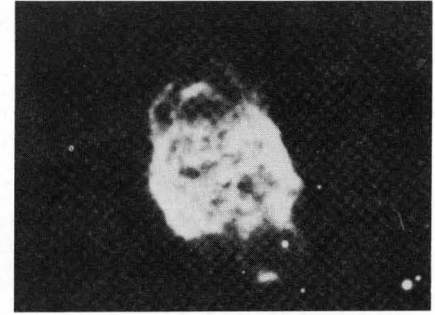
6853 60 - 3 ° 1



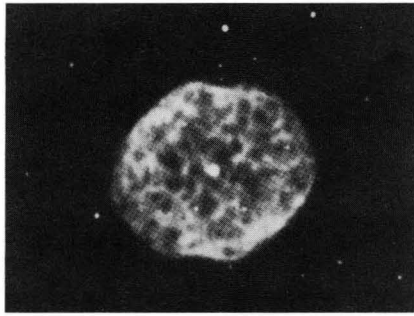
6720 63 + 13 ° 1



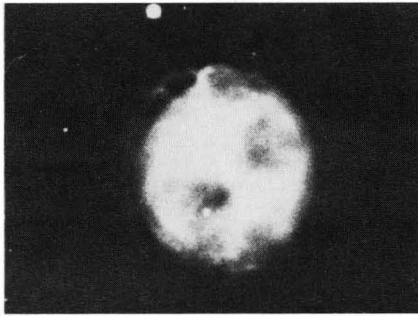
7008 93 + 5 ° 2



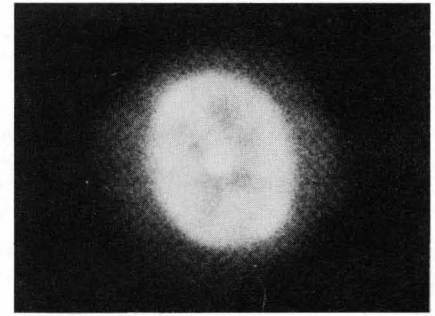
40 120 + 9 ° 1



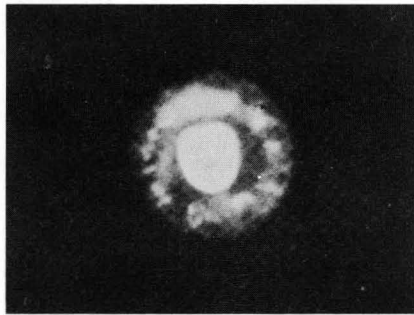
1501 144 + 6 ° 1



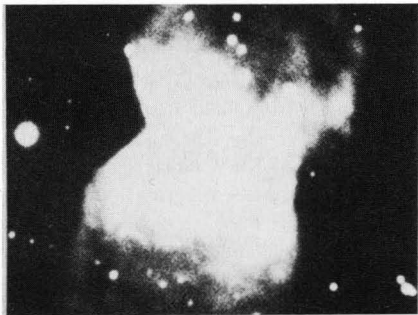
3587 148 + 57 ° 1



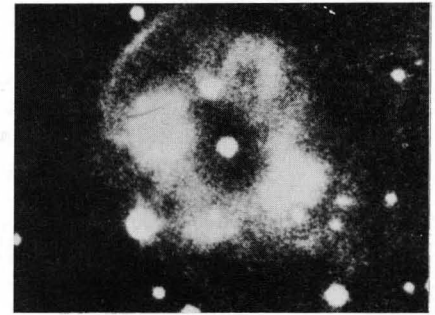
2022 196 - 10 ° 1



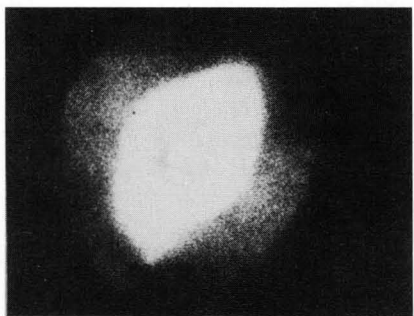
2392 197 + 17 ° 1



2346 215 + 3 ° 1



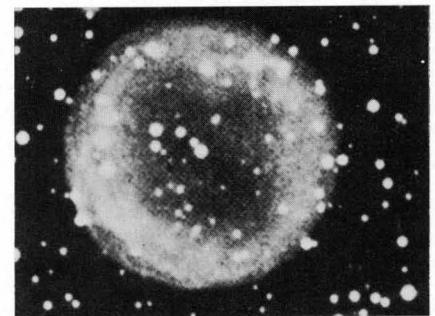
258 - 15 ° 1



3242 261 + 32 ° 1



3132 272 + 12 ° 1



286 + 11 ° 1

Abb. 1: Kleine Bildergalerie planetarischer Nebel, zusammengestellt aus verschiedenen Quellen. – Die Objekte sind identifiziert durch ihre NGC-Nummer (links unten) und durch ihre im Katalog von Perek und Kohoutek (1967) gebräuchliche Bezeichnung, wobei die erste Zahlengruppe die galaktische Länge, die zweite Zahlengruppe die gal-

aktische Breite ist. Norden ist jeweils oben, Westen rechts. Die Abbildungsmaßstäbe sind unterschiedlich. – NGC 7293 ist der Helix-Nebel, NGC 7009 der Saturn-Nebel, NGC 6853 = M27 der Hantel-Nebel, NGC 6720 = M57 der Ring-Nebel in der Leier, NGC 3587 = M97 der Eulen-Nebel und NGC 2392 der Eskimo-Nebel.

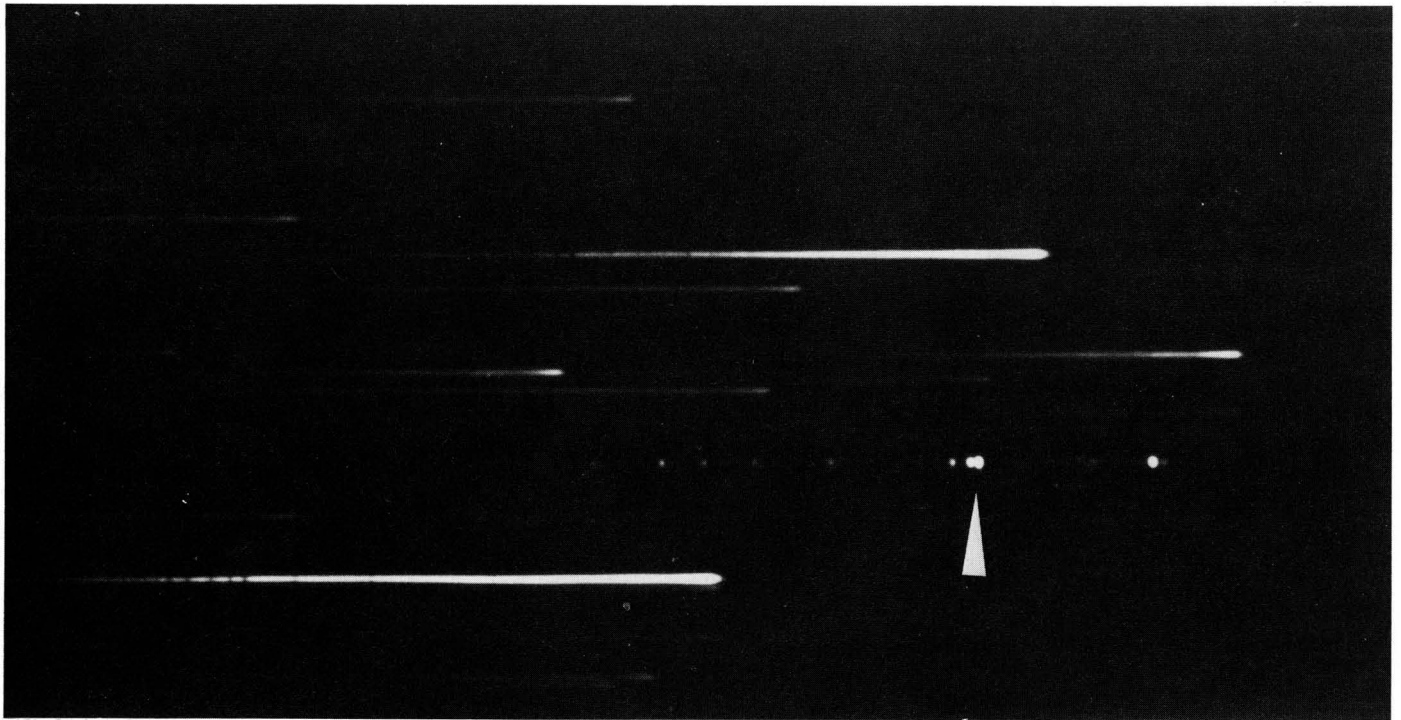


Abb. 2: Objektivprismen-Aufnahme eines Sternfeldes um NGC 6210. – Während die hellen Streifen die unverbreiterten kontinuierlichen Spektren zwischen 7000 Å (rechtes Ende) und bis zu 3500 Å (linkes Ende) der umgebenden Feldsterne sind (ihre Absorptions-„Linien“ werden erst durch Verbreiterung der Spektren optimal dargestellt), zeigt das Spektrum des planetarischen Nebels offensichtlich verschiedene kräftige diskrete Emissionen nur bei ganz bestimmten Wellenlängen. Besonders ausgeprägt sind meist die hier gerade getrennten cha-

rakteristischen Emissionen bei 5007 Å und 4959 Å (durch den Pfeil gekennzeichnet), die genau in den grünen Spektralbereich fallen und somit vielen PN ihr grünliches Aussehen verleihen. – Die Objektivprismen-Spektroskopie ist bei unerreichter hoher Reichweite und Effizienz die beste Methode zur sicheren Identifikation neuer planetarischer Nebel. (Aufnahme: Peschk, Schmidt-Teleskop des Observatoriums Hoher List).

quellen des Kosmos, deren praktisch gesamte Leuchtkraft dem Auge entgangen war, da sie im wesentlichen in dem zunächst nicht erfaßten nahen und fernen ultravioletten Spektralbereich in Erscheinung tritt.

Recht bald kannte man auch den Bewegungszustand der HPN, den man aus einer Feinanalyse der Emissionslinienprofile besonders elegant häufig entnehmen kann. Der Hintergrund der Methode wird in Abbildung 5 veranschaulicht und durch ein Beispiel belegt. Die so von der Radialgeschwindigkeit der PN selbst unabhängig gefundenen Geschwindigkeiten der HPN liegen in der Größenordnung von 20 km/s. Diese Bewegung erweist sich nun durch dynamische und später behandelte kosmogonische Überlegungen als Expansion (die sich in den Linienprofilen allein formal nicht von einer Kontraktion des Nebels unterscheiden läßt). Verfolgen wir seine Bewegungen zurück, so müssen wir einen Anfangszustand von stellaren Dimensionen erwarten. Verfolgen wir sie in die Zukunft, so sehen wir eine unaufhaltsame Ausbreitung in den interstellaren Raum. Gemessen an den mehrere 1000 km/s betragenden katastrophalen Expansionsgeschwindigkeiten bei Supernovae und Novae verläuft diese allerdings vergleichsweise harmlos und friedvoll. Und dennoch läßt sich das schnelle Ende des für uns beobachtbaren Phänomens der PN absehen, wenn nach Ausbreitung auf etwa 0.7 parsec die Verdünnung der Hülle so weit fortgeschritten ist, daß sie nur noch in den seltensten Fällen sichtbar ist. Zusammen mit der beobachteten Expansionsgeschwin-

digkeit schätzen wir daher die Größenordnung der Lebenserwartung eines PN mit 30000 Jahren ab. Damit gehört die Episode der PN zu den kürzesten Entwicklungsphasen, die wir bei den Sternen beobachten können und läßt mithin eine entsprechend geringe Anzahl gleichzeitig beobachtbarer PN erwarten. Im Lichte dieser Abschätzung besitzt unser zunächst bescheiden anmutender Katalog bekannter PN plötzlich ein unerwartet großes Ausmaß: Nur eine riesige Häufigkeit dieses Ereignisses vermag die nunmehr viel zu groß erscheinende derzeit abgeschätzte Anzahl von vielleicht 30000 gleichzeitig existierender PN in der Milchstraße zu erklären.

Wegen der relativ leicht nachweisbaren kräftigen Emissionslinien der HPN besitzen die PN eine hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit. Daneben gelingt es auch aus gleichem Grund mit relativ geringer Mühe, Radialgeschwindigkeiten abzuleiten. Daher gehört die Population der PN bezüglich räumlicher Verteilung und Kinematik im Prinzip zu den best erfaßbaren Sternpopulationen der Milchstraße, die deren Sondierung bis in das galaktische Zentrum ermöglicht. (Hierbei müssen jedoch wegen der im nächsten Abschnitt behandelten Problematik der Entfernungsbestimmung Einschränkungen eingeräumt werden.) Trotz der zeitweise bewegten Vergangenheit der Entfernungsskala der PN gibt es heute keinen Zweifel daran, daß sowohl Geschwindigkeitsdispersion als auch die Verteilung über die galaktische Breite die Zugehörigkeit der PN zu einer alten Population I erweisen, die mit der sogenannten

galaktischen Scheibenpopulation verwandt zwischen der extrem jungen und extrem alten Population I und II liegt.

Zusammenfassend stellen wir fest, daß unser heutiges Interesse an den PN vier allgemeine Aspekte besitzt:

1a) Die Zentralsterne planetarischer Nebel besitzen höchste Leuchtkräfte und Effektivtemperaturen: Sie stellen damit außerordentlich effektive Energiequellen auch härtester Strahlung dar.

1b) In den Hüllen planetarischer Nebel liegen „Experimentierbedingungen“ vor, wie sie in terrestrischen Laboratorien nicht erreicht werden: Sie stellen damit ein sonst nicht realisierbares unbegrenztes Teilchensystem unter extremen physikalischen Bedingungen dar.

Beides zusammen liefert eine einmalige Kombination eines Teilchensystems unter interstellaren Bedingungen und einer ausreichenden Energiequelle, die für die gewünschten Anregungsbedingungen sorgt. Somit werden die PN zu idealen Weltraumlaboratorien der „experimentellen“ Atomphysik und zur Untersuchung der Eigenschaften des interstellaren Mediums.

2a) Der Vergleich der relativ geringen Lebenserwartung der Planetarischen Nebel mit ihrer relativ großen erwarteten Anzahl im Milchstraßensystem zeigt uns, daß die Episode „PN“ kein pekuliares Schicksal der Sterne ist, sondern für eine große noch abzugrenzende Sternpopulation ein charakteristisches unabwendbares Schicksal zu sein scheint.

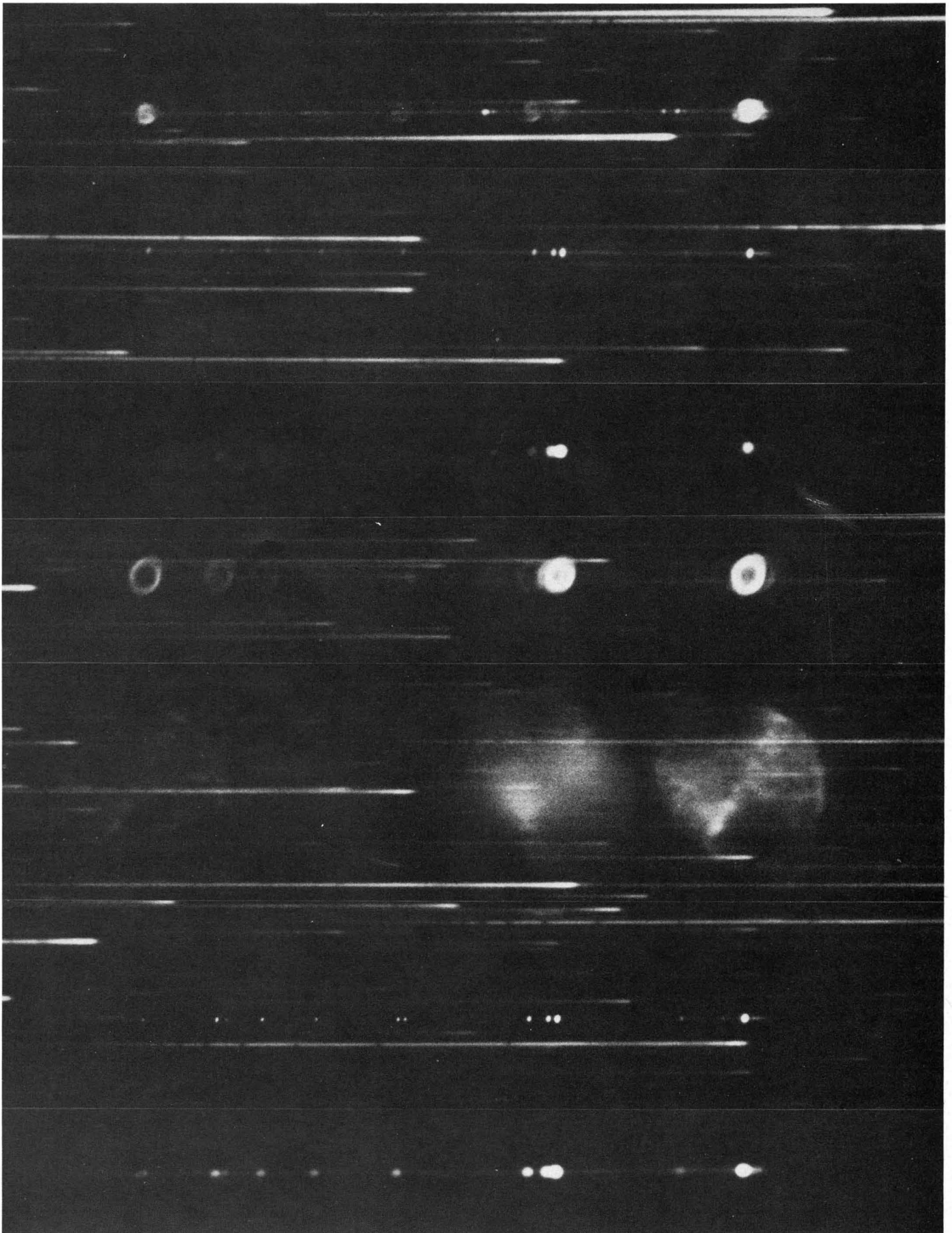


Abb. 3: Objektivprismen-Aufnahmen von NGC 40, IC 2149, NGC 6543, NGC 6720, NGC 6853, IC 4997 und NGC 7662. – Spaltlose Spektrographen liefern monochromatische Bilder der planetarischen Nebel im Lichte ihrer Emissionen und erlauben so in besonders ele-

ganter Weise sowohl die Morphologie der Anregungsbedingungen als auch (unterschiedliche) räumliche Verteilung der verschiedenen Ionen zu studieren. (Aufnahmen: Peschk, Schmidt-Teleskop des Observatoriums Hoher List.)

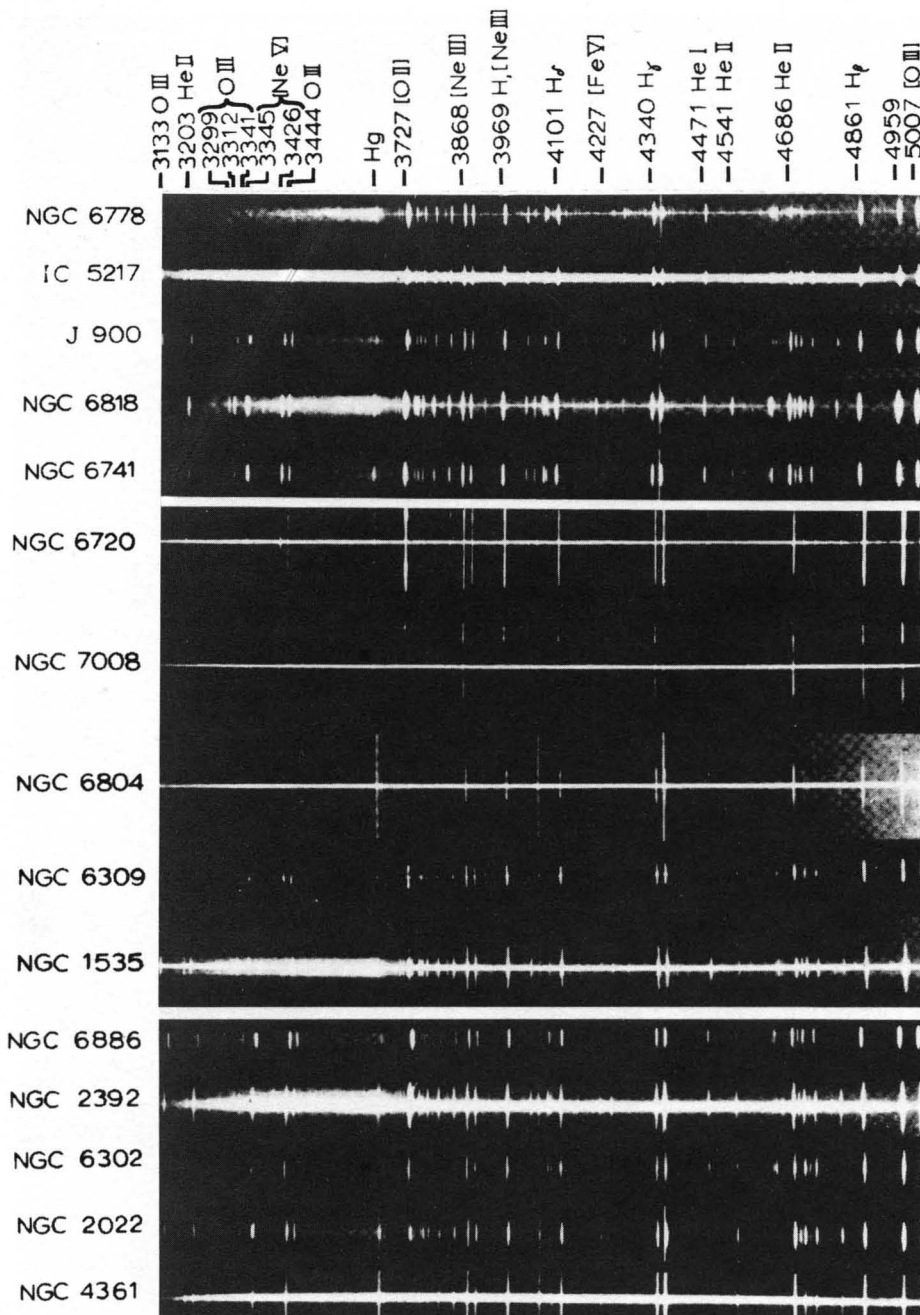


Abb. 4: Kleine Bildergalerie ausgewählter Spektren planetarischer Nebel. – Diese nun mit Hilfe eines konventionellen Spalt-Spektrographen erhaltenen Spektren zeigen die Emissionen als vertraute Emissions-„Linien“. Planetarische Nebel besitzen ein besonders reichhaltiges Emissionlinienspektrum, vorherrschend mit Linien des Wasserstoffs und Linien des neutralen und einfach ionisierten Heliums, sowie „verbotene“ Linien (in der Abbildung wie allgemein üblich durch eckige Klammern gekennzeichnet) vor allem des Sauerstoffs und Neons in verschiedenen Ionisationsstufen, wobei insbesondere wiederum die berühmten grünen Linien bei 4959 und 5007 Å des O III charakteristisch in Erscheinung treten. – Eine detaillierte systematische Behandlung der Komponenten des Emissionsspektrums und deren Deutung geschieht exemplarisch an Hand eines später gezeigten hochauflösenden Spektroms. (Diese Spektren-Tafel zeigten Aller und Czyzak 1967 beim Symposium Nr. 34 der Internationalen Astronomischen Union.)

2b) Die PN gehören einer Population mittleren Alters zwischen den extremen Populationen I und II an, womit sich das Ereignis „PN“ als eine späte Entwicklungsphase der Sterne weniger Sonnenmassen erweist.

Beides zusammen zeigt, daß die Beobachtung der PN nicht nur eine spezielle, sondern eine grundlegende Bedeutung zur Weiterentwicklung der Theorie der späten Sternentwicklung und des Aufbaus entwickelter Sterne besitzt.

3) Planetarische Nebel geben insgesamt mehr stellare Materie an das interstellare

Medium ab als Supernovae. Damit tragen sie wesentlich zur chemischen Entwicklung der interstellaren Materie bei und besitzen daher grundlegende Bedeutung zum Verständnis des Materiekreislaufs in unserem Milchstraßensystem.

4) Die PN gehören zu den im Prinzip best erfassbaren Sternpopulationen unserer Milchstraße und auch extragalaktischer Sternsysteme. Sie bieten also im Prinzip eine besonders erfolgversprechende Möglichkeit, Struktur und Kinematik einer einheitlichen Sternpopulation innerhalb der Milchstraße und an-

derer Galaxien exemplarisch zu studieren. Weiterhin gestatten sie als eine der wenigen geeigneten stellaren Raumsonden des Milchstraßensystems, dieses bis in große Tiefen zu erfassen, um somit sein Modell verbessern zu helfen. Sie werden schließlich als alternative extragalaktische Entfernungsindikatoren selbst zu Meilensteinen der Kosmologen.

## Die Entfernungen

Zur schwerstwiegenden Problematik bei der Untersuchung der PN gehört die Bestimmung ihrer Entfernung. Ohne diese Entfernung kennen wir nicht die Leuchtkraft der ZPN: Uns fehlte einer der wichtigsten Parameter der Sternentwicklung und die Kenntnis einer der wichtigsten Eigenschaften der Energiequelle der HPN. Ohne diese Entfernung kennen wir weder Leuchtkräfte noch Dimensionen der HPN, besitzen daher nur eine unzureichende Kenntnis des Strahlungstransports in ihr; ohne ihr Volumen kennen wir auch nicht ihre Massen. Ohne diese Entfernung schließlich bliebe sowohl die Struktur als auch Kinematik der Gesamtpopulation der PN in unserer Milchstraße im Dunkel. – Angesichts der so verdeutlichten grundlegenden Bedeutung dieses zunächst unerheblich anmutenden Parameters wiegt es besonders schwer, daß uns unter der Vielfalt der Methoden astronomischer Entfernungsbestimmung ausgerechnet die wichtigsten nicht zur Verfügung stehen: So stehen selbst die nächsten PN, mit Ausnahme eines einzigen, in so großen Entfernungen, daß zuverlässige trigonometrische Parallaxen nicht abgeleitet werden können, so finden wir keinen PN in offenen Sternhaufen, durch deren Entfernungsbestimmung wir uns in die weitere Sonnenumgebung vortasten könnten, und so müssen wir schließlich wegen der peculiaren physikalischen Eigenschaften der PN auch auf die effektive und bei Sternen gewöhnlicher Spektraltypen so erfolgreiche spektroskopische Parallaxe verzichten. Was uns bleibt ist dies:

1) Eine zuverlässige (größte) trigonometrische Parallaxe von 0,04 für NGC 7293 (siehe auch Abb. 1).

2) Statistische Parallaxen aus Eigenbewegungen einer Reihe näherer PN. – Hierbei wird eine durch die Pekuliarbewegung der Sonne gegebene sehr viel größere Basislänge genutzt. Diese Methode liefert jedoch naturgemäß keine zuverlässigen individuellen Entfernungen, sondern nur statistisch brauchbare.

3) Rotationsparallaxen aus Radialgeschwindigkeiten der PN. – Hierbei wird unter Annahme eines Rotationsmodells der Milchstraße, also einer Vorhersage z.B. auch der erwarteten Radialgeschwindigkeit in Abhängigkeit von galaktischer Länge und Entfernung, letztere abschätzbar. Solche Entfernungen jedoch können wegen der erhöhten

Geschwindigkeitsdispersion der PN und des im voraus anzunehmenden kinematischen Modells dieser Population nur äußerst grobe Abschätzungen sein.

4) Entfernungen aus Messung der Größe des interstellaren Farbexzesses. – Hierbei läßt sich in Richtung solcher PN, für die eine Bestimmung des Farbexzesses gelingt, aus dem mit Hilfe von Sternen gewöhnlicher Spektraltypen bestimmten Verlauf der interstellaren Absorption die Entfernung aus der Größe ihrer Verfärbung abschätzen. Diese aufwendige Methode ist in den letzten Jahren umfassend angewendet worden und hat uns eine große Zahl (~50) individueller Entfernungen geliefert!

5) Spektroskopische Parallaxen „normaler“ Begleiter einiger ZPN. – a) Hier spielen einige wenige visuelle Doppelsterne unter den PN mit Komponenten gewöhnlicher Spektraltypen eine nicht unwichtige Rolle. b) Einiges verspricht man sich auch von einer Handvoll spektroskopischer Doppelsterne und Bedeckungsveränderlicher unter den PN. c) In knapp 2 Dutzend Fällen gibt es Versuche, sich aus Mehrfarbenphotometrie entsprechende Informationen über vermutete unaufgelöste normale Begleiter zu beschaffen, die sich durch ihre, im Gegensatz zu den PN, „normalen“ Farbenindizes verraten sollten.

6) Entfernungen aus der Winkelgeschwindigkeit der expandierenden HPN. – Diese insbesondere von Martha und William Liller umfassend versuchte sehr elegante Methode beruht auf dem Vergleich der in einigen wenigen Fällen innerhalb von meist etwa 50 Jahren tatsächlich beobachtbaren Winkelbewegung z.B. einzelner markanter Partien der expandierenden Hüllen (siehe Abb. 6) mit ihren aus Radialgeschwindigkeitsmessungen gewonnenen Expansionsgeschwindigkeiten. Während die erstere Meßgröße eine Winkeländerung pro Zeiteinheit ist, läßt sich letztere in Längenänderung pro Zeiteinheit (etwa km/s) angeben, woraus sofort die Entfernung des PN folgt. Diese durch grundsätzliche sowie durch beobachtungstechnische Probleme erschwerte Methode ist leider ebenfalls nur vereinzelt auf einige der näheren PN mit einigem Erfolg anwendbar.

7) Die PN der Magellanschen Wolken. – Da die Entfernungen dieser beiden Sternsysteme aufgrund vielfältiger unabhängiger Entfernungskennzeichen heute sehr genau bekannt sind, stoßen wir nach all den vielen bisher aufgeführten wenig ermutigenden Ansätzen erfreulicherweise hier erstmals auf eine große Gruppe von PN bereits bekannter zuverlässiger Entfernungen. Tatsächlich zählen auch die PN der kleinen und großen Magellanschen Wolken bis heute noch zu den wichtigsten Meilensteinen zur Eichung der

Entfernungsskala ihrer galaktischen Artgenossen. – Eine ähnliche Rolle könnten auch die bei einigen anderen Galaxien der Lokalen Gruppe festgestellten PN spielen. Hier jedoch möchte man diese lieber umgekehrt als sekundäre Entfernungskennzeichen jener Galaxien einsetzen. – Wenig Glück haben wir leider bei den Kugelsternhaufen angesichts nur eines einzigen als sicher anzusehenden Kandidaten in M 15.

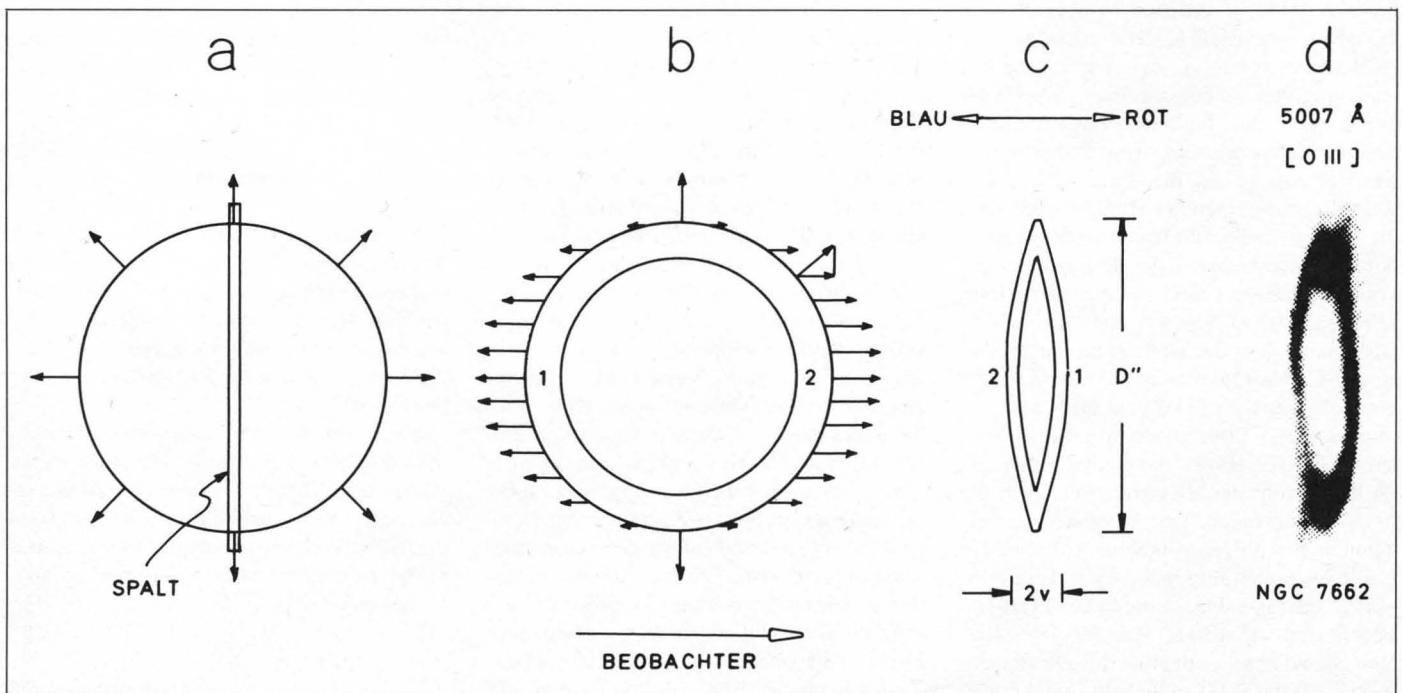
Zusammenfassend stellen wir fest, daß uns außer der potentiellen Möglichkeit, mit Hilfe der Magellanschen Wolken eine galaktische Entfernungsskala zu eichen, in Wahrheit mit den oben beschriebenen Verfahren bisher noch keine generell für die Mehrzahl der PN anwendbaren Entfernungsbestimmungsmethode zur Verfügung steht.

### Shklovsky-Entfernungen

In dieser bedauerlichen Situation eröffnete nun ein völlig neuer Einfall ungeahnte Möglichkeiten. – Wären alle HPN gleich groß, so würden in größer werdenden Entfernungen  $r$  ihre beobachteten Winkelradien  $\varphi$  in gleichem Maße kleiner, also  $r \sim 1/\varphi$ , und die Entfernungsbestimmung wäre eine triviale Aufgabe. In Wirklichkeit haben wir jedoch  $r = R/\varphi$ , wobei  $R$  der Radius der HPN z.B. in Kilometern und  $\varphi$  in radian ausgedrückt ist. Das entscheidende Problem ist es nun offensichtlich, indirekte Aussagen über

Abb. 5: Messung von Expansionsgeschwindigkeiten planetarischer Nebel aus den Linienprofilen ihrer Emissionslinien. – In dieser Sequenz von Bildern wird das Meßprinzip wie folgt veranschaulicht: a) Die in alle Richtungen gleichförmig expandierende gedachte Hülle eines PN von vorn aus der Sicht des Beobachters, der den Spalt seines Spektrographen wie angegeben ausgerichtet hat. b) Die durch den Spalt ausgeschnittene Ringscheibe von der Seite betrachtet mit dem Beobachter in der Zeichenebene in der angegebenen Richtung. Die erwartete Dopplerverschiebung aufgrund der Radialgeschwindigkeit der Hülle zeigt einen Gang über die Länge des Spektrographen-Spalttes, weil sich die Raumgeschwindigkeit der Hülle an den verschiedenen Stellen des Spalttes mit unterschiedlichen Beträgen in Richtung zum Beobachter projiziert.

ziert. Diese Projektion ist an einer Stelle der Scheibe explizit veranschaulicht. c) Das idealisierte erwartete Linienprofil einer aus der Ringscheibe emittierten Spektrallinie.  $D$  ist der in Bogensekunden angebbare Winkeldurchmesser der Hülle, der die Höhe der Spektrallinie definiert. Die Doppleraufspaltung entspricht der doppelten Hüllenexpansion. d) An der verbotenen O III Linie 5007 Å des planetarischen Nebels NGC 7662 gezeigtes Beispiel eines tatsächlich beobachteten Linienprofils aus einer Arbeit von Osterbrock, Miller und Weedman im *Astrophysical Journal* 1966. Man beachte, daß sich die Expansionsgeschwindigkeiten ohne Kenntnis der schwer bestimmbar Radialgeschwindigkeit der Zentralsterne selbst ermitteln lassen.



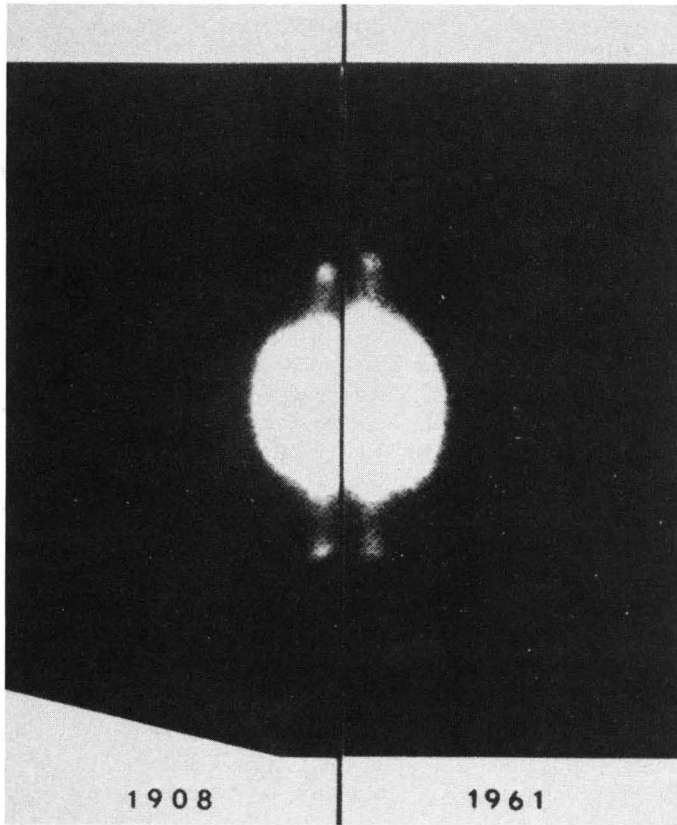


Abb. 6: Der Saturn-Nebel NGC 7009 (siehe auch Abb. 1) zu verschiedenen Zeitpunkten. Diese von William Liller 1965 in Publication of the Astronomical Society of the Pacific gezeigte Abbildung ist ein Beispiel für einen der wenigen planetarischen Nebel, deren Hüllenexpansion innerhalb eines angemessenen Beobachtungszeitraumes als Winkelbewegung zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte.

R zu erhalten. Dies geht nicht ohne Annahmen. Eine erste geht davon aus, daß die HPN praktisch vollständig ionisiert sind, so daß die Dichte der Hülle durch die Elektronendichte  $n_e$  beschrieben werden kann. Eine zweite Annahme setzt hier zunächst probeweise für alle HPN eine gleiche gemeinsame Masse an. Betrachten wir nun weiter aus Gründen höherer Anschaulichkeit eine homogene Kugel mit dem Volumen  $4/3 \pi R^3$  (was durch Einführung eines „Füllfaktors“ verallgemeinert werden könnte), so nimmt unter obigen Annahmen bei fortschreitender Expansion der Hülle deren Elektronendichte für alle HPN in gleichem Maße ab nach  $4/3 \pi R^3 n_e = \text{konstant}$  (1). Hiermit ist das Problem erneut verlagert, nunmehr auf die Bestimmung von  $n_e$ . Diese gelingt, wie wir sehen werden, auf direktem Wege nur unter bestimmten Voraussetzungen. Daher nutzen wir hier allgemeiner die Tatsache aus, daß viele Emissionslinien der HPN, so auch etwa die leicht meßbare Wasserstofflinie H $\beta$ , durch Rekombination der Elektronen und Wasserstoffionen (also Umkehrung der Ionisation) entstehen. Somit ist, falls die meisten H $\beta$ -Quanten aus der Hülle entkommen, diese also für H $\beta$ -Quanten optisch dünn ist, die Gesamtleuchtkraft  $L(\text{H}\beta)$  der HPN im Lichte etwa dieser Linie zunächst natürlich dem Volumen der Hülle, dann aber auch der Dichte sowohl der Elektronen als auch der Ionen proportional. Da die beiden letztgenannten bei obiger Annahme vollständiger Ionisation gleich sind, haben wir also  $L(\text{H}\beta) \sim R^3 n_e^2$  oder eine Flächenhelligkeit  $F(\text{H}\beta)$  als Leuchtkraft pro Fläche von  $F(\text{H}\beta) \sim R n_e^2$ . Nun gelingt es uns, mit Hilfe des Zusammenhangs (1) die Elektronendichte zu eliminie-

ren und wir erhalten die fundamentale Formel  $R = K \cdot F^{-1/5}$ , nach der es bei Kenntnis der Konstanten K durch Messung der Flächenhelligkeit der HPN (z.B. im Lichte der H $\beta$  Emission) gelingt, deren Radien indirekt zu bestimmen. Dieses ist die Grundlage der nach ihrem Erfinder benannten Shklovsky-Methode, bei der es offensichtlich nun nur noch darauf ankommt, die Konstante zu eichen. Die genauere Ableitung des obigen Zusammenhanges auch unter Aufgabe der Annahme konstanter Hüllenmassen zeigt, daß K neben atomistischen Größen, der chemischen Zusammensetzung, der Morphologie (Füllfaktor), auch jene Hüllenmassen enthält. Nun zeigen die beiden erstgenannten Parameter, die entfernungsunabhängig untersucht werden können, nur geringe Schwankungsbreite, so daß mit befriedigender Genauigkeit für alle HPN entsprechende Mittelwerte angenommen werden können. Während weiterhin der Füllfaktor (Abweichung von der homogenen Kugel) für viele HPN mit angemessener Zuverlässigkeit individuell angegeben werden kann (in anderen Fällen wird auch hier ein Mittelwert angesetzt), bleibt als wichtigster Faktor die Hüllenmasse. Erfreulicherweise wird nun dieses zunächst schwerwiegend anmutende Problem durch den Umstand wesentlich entschärft, daß die Hüllenmasse nur mit der fünften Wurzel ihres Quadrats, und mithin nur schwach in diesen Zusammenhang eingeht. Das Eichproblem ist hiermit jedoch keineswegs gelöst, vielmehr kommt es nun darauf an, tatsächlich von so vielen PN wie möglich auch Hüllenmassen zu bestimmen. Dieses läßt sich durch Umkehrung obiger Zusammenhänge für all diejenigen PN

durchführen, für die Entfernungen unabhängig gemessen werden konnten. Hier gewinnen die PN der Magellanschen Wolken und neuerdings die „Absorptionsentfernungen“ galaktischer PN (Methode 4) grundlegende Bedeutung, andere Methoden (etwa die der statistischen Parallaxen) treten als Korrektiv in Erscheinung. Aus der Bestandsaufnahme der so bestimmten Hüllenmassen folgt nun, daß die bisher beobachteten Werte hauptsächlich in einer typischen Größenordnung von 0.2 bis 0.4 Sonnenmassen liegen.

Nach anfänglichem überschwinglichen Optimismus bezüglich der Anwendbarkeit dieser Methode, ist in den letzten Jahren jedoch erhebliche Kritik an der Berechtigung der ersten zugrundeliegenden Annahme geäußert worden: Besonders bei den kompakteren Hüllen scheint keineswegs der überwiegende Anteil ihrer Gesamtmassen auch ionisiert zu sein. (Die ionisierte Masse kann im Gegenteil sogar zu einem kleinen Bruchteil der Gesamtmasse werden.) In diesen Fällen werden mithin zu geringe Flächenhelligkeiten im Lichte etwa der H $\beta$ -Linie gemessen, so daß die Shklovsky-Methode ihre Entfernungen teilweise erheblich überschätzt. Glücklicherweise jedoch erhalten wir durch einen ebenfalls in den letzten Jahren gefundenen empirischen Zusammenhang zwischen dem Hüllenradius und der Masse der ionisierten Hülle eine unabhängige Information über das Verhältnis der ionisierten zur nichtionisierten Masse, die die resultierenden „primären“ Shklovsky-Entfernungen korrigieren hilft.

Zusammenfassend stellen wir fest, daß uns über den Umweg der Messung von Winkeldurchmesser und Flächenhelligkeit eine indirekte erstmals umfassende Entfernungsmessungsmethode für Planetarische Nebel zur Verfügung steht. Dabei können individuelle Entfernungen größere Fehler aufweisen. Shklovsky-Entfernungen sind nach ihrer Korrektur jedoch statistisch brauchbar und für den Hauptanteil der PN das beste was wir besitzen. Dabei wird ihre durch K bestimmte Skala von dem neuesten Stand der Eichung mittlerer Hüllenmassen festgelegt.

## Zwei Rätsel

Auf optischen Bildern der PN erscheinen ihre Hüllen meist in einem Lichte, das um mehrere Größenordnungen heller als der anregende Stern ist. Welcher rätselhafte Mechanismus transformiert die erwartete energiereiche Strahlung der ZPN in das sichtbare Spektrum?

Die Erzeugung von „verbotenen“ Spektrallinien besitzt eine außerordentlich kleine Wahrscheinlichkeit. Und doch gehören ausgerechnet sie zu den stärksten im Spektrum der HPN. Welcher rätselhafte Mechanismus macht sie stärker als die meisten anderen Emissionen?

(Fortsetzung folgt)