

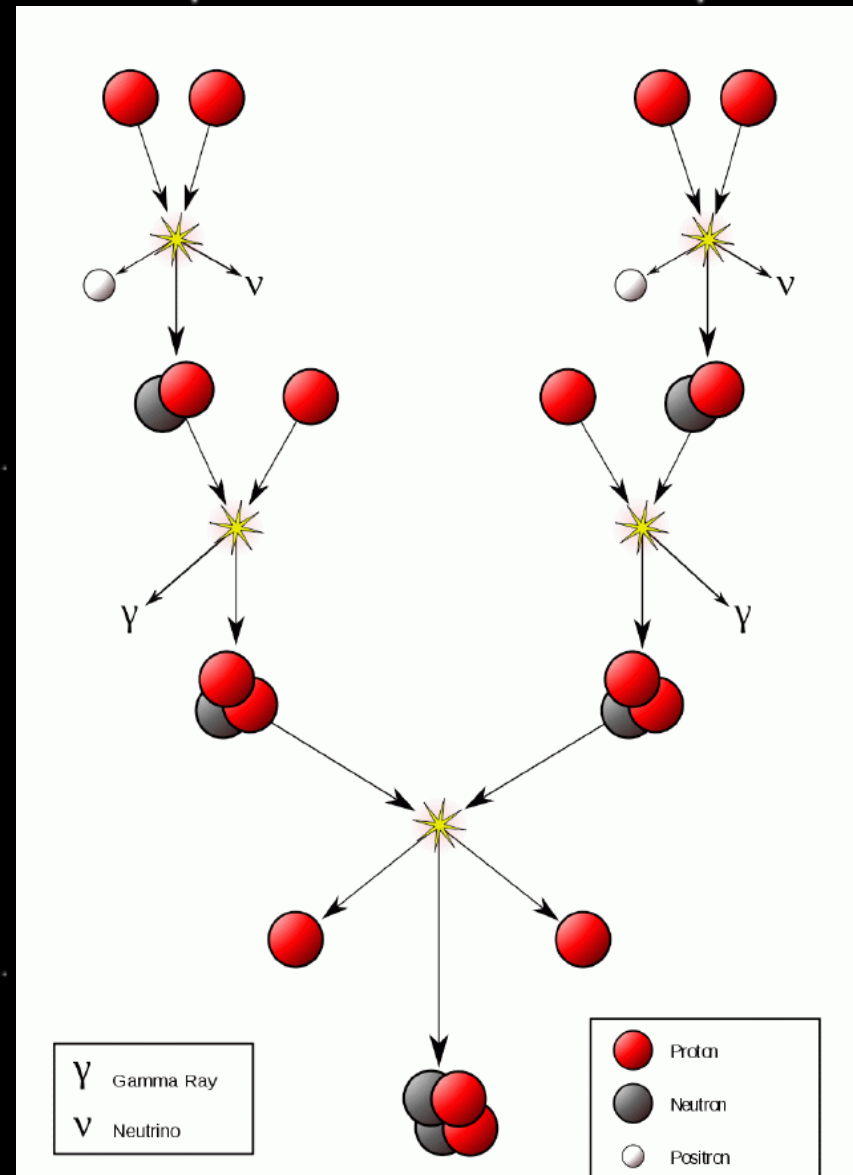
Auflösung der Klausurfragen

- Nennen Sie die beiden fundamentalen Prozesse, mit denen die Energie gewonnen wird, die ein stellares Objekt als Strahlung abgeben kann. Welche Sternparameter (Radius, Masse, Leuchtkraft, Oberflächentemperatur) ändern sich dabei jeweils hauptsächlich?
- **Antwort: “Unsere Sonne”, “Sterne und Sternentwicklung”, “Spätstadien”, “Sternentstehung”**

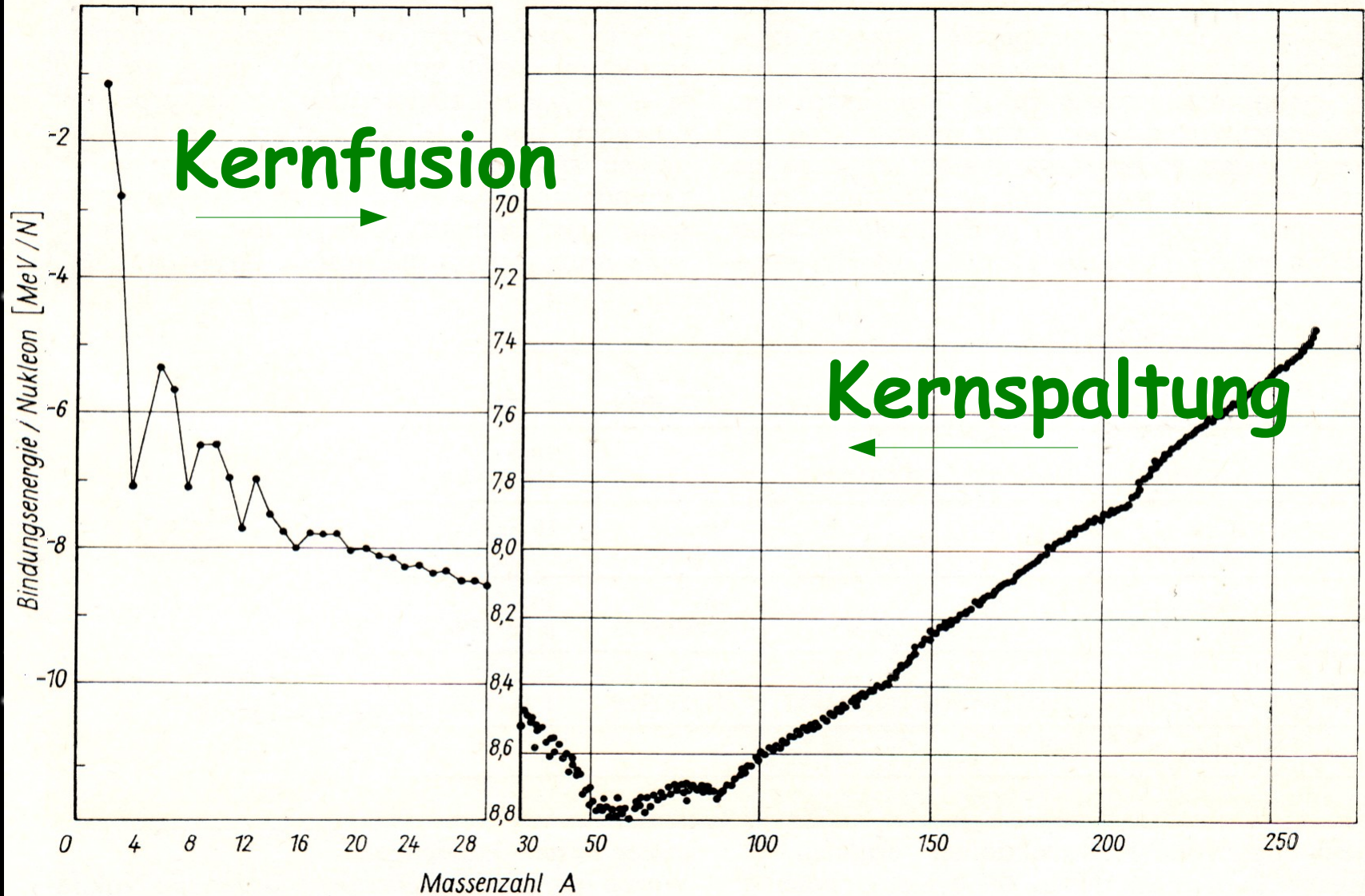
Energieerzeugung

- Kernfusion
- Verbrennung von Wasserstoff zu Helium
- Prinzip:
Umwandlung von Materie in Energie

$$E = m c^2$$



Energieerzeugung



Stufe 1: Der Protostern

| | |
|------------------|---------------------|
| • Alter: | 1 - 1000 J |
| • Radius: | $\sim 50 R_{\odot}$ |
| • T im Kern: | 150,000 K |
| • T der Hülle: | 3,500 K |
| • Energiequelle: | Gravitation |

Der Protostern ist kühl, seine Farbe rot, aber er ist sehr groß und leuchtstark - der Stern erscheint im **Hertzprung-Russell Diagramm** oben rechts.

Das Russell-Vogt Theorem

$$M_* < 0.02 M_\odot$$

leichte Erwärmung durch Gravitationsdruck

$$0.02 < M_* < 0.085 M_\odot$$

Brauner Zwerg: $\sim 3,000,000\text{K}$ im

Kern, H-Brennen wird nie erreicht

$$0.085 < M_* < 0.4 M_\odot$$

masseärmste Sterne:

He-Brennen wird nie erreicht

$$0.4 < M_* < 3 M_\odot$$

massearme Sterne: $H \rightarrow He$ (p-p

Kette), $He \rightarrow C$ (Triple- α)

$$M_* > 3 M_\odot$$

massereiche Sterne: $H \rightarrow He$ (CNO

Kette), $He \rightarrow C$, $C \rightarrow Ne, Na, Mg, O$

Entartetes Gas

- Hinzufügen von Masse: R nimmt ab

- Chandrasekhar-Masse:

$$R=0 \text{ bei } M = 2.018 \frac{\sqrt{3\pi}}{2} \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{(\mu_e m_h)^2} = 1.4 M_\odot$$

- Wenn die Masse bis zur kritischen Masse wächst kollabiert der Stern
- Die Gravitationsenergie wird mit einem Schlag frei
- $L = 10^9 L_\odot$, genauso hell wie Galaxie

Supernova

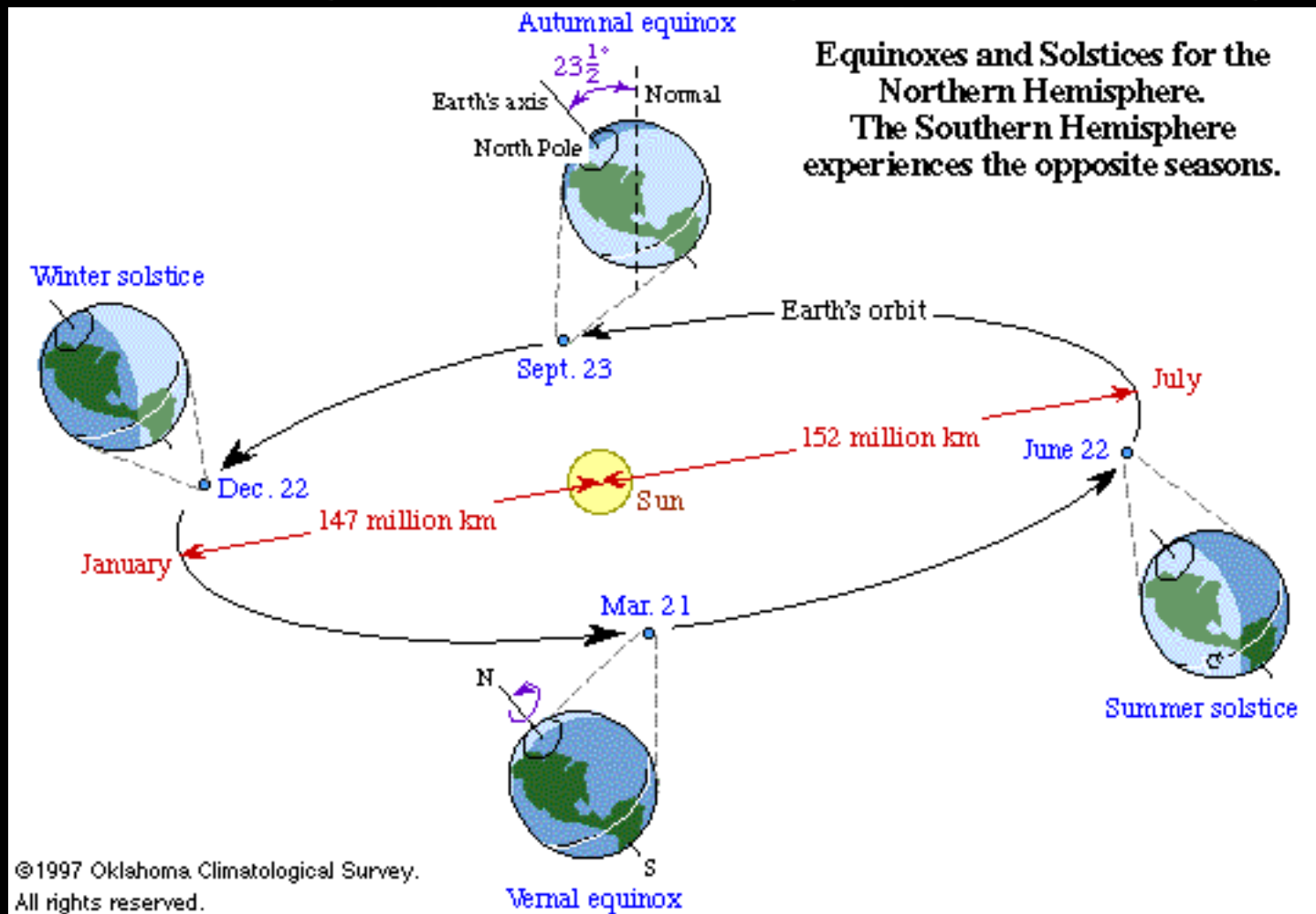
- Freigesetzte Energie = Gesamtenergie der Sonne in 10 Milliarden Jahren

Auflösung der Klausurfragen

- Warum ist es im Sommer wärmer als im Winter?
- **Antwort: “Kurzer Ausflug durch das Universum”, “Das Sonnensystem”**



Die Erdbahn



Kepler-Bahn

-

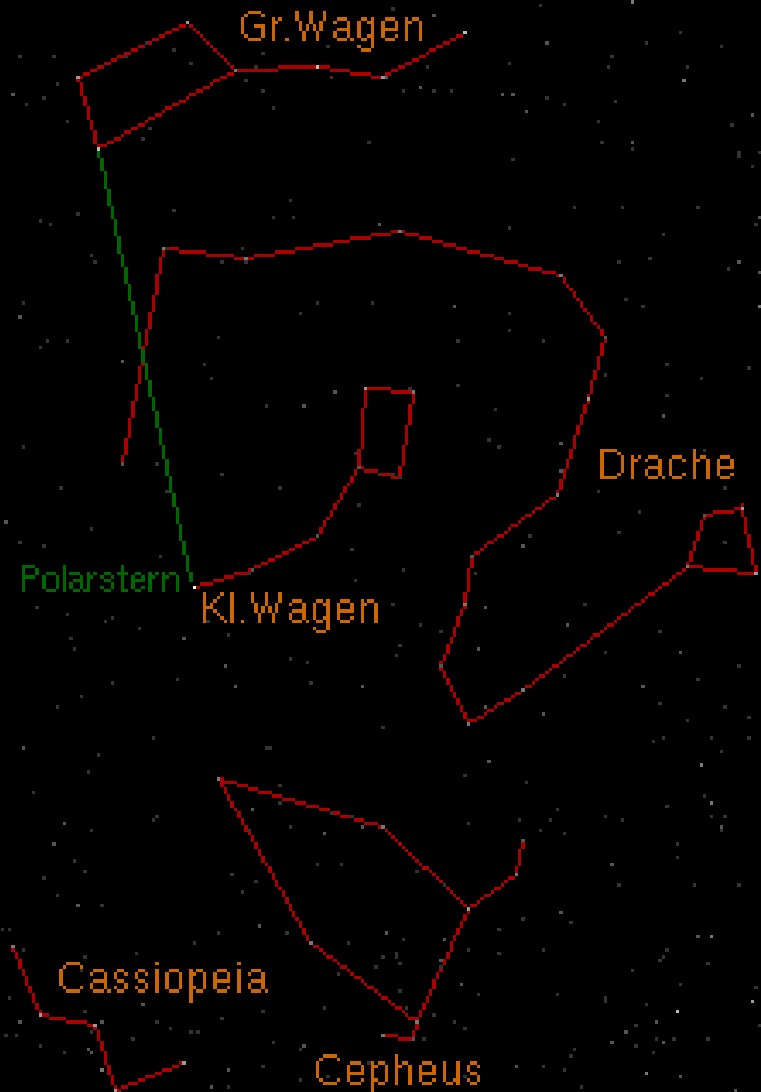
Jahreszeiten

Auflösung der Klausurfragen

- Nennen Sie drei Sternbilder, die in unseren Breiten das ganze Jahr über am Nachthimmel beobachtet werden können.
- **Antwort: “Sterne und Sternentwicklung”**

Die wichtigsten Sternbilder

- Zirkumpolare Sternbilder:
 - Immer sichtbar
 - Kleine Bärin
(Kleiner Wagen, Ursa Minor)
enthält Polarstern
 - Große Bärin
(Großer Wagen) und
Kassiopeia meist gut
sichtbar

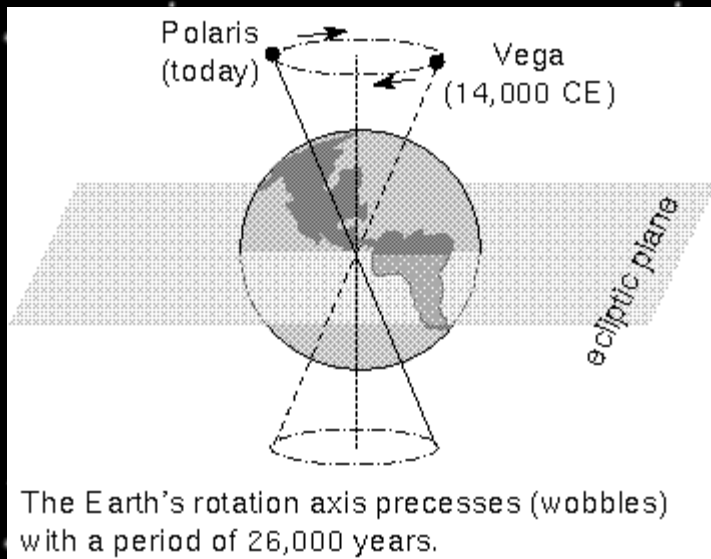


Auflösung der Klausurfragen

- Warum wurde α UMi (Ursa Minor = Kleine Bärin) von Hipparchos nicht als Polarstern erkannt?
- **Antwort: “Positions- und Entfernungsbestimmungen”**

Abweichungen in der Positionsbestimmung

- Präzession: 50.4" pro Jahr



Sonne & Mond versuchen: den Äquatorwulst in die Ekliptik zu kippen. Als Folge führt die Erdachse eine Präzessionsbewegung auf einem Kegel um den Pol der Ekliptik aus.

Die Erdachse präzidiert mit einer Periode von 26.000 Jahren

Auflösung der Klausurfragen

- Vergleichen Sie das Auflösungsvermögen des 100m-Radioteleskops in Effelsberg bei einer Wellenlänge von 20cm mit der eines optischen Amateurteleskops von 10cm Durchmesser. Um das Wievielfache unterscheiden sich beide?
- **Antwort: “Teleskope”**

Abbildungstheorie

• Auflösungsvermögen

- Fähigkeit eng beieinander liegende Objekte **getrennt** darzustellen
- begrenzt durch Beugung an der Öffnung
- Breite des Beugungsbildes:

$$d_0 = 1.22 \lambda k/f$$

• λ - Wellenlänge

- Mit Platten- und Blendengleichung

• **Auflösungsvermögen:**

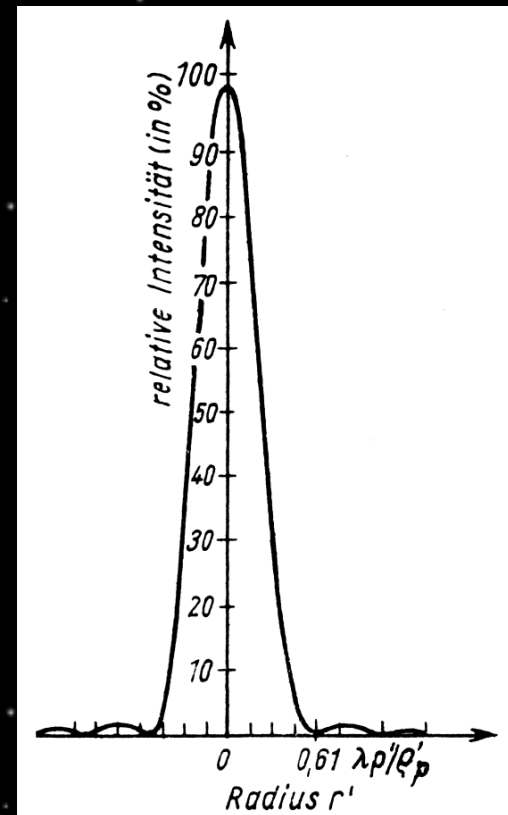
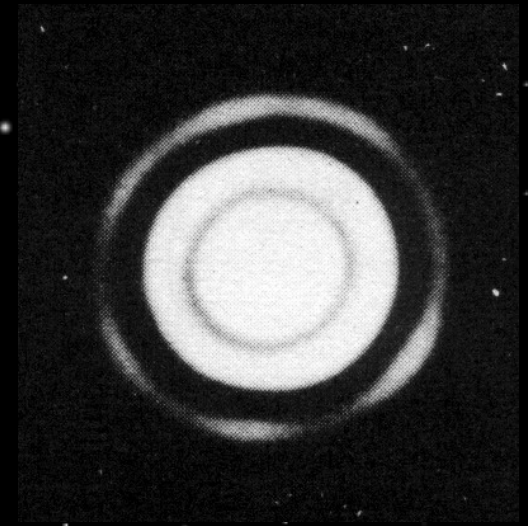
$$\begin{aligned}\Theta &= 1.22 \lambda/D \text{ [rad]} \\ &= 69.9^\circ \lambda/D\end{aligned}$$

- Bsp: Auge, $\lambda = 500\text{nm}$

$$\Rightarrow \Theta = 0.007^\circ = 0.4'$$

$d=6\text{cm}$ -Teleskop

$$\Rightarrow \Theta = 0.0006^\circ = 2''$$



Effelsberg



Radiowellenlängen:

λ von cm-dm statt $< \mu\text{m}$

Auflösungsvermögen:

$$\Theta = 1.22 \lambda / D \text{ [rad]}$$

=> Teleskope müssen riesig sein.

Die Oberflächengenauigkeit von $\lambda/20$ lässt sich leicht erreichen

Auflösung der Klausurfragen

- Standardkerzen sind Objekte mit recht genau bekannter Helligkeit.
 - Wozu werden Standardkerzen in der Astronomie gebraucht? Wie geht man dabei vor?
 - Nennen Sie zwei Beispiele astronomischer Standardkerzen und erklären Sie wodurch sich deren bekannte Helligkeit ergibt.
- **Antwort: “Positions- und Entfernungsbestimmungen”, “Spätstadien der Sternentwicklung”**

Entfernungsbestimmung

Wie misst man Entfernungen?

- Licht ist die (fast) einzige Informationsquelle
 - Wir blicken immer zurück in die Vergangenheit!
 - In einigen Fällen sehen detektieren wir Photonen, die vor einigen Milliarden Jahren ausgesandt worden sind.!!
- „Standardkerzen“ spielen eine wichtige Rolle
 - Quelle bekannter Leuchtkraft, wie z.B. die Sonne
 - Gelingt es einen Stern wie die Sonne in großen Entfernungen wiederzuerkennen und seine scheinbare Helligkeit zu messen, dann kann die Entfernung bestimmt werden.

Absolute Helligkeit

- Die scheinbare Helligkeit
 - Kombiniert tatsächliche Leuchtkraft
 - Entfernung: $I \sim 1/r^2$
- Festlegung eines Nullpunktes bei $r = 10\text{pc} = 32.6\text{Lichtjahre}$
- Die absolute Helligkeit
 - Helligkeit die Stern hätte, wenn er 10pc entfernt wäre

$$M = m - 5 \lg r + 5$$

- Beschreibt tatsächliche Leuchtkraft des Sterns
- Bsp: Sonne $M = 4^m.87$

Cepheiden-Methode I

(H. Leavitt, 1908)



Standardkerzen: Sterne, die die gleiche intrinsische Helligkeit (Leuchtkraft) haben, unabhängig von der Entfernung.

Pulsierende Sterne:

- Helligkeit variiert periodisch: **Cepheiden**

Riesensterne mit $L=1000$ bis $10000 L_{sol}$, He-Brennen im Innern, sehr heiß und hell !

Pulsationen: Zyklus:

- *Helium ionisiert in äußeren Schichten,*
- *Lichtstreuung an Elektronen, optisch dick, der Stern bläht sich auf,*
- *durch die größere Oberfläche kann er sich effektiver abkühlen,*
- *er kontrahiert, Helium rekombiniert, optisch dünn,*
- *der Stern kontrahiert noch stärker*

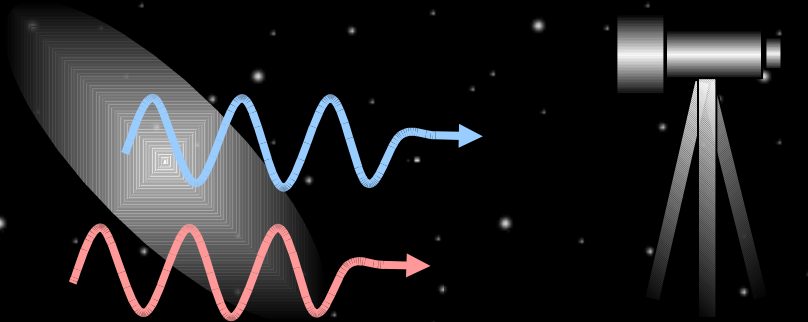
Absolute Leuchtkraft ist proportional zur Periodenlänge: L proportional P

Tully-Fisher Relation

Die Leuchtkraft von Spiralgalaxien ist korreliert mit der Geschwindigkeitsdispersion der HI-Emission: $L \sim v_{\max}^4$

$d \leftarrow L_{\text{abs}}$ und L_s über $1/r^2$ -Gesetz

$\leftarrow \approx L_{\text{abs}} \leftarrow M_g \leftarrow v_{\text{rot}}$



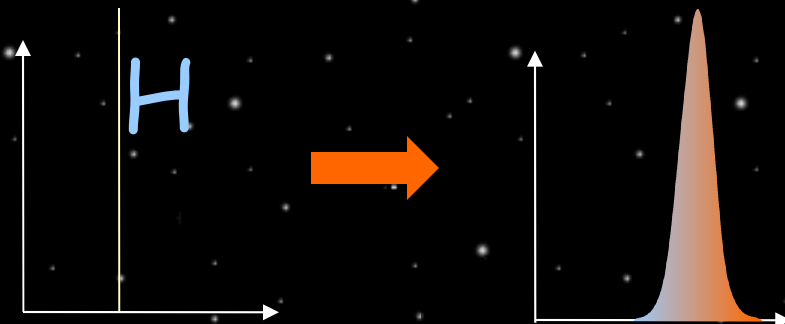
Warum funktioniert das?

1) Sterne & Gas drehen sich um galaktisches Zentrum $F_Z = F_G$

$$v^2 / r - g M(r) / r^2 = 0$$

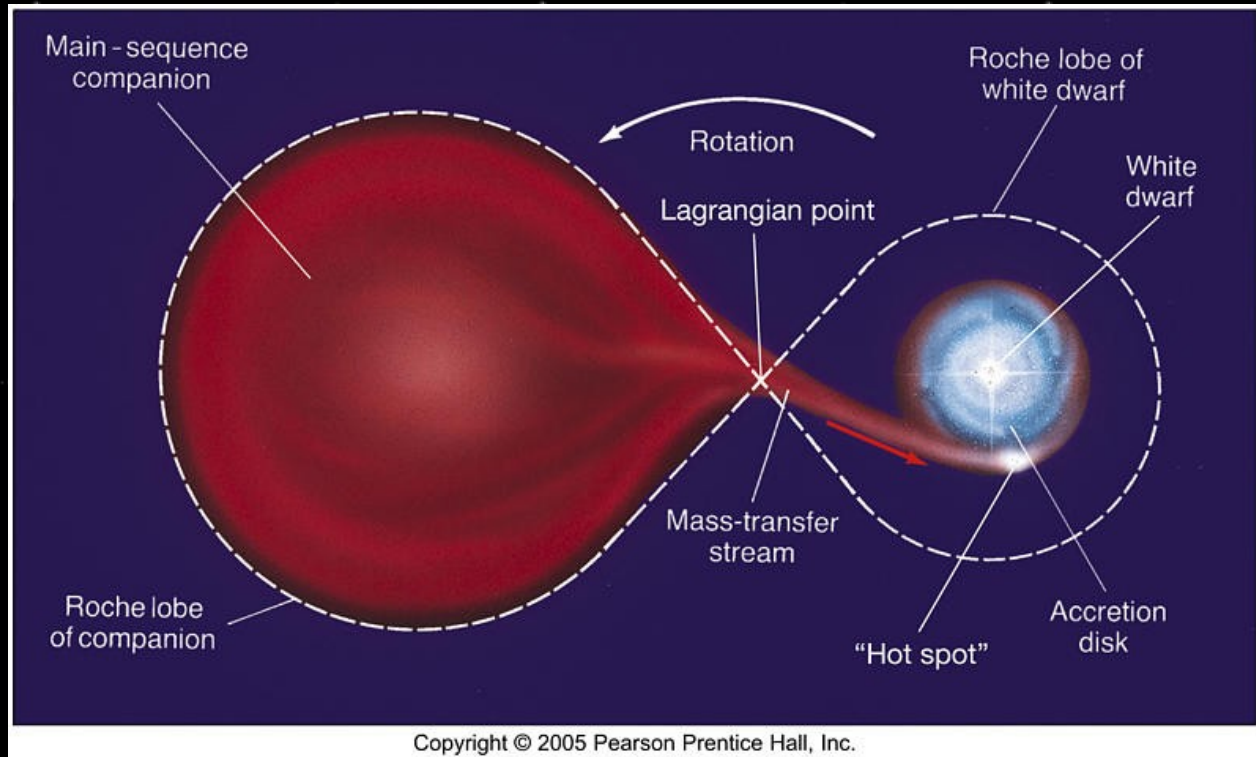
1) Sterne & Gas drehen sich um galaktisches Zentrum: $F_Z = F_G$

2) Sterne ($M_{(r)}$) leuchten.



Supernova-Typen

Type Ia: Weißer Zwerg nimmt Masse von Begleiter auf



- Hervorragende "Standardkerze" durch genau definierte Bedingungen

Auflösung der Klausurfragen

- Jupiter hat bei einem Abstand zur Erde von 5 Astronomischen Einheiten eine scheinbare Helligkeit von $-2^m.4$.
 - Wie hell wäre ein frei stehender Jupiter in einer Entfernung von einer halben Parallaxensekunde?
 - Könnte man ihn damit noch mit bloßem Auge erkennen? Begründen Sie die Antwort.
- **Antwort: “Positions- und Entfernungsbestimmungen”, “Sterne und Sternentwicklung”**

Sternparameter

- Die scheinbare Helligkeit
 - Historische Skala mit
 - 1^m für hellste Sterne und
 - 6^m für schwächste Sterne
 - m = magnitudo (Größenklasse)
 - Empfindlichkeit der Wahrnehmung logarithmisch
 - Ein Unterschied in der Intensität zwischen 1 und 2 scheint gleich groß wie der zwischen 2 und 4 oder zwischen 4 und 8.
- Logarithmische Helligkeitsskala:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \lg(I_1 / I_2)$$

Absolute und scheinbare Helligkeit m

Definition der Helligkeitsskala:

Scheinbare Helligkeit m (Energie pro Zeit und Fläche bzw. Energiestrom)
gerechnet in Größenklassen: m = 1^m Stern 1. Größe

$$m_A - m_B = -2.5 \log_{10} (I_A / I_B)$$

(historisch motivierte Definition
der Größenklassen)

Scheinbar hellster Stern: Sonne

Schwächster noch messbarer Stern: 50^m Unterschied: entspricht $I_1/I_2=10^{20}$!!

(logarithmische Definition ist sicher sinnvoll)

Absolute Helligkeit M:

(1) in (2)

$$m_B - m_A = 2.5 \log_{10} (d_B / d_A)^2$$

m(10pc) definiert als M:

$$d_A = 10 \text{ pc}, m_A = M_A$$

$$m - M = 5 \log_{10} (d / 10\text{pc})$$

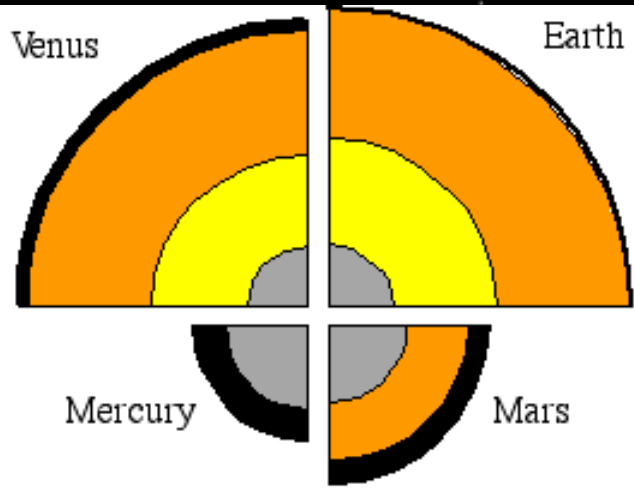
(Entfernungsmodul)

$$d = 10^{0.2 (m - M + 5)}$$

Auflösung der Klausurfragen

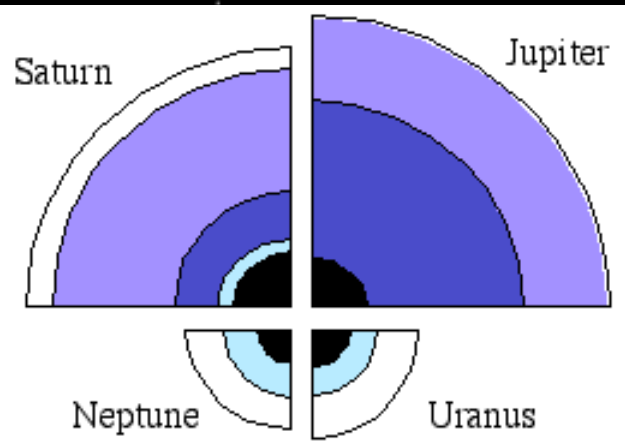
- Worin unterscheiden sich im Wesentlichen der Aufbau der inneren Planeten (bis Mars) von dem der äußeren Planeten?
- **Antwort: “Das Sonnensystem”, “Sternentstehung”**

Im Vergleich



- solid iron core
- silicate mantle
- liquid iron core
- silicate crust

Terrestrial planet interiors to same scale



- silicate core
- ice core
- liquid metallic hydrogen
- liquid hydrogen
- gaseous hydrogen

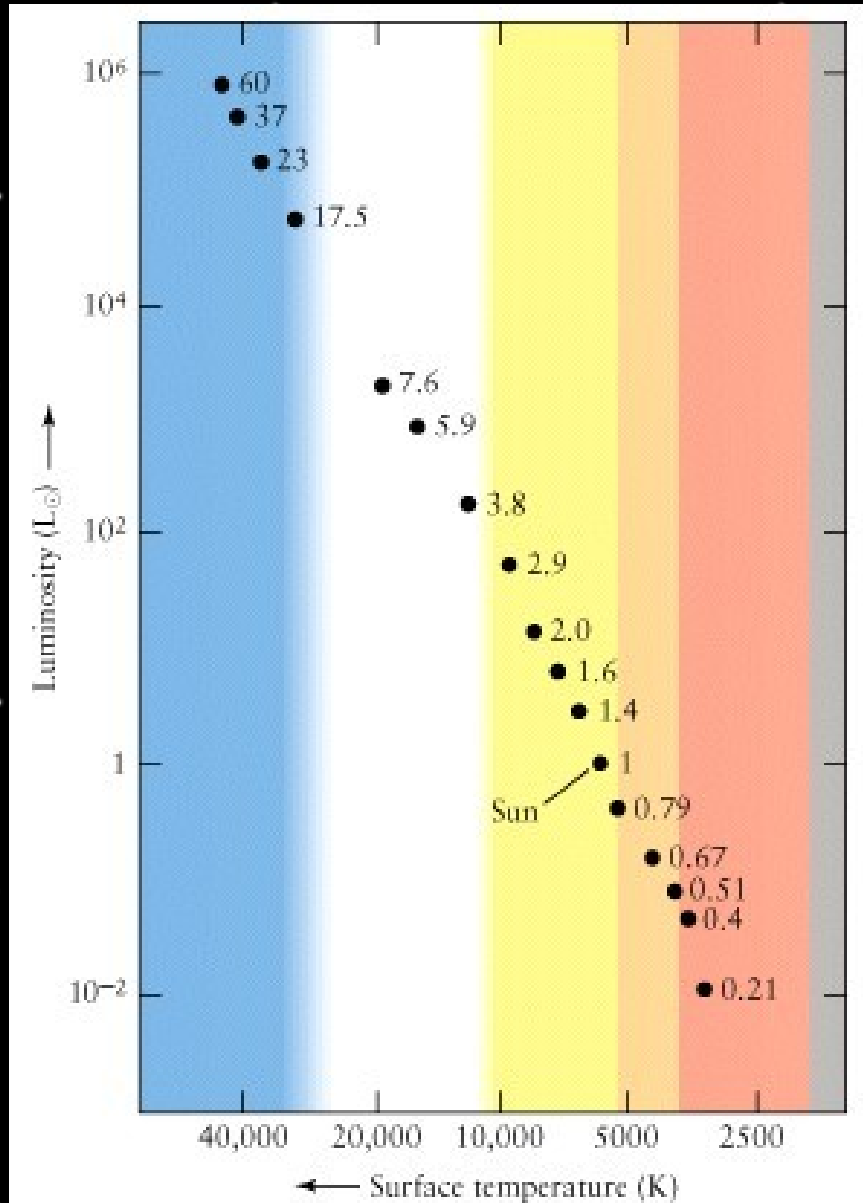
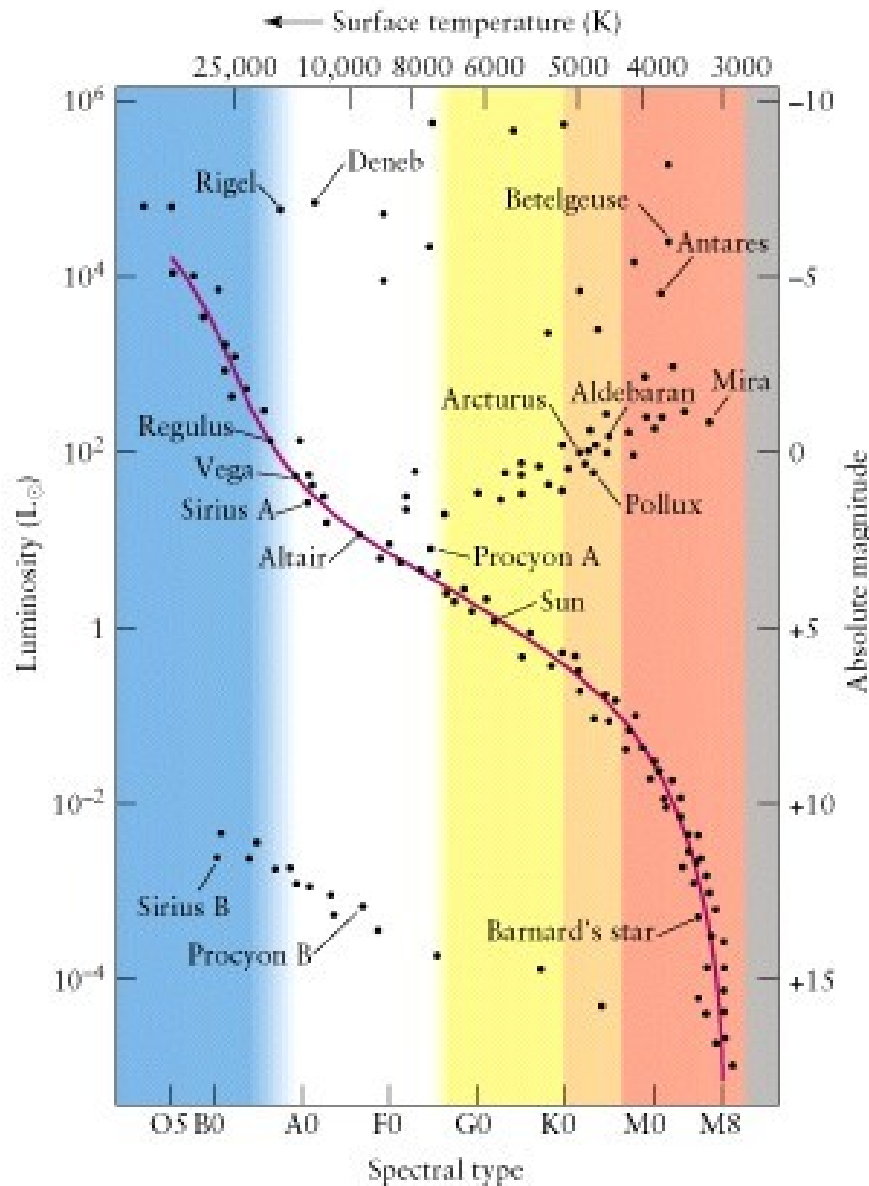
Jovian planets interiors to same scale



Auflösung der Klausurfragen

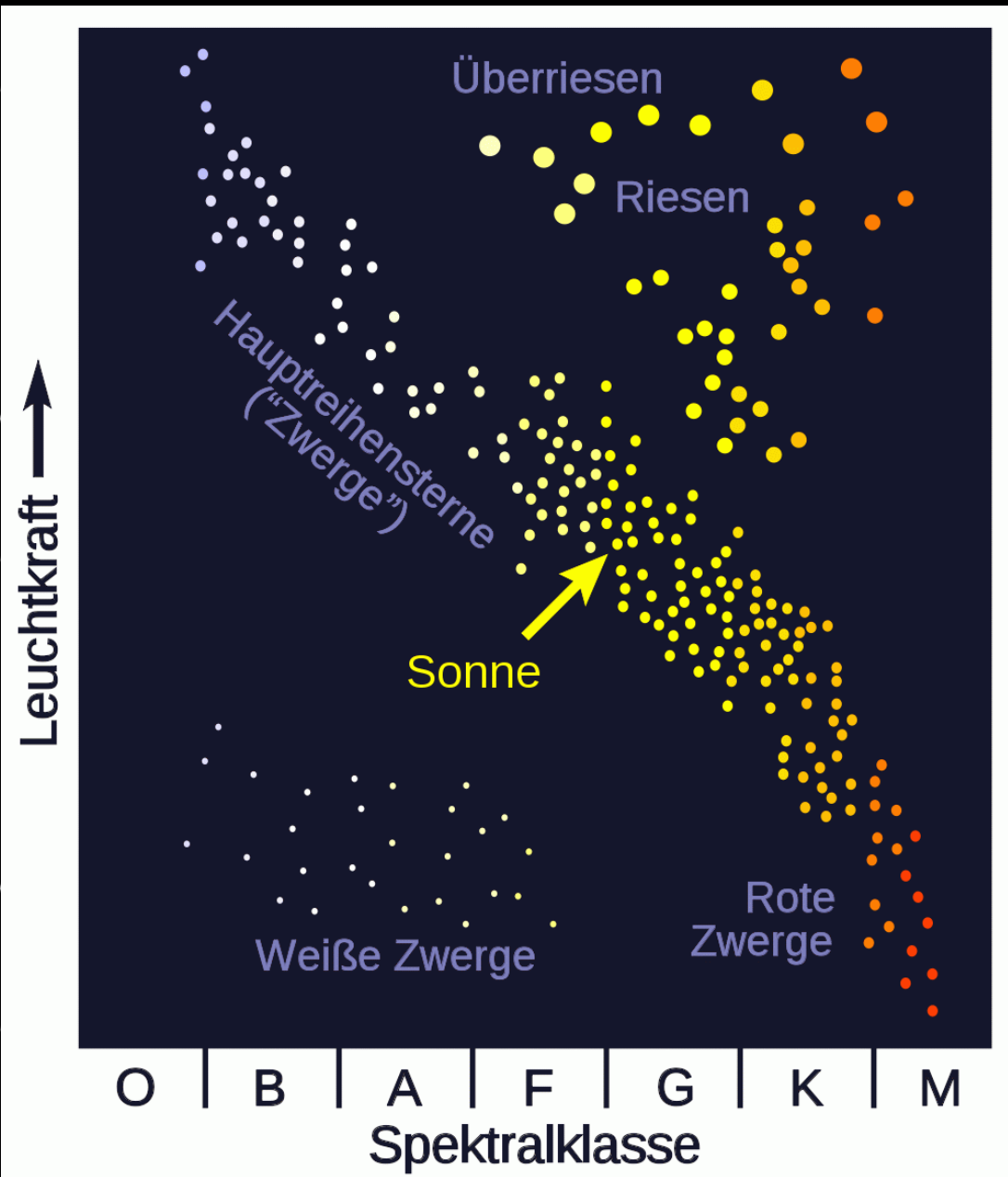
- Skizzieren Sie das Hertzsprung-Russel-Diagramm, beschriften sie die Achsen (Richtung nicht vergessen), zeichnen Sie die Hauptreihe und drei typische Bereiche aus den Früh- und Spätstadien der Sternentwicklung ein.
- **Antwort: “Sterne und Sternentwicklung”, “Spätstadien der Sternentwicklung”, “Sternentstehung”**

Sterntemperatur und Sternmasse

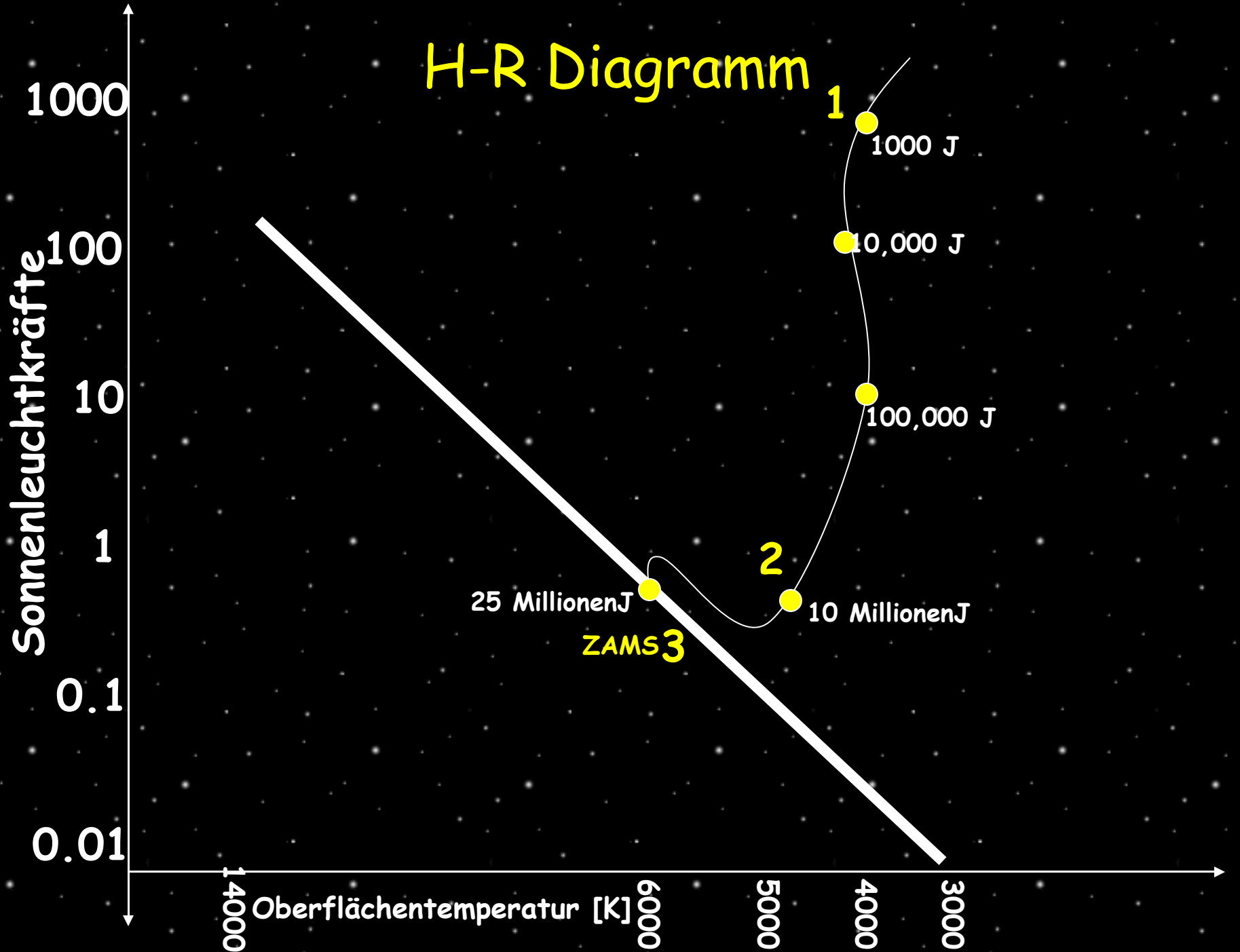


Das Hertzsprung-Russel-Diagramm

- Ordnung nach Leuchtkraft und Spektralklasse
- Sterne bilden klare Gruppen
- Entsprechen verschiedenen Massen oder Entwicklungsstufen



H-R Diagramm

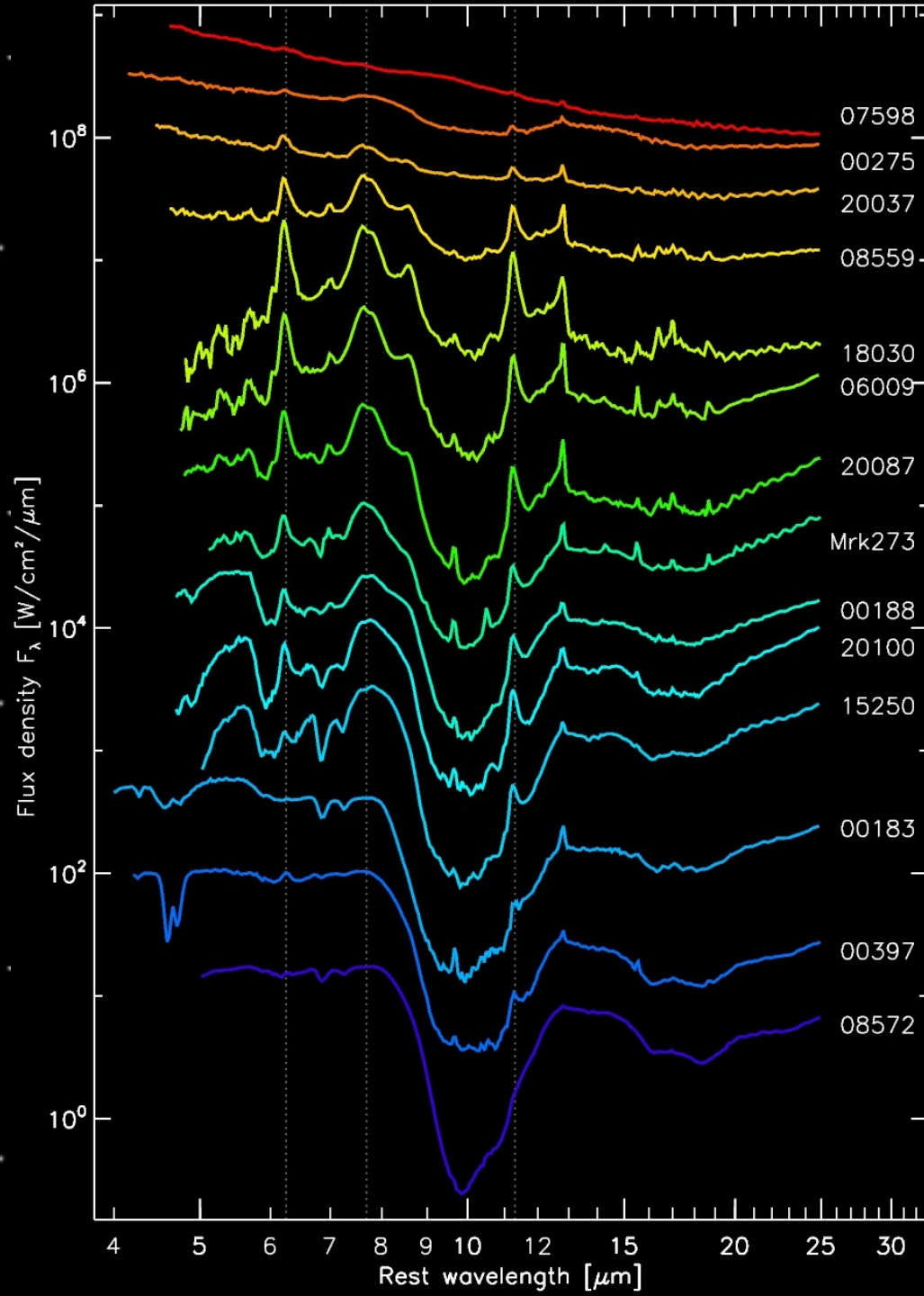


Auflösung der Klausurfragen

- Interstellare Materie macht sich als “Störung” des Strahlungsspektrums entfernter astronomischer Objekte bemerkbar. Besonders (aber nicht nur) im Infrarotbereich erscheinen in den beobachteten Spektren charakteristische schmale Linien und breite Banden.
 - Wodurch werden diese beiden Arten spektraler Signaturen verursacht?
 - Nennen sie für beide Arten jeweils drei typische interstellare Materialien, die so identifiziert werden können.
 - Wann treten die Signaturen als Emissionsprofile und wann als Absorptionsprofile auf?
 - Wie lässt sich aus solchen Spektren die Geschwindigkeit der interstellaren Wolken relativ zum Beobachter bestimmen?
- **Antwort: “Interstellare Materie”, “Sterne und Sternentwicklung”**

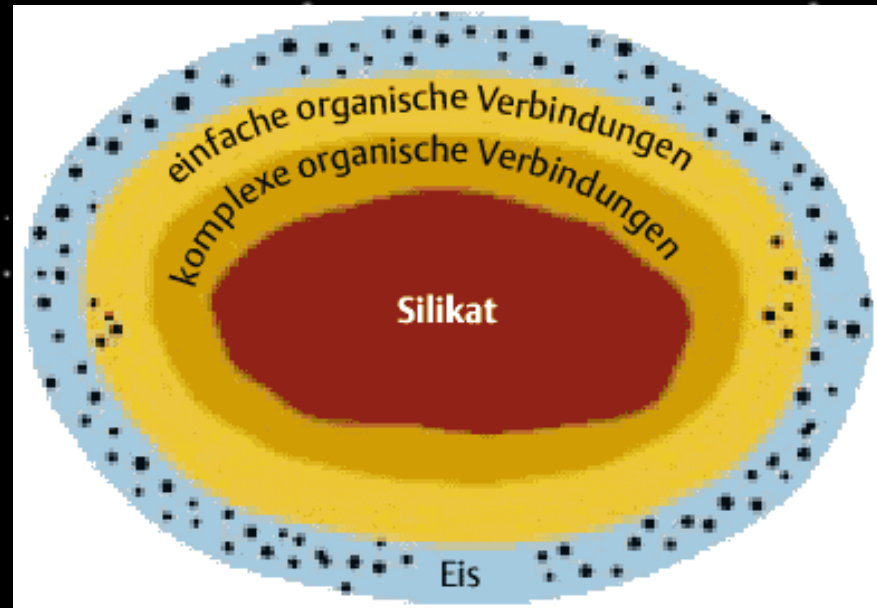
Infrarot-Spektren

- Mischung von Emission und Absorption

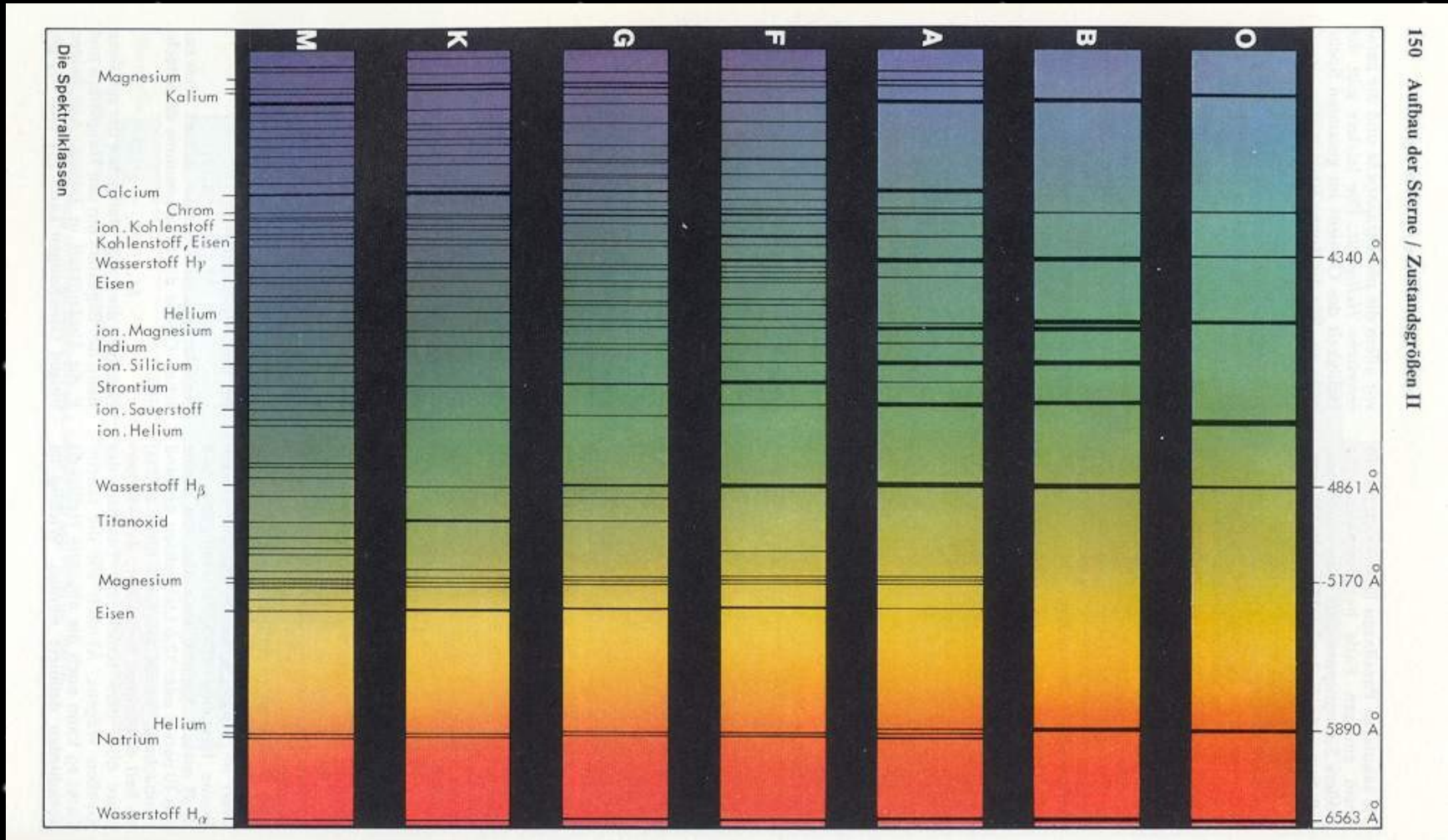


Zusammensetzung

- 4 Komponenten:
 - Silikate
 - Kohlenstoff (teils amorph teils graphitisch)
 - Eismantel
 - PAHs



Oh be a fine girl, kiss me



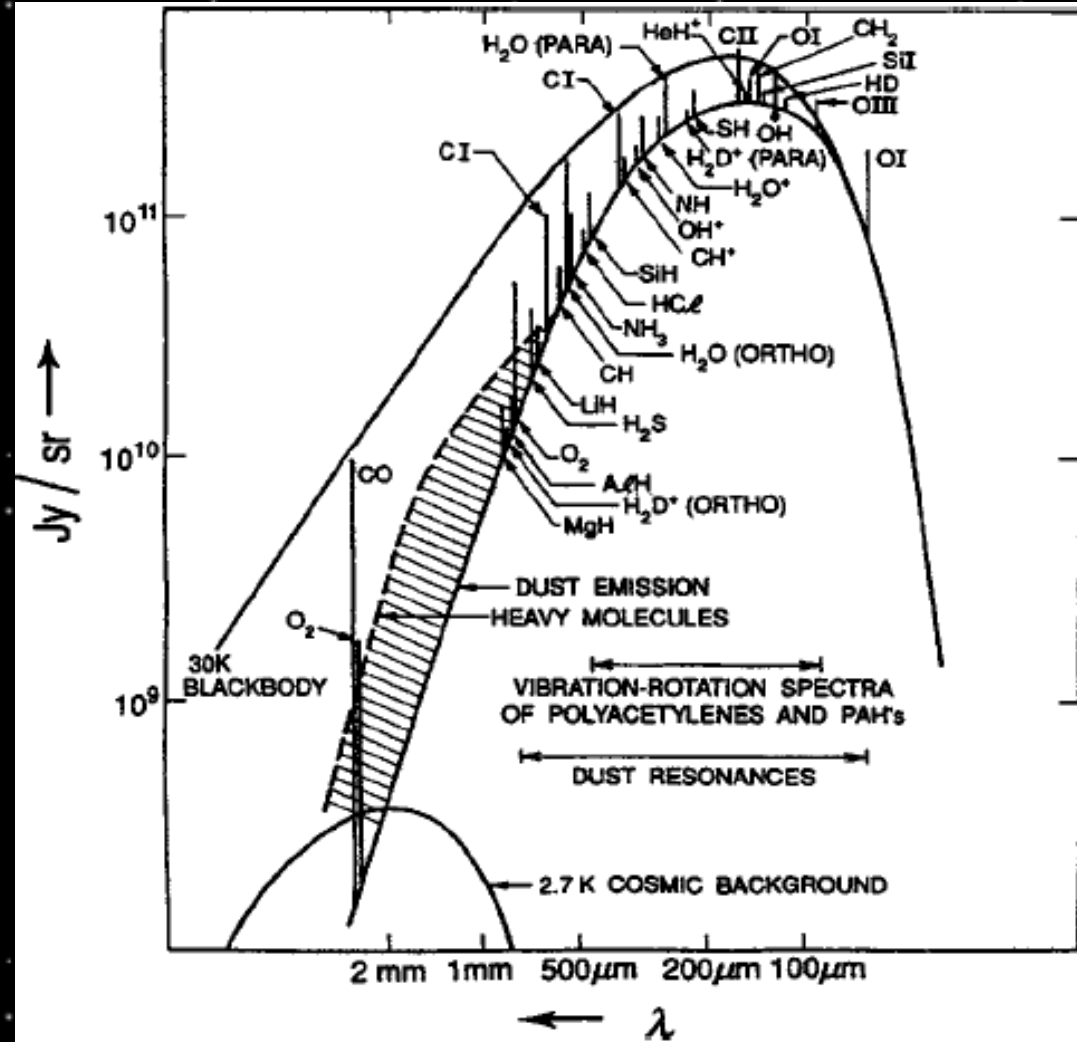
Spektralklassen = Temperaturskala: 2500K - 30000K
Unterklassen mit Nummerierung von 0 bis 9

Interstellares Gas

- Emissionslinien im Infrarot und Radiobereich

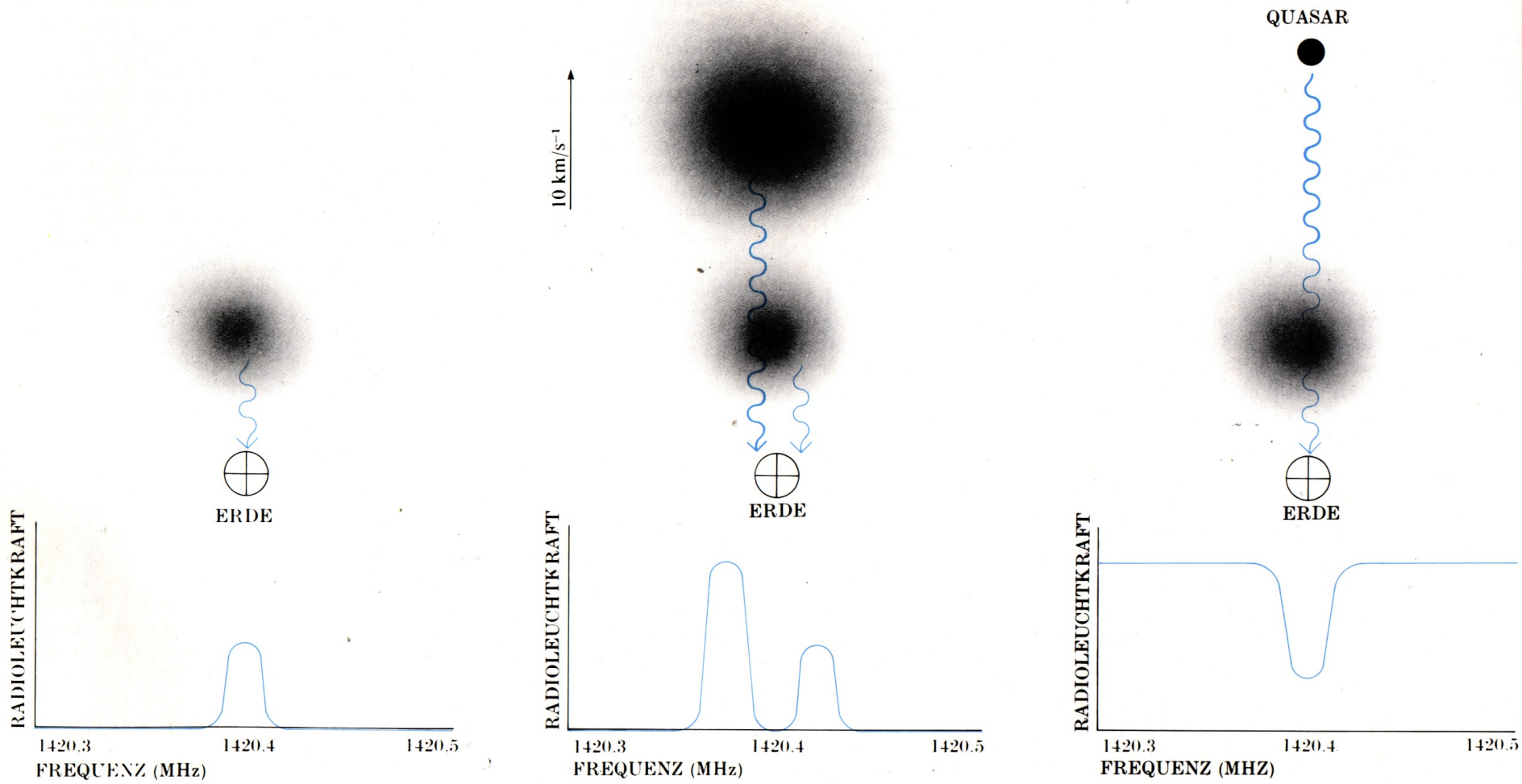
Gesamtspektrum einer Galaxie (M82) im IR-Bereich

- Staub- und Gasemission



HI-Beobachtungen

- Dopplerverschiebung der Linie erlaubt Geschwindigkeitsmessungen



Auflösung der Klausurfragen

- Ein Astronom entdeckt ein Doppelsternsystem mit einem masseärmeren roten Riesen und einem massereicheren Hauptreihenstern. Erklären Sie, warum der Astronom das als paradox ansieht? Geben Sie eine wahrscheinliche Erklärung für das Paradoxon.
- **Antwort: “Sterne und Sternentwicklung”, “Spätstadien der Sternentwicklung”**

Altersbestimmung durch Sternhaufen

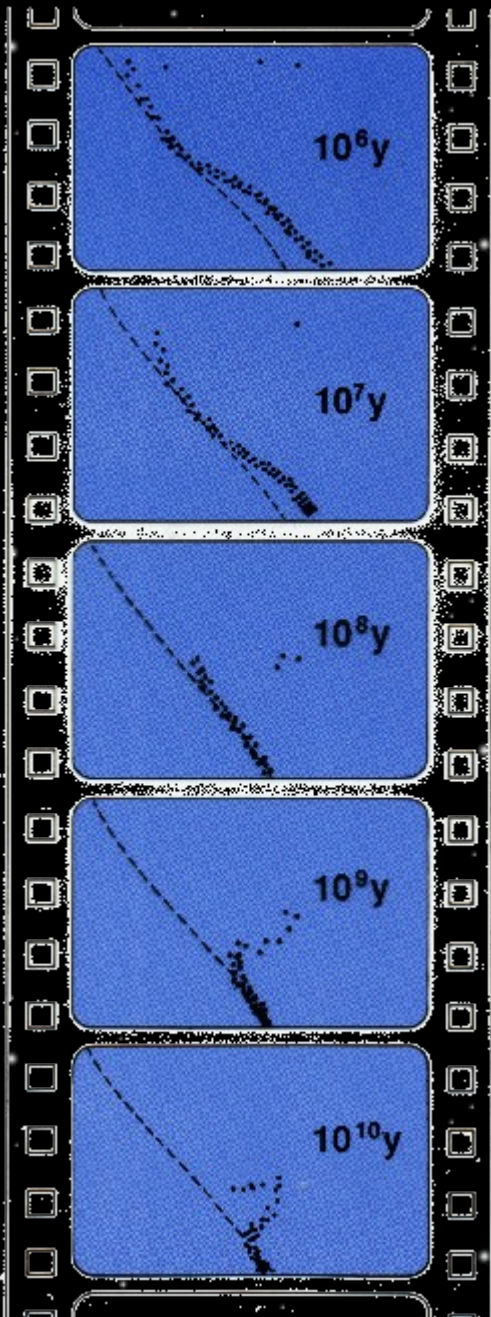
- Alle Sterne eines Haufens sind etwa gleichzeitig entstanden
 - Entsprechend ihrer Masse entwickeln sie sich unterschiedlich schnell

| Masse [M_{\odot}] | Spektral- typ | Kontraktion z. HR | Haupt- reihe | Riese | Roter Riese |
|--------------------------|------------------|----------------------|-----------------|-------|----------------|
| 30 | O5 | 0,02 | 4,9 | 0,55 | 0,3 |
| 15 | B0 | 0,06 | 10 | 1,7 | 2 |
| 9 | B2 | 0,2 | 22 | 0,2 | 5 |
| 5 | B5 | 0,6 | 68 | 2 | 20 |
| 3 | A0 | 3 | 240 | 9 | 80 |
| 1,5 | F2 | 20 | 2000 | 280 | |
| 1,0 | G2 | 50 | 10000 | 680 | |
| 0,5 | M0 | 200 | 30000 | | |
| 0,1 | M7 | 500 | 10^7 | | |

Der "Knick" in der Sternhaufen-Entwicklung

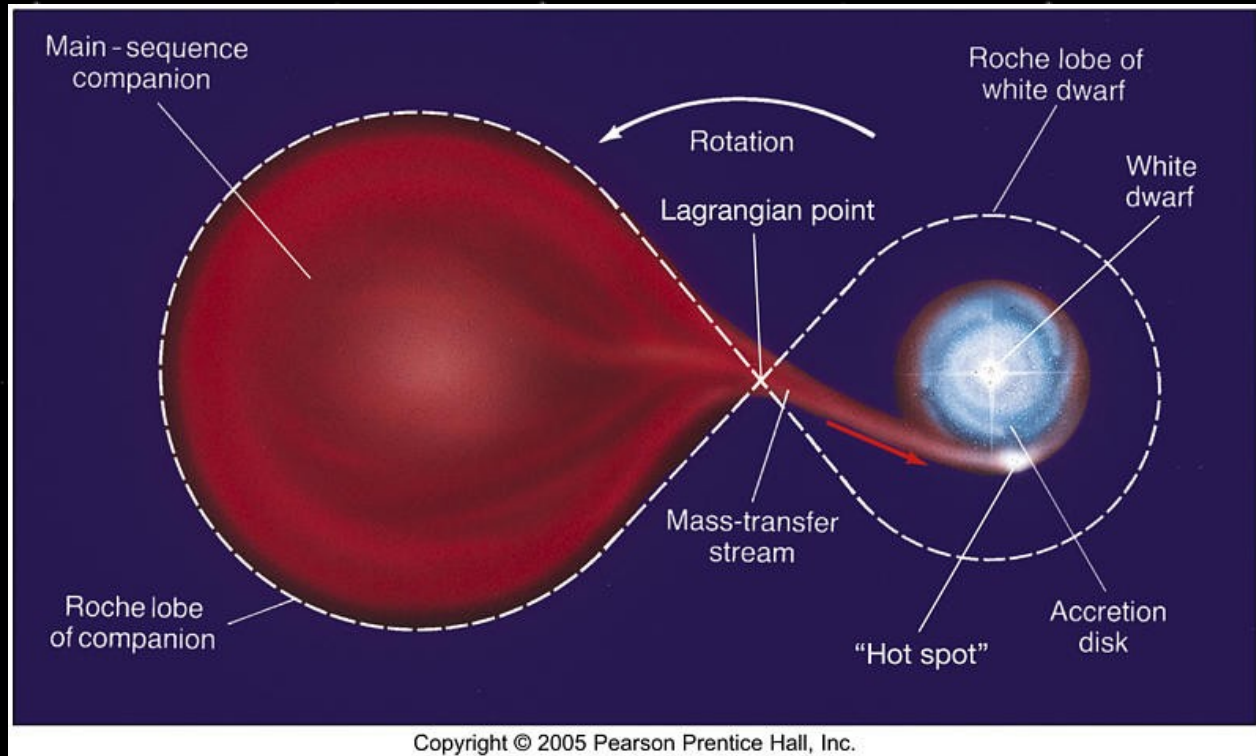
Der Knick in der HR markiert den Zeitpunkt, zu dem die Sterne ihren Wasserstoff aufgebraucht haben und sich in Richtung der roten Riesen bewegen.

Aus der Knickstelle kann somit das Alter des Sternhaufens abgelesen werden.



Supernova-Typen

Type Ia: Weißer Zwerg nimmt Masse von Begleiter auf



- Hervorragende "Standardkerze" durch genau definierte Bedingungen

Auflösung der Klausurfragen

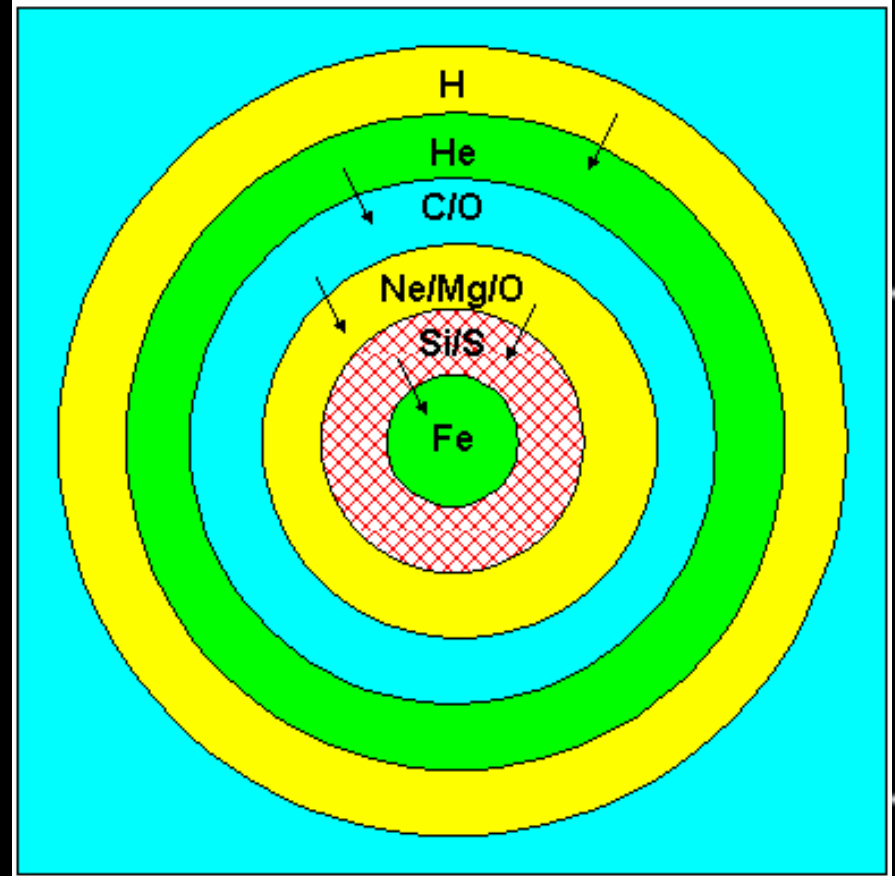
- Wie hängt die Metallizität sonnenähnlicher Sterne in der Milchstraße von ihrem Alter ab und warum?
- **Antwort: “Sterne und Sternentwicklung”, “Spätstadien der Sternentwicklung”, “Die Milchstraße”**

Supernova-Typen

Type II: Eisenkernzusammenfall nach Schalenbrennen

Sobald entarteter Kern groß genug geworden ist, kollabiert er.

Genauer Verlauf abhängig von Restschalen



Type Ib, Ic: wie Typ II aber H-Hüllen vorher weggeblasen

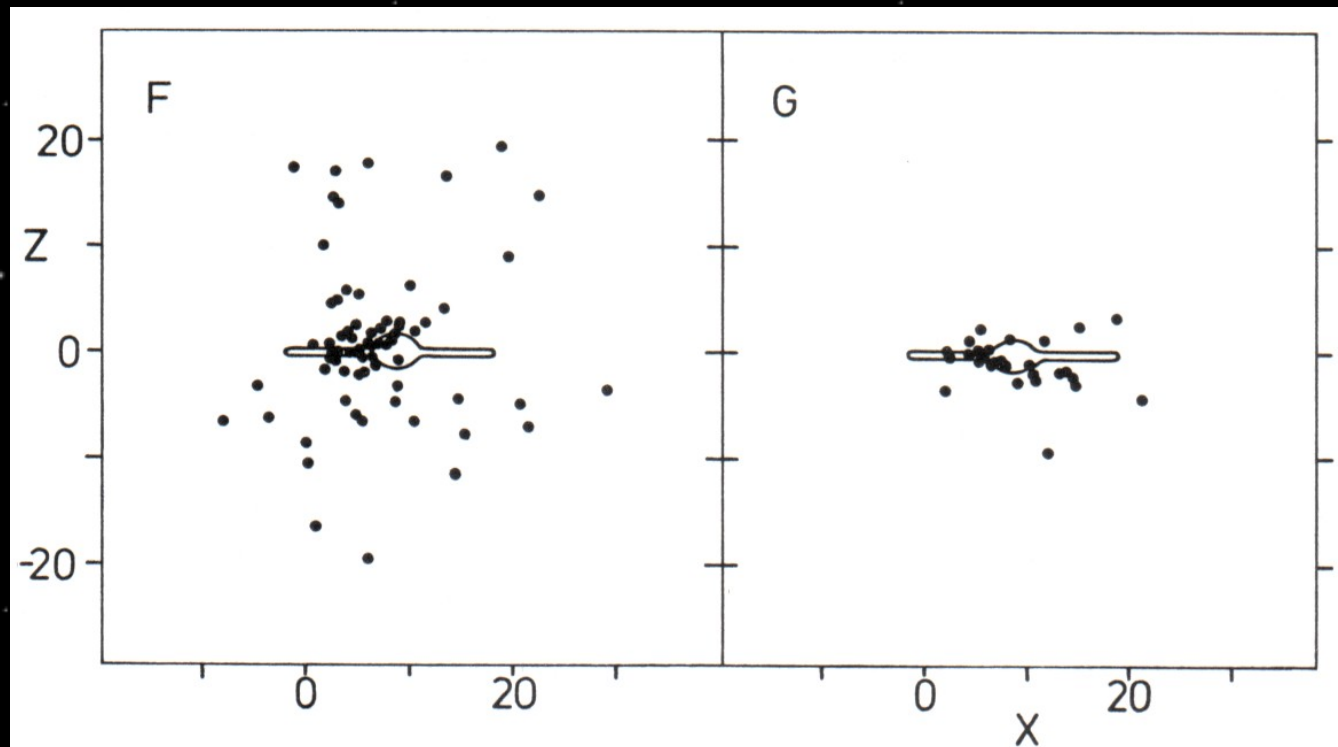
Verlauf der Typ-II SN-Explosion ($25M_{\odot}$ -Stern)

- Kern fällt zusammen wenn Chandrasekhar-Masse durch Fe Ablagerung erreicht ist: 0.2 s , $T=5 \times 10^9 \text{ K}$
- Kern wandelt sich um in Neutronenstern: Unverdichtbar
→ Core bounce:
 - Die einstürzenden Schalen prallen ab
 - Neutrinos und Gammastrahlen aus dem Kern sprengen die Hülle explosionsartig ab
- Supernova leuchtet auf um Faktor 10^8
- $20 M_{\odot}$ der Hülle werden abgeworfen
- In der Hülle werden durch den Druck der Neutrinos und der Schockwelle schwere Elemente gebildet

**Alle Elemente schwerer als Eisen stammen aus
Supernova-Explosionen**

Verteilung der Kugelsternhaufen

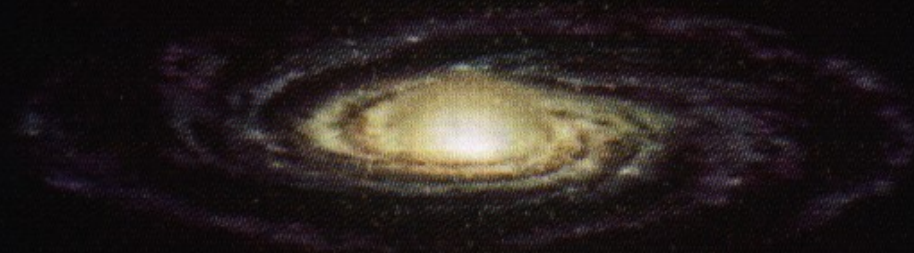
Unterschiedliche Verteilung von Kugelsternhaufen verschiedenen Alters im Halo



Verteilung der Kugelhaufen mit Spektraltyp F (metallarm) und G (metallreich).
Ursprung: Sonne, Einheiten: kpc

Metallreiche Haufen sind zur Scheibe hin konzentriert.

Entstehung der Milchstraße



Milliarden Jahre später sorgt der Stern-Gas-Stern-Zyklus für anhaltende Sternentstehung in der Scheibe. Das Fehlen von Gas im Halo verhindert die Sternentstehung außerhalb der Scheibe.

Auflösung der Klausurfragen

- Was sind braune Zwerge?
- **Antwort: “Sterne und Sternentwicklung”,
“Sternentstehung”**

Das Russell-Vogt Theorem

$$M_* < 0.02 M_\odot$$

leichte Erwärmung durch Gravitationsdruck

$$0.02 < M_* < 0.085 M_\odot$$

Brauner Zwerg: $\sim 3,000,000\text{K}$ im

Kern, H-Brennen wird nie erreicht

$$0.085 < M_* < 0.4 M_\odot$$

masseärmste Sterne:

He-Brennen wird nie erreicht

$$0.4 < M_* < 3 M_\odot$$

massearme Sterne: $H \rightarrow He$ (p-p

Kette), $He \rightarrow C$ (Triple- α)

$$M_* > 3 M_\odot$$

massereiche Sterne: $H \rightarrow He$ (CNO

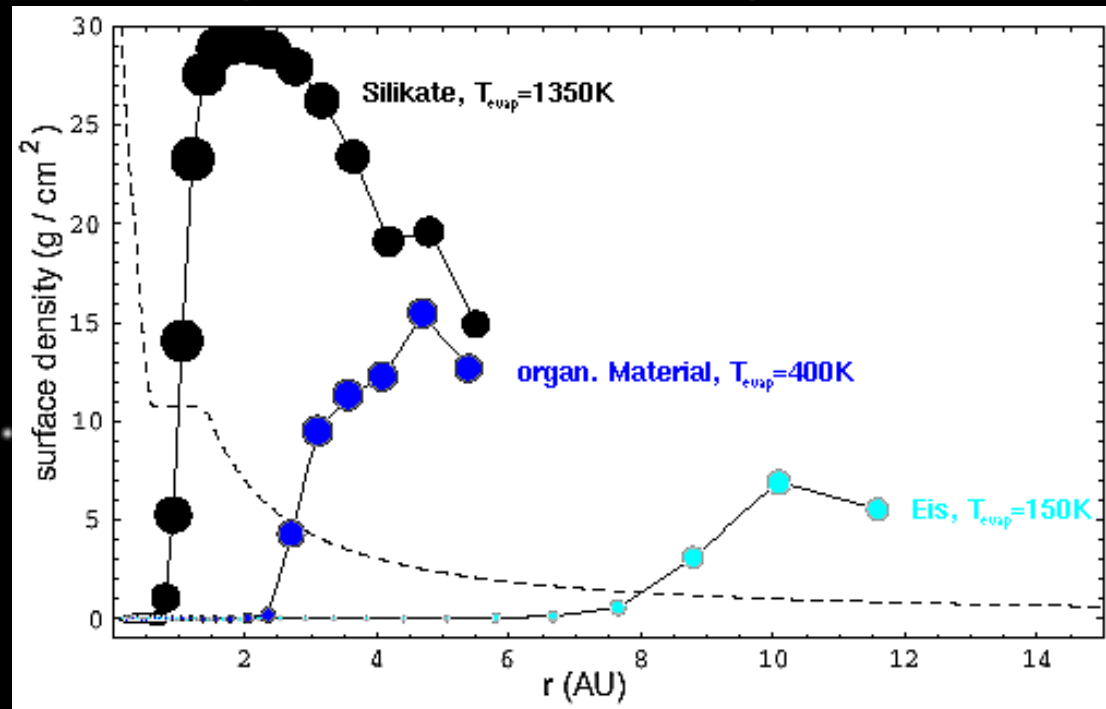
Kette), $He \rightarrow C$, $C \rightarrow Ne, Na, Mg, O$

Auflösung der Klausurfragen

- Welche Rolle spielt die „Schneegrenze“ bei der Planetenentstehung?
- **Antwort: “Sternentstehung”**

Die Schneegrenze

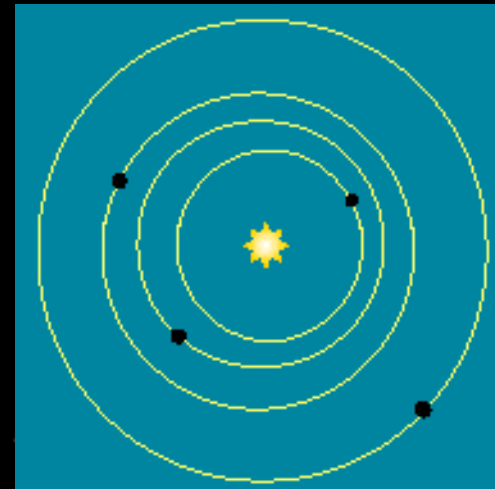
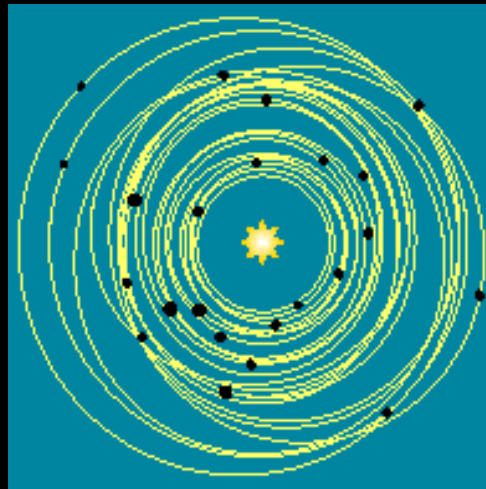
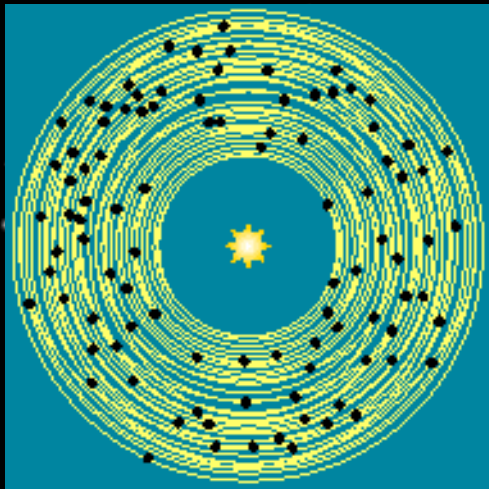
- Teilchen können in der Scheibe verdampfen und kondensieren



- Nahe am Zentralstern überleben nur Silikate als Staubteilchen. Jenseits der "**Schneegrenze**" kommt ein großer Anteil von Eis dazu (Kornet et al. 2001).

Planetenentstehung

- Zwischen 1 und 10 km wird die gravitative Anziehung zwischen den Planetesimalen dominant.
- Aus 10^{14} etwa km-großen Planetesimalen werden wenige Planeten.
- Schnelle Planetenentstehung nur jenseits der "Schneegrenze".

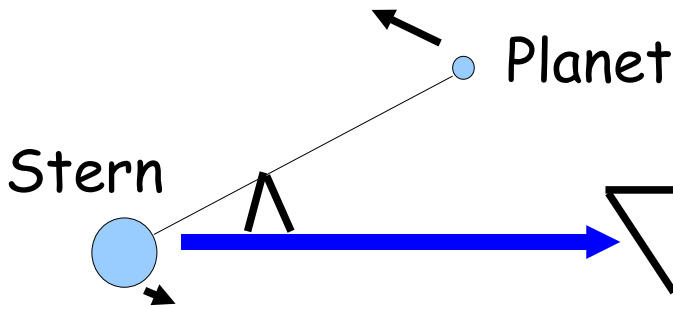


Auflösung der Klausurfragen

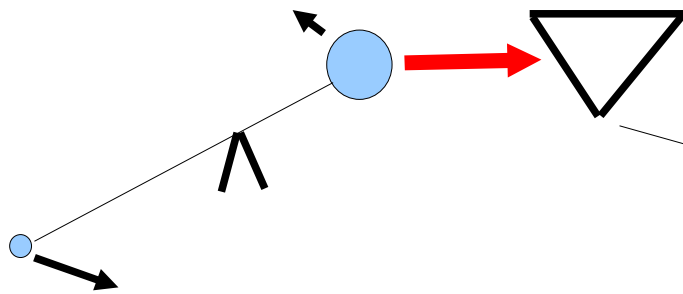
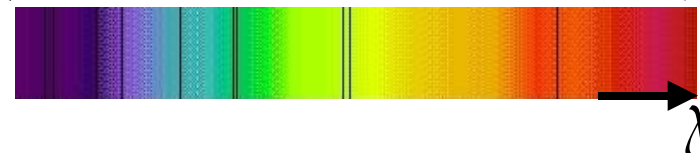
- Mit welcher Methode wurden bisher die meisten extrasolaren Planeten gefunden? Erläutern Sie deren Funktionsprinzip.
- **Antwort: “Extrasolare Planeten”, “Sterne und Sternentwicklung”**

2. Die Suchmethode: Dopplerspektroskopie

Position der Spektrallinien in Ruhe:



Blauverschiebung



Rotverschiebung



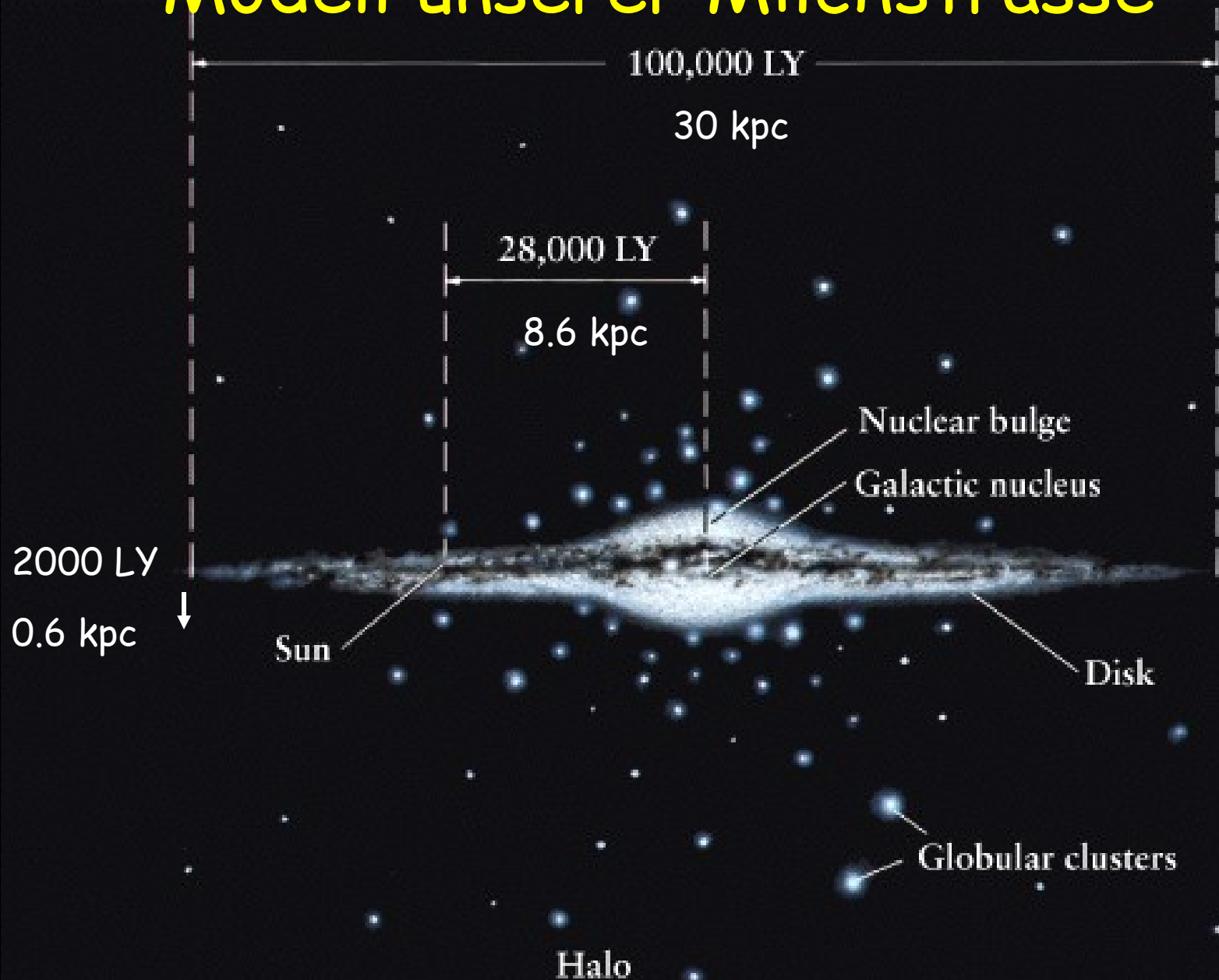
Dopplereffekt:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = 10^{-8} \Rightarrow v = 3\text{m/sec}$$

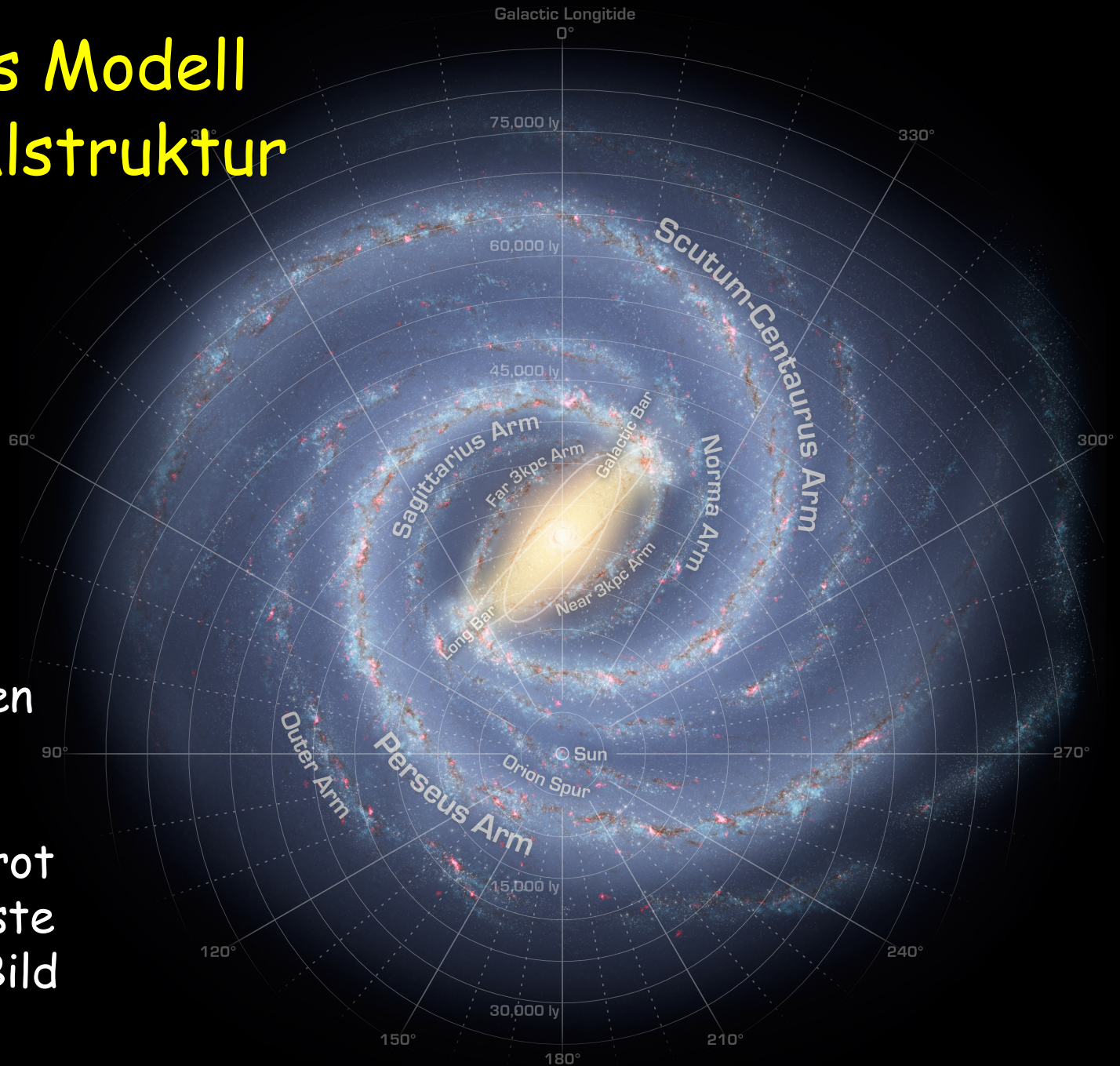
Auflösung der Klausurfragen

- Geben Sie in zwei Skizzen an, wie unsere Milchstraße aussähe, wenn man sie von Außen betrachten könnte, einmal entlang ihrer Ebene und einmal senkrecht dazu. Beschriften Sie wichtige Komponenten der Milchstraße und zeichnen sie die ungefähre Lage der Sonne ein.
- **Antwort: “Die Milchstraße”, “Galaxien”**

Modell unserer Milchstrasse



Aktuelles Modell der Spiralstruktur



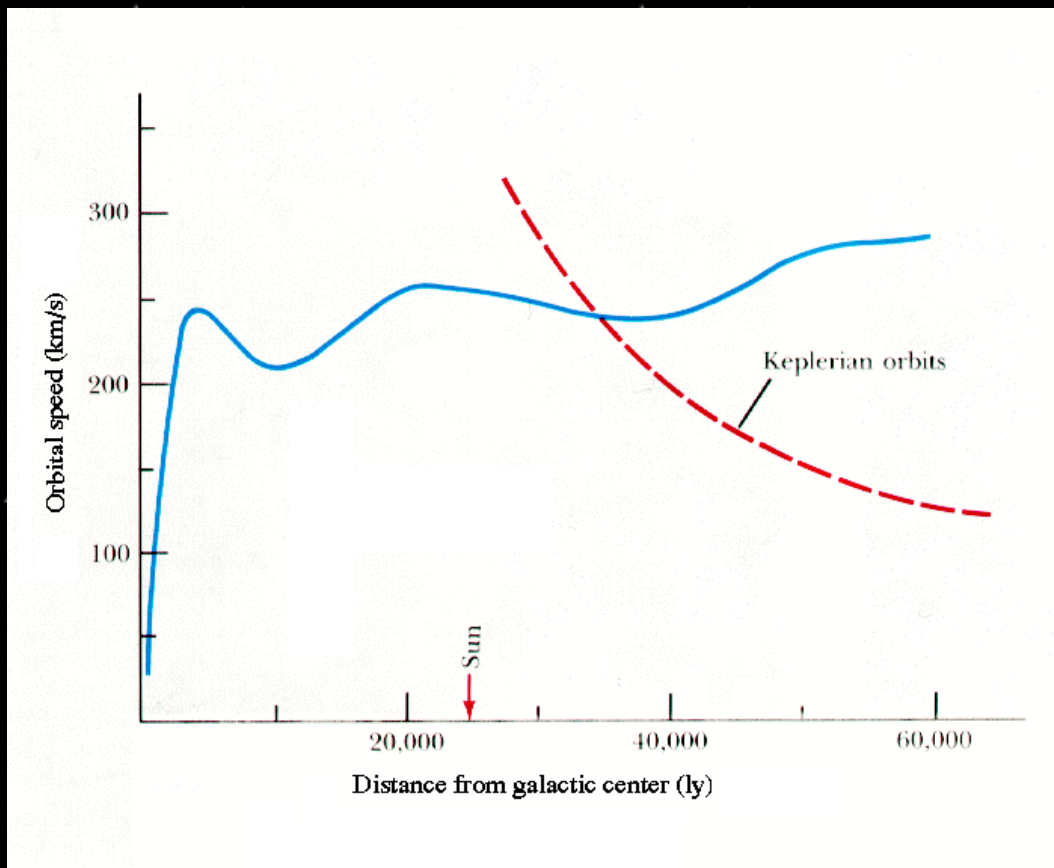
Beobachtungen
des Spitzer-
Satelliten im
fernen Infrarot
haben das erste
vollständige Bild
geliefert.

Auflösung der Klausurfragen

- Wie unterscheidet sich die Bahnbewegung der Planeten in unserem Sonnensystem von der Rotation der Sterne in der Scheibe der Milchstraße um deren Zentrum? Was können wir daraus ablesen?
- **Antwort: “Die Milchstraße”, “Galaxien”**

Masseverteilung

Ein Großteil der Masse der Galaxis wird nicht beobachtet: Diese Masse kann nicht aus Sternen, Gas oder Staub bestehen und ihre Verteilung muss sich weit über den sichtbaren Rand der Galaxis erstrecken (60 - 80 kpc!).



Dunkle Materie:

Kandidaten:

MACHOS (Massive Compact Halo Objects)

- braune Zwerge
- weiße Zwerge
- schwarze Löcher,
- Neutronensterne

WIMPS (Weakly interacting massive particles)

kalter molekularer Wasserstoff

Auflösung der Klausurfragen

- Kann aus der Milchstraße eine Radiogalaxie werden? Was müsste dafür passieren?
- **Antwort: “Galaxien”**

Aktive Galaxienkerne (AGN)

Viele Typen:

- QSO: Quasi Stellar Object

Quasar: QUAsi-StellAr Radio source, sehr hell: 10^{40} W
Akkretion von Sternen/Gas auf schwarzes Loch
(braucht 10 Sterne/Jahr)

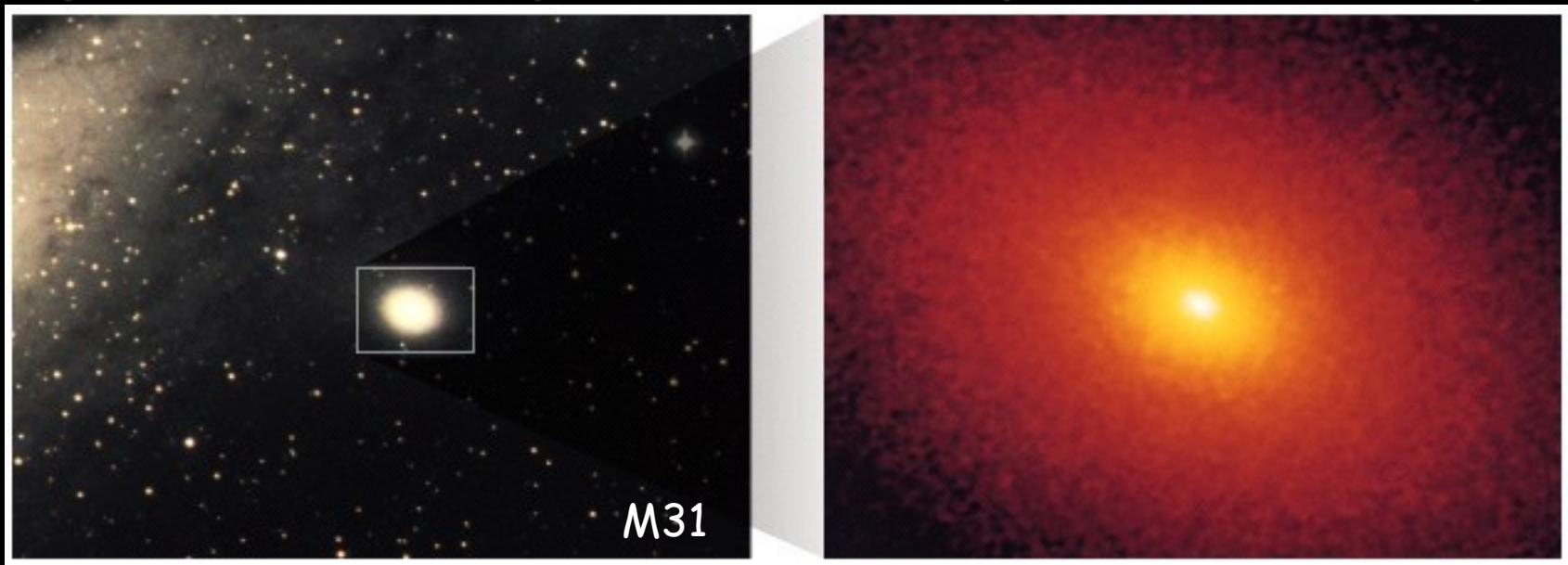
- Radio Galaxie: Galaxie, die im Radiowellenlängenbereich hell strahlen (bis zu 10^{39} W zwischen 10 und 100GHz),
Synchrotronstrahlung von geladenen Teilchen im Jet
mit IGM, fast ausschließlich elliptische Galaxien

Energiequelle von AGNs

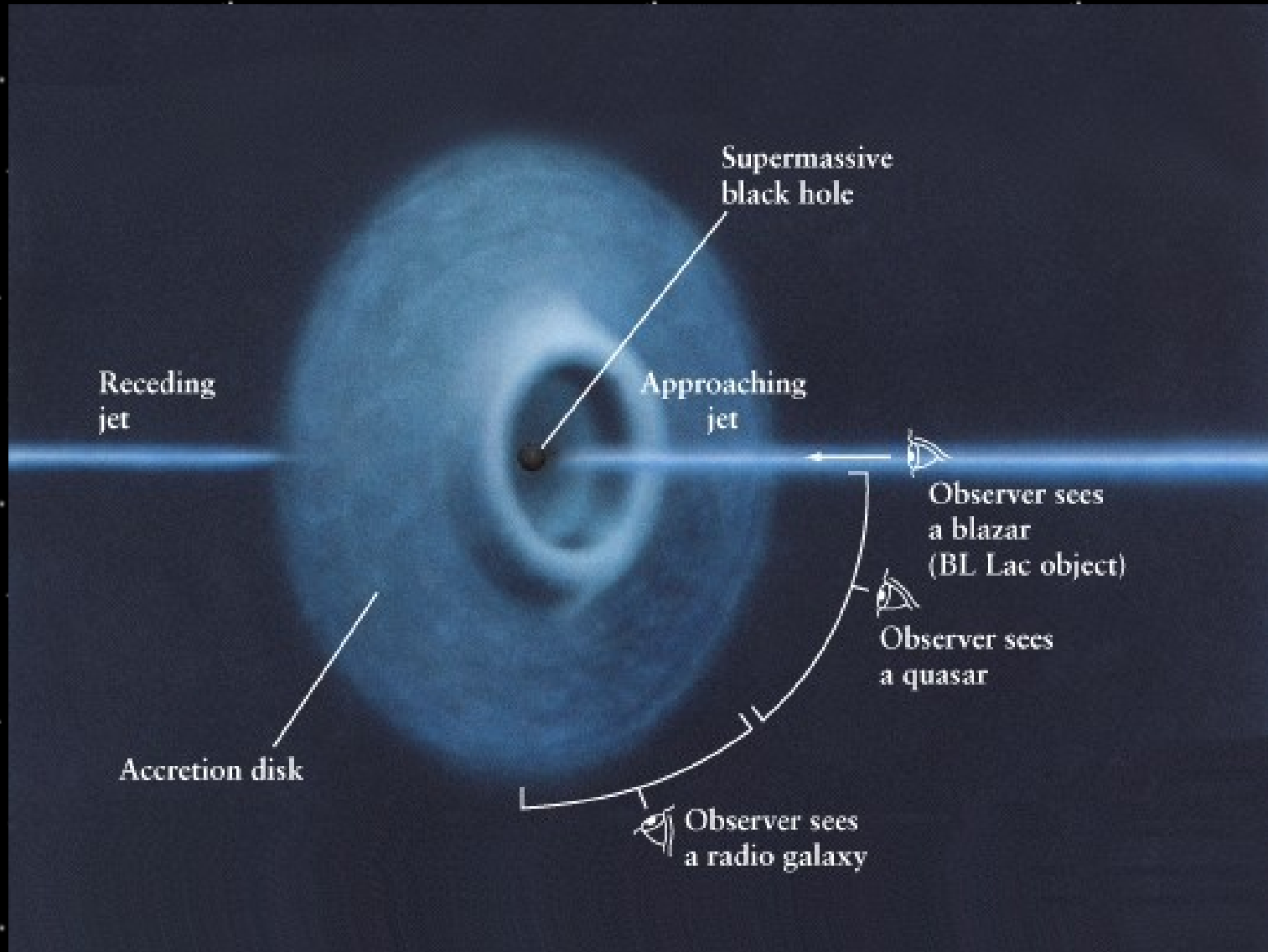
Zentrales Schwarzes Loch

M31 $5 \times 10^7 M_{\odot}$

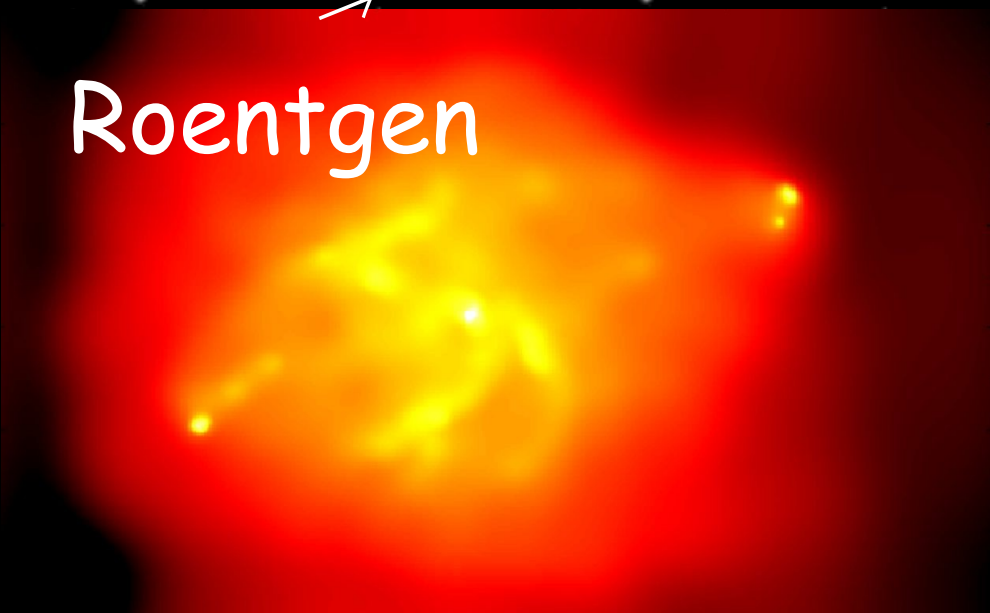
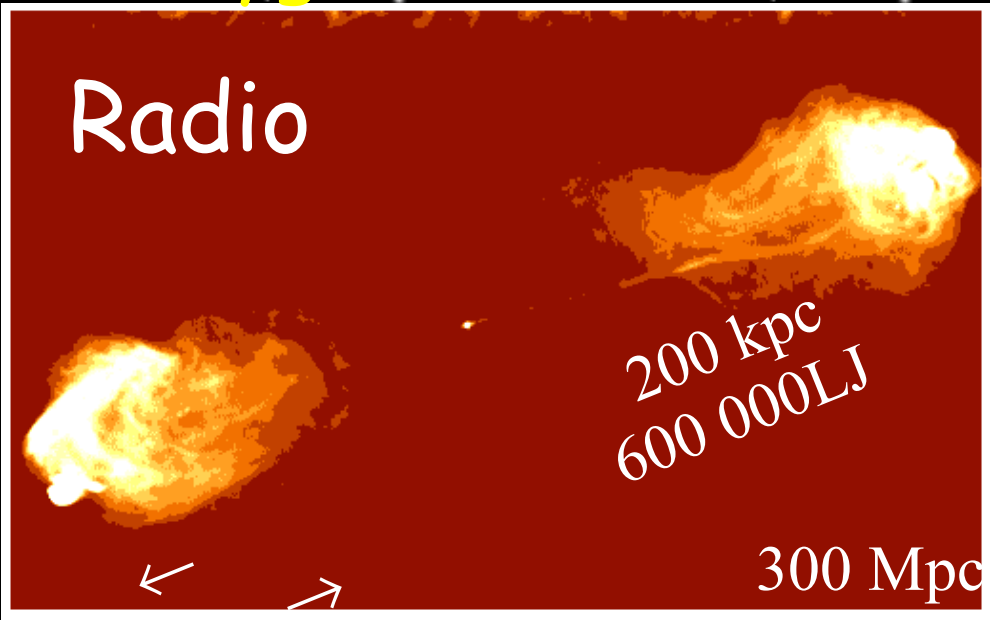
M104 $10^9 M_{\odot}$



Unified Model/ starke Emission, radiolaute Quellen



Cygnus A: 3C 405



Galaxienzusammenstöße



Wagenradgalaxie

Galaxien stoßen häufig zusammen

- Abstand von Galaxien ca. 20x Radius

(Vgl. Sternabstand ca. 10^7 Radius)

Gas der Galaxien wechselwirkt.

Auflösung der Klausurfragen

- Was sehen wir, wenn wir die kosmische Hintergrundstrahlung beobachten?
- **Antwort: “Kurzer Ausflug durch das Universum”,
”Kosmologie”**

Rekombination/Entkopplung

- Nach 300 000 Jahren kühlt das Universum auf 3000K und die Energie der Photonen reicht nicht mehr zur Ionisation von Wasserstoff. Es bilden sich neutrale Atome.

„Rekombination“, „Materiedominiertes Universum“

- Entkopplung von Photonen und Materie

- Die Photonen können sich ungehindert ausbreiten. Wir können diese Photonen in Form der kosmischen Strahlung sehen:

- Kosmische Hintergrundsstrahlung:

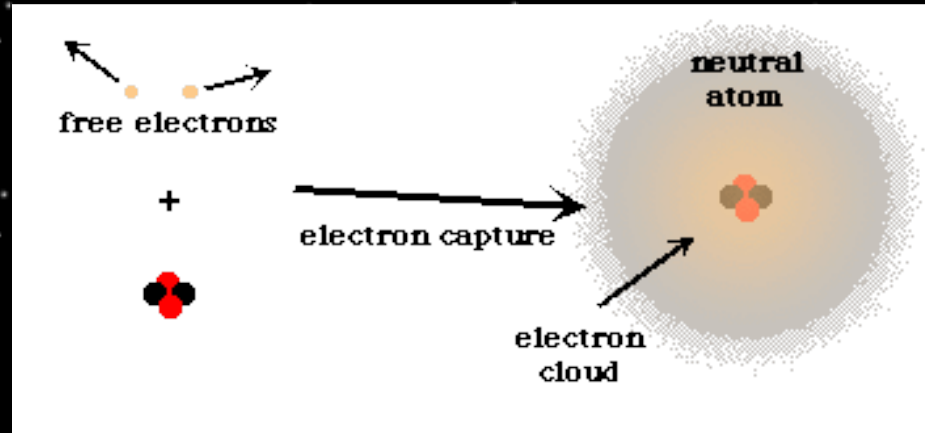
bei 3000K ist das Wien max bei 0.001 mm

Inzwischen hat sich das Universum ausgedehnt und die Wellenlänge mitgedehnt auf 1mm, 3K

- Heute: 4×10^8 CMB Photons pro m^3
3 H pro m^3

Die Materie - Ära: Das gläserne Universum

- nach 300 000 Jahren bei 3000 K (re)kombinieren die e mit den Kernen und bilden neutrale Atome



$n(\text{He})/n(\text{H}) = 0.08$ bzw. 0.25 nach Masseanteilen.
Das tatsächlich gemessene Verhältnis ist ein weiterer Test für die Urknall-Theorie!

- die (Re-)Kombination der Elektronen machte das Universum bei $z = 1200$ „durchsichtig“ (γ sind endlich frei).

Die Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung zeigt uns also das Universum zum Zeitpunkt des Entkoppelns!

Kosmische Hintergrundstrahlung

