

Endstadien der Sternentwicklung

Prof. Dr. Werner Becker
&
Dipl. Phys. Mike G. Bernhardt

Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik

Max-Planck Institut für Astrophysik

[web at mpe-mpg.de](http://www.xray.mpe.mpg.de/~web)

<http://www.xray.mpe.mpg.de/~web>

WS 2010/11

WEISSE ZWERGE, NEURONENSTERNE UND SCHWARZE LÖCHER

Literaturliste

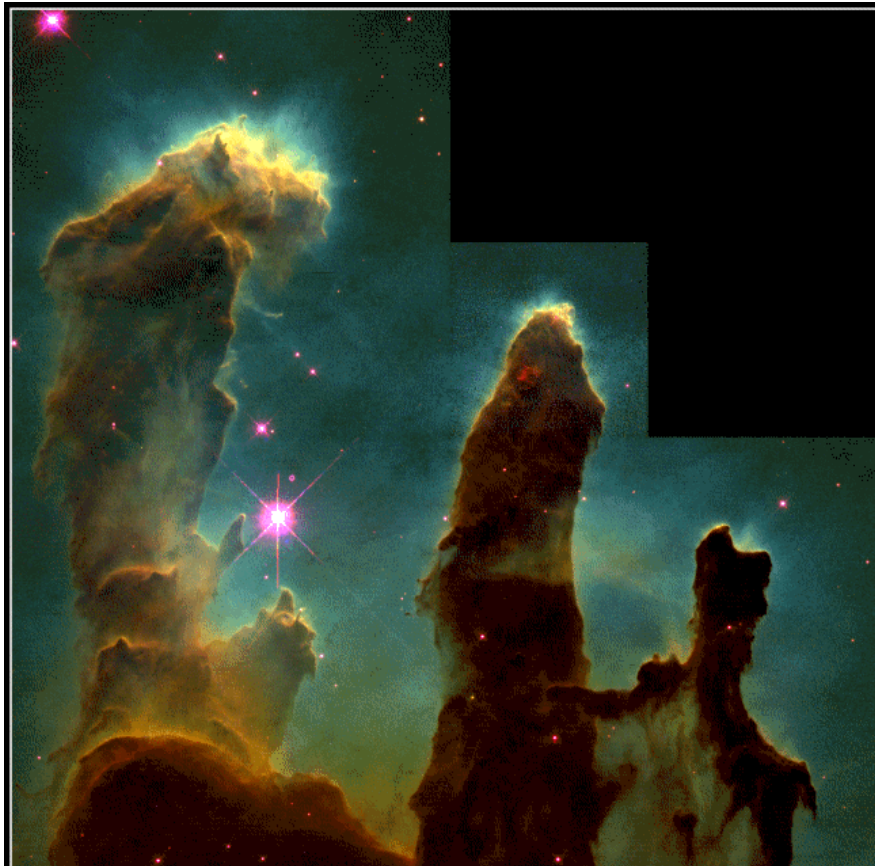
Lehrbücher und Monographien

- Glendenning, N.K.: **Compact stars – Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity**, Astronomy and astrophysics library, Springer, Berlin (1997), ISBN: 3-387-94783-3
- Hansen, C.J., Kawaler, S.D., Trimble, V.: **Stellar Interiors**, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2004), ISBN: 0-387-20089-4
- Kawaler, S.D., Novikov, I., Srinivasan, G.: **Stellar Remnants**, Saas-Fee Advanced Course 25, Springer Verlag, Berlin (1997), ISBN: 3-540-61520-2
- Kippenhahn, R., Weigert, A.: **Stellar Structure and Evolution**, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1994), ISBN: 3-540-58013-1
- Lyne, A.G., Graham-Smith, F.: **Pulsar Astronomy**, Cambridge Astrophysics Series, No. 31, CUP, Cambridge (2006), ISBN: 0-521-83954-8, auch in deutscher Uebersetzung, erschienen bei J.A. Barth Verlag, Leipzig
- Shapiro, S.L., Teukolsky, S.A.: **Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars**, J. Wiley & Sons, New York (1983), ISBN: 0-471-87316-0

Weiterführende Literatur

- Alpar, A.M., et al. (eds.): **The Lives of the Neutron Stars**, NATO ASI Ser. C, Vol. **450**, Kluwer, Dordrecht (1995), ISBN: 0-7923-3246-6
- Bailes, M., Nice, D.J., Thorsett, S.E. (eds.): **Radio Pulsars**, ASP Conf. Ser. Vol. **302**, Astron. Soc. Pacific., San Francisco (2003) ISBN: 1-58381-151-6
- Bhattacharya, D., van den Heuvel, E.P.J.: **Formation and Evolution of Binary and Millisecond Pulsars**, Physics Reports **203**, 1–124 (1991)
- Fruchter, A.S., Tavani, M., Backer, D.C. (eds.): **Millisecond Pulsars: A Decade of Surprise**, ASP Conf. Ser. Vol. **72**, Astron. Soc. Pacific., San Francisco (1995), ISBN 0-937707-91-0
- Koester, D., Chanmugam, G.: **Physics of white dwarf stars**, Rep. Prog. Phys. **53**, 837–915 (1990)
- Koester, D.: **White dwarfs: Recent Developments**, The Astron Astrophys Rev **11**, 33–66 (2002)
- Lorimer, D.R.: **Binary and Millisecond Pulsars**, Living Rev. Relativity **8** (2005), 7, nur online
<http://www.livingreviews.org/lrr-2005-7>
- Rasio, F.A., Stairs, I.H. (eds.): **Binary Radio Pulsars**, ASP Conf. Ser. Vol. **328**, Astron. Soc. Pacific., San Francisco (2005), ISBN: 1-58381-191-5
- Shore, S.N., Livio, M., van den Heuvel, E.P.J.: **Interacting Binaries**, Saas–Fee Advanced Course 22, Springer Verlag, Berlin (1992), ISBN: 3-540-57014-4, ISBN: 0-387-57014-4
- Slane, P.O., Gaensler, B.M. (eds.): **Neutron Stars in Supernova Remnants**, ASP Conf. Ser. Vol. **271**, Astron. Soc. Pacific., San Francisco (2002), ISBN: 1-58381-111-7

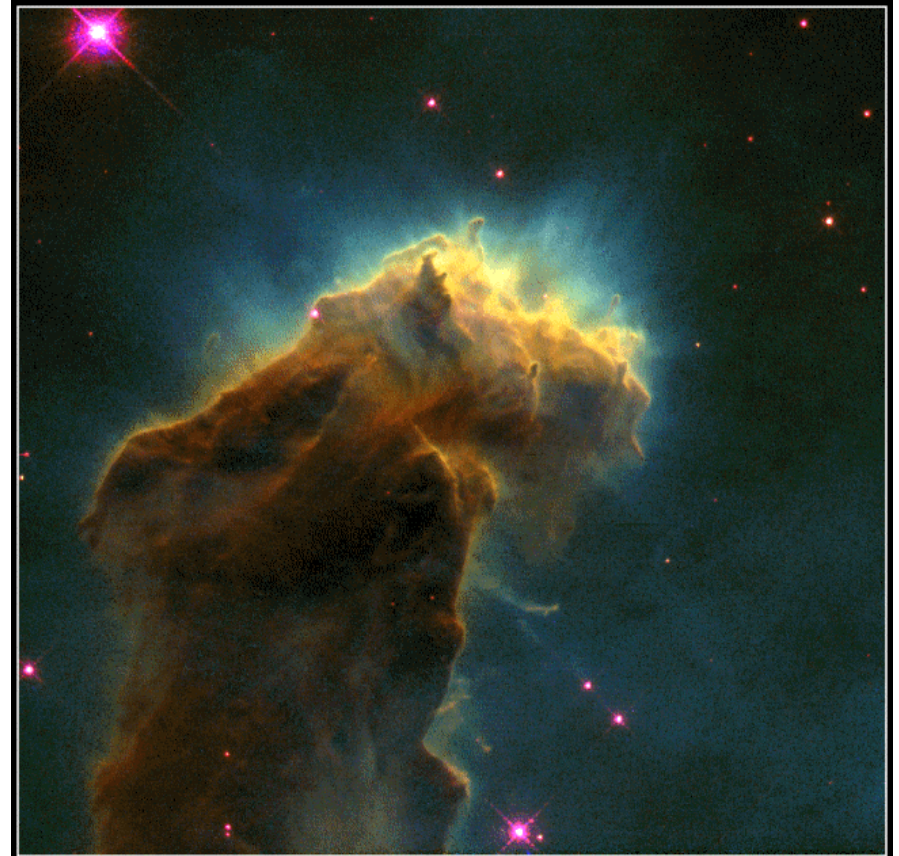
Sternentstehung im Sternbild *Adler*



Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



Star-Birth Clouds · M16

HST · WFPC2

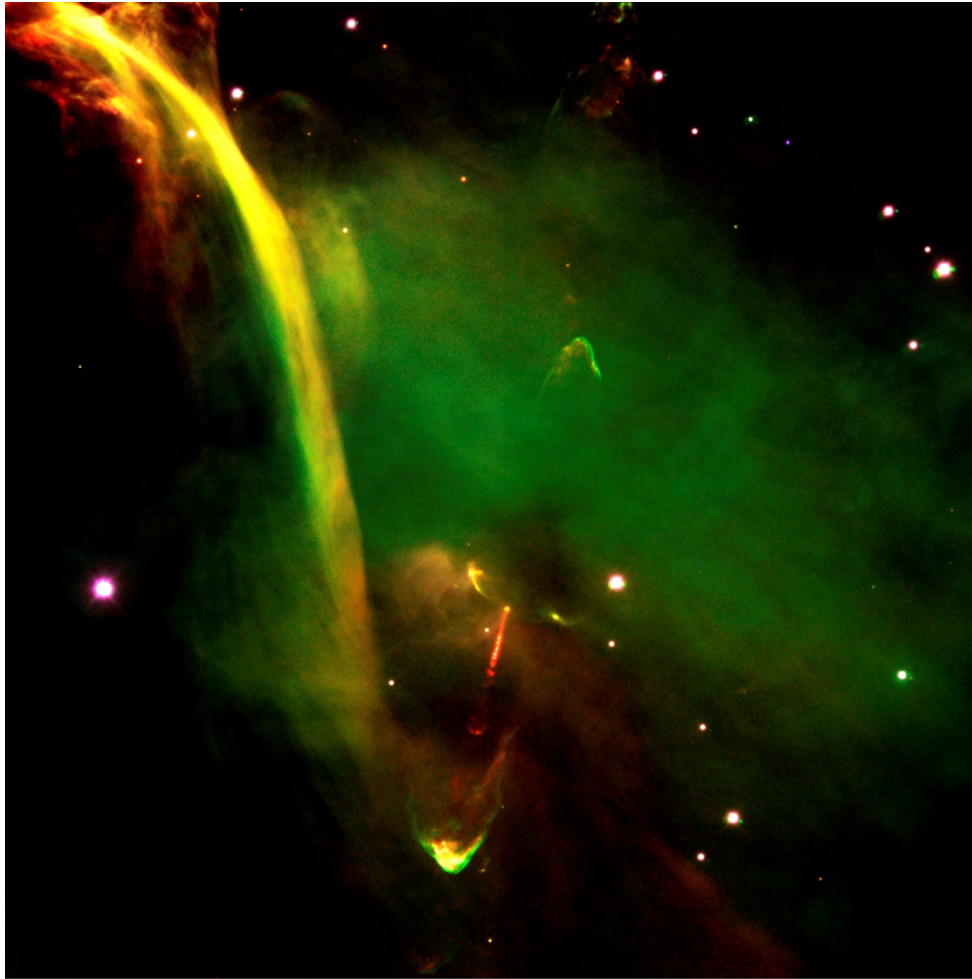
PRC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Im Laufe von mehreren Millionen von Jahren kann diese Gas/Staub/Molekülwolke tausende von Protosterne hervorbringen (evaporating gaseous globules - EGGs, $d=7000 \text{ Lj}$)



Der Orion-Nebel ist ein gas- und staubreiches Sternentstehungsgebiet
in ~ 1500 Lj Entfernung

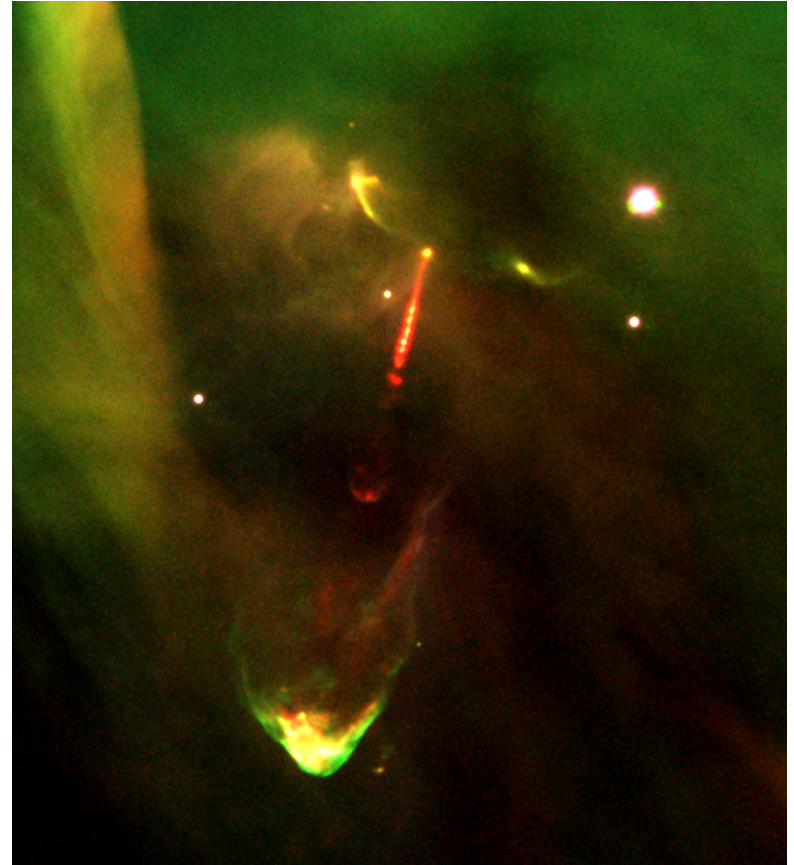
Sternentstehung im Sternbild Orion



Protostar HH-34 in Orion (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40b/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory





NGC 2264 ist ein extrem junger Sternhaufen, in dem eine starke Sternentstehung zu beobachten ist.

Sternentstehung im Orion-Nebel

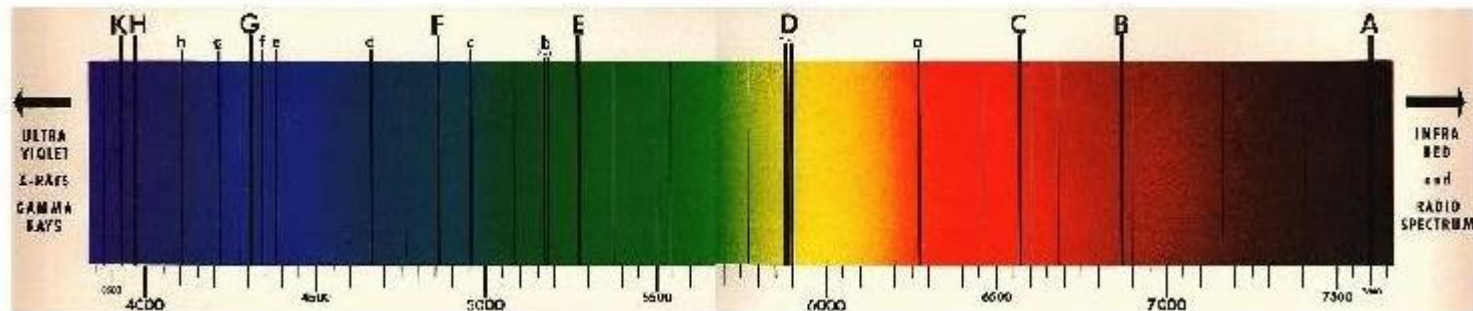
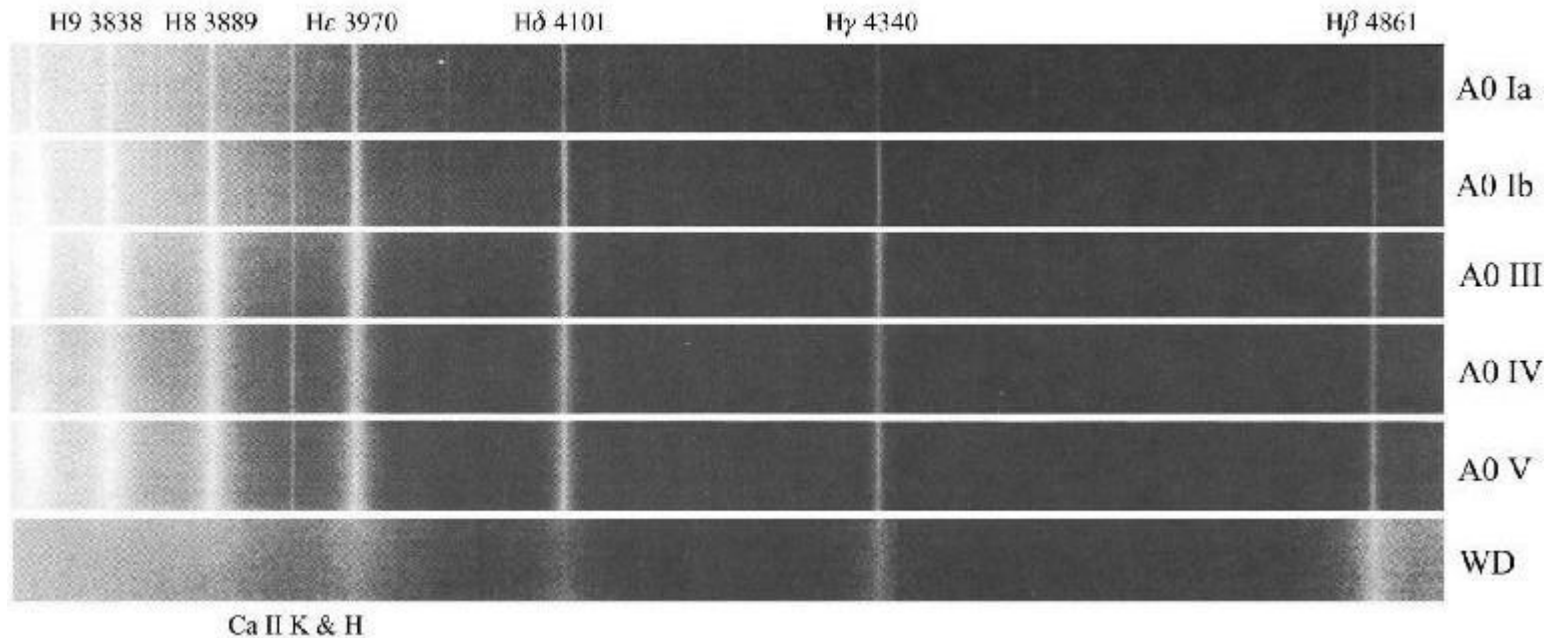


Diese HST Aufnahme zeigt anzeichen von Staub- und Gasscheiben, die die jungen Sterne umgeben (→ Planetensystem)

Wie kann man was über die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Sterne und über die Zustände ihrer physikalischen Parameter erfahren?



Klassifikation der Sterne anhand ihrer Spektren

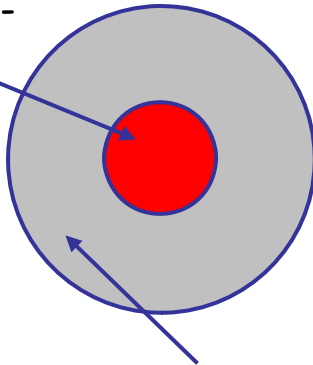


Klassifikation der Sterne anhand ihrer Spektren

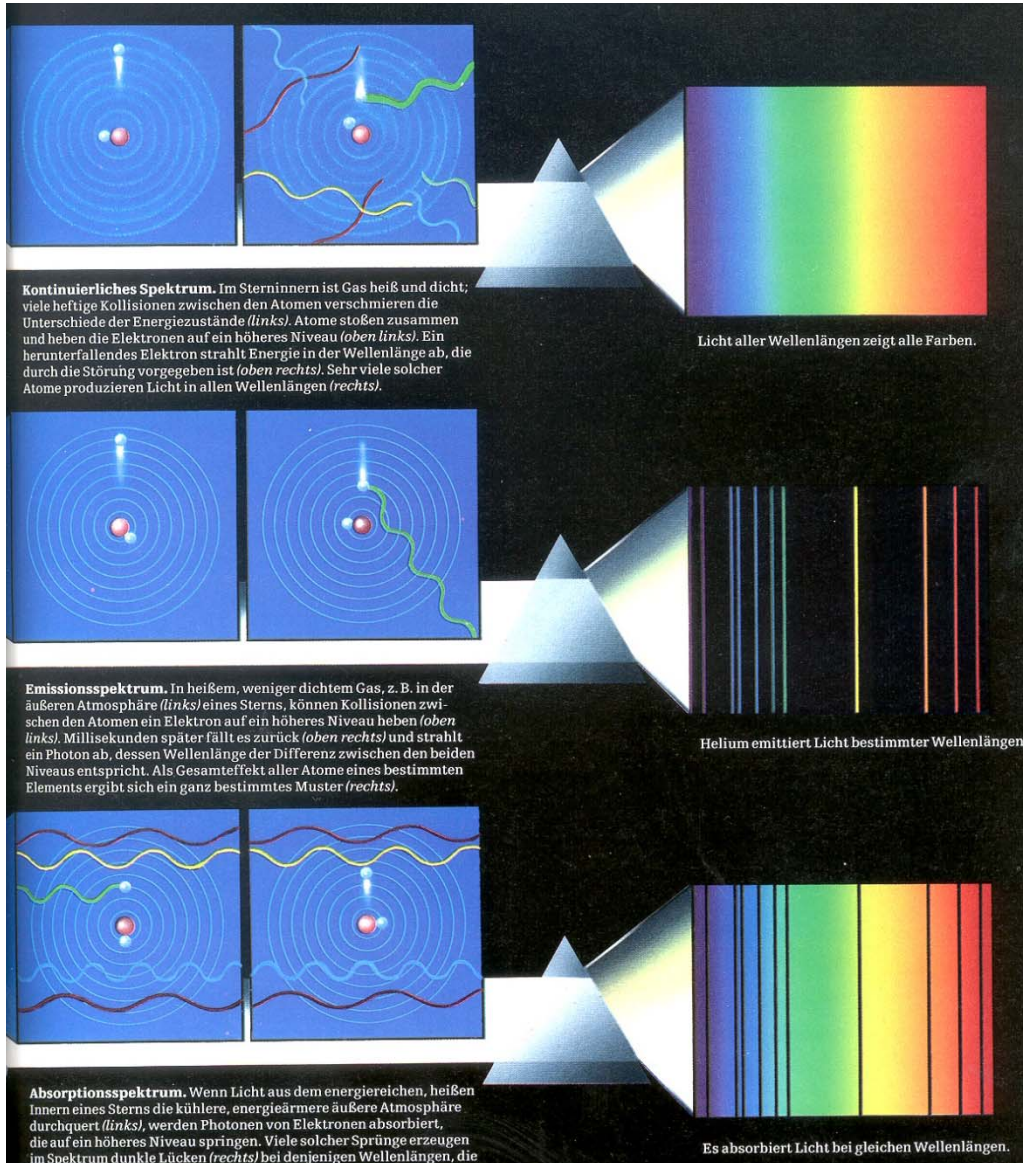
heißes
dichtes Gas

heißes
expandierendes
Gas

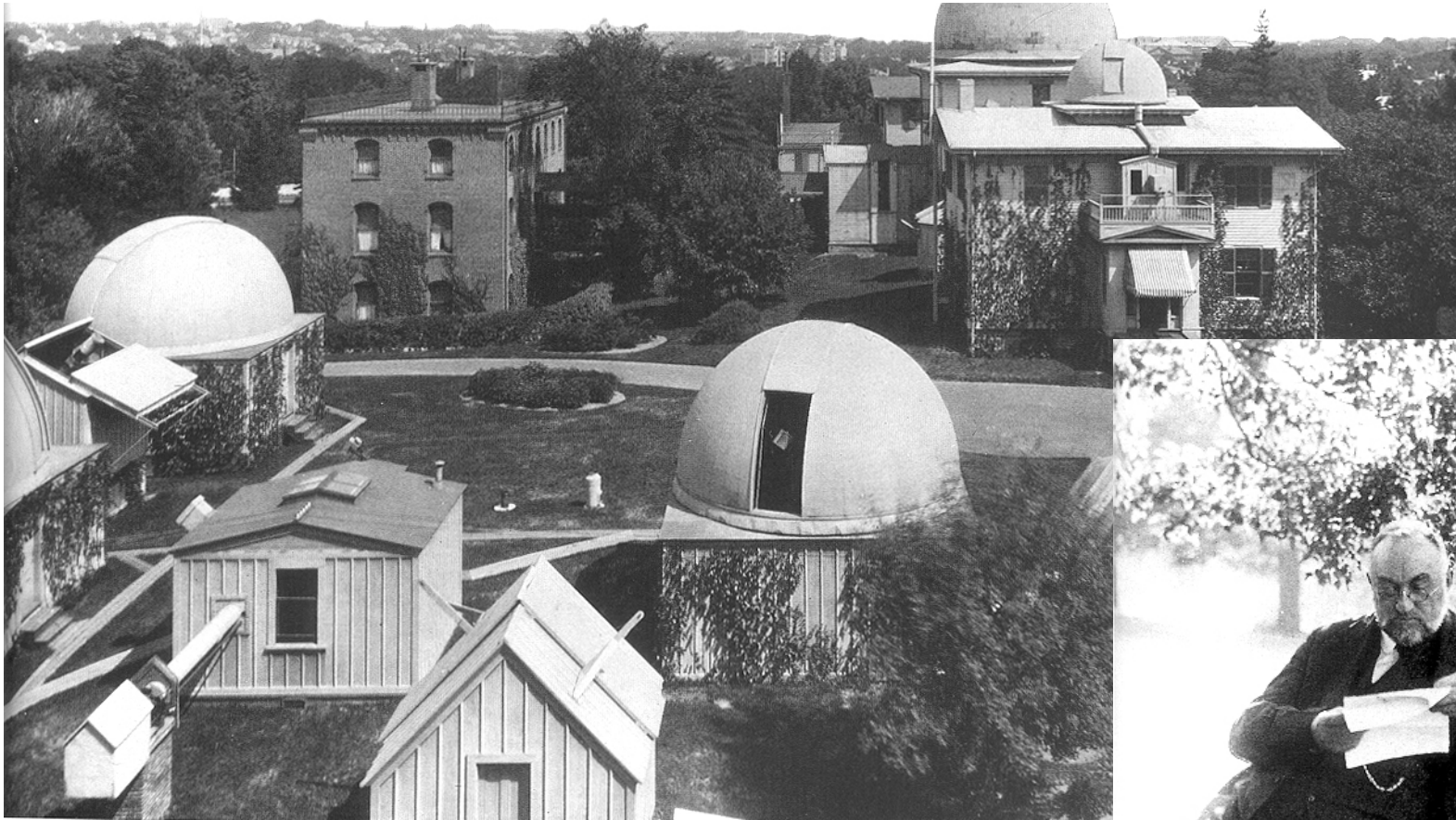
Strahlungs-
quelle



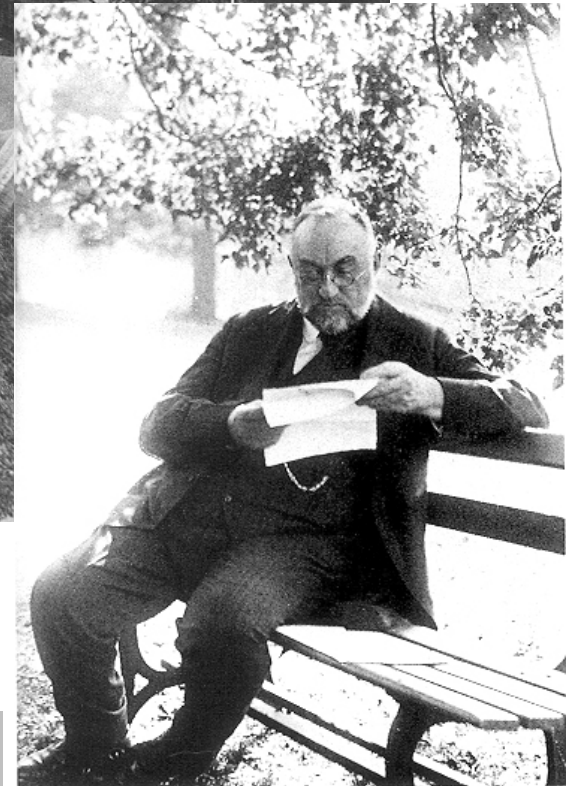
Kühles expandierendes Gas



Klassifikation der Sterne anhand ihrer Spektren



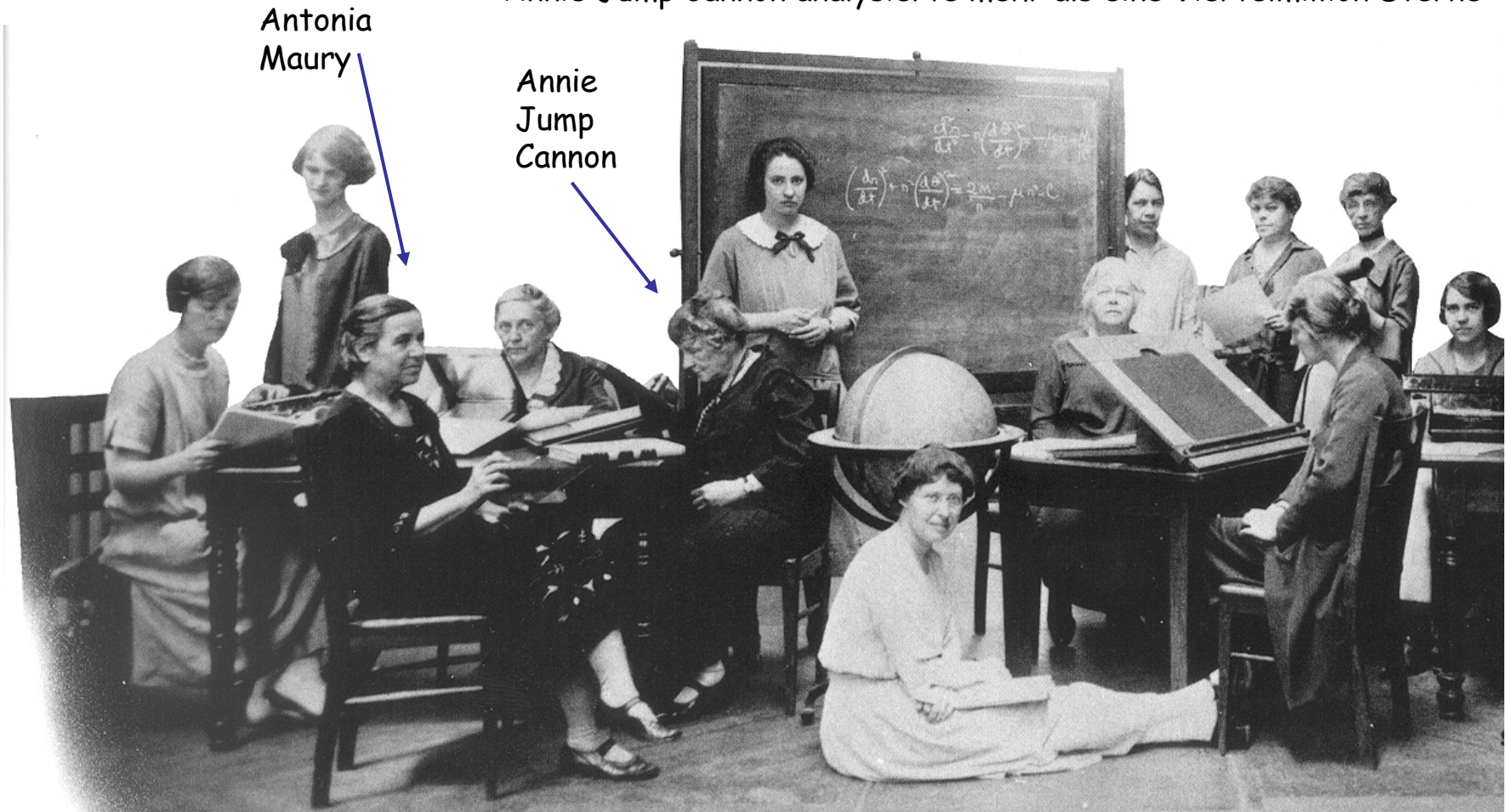
Harvard College Observatory (1897)



Edward Pickering

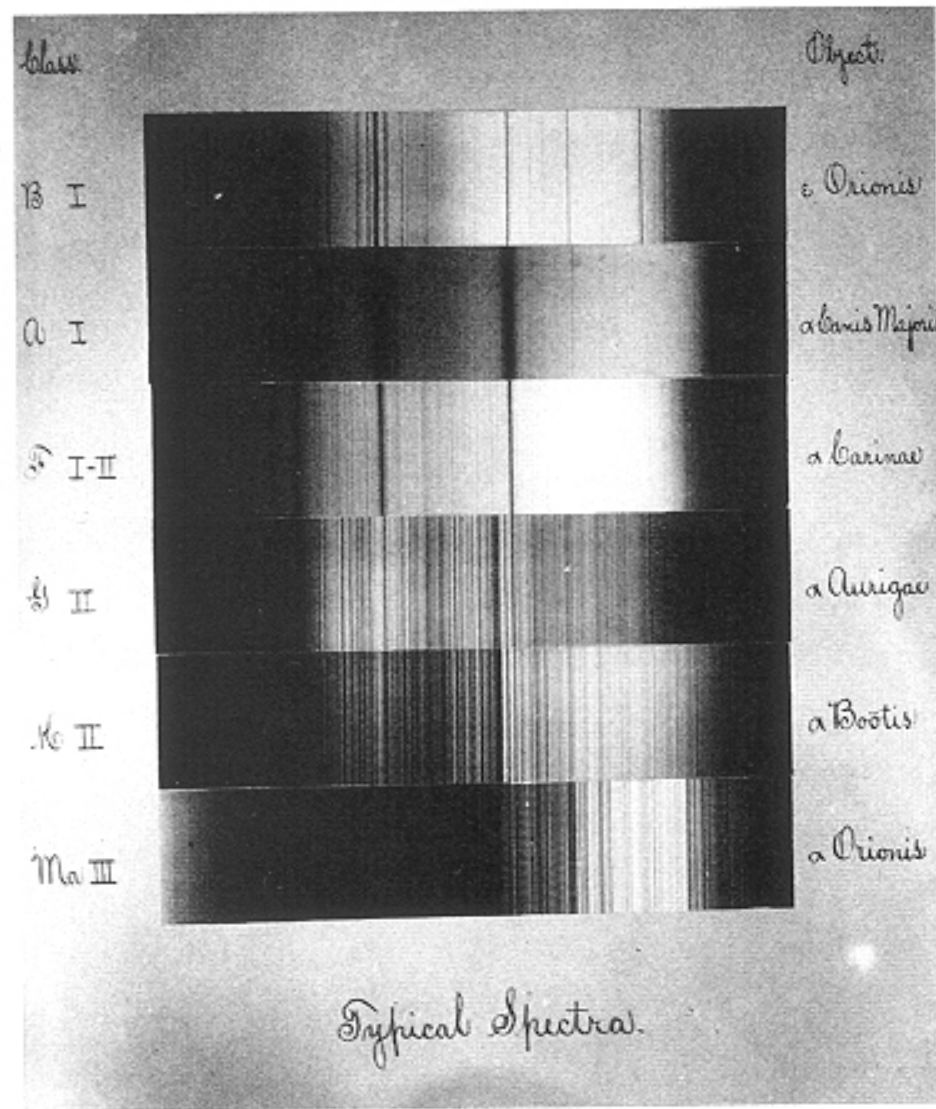
Klassifikation der Sterne anhand ihrer Spektren

Annie Jump Cannon analysierte mehr als eine Viertelmillion Sterne

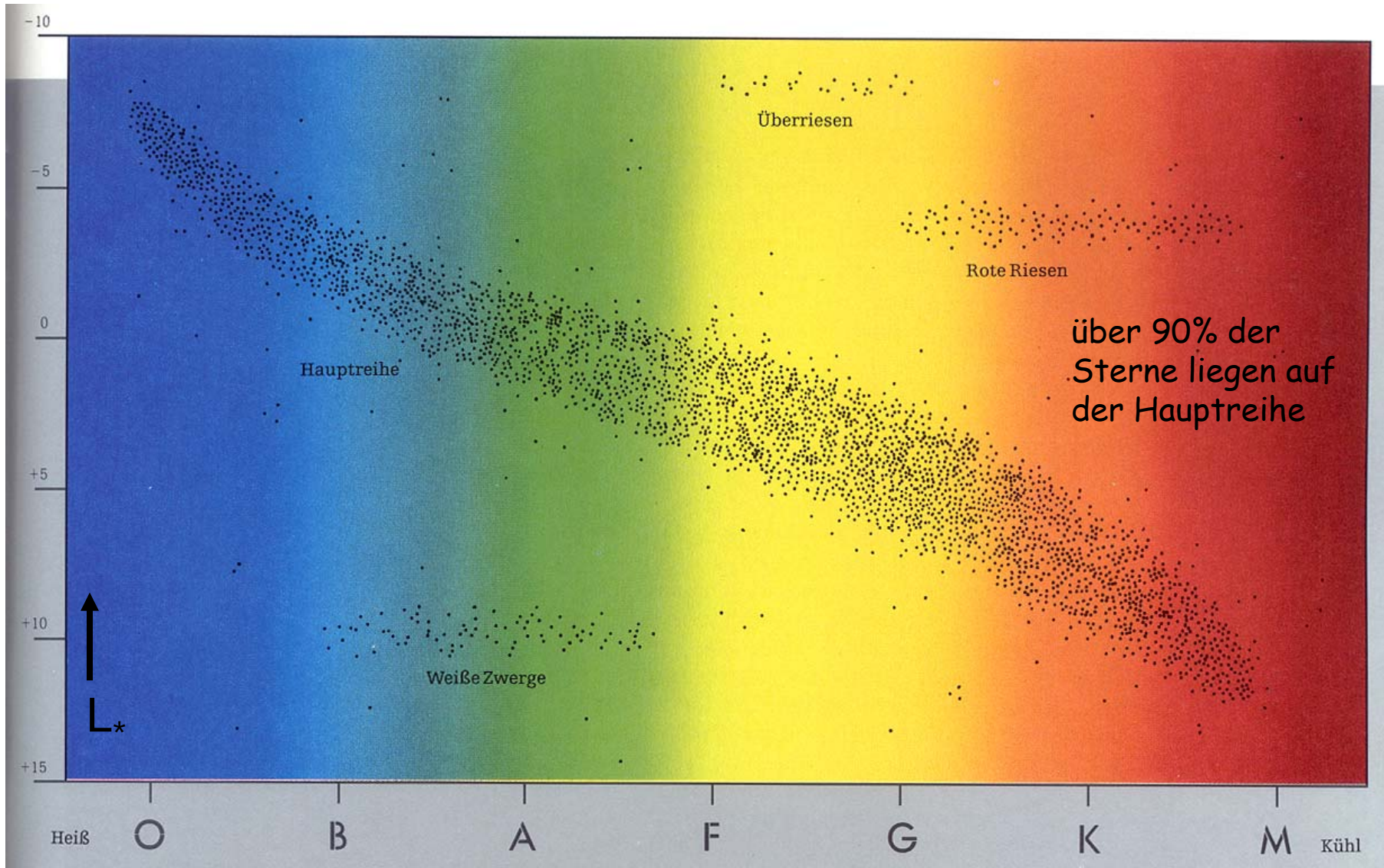


„Pickering's Harem“

Klassifikation der Sterne anhand ihrer Spektren

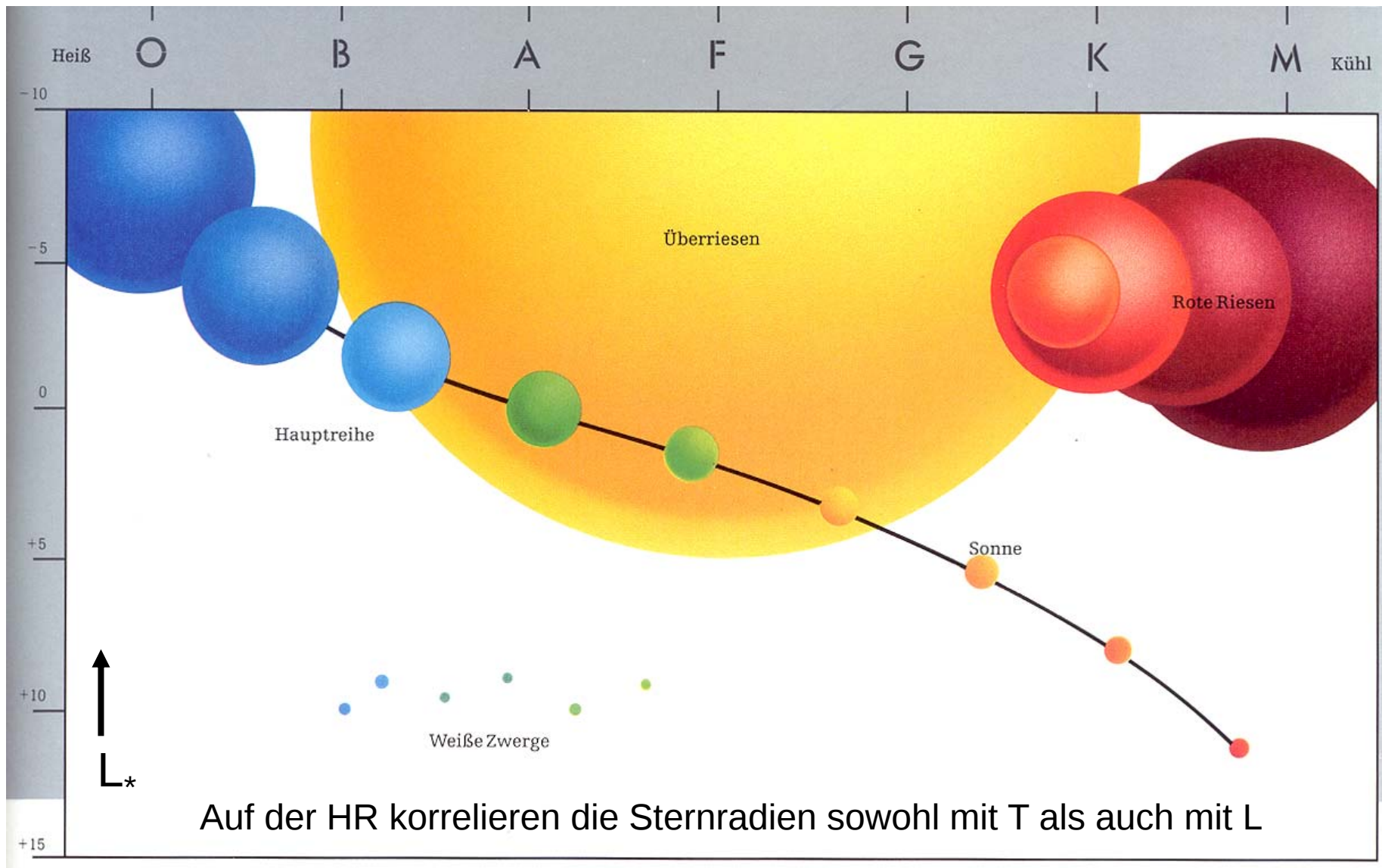


Klassifikation der Sterne: Hertzsprung-Russell Diagramm

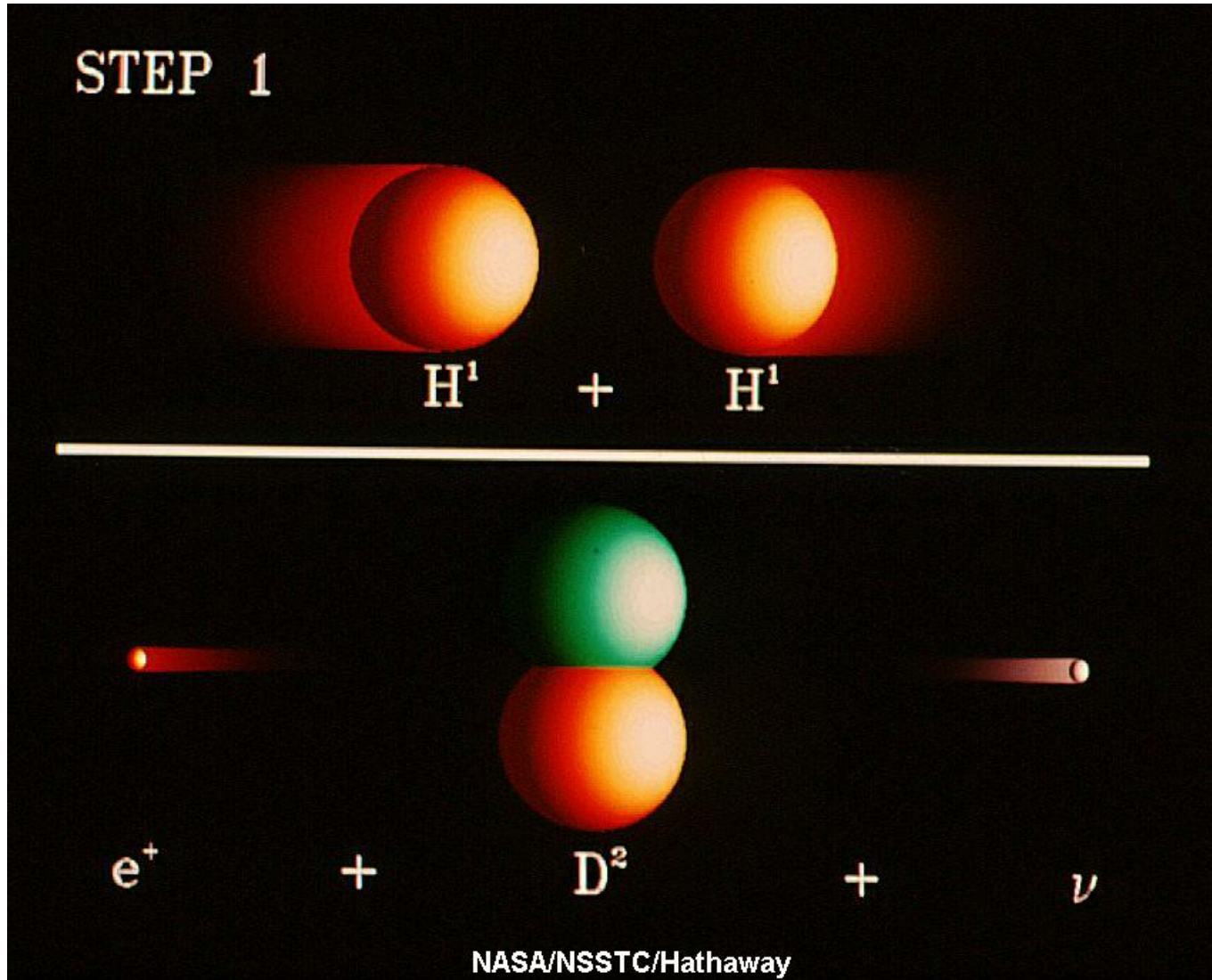


Oberflächentemperatur nimmt von links nach rechts ab

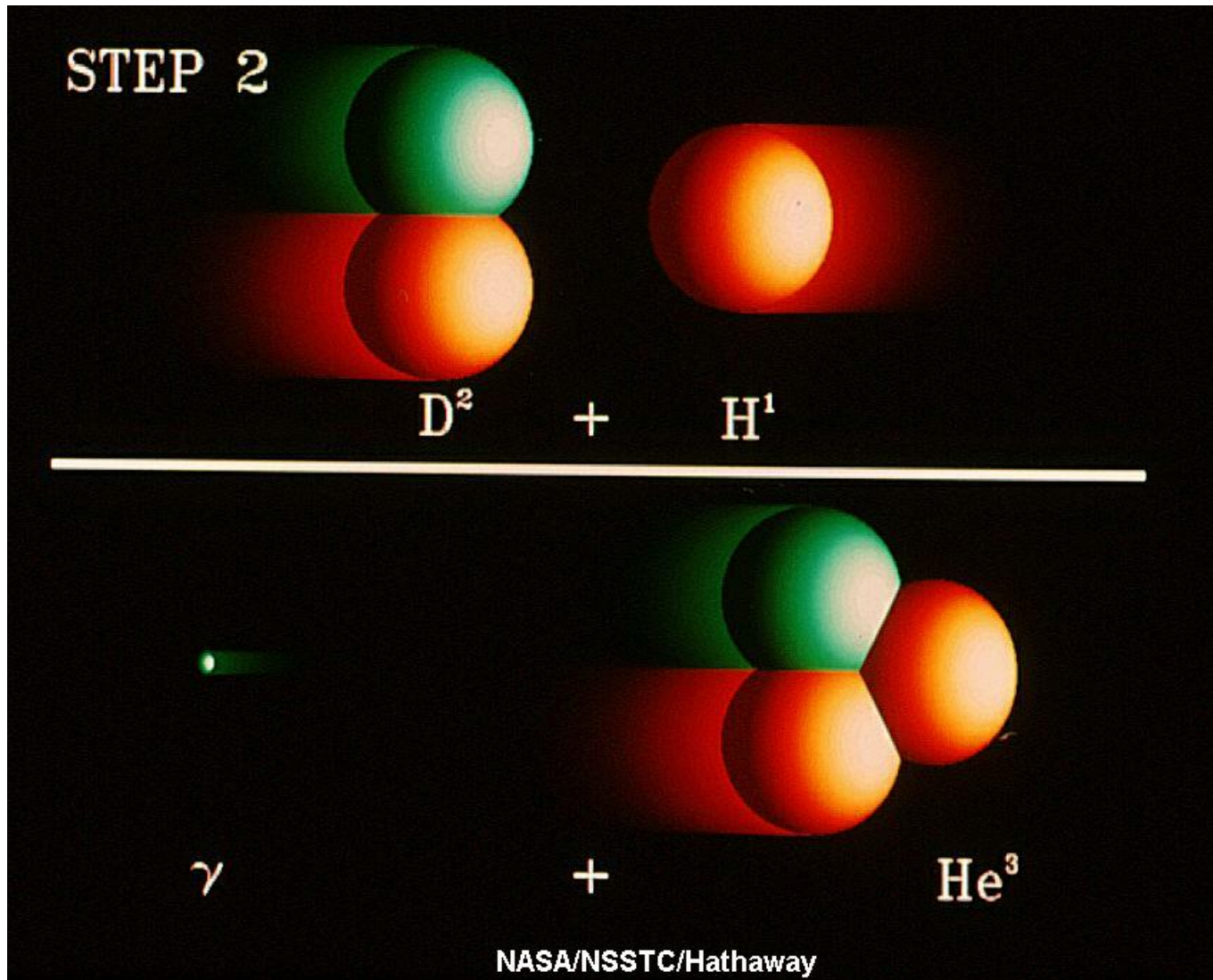
Klassifikation der Sterne: Hertzsprung-Russell Diagramm



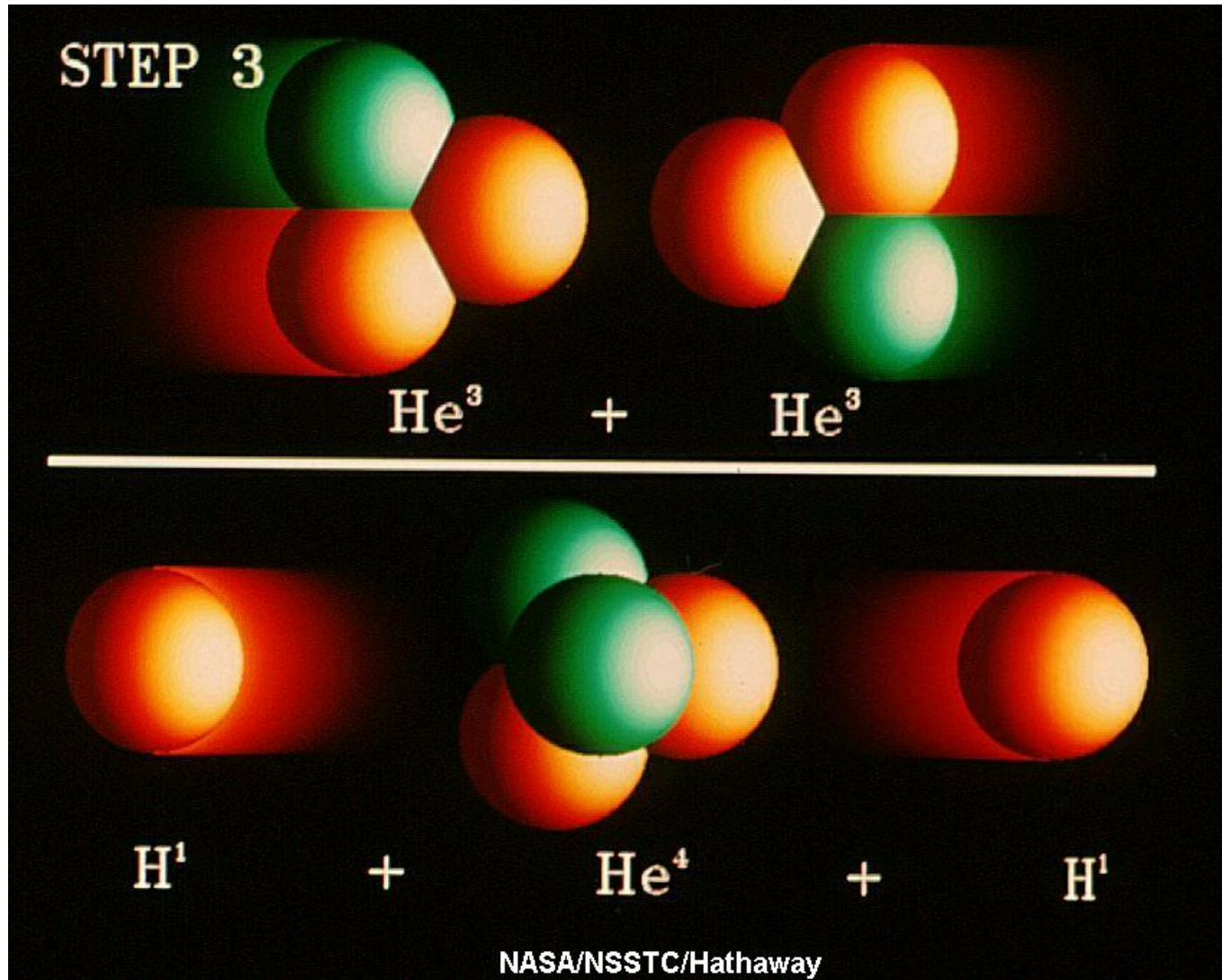
Der pp-Zyklus: $\text{H}^1 + \text{H}^1 \rightarrow \text{D}^2 + \text{e}^+ + \nu$ (1.44 MeV, 14 Mrd. a)



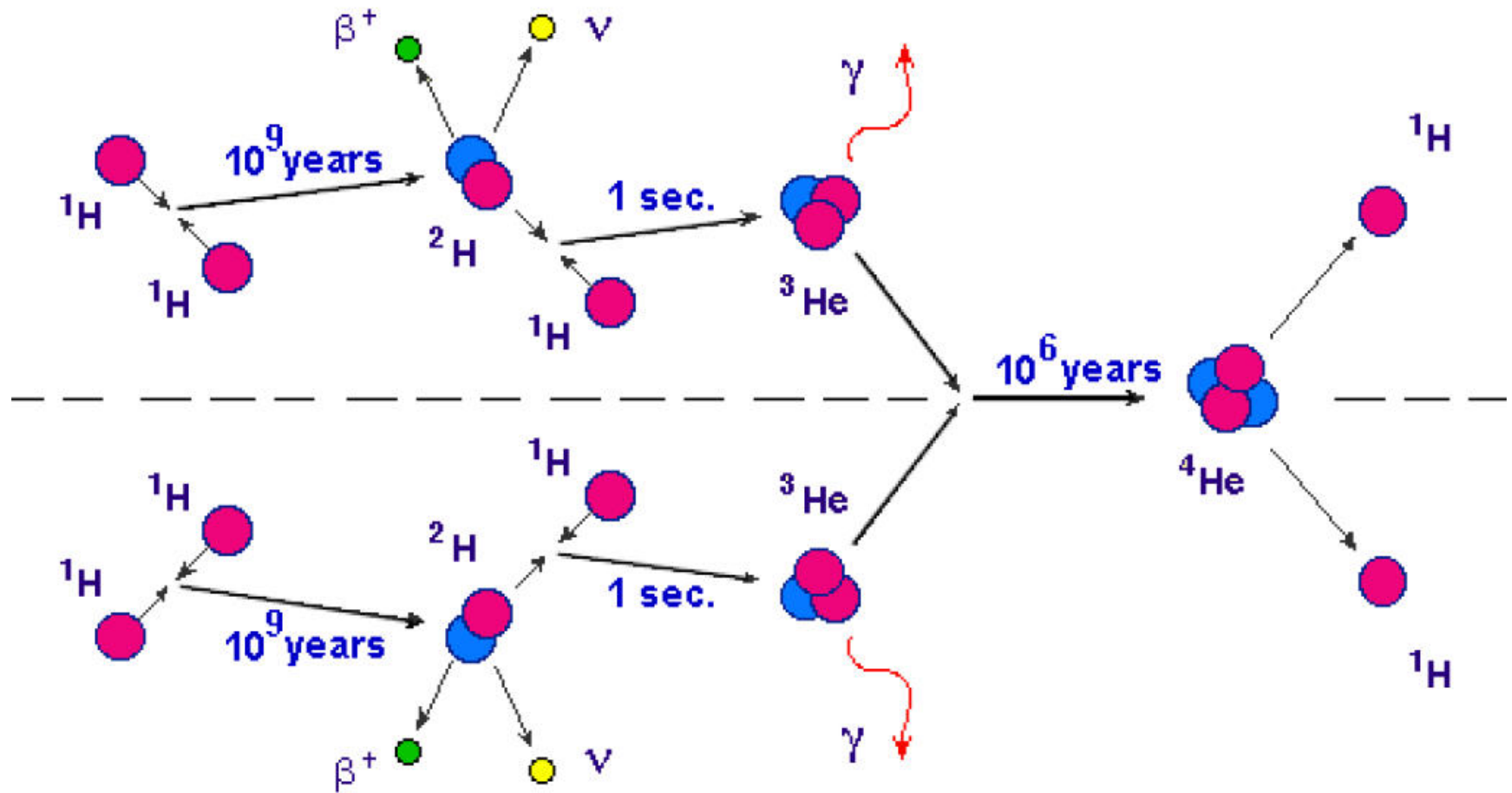
Der pp-Zyklus: $D^2 + H^1 \rightarrow He^3 + \gamma$ (5.49 MeV, 6 sec)



Der pp-Zyklus: $\text{He}^3 + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + 2 \text{H}^1$ (12.85 MeV, 1 Mill. a)



Der pp-Zyklus: Zeitlicher Ablauf der PP- Kette

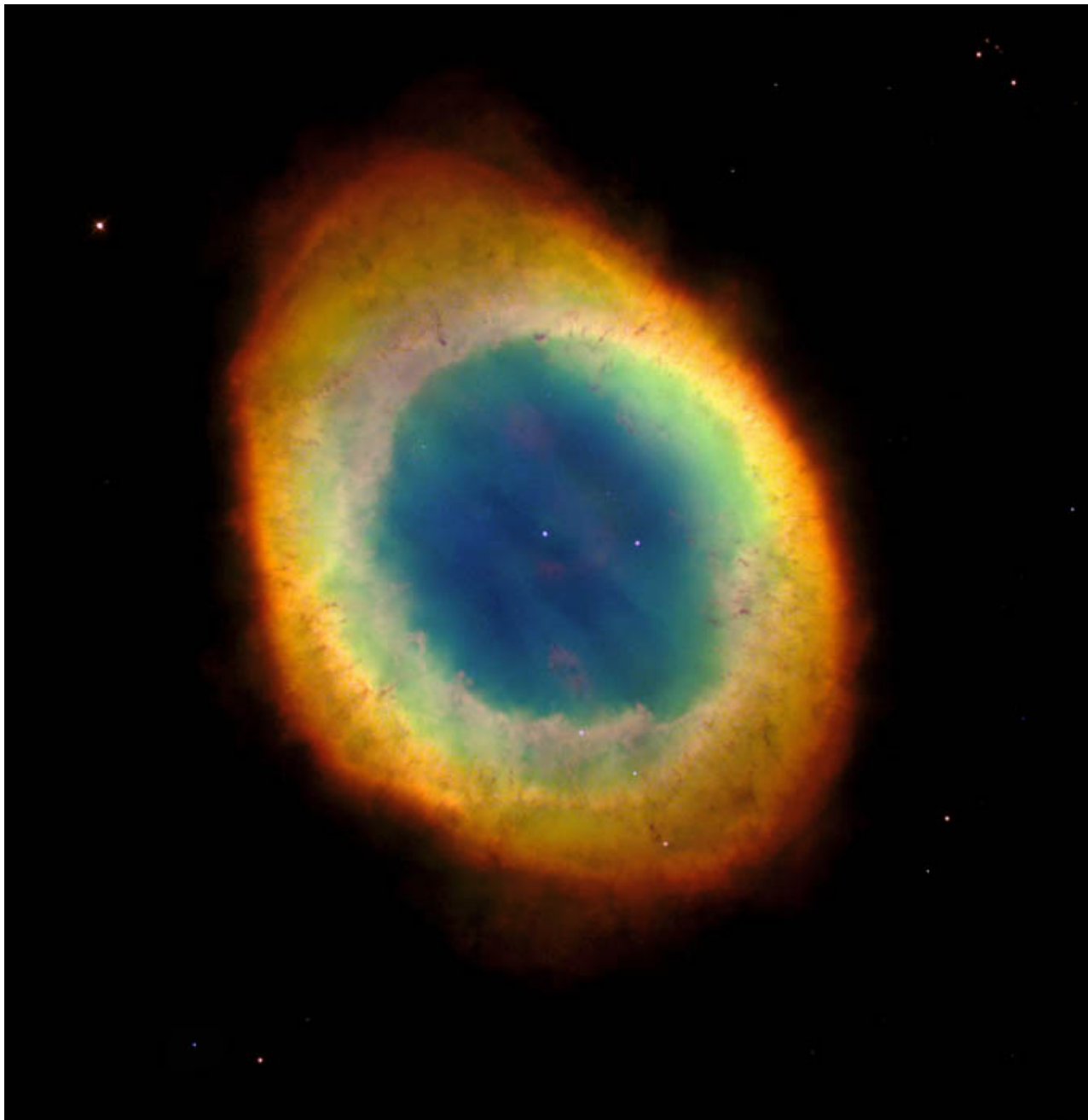


Entwicklung der Sterne: Endstadien

Brenndauer bei Massereichen Sternen

Brennphase	Temperatur K	Dichte g/cm ³	Dauer
Wasserstoffbrennen	37 Mill.	3.8	7.3 Mill. Jahre
Heliumbrennen	180 Mil.	620	720 000 Jahre
Kohlenstoffbrennen	720 Mill.	6.4×10^5	320 Jahre
Sauerstoffbrennen	1 800 Mill.	1.3×10^7	0.5 Tage
Siliziumbrennen	3 400 Mill.	$1.1 \cdot 10^8$	1 Tag
Kollaps	8 300 Mill.	$>3.4 \times 10^9$	0.45 sec
Neutronenstern	< 8 000 Mill.	$>1.4 \cdot 10^{14}$	--

Kernreaktionen und Brenndauer für einen Stern mit 25 M_☉



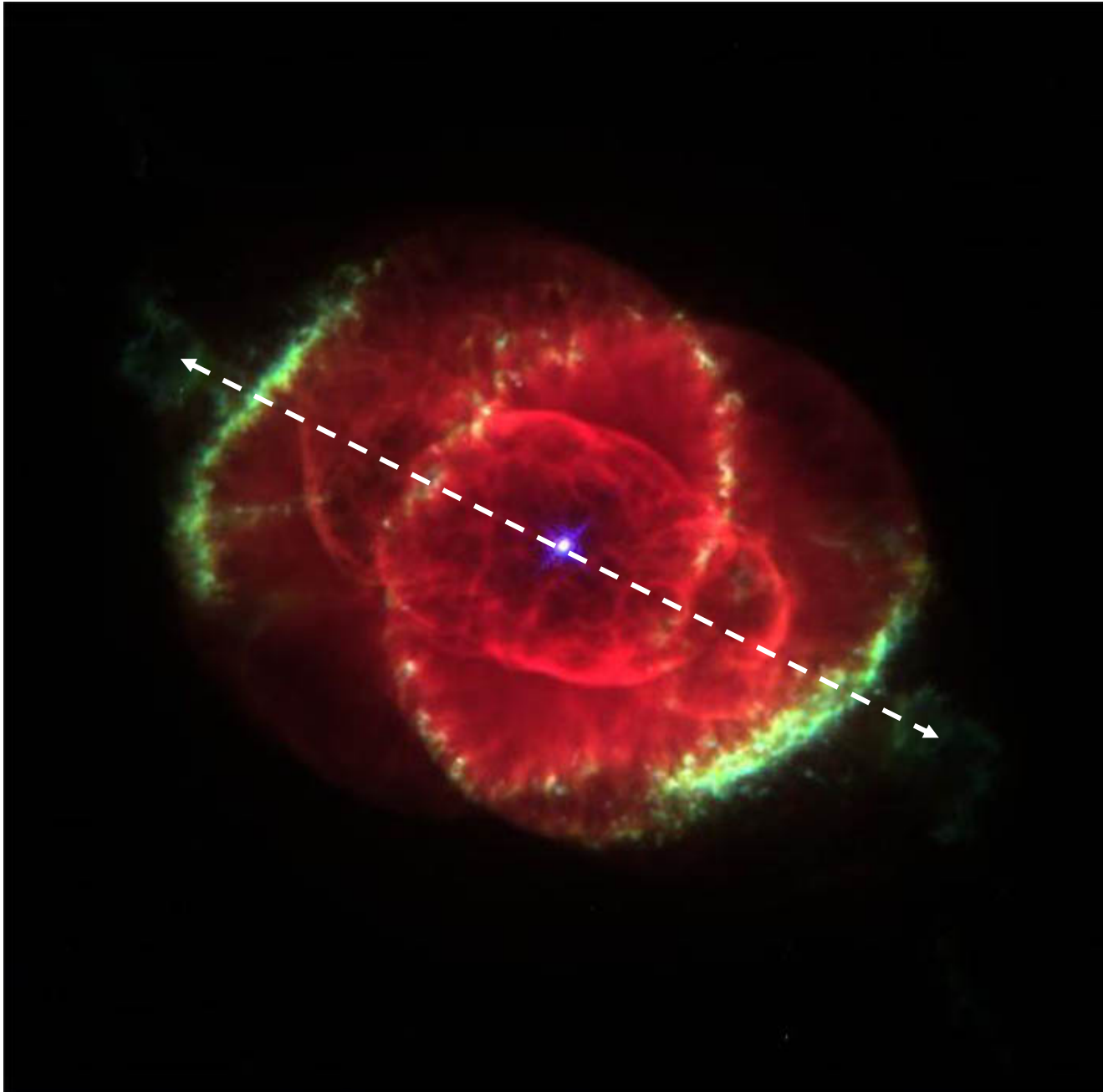
M57 - **Ring-Nebel**
im Sternbild der
Leier, Prototyp eines
Planetarischen
Nebels.

Der **Zentralstern**
(der spätere Weiße
Zwergstern) ist
deutlich im Zentrum
zu erkennen.



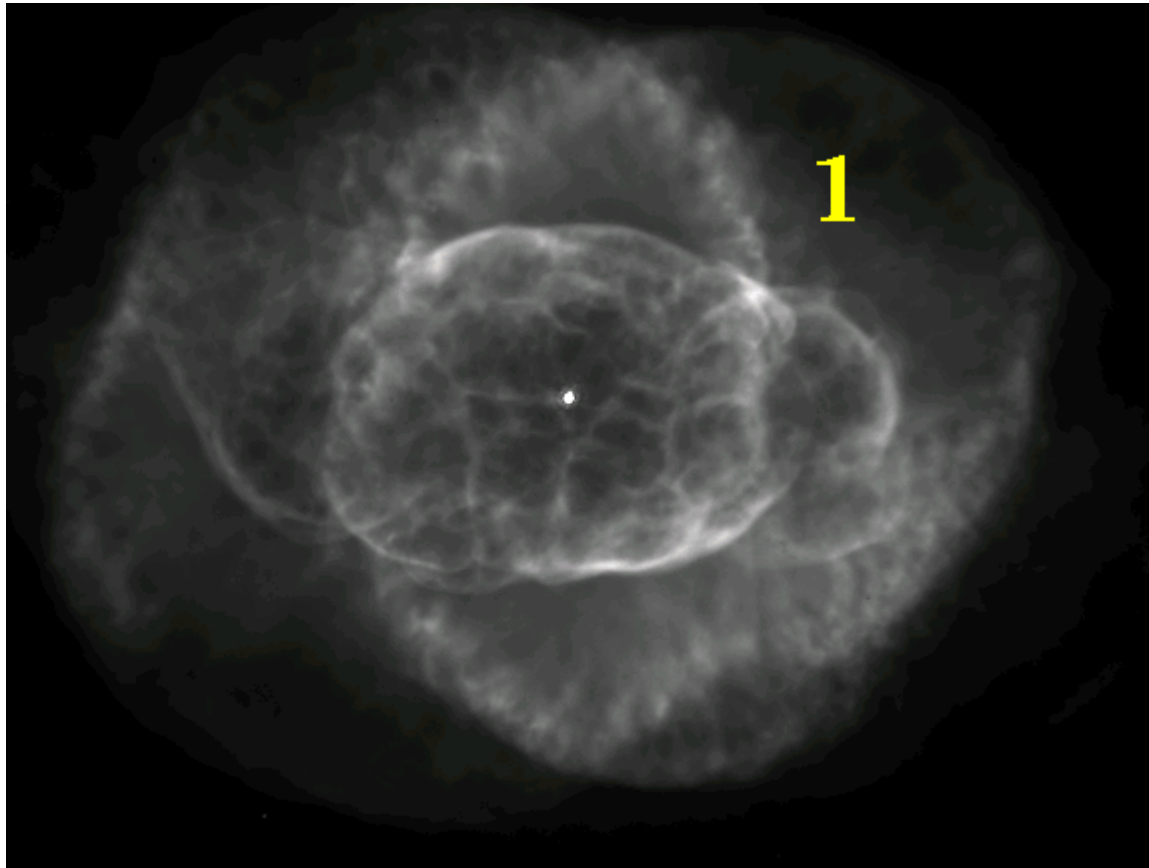
Ring-Nebel mit mehreren schwachen Halos

© Subaru Telescope



Cat's Eye Nebula

mit sehr heißem
Zentralstern,
vielleicht ein
Doppelstern ?
(~1kpc entfernt)
und einem sehr
komplexen
Planetarischen
Nebel



Cat's Eye Nebula mit zwei Aufnahmen, 1994 und 1997. Die *Expansion* des Planetarischen Nebels ist beim *Blinken* der beiden Felder deutlich zu erkennen.



M27 –

Dumbbell Nebula

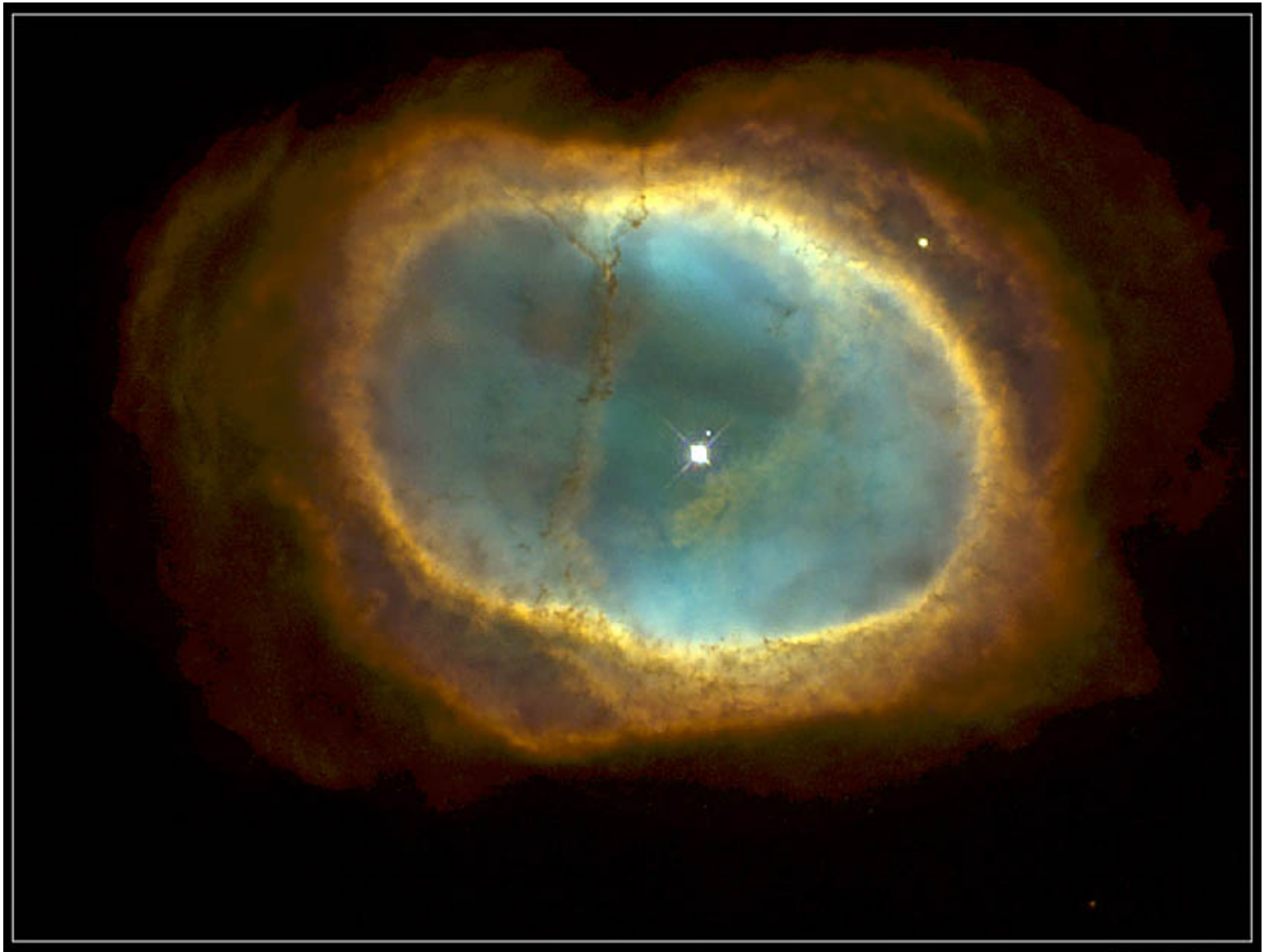
aufgenommen mit

FORS2 am ESO

VLT



Zentrum des **Dumbbell
Nebula** mit
Wasserstoff-Linien
(**grün**) und rätselhaften
Globulen aus
Molekülen und Staub
(**rot**)



NGC 3132 (Southern Ring Nebula). Der WD ist der schwache Stern.



Stingray Nebula

~6kpc entfernt.

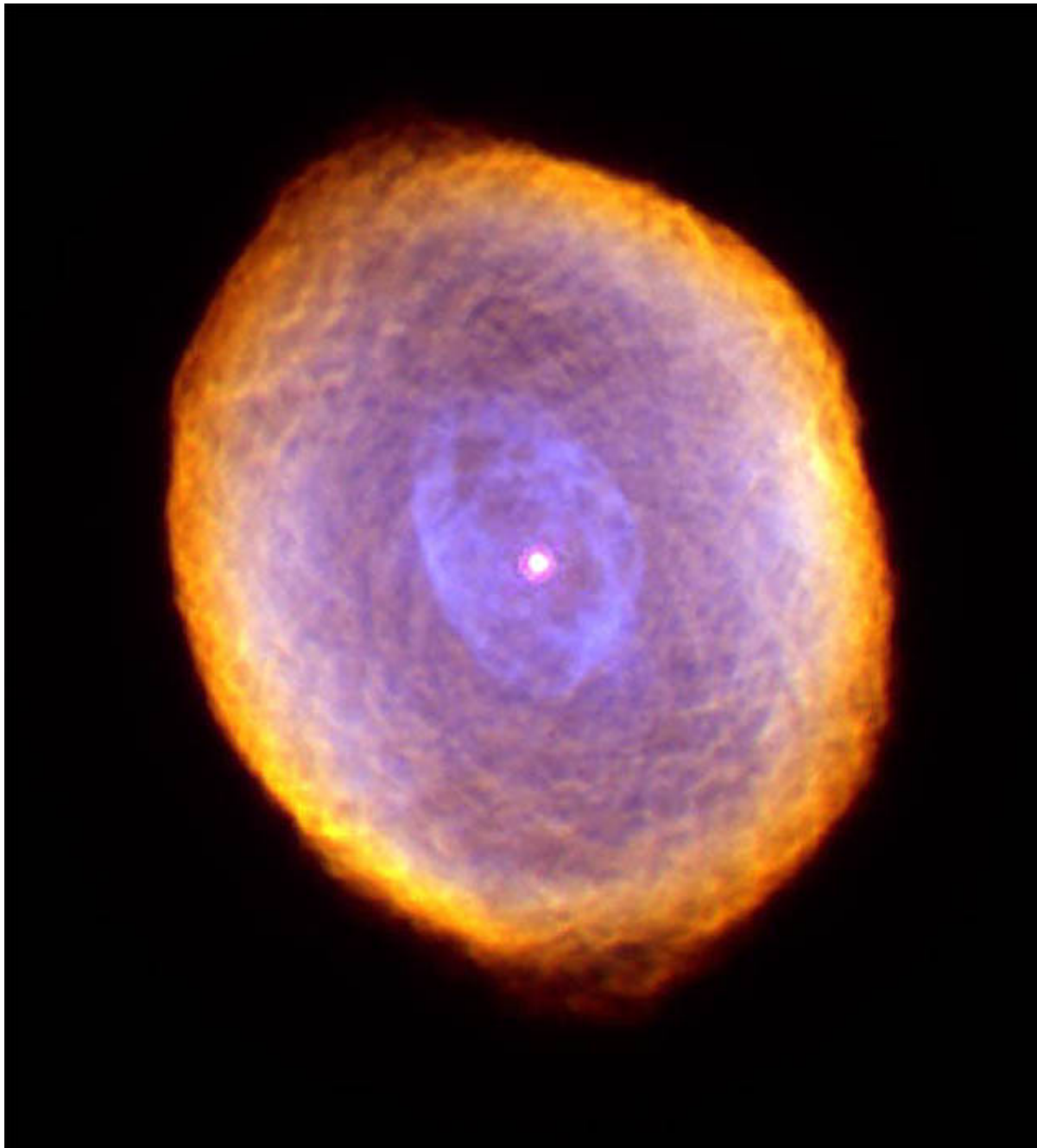
In der Hülle des
Planetarischen
Nebels ist neben
dem WD ein
zweiter Stern zu
sehen.

Wahrscheinlich
ist dies der Grund
für die irreguläre
Struktur.



NGC 5882

weitgehend regelmäßig,
aber mit gegeneinander
verdrehten Hüllen.



IC 418 -
Der **Spirograph Nebula**

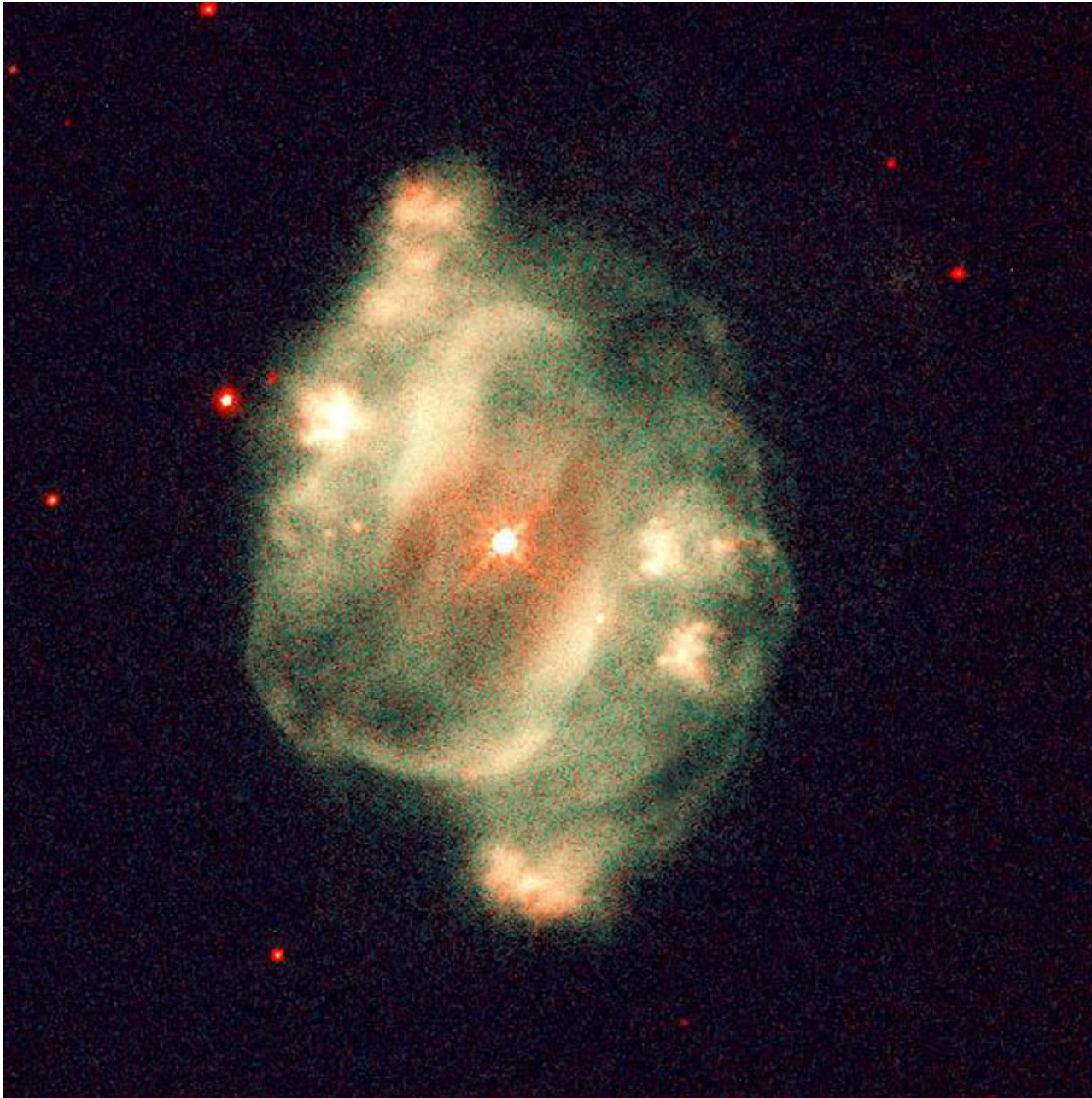
Insgesamt sehr reguläre
Form, aber eine *Textur
von zyklischen Mustern*.

Möglicherweise durch
chaotische Winde
entstanden.

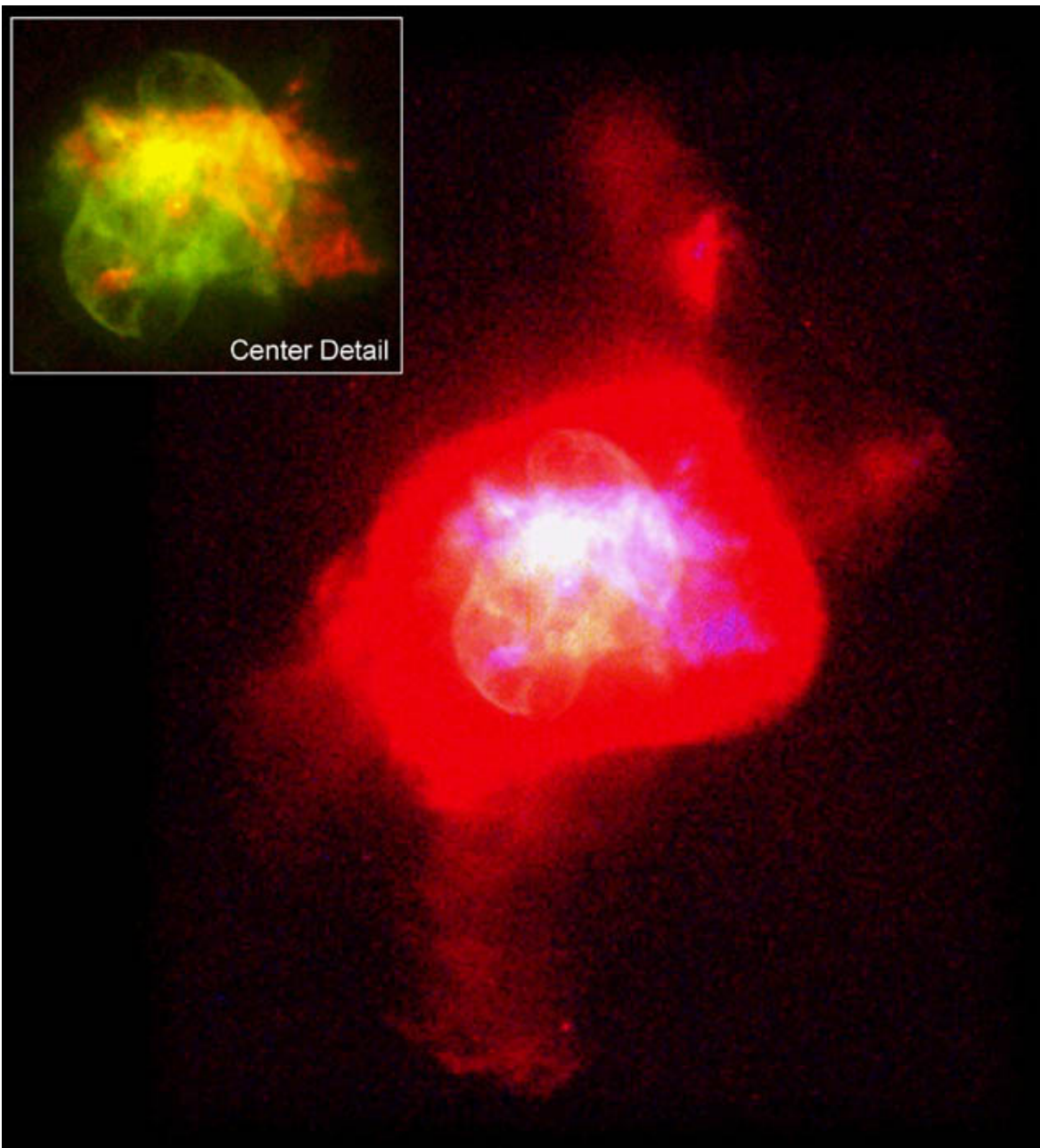


NGC 2440

ein junger Planetarischer Nebel



NGC 5307, ein
sehr
symmetrischer
Planetarischer
Nebel mit
Spiralstruktur



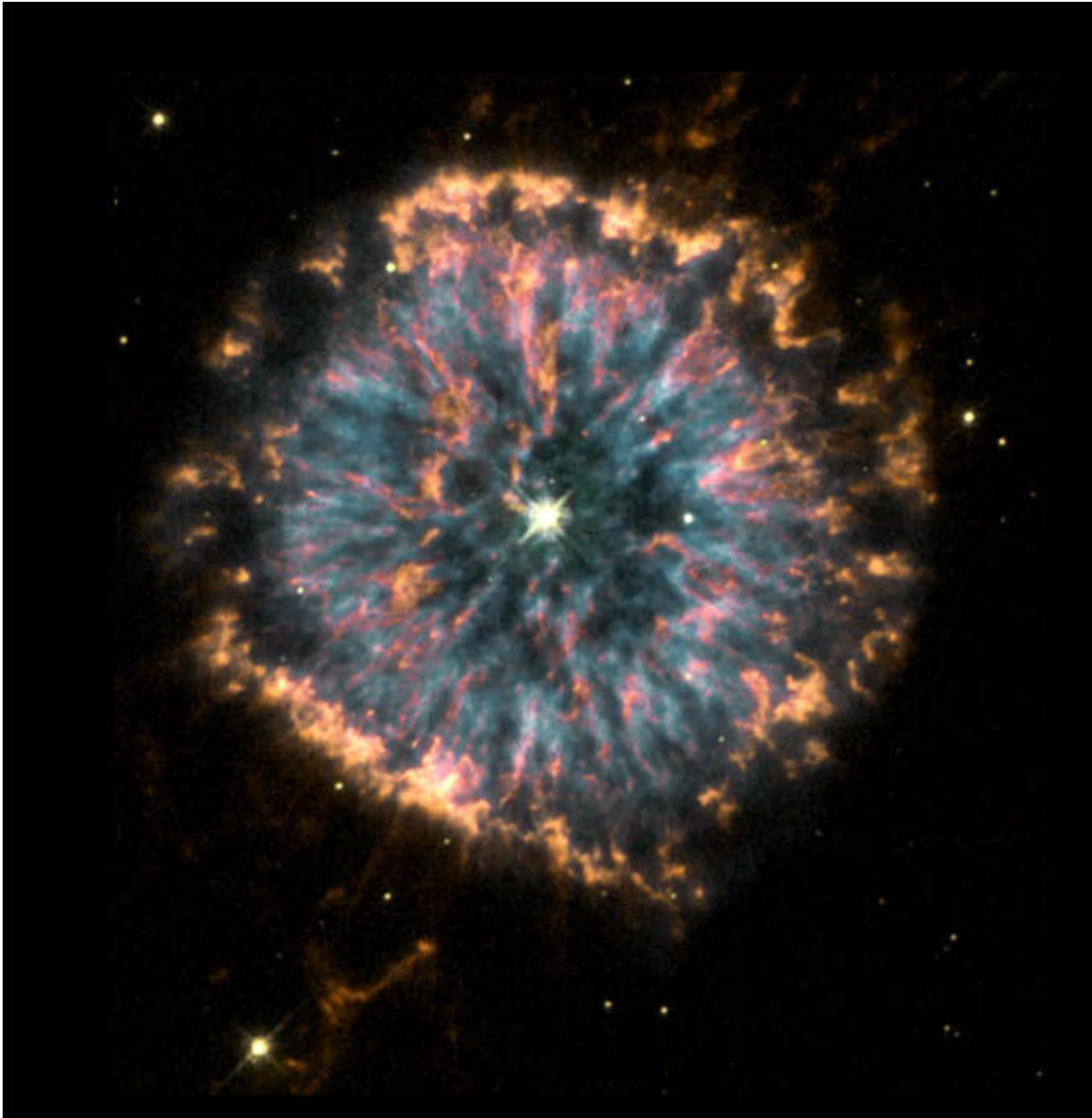
NGC 6210 - der

Turtle Nebula

(~2kpc entfernt).

Heißes Gas bricht hier
durch eine Schale
kühleren Gases.

Im Detail ist der WD zu
sehen.



NGC 6751 besitzt
eine Gashülle mit
durchgehend
radialen Strukturen
(Explosion...)



NGC 2392 –

Eskimo- Nebel

Innen die abgeworfenen
Hüllen, außen ~0.3pc
lange radiale Filamente

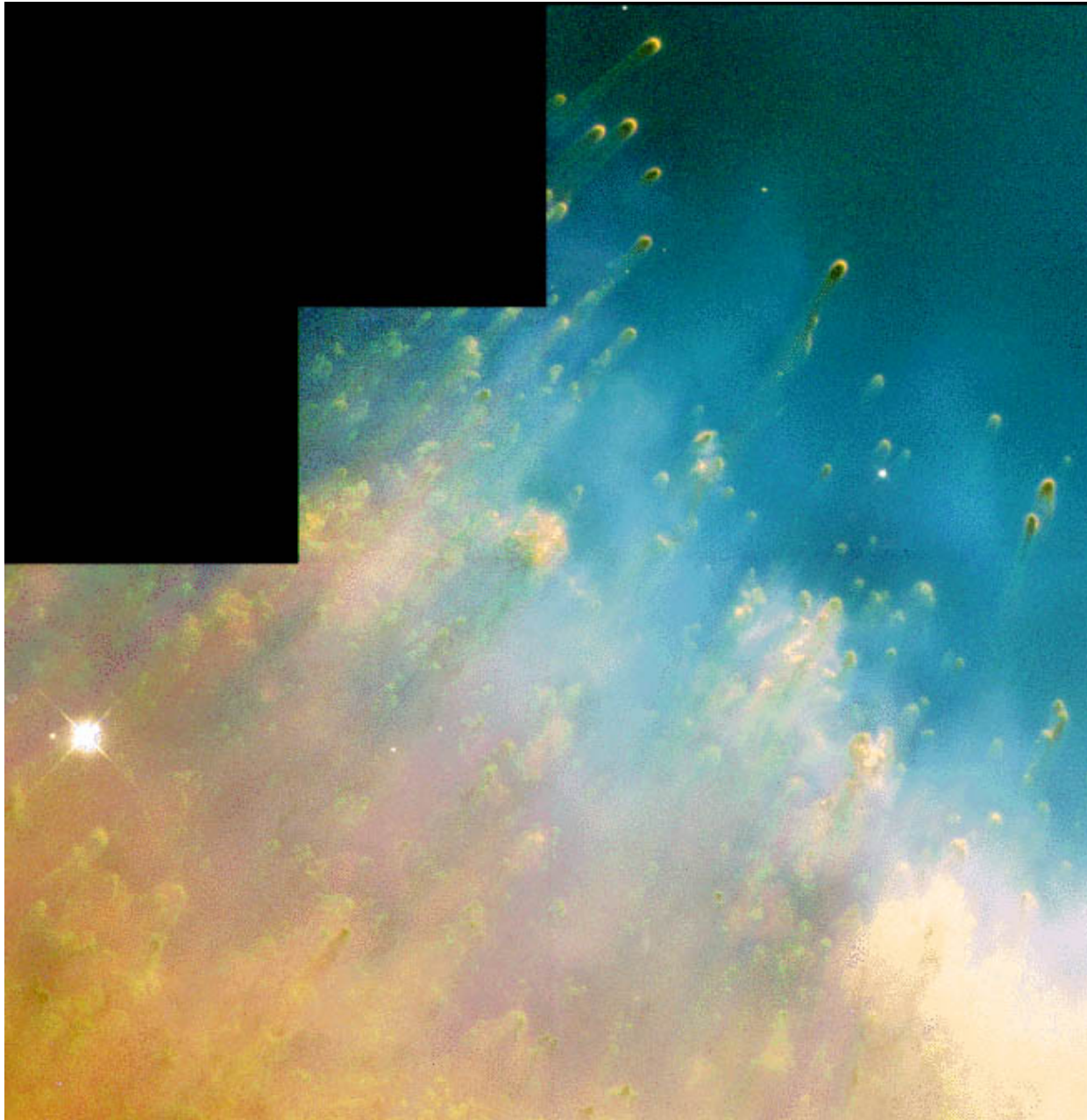


NGC 7293 –

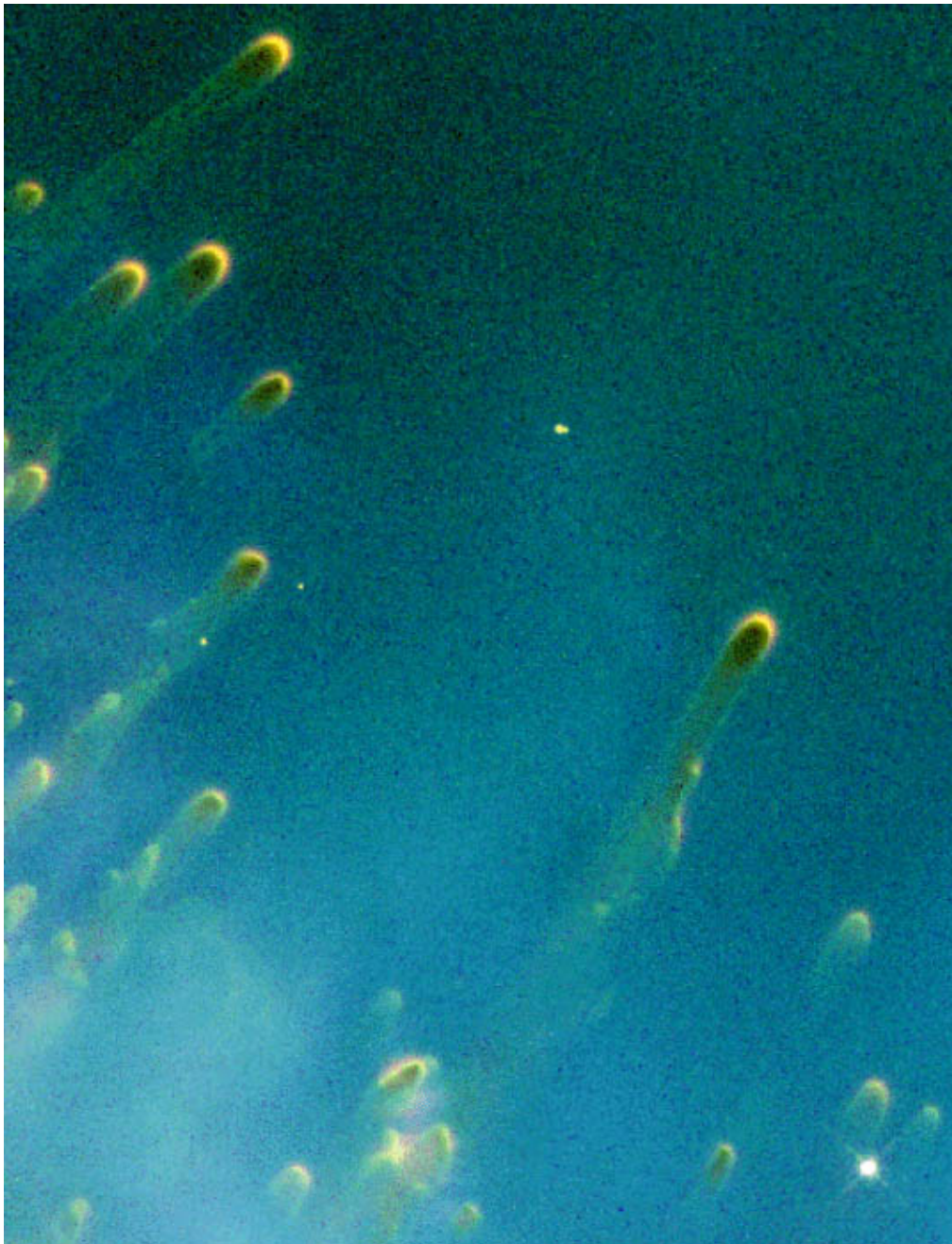
Helix-Nebel

ist *der* Planetarische
Nebel mit der
geringsten Entfernung
von der Sonne
(~150pc).

Auch er zeigt mehrere
Hüllen.

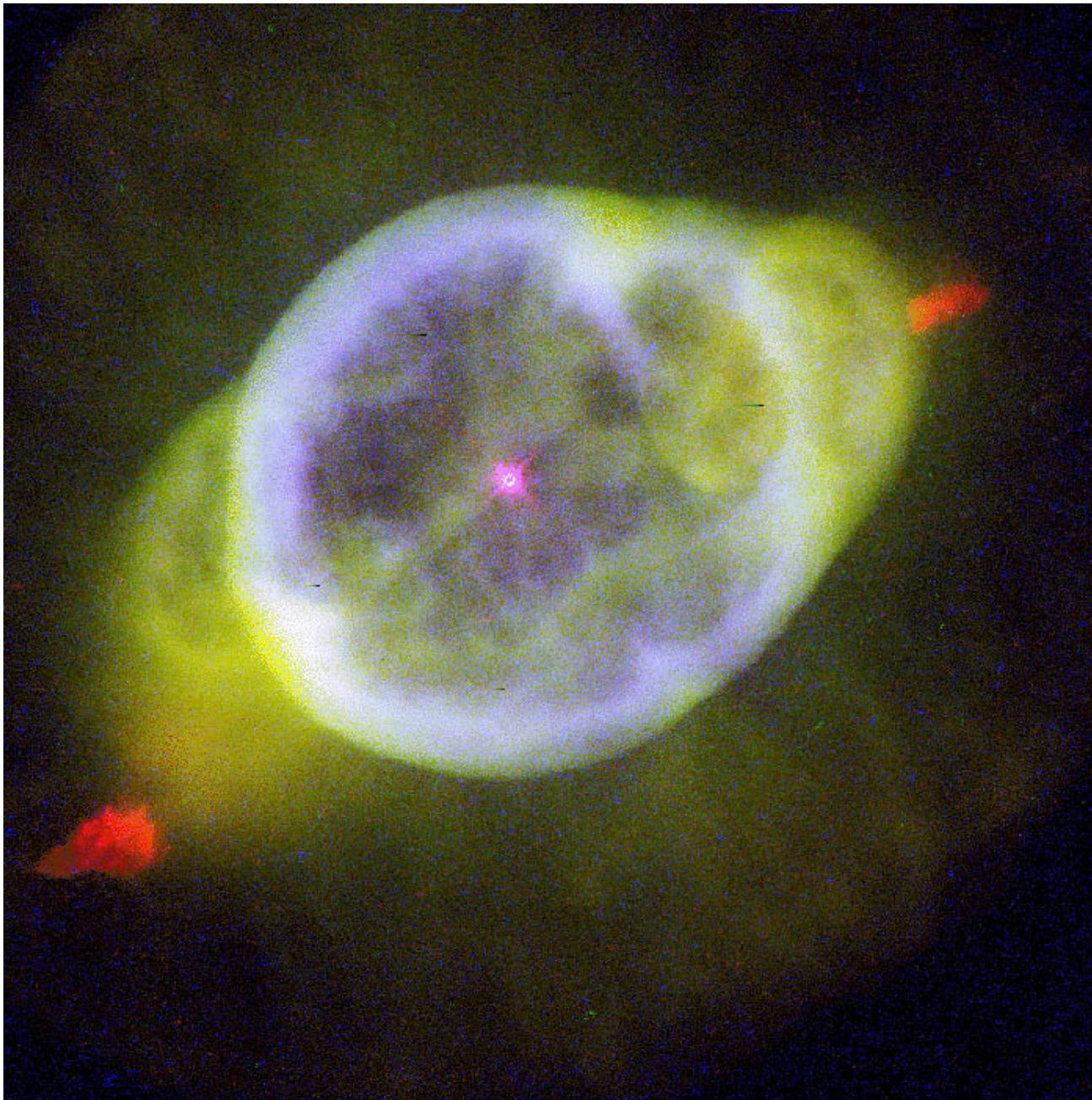


Detailaufnahme des
Helix-Nebels zeigt
mehrere 1000
kometenartige
Gasstrukturen



Feinste Details aus der Gashülle des **Helix-Nebels** zeigen die **inhomogene Zusammensetzung**, in der dichtere, früher abgeworfene Hüllen durch heißeres Gas überholt werden.

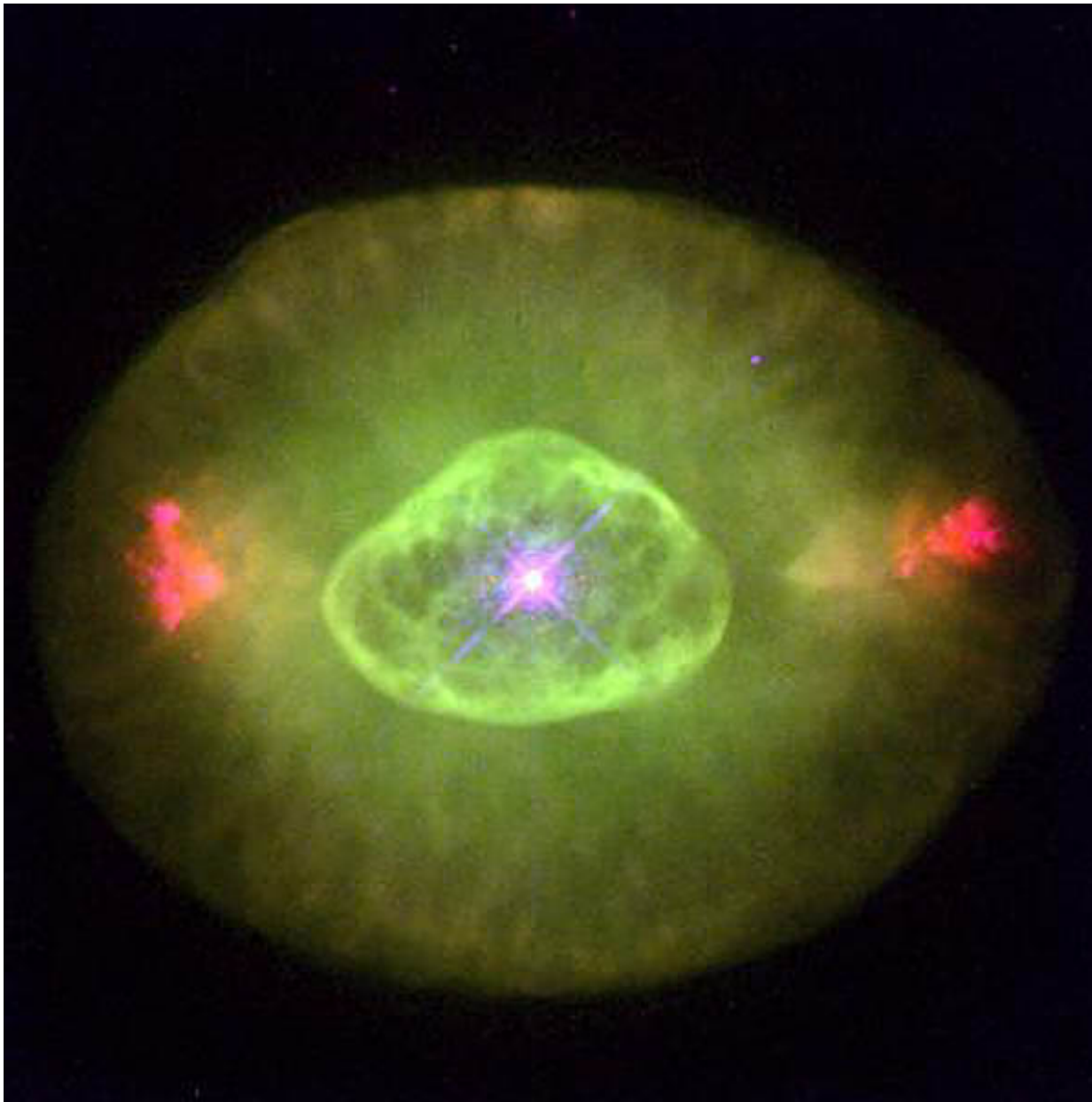
Durchmesser der "Kometen"-
Köpfe: ~ Sonnensystem !



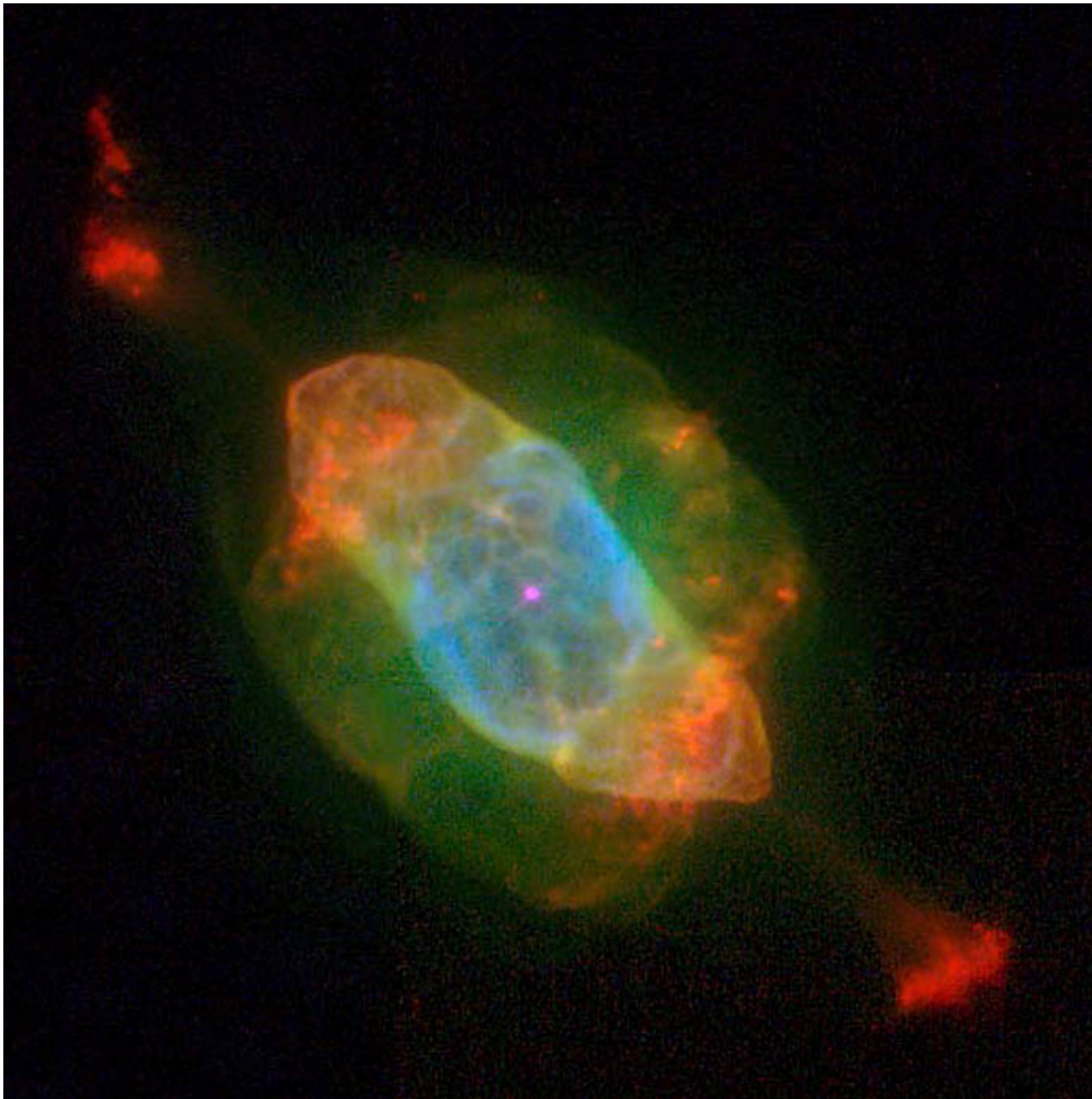
NGC 3243 –

Jupiters Geist

ebenfalls mit
knotenähnlichen
Strukturen



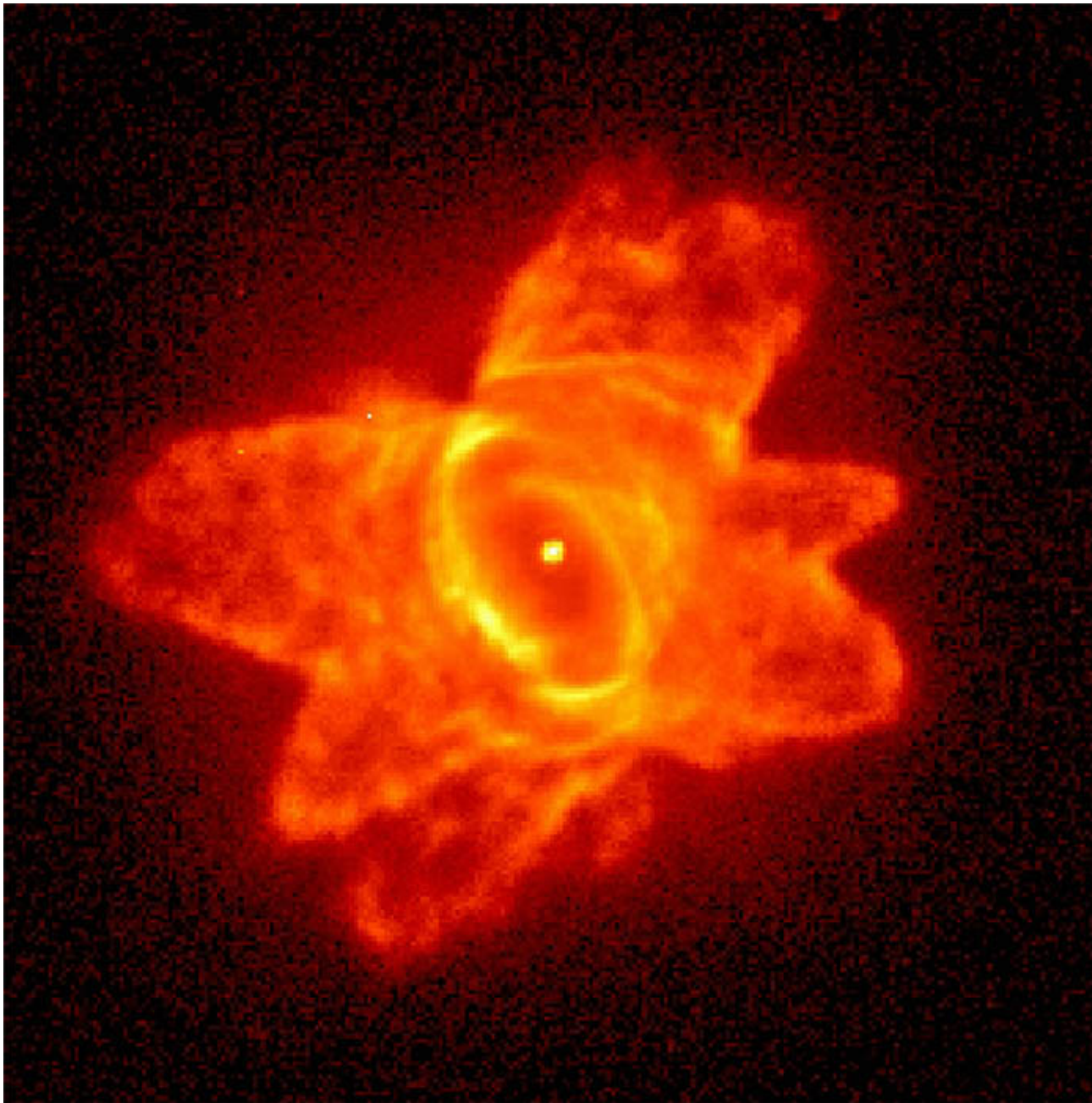
NGC 6826, zeigt
neben einer
Doppelhülle zwei (**rote**)
Verdichtungen, deren
Herkunft ungeklärt ist.



NGC 7009, der
Saturn-Nebel

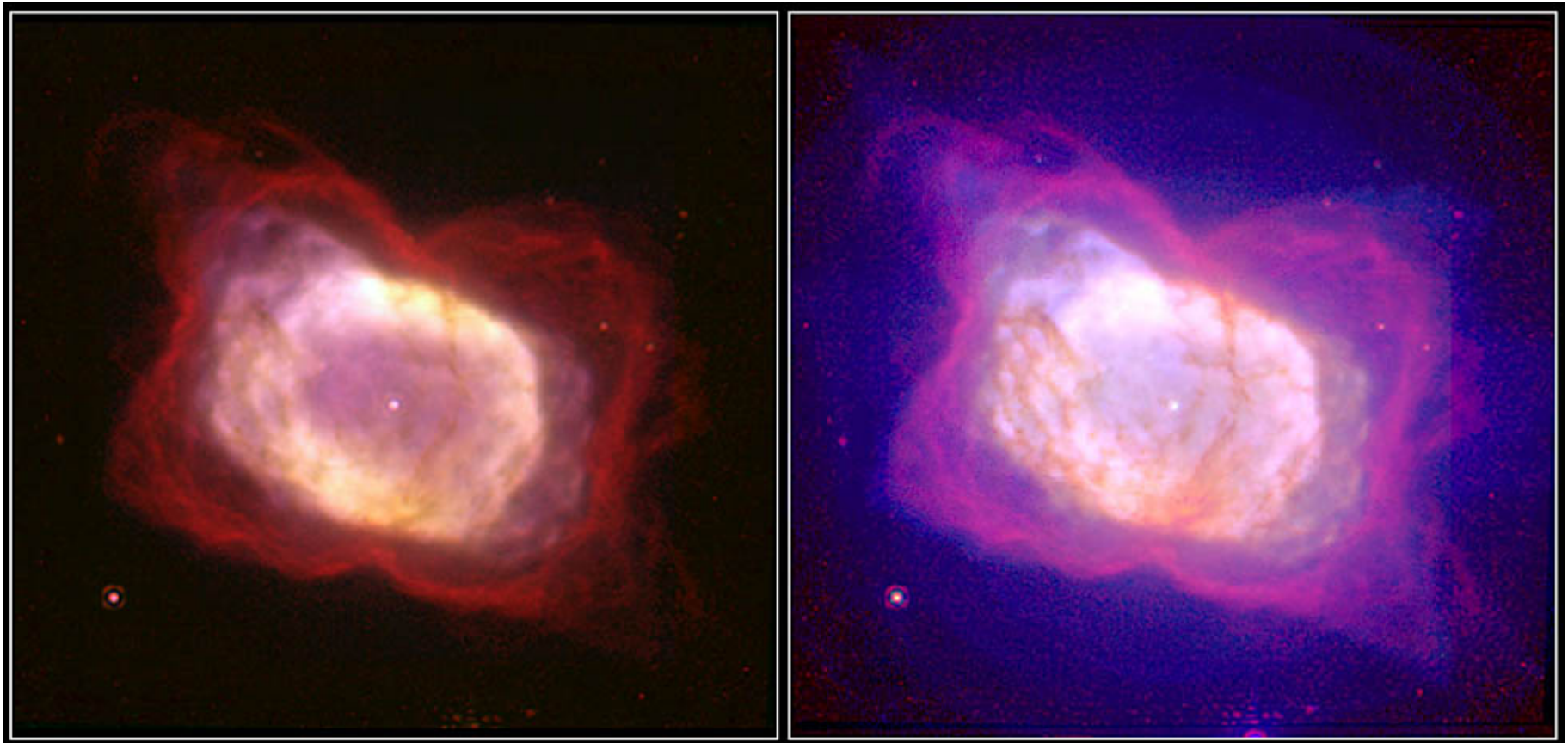
ist wahrscheinlich
in zwei Phasen
entstanden.

Zuerst wurde das
"grüne" Gas
emittiert, welches
nachfolgende
Ausbrüche zu
Winden umformte,
die entlang einer
(Drehimpuls-?)
Achse **kollimiert**
sind.



PKS285-02, ein
junger
Planetarischer
Nebel.

Die Gashüllen
lassen mehrere
*kollimierte Gas-
ausbrüche*
während des
letzten
Riesenstadiums
vermuten.

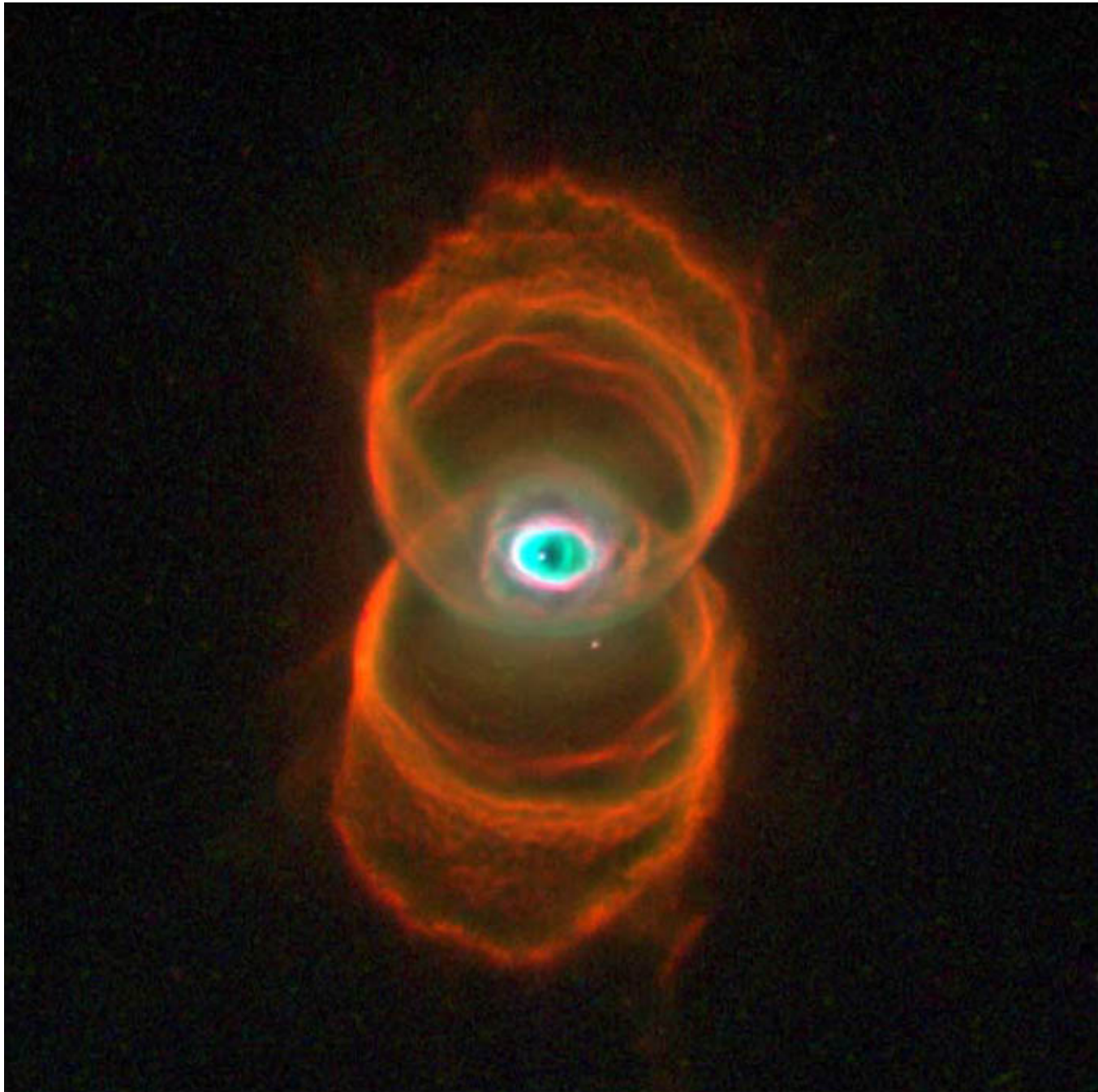


© HST, NICMOS

NGC 7027 ist der kleinste bekannte Planetarische Nebel (nur 14000 AE Durchmesser). Aufnahme im **Infraroten** mit NICMOS am HST. Erkennbar wieder die sanduhrförmige, bipolare Struktur.



NGC 2346 ist ein PN mit **zentralem Doppelsternsystem** ($p = 16^d$)



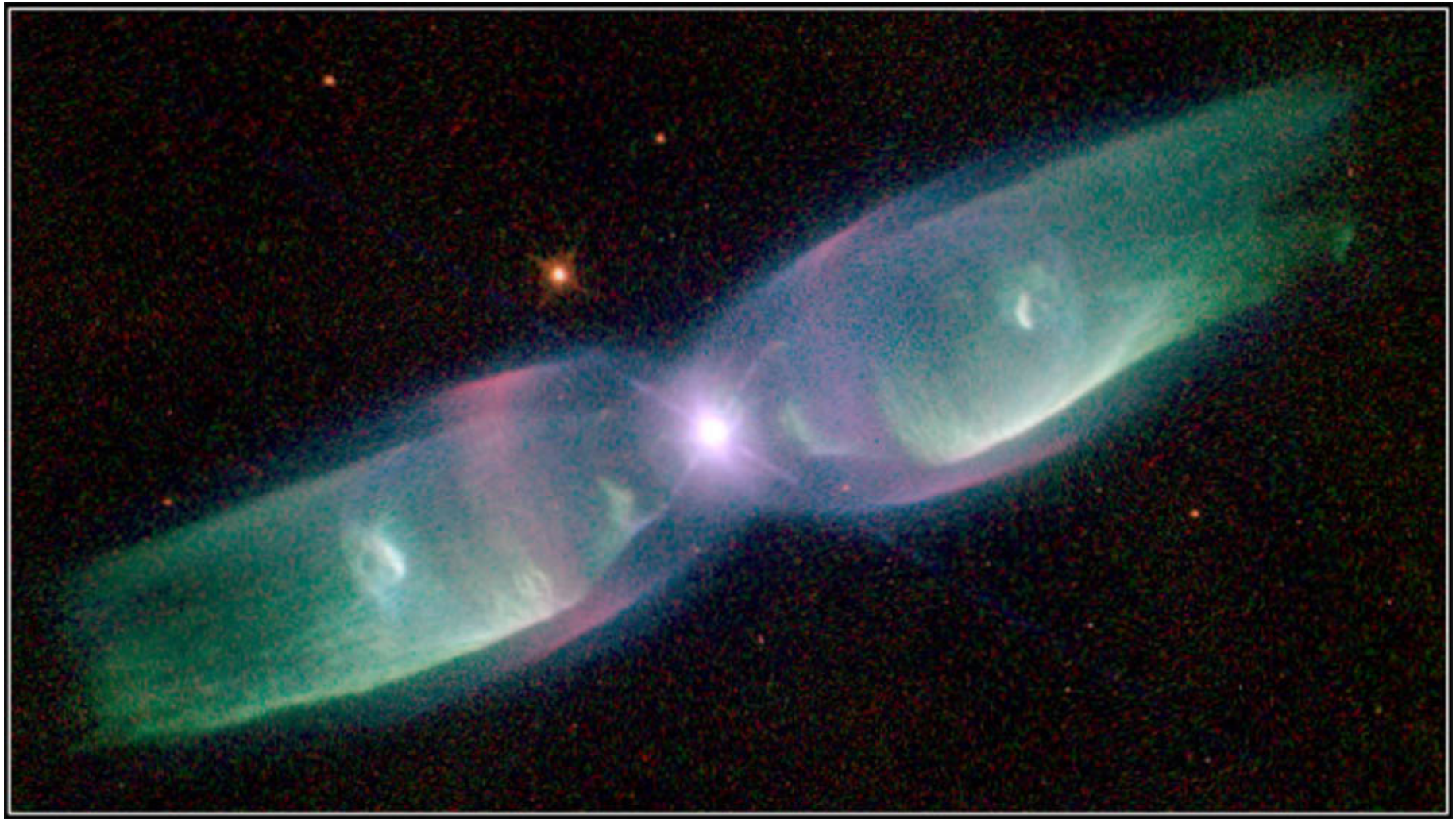
Hourglass Nebula

zeigt eine **bipolare
Nebelstruktur** mit
vorherrschender N-
Emission.



© HST, JPL, NASA

NGC 6537 (Roter Spinnennebel) mit bipolarer Hülle, wahrscheinlich wieder ein Doppelsternsystem. Der Zentralstern ist einer der heißesten bekannten Weißen Zwerge (~ 100000 K). Wind mit 300 km/s erzeugt beim Überholen des Nebels Stoßfronten.



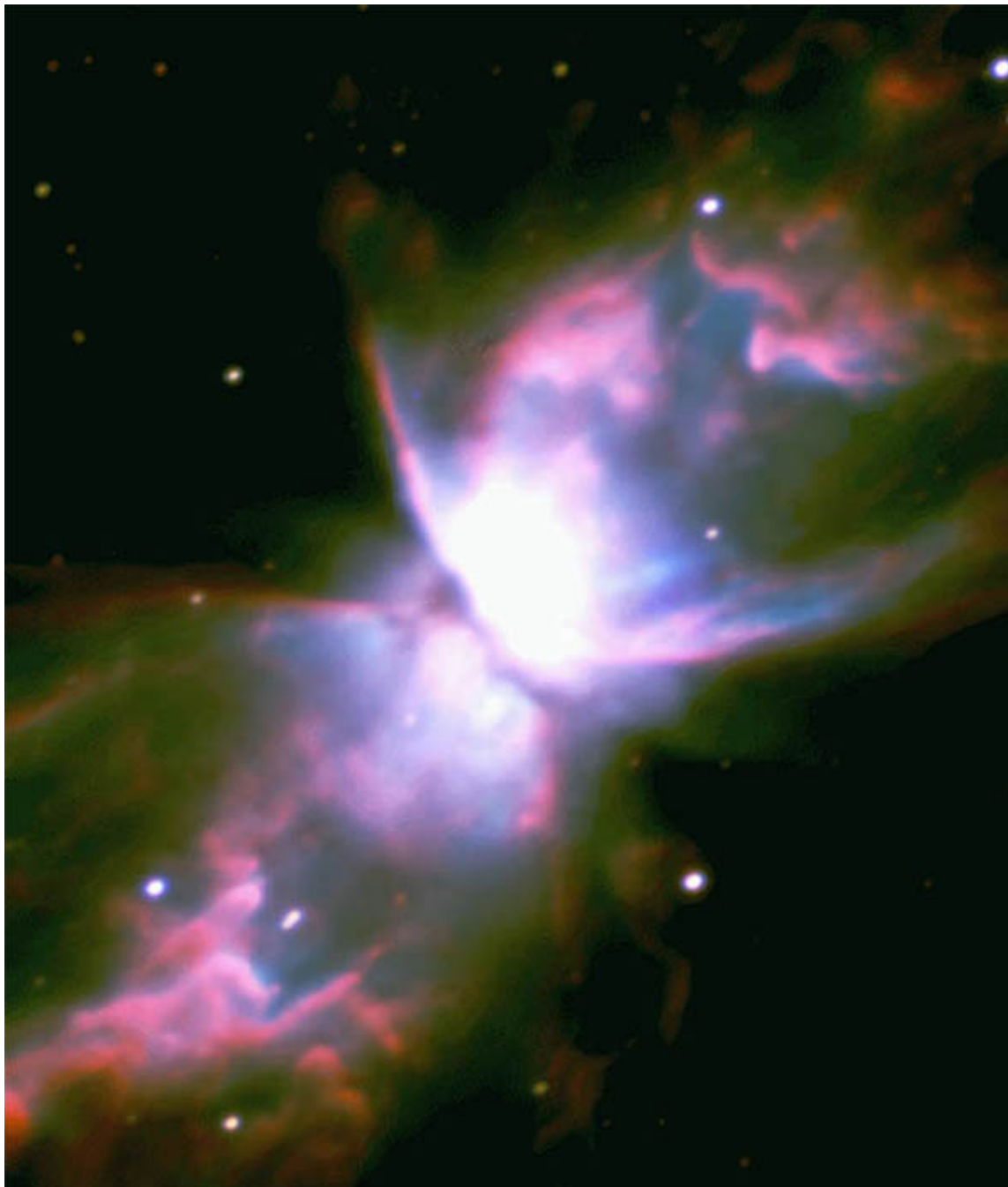
© HST, JPL, NASA

M2-9: mit den "Flügeln" eines Schmetterlingsnebels. Wieder ein Doppelsternsystem, bei dem der Ausbruch entlang der **Drehimpulsachse** verläuft



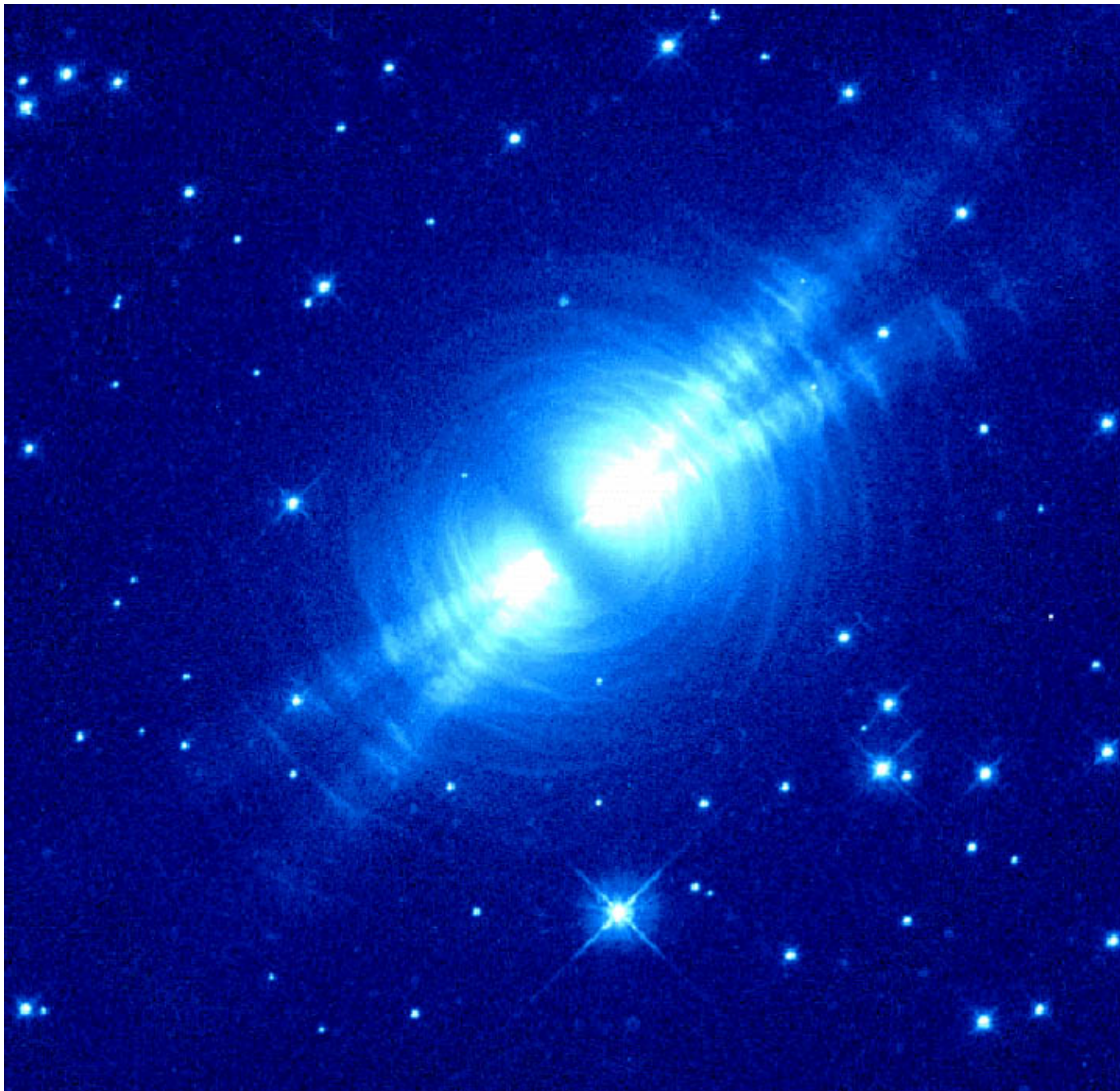
© HST

Rotten Egg Nebula (OH231.8+4.2) mit bipolaren Jets anstelle einer symmetrischen Gashülle. Hier wirkt das ausgeworfene Gas teilweise als Reflexions- und nicht als Emissionsnebel



Der **Butterfly Nebula** ist in einem Doppelsternsystem entstanden.

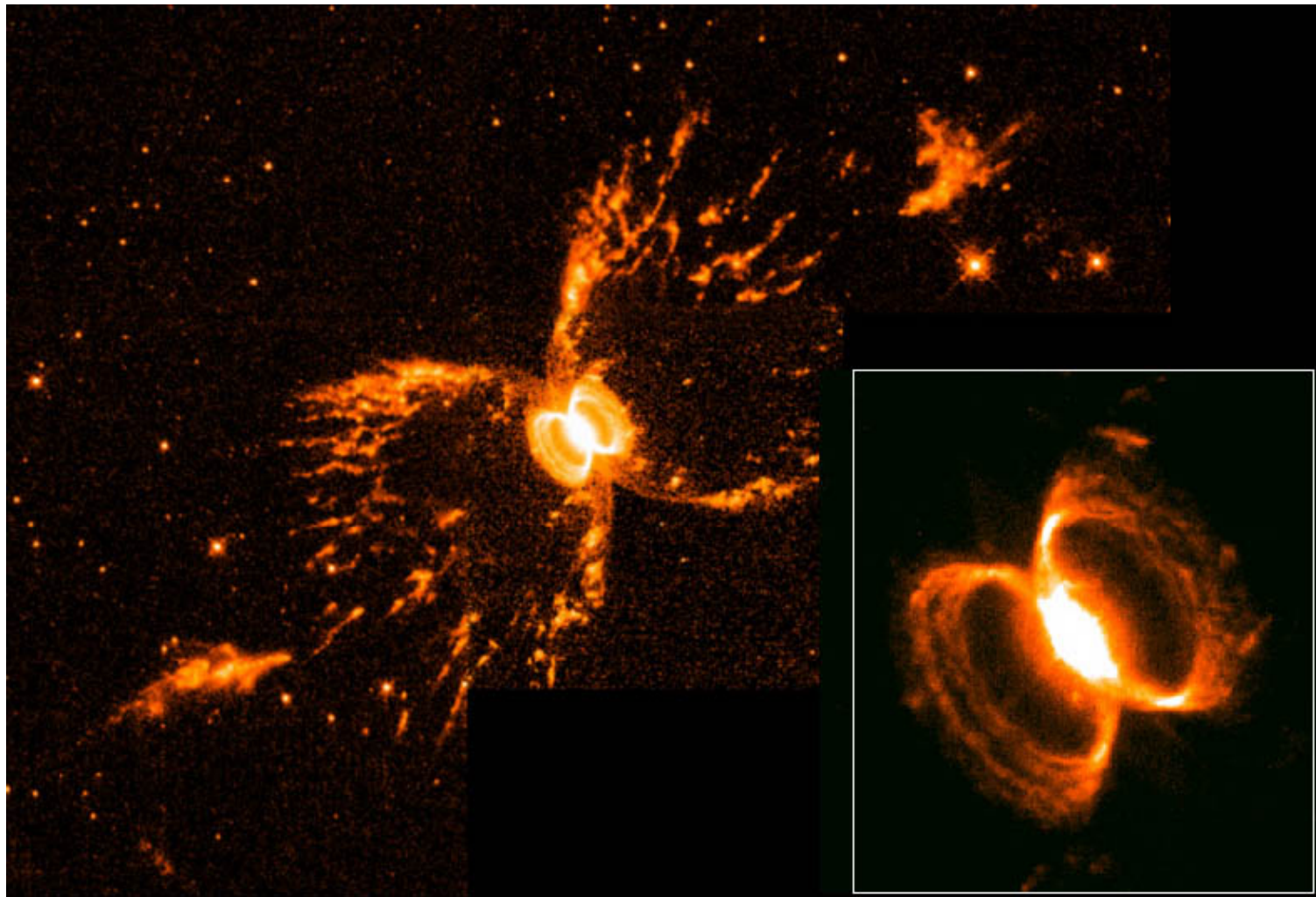
Die ausgeworfene Gashölle wird durch den verbliebenen **Zentralstern** ionisiert und so zum Leuchten angeregt.



Egg Nebula

Planetarischer
Nebel beim
Ausbruch
innerhalb einer
dichten
Staubscheibe.

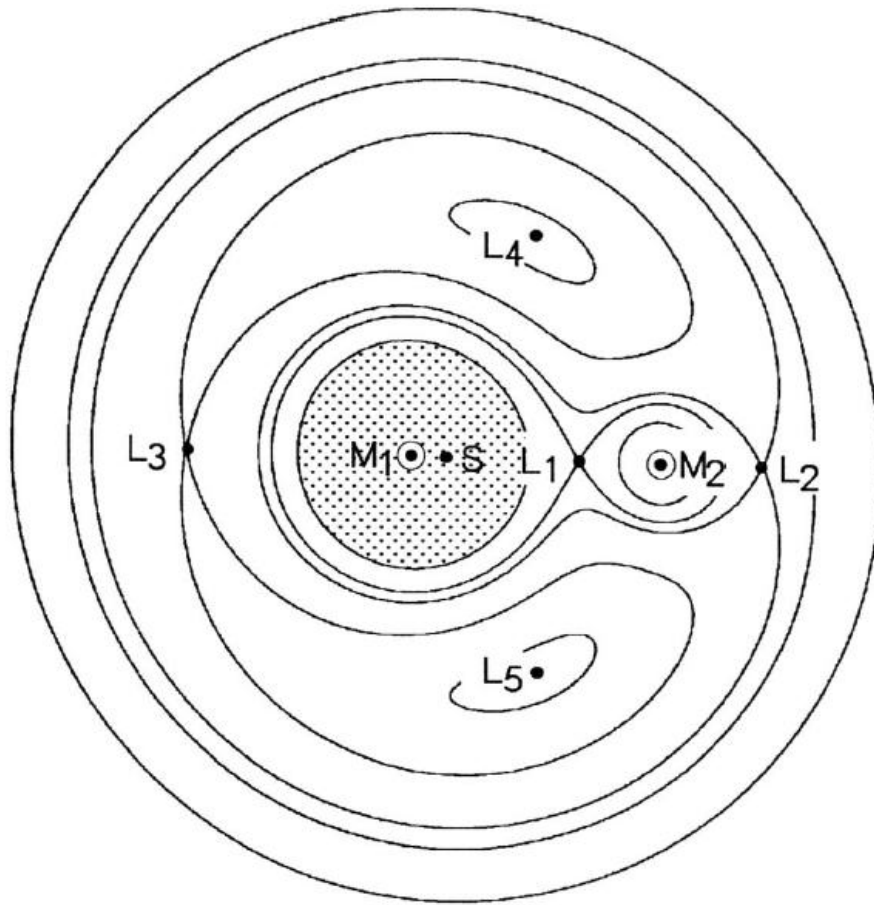
Staubteilchen
in der
expandierende
n Hülle streuen
das Licht des
Zentralsterns
(hier nicht
sichtbar).



© WFPC2 and HST, JPL, NASA

Doppelsternsystem **He2-104** besteht aus **Weißem Zwerg** (WD) und **Roten Riesen** (RG). Der WD hat einen Planetarischen Nebel abgeworfen, der RG füllt seine Rochegrenze aus und deponiert Masse in einer **Akkretionsscheibe**.

Intermezzo: Roche-Potential

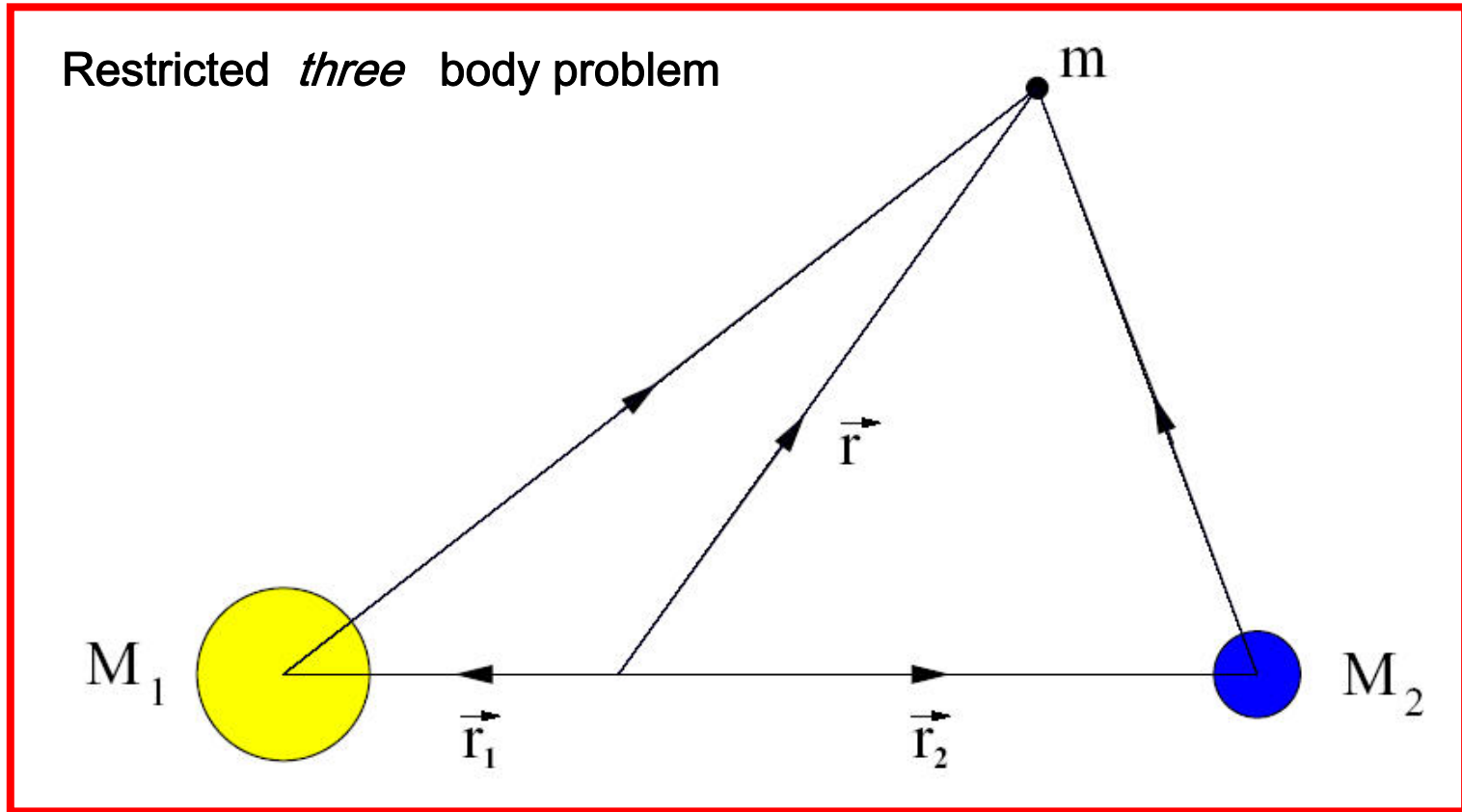


Äquipotentiallinien

L1-L5:

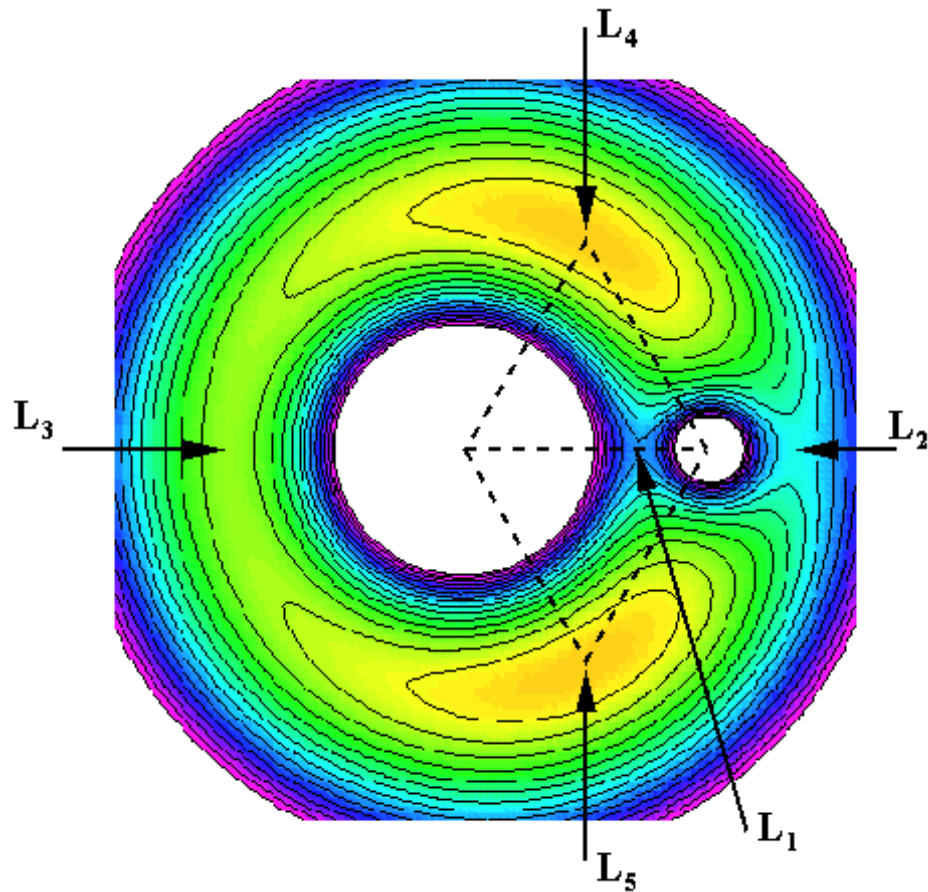
Lagrange-Punkte

Intermezzo: 5 Lagrange-Gleichgewichtspunkte



Suche Lösungen der Bewegungsgleichung, welche die Abstände zwischen den 3 Körpern konstant lässt. **Einschränkende Bedingung:** $M_1, M_2 \gg m$

Intermezzo: Roche-Potential

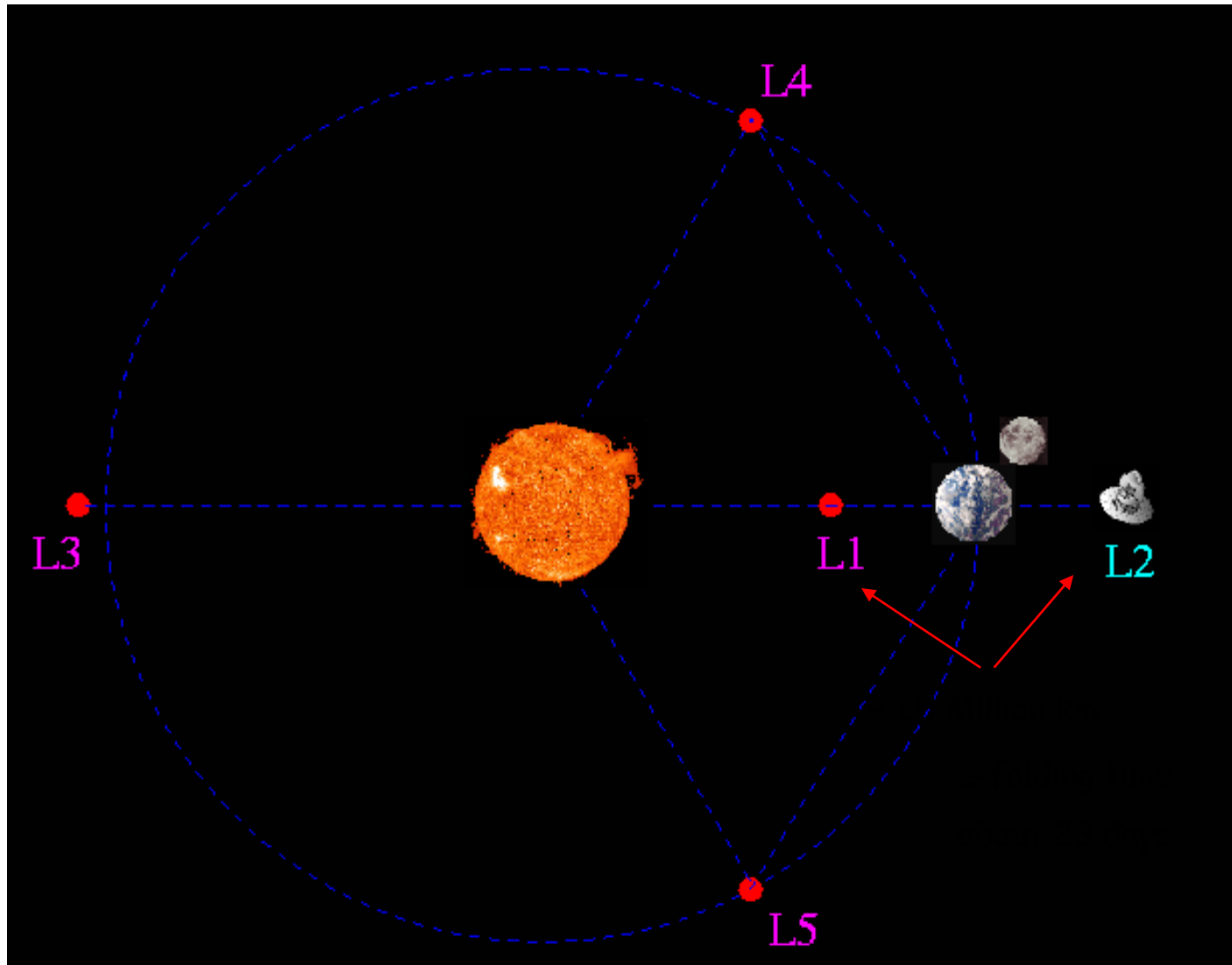


Äquipotentiallinien

L_1 - L_5 :

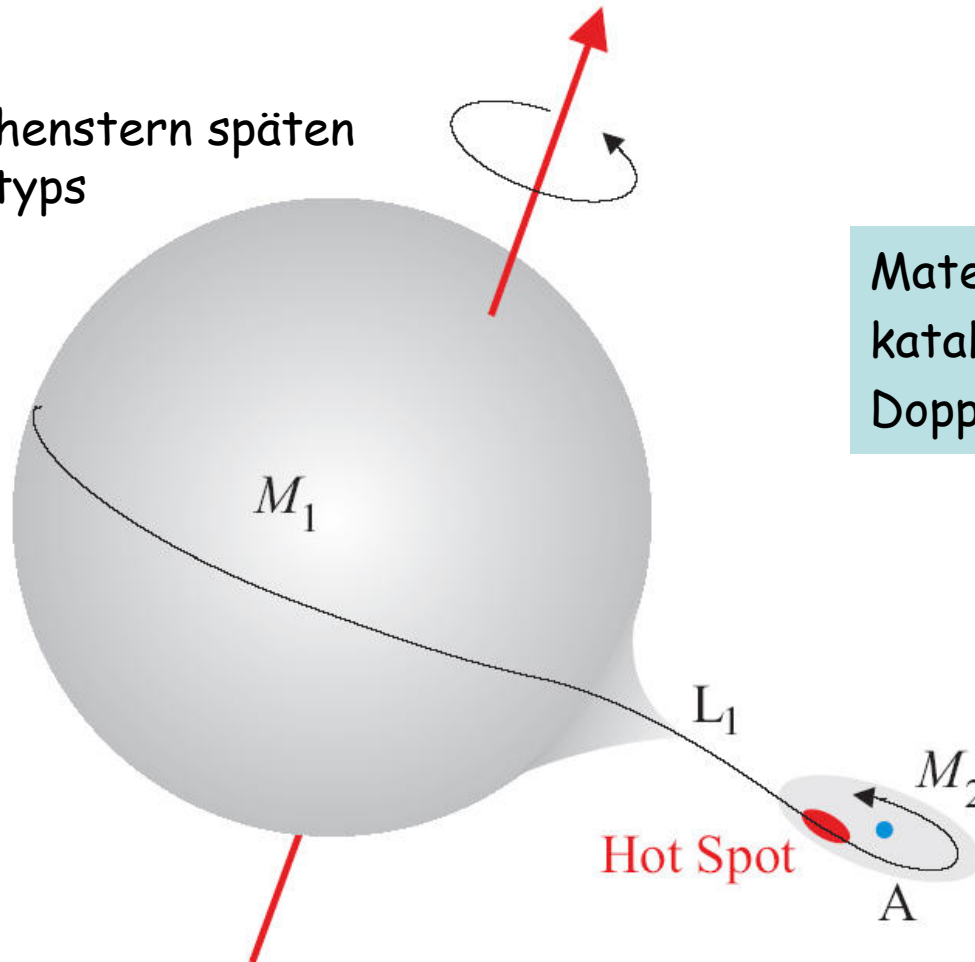
Lagrange-Punkte

Intermezzo: Lagrangepunkte L1-L5 des Erde-Sonne Systems



Entwicklung der Sterne: Veränderliche Phänomene

Hauptreihenstern späten
Spektraltyps



Materiestrom in
kataklysmischen
Doppelsternsystemen

Stern mit
Akkretionsscheibe

Entwicklung der Sterne: Typische Lichtkurve einer Novae

