Perspektiven Moderner Astrophysik

Silke Britzen Max-Planck-Institut für Radioastronomie Bonn

e-mail: sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de Web: http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/

Teleskopkosten: Die Kosten des Baus beliefen sich, in guter Übereinstimmung mit der Kalkulation, auf 33 Millionen DM. Das Gros von 27 Millionen steuerte die Volkswagenstiftung bei, je zwei Millionen übernahmen die Max-Planck-Gesellschaft, der Bundeshaushalt, sowie das Land Nordrhein-Westfalen. Inbetriebnahme: 01.08.1972

Programm für das SoSe 2010

- 16.04. Die Themen des Semesters im Überblick 30.04. LOFAR & Pathfinder SKA
- 21.05. Schwarze Löcher, Teil I
- 04.06. Schwarze Löcher, Teil II
- 18.06. Die Länge des Tages, Erdbeben & Astronomie
- 02.07. Die fundamentalen Gesetze der Natur
- 16.07. Neues am LHC?

Programm für Heute und den 04.06.:

Schwarze Löcher – und was wir meinen zu wissen

- Welche Gewichtsklassen an SL gibt es und wie entstehen sie?
 - Quanten SL
 - Primordiale SL
 - Stellare SL
 - Mittelschwere SL?
 - Galaktisches Zentrum SL
 - Supermassive SL
 - Inaktiv
 - Aktive Galaxienkerne
- Hawking Strahlung
- Wie enden SL Was bleibt von unserem Universum?

Warum "Schwarze Löcher" ?

Schwarzes -

→Entweichgeschwindigkeit c

Loch

Singularität in der Raum-Zeit

Solution of the vacuum field equations of Einsteins general relativity (1915)

Einstein'sche Feldgleichungen:

$$G^{\mu\nu} = aR^{\mu\nu} - \frac{1}{2}aRg^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T^{\mu\nu}$$

Nur scheinbar einfach, ein Satz von 10 partiellen, nicht linearen, gekoppelten Differentialgleichungen, für die es keine geschlossene, vollständige Lösung gibt.

 Vereinfacht: Schwarze Löcher sind alle Objekte, deren Masse innerhalb des Schwarzschildradius konzentriert ist

$$R_s = 2GM / c^2$$

- S.L. umgeben von Ereignishorizont (kugelförmige Zone, ab der es kein Entrinnen mehr gibt und Körper in das Loch fallen müssen) und besitzen Krümmungssingularität im Zentrum (Krümmung der Raumzeit wird unendlich)
- ✓ Von außen ist ist die Zeit am E.H. eingefroren
- S.L. hat 3 Quantenzahlen Masse, Drehimpuls, elektrische?(magnetische)
 Ladung

Speziallösungen sind notwendig, in denen die Gravitation eine spezielle Gestalt und u.U. spezielle Symmetrien annimmt

Ein klassisches Schwarzes Loch ist gerade eine spezielle Form einer Raumzeit, die die Einstein'sche Feldgleichung löst. Die wesentlichen SL in der Astrophysik werden durch die *Schwarzschild*-Lösung (statisch und kugelsymmetrisch) und die *Kerr*-Lösung (rotierend und achsensymmetrisch) beschrieben.



Masse gegen Radius

Die Gewichtsklassen

Klassifikation	Masse (Sonnenmassen)	Schwarzschild- Radius (m)
Primordiale SL	10^{-15}	$3 \cdot 10^{-12}$
Stellare SL	3 - 100	$9 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5$
Mittelschwere SL	$10^2 - 10^6$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^9$
Supermassive SL	$10^6 - 10^{12}$	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{15}$

Wichtig ...

- In Schwarzen Löchern verschwindet nicht ausnahmslos alles …
- Ein Testkörper (Planet, Stern, etc.) kann sich um ein Schwarzes Loch auf einer Kreis- oder Ellipsenbahn bewegen, ohne jemals in das Loch hineinzustürzen
- Bsp. Sonnensystem
- Die Bewegung um Schwarze Löcher hängt von den
 - Massen
 - Geschwindigkeiten
 - Drehimpulsen

der beteiligten Körper ab.

 Weder Ereignishorizont noch Singularität wurden experimentell bestätigt

Und ...

- Mittels elektromagnetischer Wellen wird es den Astronomen niemals gelingen, Ereignishorizont und Singularität nachzuweisen!
- Die Singularität ist hinter dem Schleier des Ereignishorizonts verborgen und daher prinzipiell unsichtbar.
- Singularitäten liegen in der Zukunft des Beobachters
- Der Ereignishorizont ist laut ART eine Zone mit exakt null elektromagnetischer Emission
- Nur die Gravitationswellen könnten uns die genauen Eigenschaften der Raumzeit mitteilen

Die GewichtsklassenQuanten – SL (Mini-SL, etc.)

Schwarze Löcher im Labor

- Überlegung: Teilchen die mit extrem hohen Energien auf einander Treffen können ein Schwarzes Loch erzeugen
- Abschätzung: Am LHC wird es möglich sein, ein Proton mit bis zu 7 TeV zu beschleunigen. Nach E=m*c² folgt daraus eine Masse von 10⁻²³kg. Unter der Annahme, dass die maximale quantenmechanische Auflösung bei diesen Energien bei 10⁻¹⁹m liegt, ergibt sich daraus eine maximale Dichte, beim Zusammenstoß 2er Protonen, von 10³⁴kg/m³.
- Problem: Um das kleinste mögliche Schwarze Loch zu erzeugen muss die Dichte mindestens der Planck-Dichte (5*10⁹⁶kg/m³) entsprechen.

Quanten SL am LHC
$$M_{BH} \sim 10^{-24}$$
g



- Große
 Vereinheitlichung der Kräfte – welche
 physikalische Theorie
 beschreibt unsere
 Welt?
- Energie-Skala des Universums
- In wievielen
 Dimensionen leben wir?



- ATLAS (A Toroidal LHC AparatuS)
 - Proton-Antiproton und Elektron-Antielektron Kollisionen
 - Produktion von Mini Schwarzen Löchern möglich
 - Suche nach dem Higgs-Boson und Forschung an Quarks und Leptonen



- CMS (Compact Muon Solenoid)
 - Kollision von Protonen bei bis zu 14 TeV
 - Messung der entstehenden Elektronen, Photonen und Myonen
 - Entdeckung von Schwarzen Löchern möglich
 - Erforschung von SuSy-Teilchen und Suche nach Higgs-Boson

Schwarze Löcher in der Erdatmosphäre

- Harte kosmische Hintergrund Strahlung (Protonen und Atome mit Energien von bis zu 10⁹ TeV) könnten in der Erdatmosphäre bis zu 100 Mini Schwarze Löcher pro Jahr erzeugen.
- Bein Zerfall entstehen sämtliche Partikelsorten mit hohen Energien
- Zerfallsprodukte könnten bald am Auger-Observatorium in Argentinien und am Fly´s-Eye-Observatorium in Utha/USA gemessen werden.

Hawking Strahlung

Hawking-Strahlung

 Quantenfluktuationen am Rande Schwarzer Löcher führen zu einem Energieverlust des Schwarzen Loches

 $T_{H} = \frac{hc^{3}}{16\pi^{2}k_{B}GM}$

Vernichtung Schwarzer Löcher Hawking-Strahlung



Hawking-Strahlung

- Die Hawking-Strahlung ist eine Schwarzkörper-Strahlung
- Ihre Wellenlänge entspricht in etwa dem Schwarzschild-Radius
- Die Temperatur des SL entspricht $T = hc^3/8\pi kGM$
- Die Leuchtkraft ist damit $L = A \sigma T^4$
- Damit wird die Lebensdauer des SL etwa $\tau = M/L \approx (M/M_{\odot})^3 10^{66}$ Jahre

Die Gewichtsklassen • Primordiale SL

Primordiale Schwarze Löcher



- Der Nettoeffekt: Emission von Gammastrahlung
- Im Endstadium Explosion von Partikeln
- Primordiale S.L. von 5*11Kg würden bei Entstehung vor 20 bis 20 Milliarden Jahren Gammastrahlung mit 100 MeV aussenden



- Könnten Keimzellen größerer Schwarzer Löcher sein, die zur Entstehung von Galaxien geführt haben
- Zerfall durch Hawkingstrahlung antiproportional zur Masse, daher zerstrahlen Primordiale Schwarze Löcher sehr schnell. Explosion unterhalb Grenzmasse.
- Primordiale Schwarze Löcher mit einer Anfangsmasse von 10¹²kg haben eine Lebensdauer von ca. 10¹⁰ Jahren, was dem derzeitigen Alter des Universums entspricht, daher möglicherweise Explosionen messbar.
- Eine andere Theorie besagt, dass die Hawking-Strahlung nur f
 ür große Massen zutreffend ist, daher ist es m
 öglich, dass L
 öcher mit Massen unterhalb einer Grenzmasse stabil bleiben.



- ALICE (A Large Ion Collider Experiment)
 - Hier werden vor allem größere Kerne (Bleiionen) zur Kollision gebracht
 - Daher Mini Schwarze Löcher unwahrscheinlich
 - Forschung am Quark-Gluonen-Plasma, Simulation der Zeit unmittelbar nach dem Urknall

Die Gewichtsklassen •Stellare SL

0,05 Mo

Überriese

 $1 M_{\odot}$

10 M.

30 Mg

Entwicklung der Sterne

Brauner Zwerg

Roter Riese

planetarischer Nebel

Weißer Zwerg

Überriese

Weißer Zwerg

Neutronenstern

Schwarzes Loch

Der Sternenfriedhof



G. Hasinger

29

Die folgenden Folien wurden von

Albrecht Koehler und Christian Gross

erstellt und sind auf folgender Internet-Seite



Historische Supernovae

Historisch falsch entstandener Begriff

Helles Aufleuchten wurde mit der Geburt eines Sternes assoziiert. Das Gegenteil – das letzte Aufbäumen eines sterbenden Sternes ist jedoch der Fall.





Jahr	Beobachtet in	Maximalhelligkeit
185	Sternbild Zentaur	−6 mag
386	Sternbild Schütze	?
393	Sternbild Skorpion	−3 mag
1006	Sternbild Wolf	-7.5 ±0.4
1054	Sternbild Stier	−6 mag
1181	Sternbild Kassiopeia	−2 mag
1572	Sternbild Kassiopeia	−4 mag
1604	Sternbild Schlangenträger	−2 mag
1680	Sternbild Kassiopeia	+6 mag
1885	Andromedanebel	+6 mag
1979	Galaxie Messier 100	+11.6 mag
1987	Große Magellansche Wolke	+3 mag



SN 185

In einer Chronik der chin. Geschichte von 25-220 n. Chr. erwähnt und als "Gaststern" beschrieben





Historische Supernovae

SN 1987



Historische Supernovae

SN 1987

One theory of the evolution of Supernova 1987A (SN 1987A)





Hertzsprung-Russel-Diagramm








Figure 13.1 Main-sequence and post-main-sequence evolutionary tracks if stars with an initial composition of X = 0.708, Y = 0.272, and Z = 0.020. (Figure from Iben, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 5, 571, 1967.

Ganz einfach

- Ein Stern ist eine sich drehende Plasmakugel, die Licht abstrahlt die Energiequelle steckt im Innern. Dort ist es heiß genug, daß Atomkerne verschmelzen (Kernfusion).
- Bei der Fusion von leichteren zu schwereren Elementen wird Energie frei – diese kämpft sich als elektromagnetische Strahlung ihren Weg bis an die Sternoberfläche und sorgt andererseits für die Umwälzung der Gasmassen (gigantischer Kochtopf).
- Der Stern sucht den Zustand zu erreichen, in dem alle auf ihn wirkenden Kräfte im Gleichgewicht stehen:
 - Nach außen: Der Zentrifugaldruck, der den Stern aufgrund der Rotation aufbläht
 - Nach außen: Der Gasdruck des kochenden Plasmas im Sterninnern
 - Nach außen: Strahlungsdruck, durch die im Innern frei werdende Strahlung
 - Nach innen: Gravitationsdruck, Schwerkraft versucht den Stern zu verkleinern
- Der Stern befindet sich im hydrostatischen Gleichgewicht, wenn sich alle Kräfte ausgleichen

Aber ...

- Sterne entwickeln sich und ihre chemische Zusammensetzung ändert sich damit auch die Kräfteverhältnisse -> Fusionskette
- Natürliches Ende der Fusionskette, da Eisen die größte Bindungsenergie pro Kernteilchen hat. Für schwerere Elemente als Eisen ist es energetisch günstiger, die Energie aus der Spaltung (Fission) des Atomkerns zu gewinnen. Der Stern hat ein Problem ...
- Weitere Fusion kann die Energiequelle im Sternkern nicht mehr speisen ohne weitere Energie aus der Fusion sacken Gas- und Strahlungsdruck rapide ab – das Gleichgewicht gerät aus den Fugen und die Gravitation gewinnt die Oberhand – der Gravitationskollaps setzt ein – ein In-Sich-Zusammenfallen aufgrund der dominierenden Schwerkraft.
- Die weitere Entwicklung hängt von der Masse ab.
- Im Gravitationskollaps wird die Masse mehr und mehr verdichtet

Das Ende 1 ...

• Weißer Zwerg:

- Pauli-Verbot sorgt bei hohen Dichten dafür, daß die Elektronen sich nicht beliebig nahe kommen – neue Art von Druck: Elektronendruck
- Wiegt die Kollapsmaterie nicht mehr als 1.46 Sonnenmassen (Chandrasekhar-Masse), so kann der Entartungsdruck dem Gravitationsdruck standhalten und das System ins Gleichgewicht bringen
- Größe vergleichbar der Erde, Gewicht vergleichbar der Sonne
- Bildung läuft unspektakulär ab: Stern bläht sich zum Roten Riesen auf, verliert seine äußere Sternhülle, die einen Planetarischen Nebel bildet, die restliche Sternmasse fällt in sich zusammen und hinterläßt einen Weißen Zwerg

Das Ende 2 ...

- Neutronensterne:
 - Bei höheren Restmassen (Restmasse nicht wirklich klar) der kollabierenden Sternmaterie kann auch der Entartungsdruck der Elektronen nichts mehr ausrichten
 - Die Elektronen werden bei den immensen Dichten in die positiv geladenen Protonen in den Atomkernen gepresst – inverser Betazerfall
 - Neutronisierung der Materie
 - Entartungsdruck der Neutronen stabilisiert jetzt den kollabierenden Stern
 - Neben den Neutronen gibt es exotische Teilchen wie Hyperonen, Kaonen, Diquarks, freie Quarks (Vermutung!!)
 - Durchmesser von ca. 20 km, Gewicht wie die Sonne
 - Neutronensterne werden als Pulsare entdeckt
 - Neutronensterne mit besonders starken Magnetfeldern; Magnetare

Das Ende 2 ...

Neutronensterne:

- Bildung läuft katastrophal ab: im Gravitationskollaps entsteht ein hoch verdichteter Sternkern, der besonders eisenhaltige Prä-Neutronenstern
- Bei Erreichen einer kritischen Dichte bildet sich eine Stoßwelle (Schockwelle), die von innen nach außen läuft. Sie zerreißt die äußeren Sternhüllen und verursacht die Explosion des Sterngiganten in einer Supernova Typ II.
- Der innere Teil kollabiert und bildet einen Neutronenstern.

Das Ende 3

- Schwarzes Loch:
 - Überschreitet die Restmasse drei Sonnenmassen, bildet sich das ultimative kompakte Objekt: ein schwarzes Loch
 - Guter Kandidat: Eta Carinae
 - Bildung: noch katastrophaler: Explosion noch heftiger und leuchtkräftiger und heißt Hypernova bzw. langzeitiger Gammastrahlenausbruch







Klassifizierung von SN (Typen)





Typ Ia

Auch ,thermonukleare SN' genannt

Ein akkretierender Weißer Zwerg überschreitet die Chandrasekhar-Masse von rund 1.38 Sonnenmassen (Bedingung für Stabilität eines Weißen Zwerges) und explodiert.

DDT (deflagration-to-detonation transition) entsteht durch starken Explosionsdruck → schockgetriebene, supersonische Detonationswelle mit einer Leuchtkraft von bis zu 5 Mrd. Sonnen

Helligkeitsabhängigkeit von der Sternmateriedichte:

Hohe Dichten erlauben Ni-56-Brennen (Zerfall bis Eisen während es durch schnelle Teilchen aus Betazerfällen das Explosionsgas aufheizen)

Niedrige Dichten sorgen für das Brennen mittelschwerer Elemente wie Si und damit weniger Helligkeit



Typ Ib

Ähnelt dem Typ Ia stark, zeigt jedoch eine schwach ausgeprägte Siliziumabsorptionslinie. Lichtkurven sind ähnlich.



Typ Ic

Verlust der Heliumhülle, da der Vorläuferstern sehr massereich war → starke Sternwinde bliesen die He- und H-Hülle weg. Typ Ic explodiert in einer Hypernova



Typ II

Bekanntester Supernovatyp. Unterteilung in verschiedene Typen aufgrund der Lichtkurven

Wichtigster Unterschied zu TypI: **Gravitationskollaps** und anschließende Explosion

Typische Sternmassen: 15-25 Sonnenm.



SN1987A



Lichtkurven der Typen

Anhand der Lichtkurve kann man erkennen, um welchen Typ Supernova es sich handelt. Sterne der Sternenpopulation I explodieren meist als Typ II und die der Sternenpopulation II als Typ I.



Fit SN1987 13.20



Figure 13.20 The bolometric light curve of SN 1987A through the first 1444 days after the explosion. The dashed lines show the contributions expected from the radioactive isotopes produced by the shock wave. The initial masses are estimated to be ${}^{56}_{28}$ Ni (and later ${}^{56}_{27}$ Co), 0.075 M_{\odot}; ${}^{57}_{27}$ Co, 0.009 M_{\odot} (five times the solar abundance); ${}^{44}_{22}$ Ti, 1 × 10⁻⁴ M_{\odot}; and ${}^{22}_{11}$ Na, 2×10^{-6} M_{\odot}. (Figure from Suntzeff et al., *Ap. J. Lett.*, 384, L33, 1992.)



Lichtkurven der Typen

Eine genauere Klassifizierung gibt die Untersuchung nach charakteristischen Linien



Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.



Wasserstoffbrennen:

pp-Zyklus (massearme Sterne)

¹H + ¹H \Rightarrow ²D + e⁺ +v

- $^{2}D + ^{1}H \implies ^{3}He + \gamma$
- 3 He + 3 He \Rightarrow 4 He + 2 1 H

CNO-Zyklus (massereiche Sterne)

¹² C + ¹ H	⇔ ¹³ N + γ
¹³ N	\Rightarrow ¹³ C + e ⁺ +v
¹³ C + ¹ H	\Rightarrow ¹⁴ N + γ
¹⁴ N + ¹ H	\Rightarrow ¹⁵ O + γ
¹⁵ O	\Rightarrow ¹⁵ N + e ⁺ +v
¹⁵ N + ¹ H	⇔ ¹² C + ⁴ He

Helium-Brennen (Riesen) 4 He + 4 He \Rightarrow 8 Be ⁸Be + ⁴He \Rightarrow ¹²C + γ ¹²C + ⁴He \Rightarrow ¹⁵O + γ Kohlenstoff-Brennen (massereiche Riesen) $^{12}C + ^{12}C \implies ^{24}Mg + \gamma$ ⇒ ²³Mg + n \Rightarrow ²³Na + ¹H \Rightarrow ²⁰Ne + ⁴He, usw. Sauerstoff-Brennen (massereiche Riesen) $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \implies ^{32}\text{S} + \gamma$ \Rightarrow ³¹S + n \Rightarrow ³¹P + ¹H \Rightarrow ²⁸Si + ⁴He, usw. **Silizium-Brennen** (massereiche Riesen) ²⁸Si + ²⁸Si \Rightarrow ⁵⁶Fe $T_{\rm Si,ig} = 3 \times 10^9 \ K$



Art des Brennvorgangs	Dauer des Brennvorgangs
Wasserstoff	6 x 10^6 a
Helium	5 x 10^5 a
Kohlenstoff	6 x 10^2 a
Neon	1 a
Sauerstoff	0.5 a
Silizium	1 d
Kollaps	≈ 3 ms
bis zur Explosion	einige Stunden



Bedeutung der Verbrennungsphasen

Zustandsgl.
$$\frac{Y_e k_B T_c}{m_B} = f G M^{\frac{2}{3}} \rho_c^{1/3} - K_{\Gamma} Y_e^{\Gamma} \rho_c^{\Gamma} , \quad Y_e \equiv \frac{n_e}{n_p + n_n}$$

Zündet Si?

• für große Massen: $T_c \propto
ho_c^{1/3}$

alle Brennstoffe werden zünden

• für kleine Massen:

$$7\propto
ho_c^{1/3}M^{2\over 3}$$

T nimmt ein Maximum ein und anschließend erfolgt Abkühlung kritische Dichte: $\left(fCM_{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{\Gamma-\frac{4}{3}}}$

 $\rho_{\rm crit} \approx \left(\frac{fGM^{\frac{2}{3}}}{K_{\Gamma}Y_e^{\Gamma}}\right)^{\overline{\Gamma-\frac{4}{3}}}$

Beide Verläufe werden durch die Chandrasekhar-Masse getrennt.

$$M_{\rm Ch} = 5.72 Y_e^2 M_{\odot}$$



Wie kommt es zum Kollaps?

Dynamische Instabilitäten

• Photodisintegration

bei den hohen Temperaturen (größer als 10^{9} K) entsteht durch die Schwarzkörperstrahlung ein so hoch energetisches Photon, dass es Fe spalten kann.

$$\gamma + {}^{56}_{26}Fe \leftrightarrows 13\alpha + 4n$$

Für die Dissoziation wird Q=124.4 MeV benötigt. Wird aus der Bindungsenergie genommen.



bei noch höheren Temperaturen (jetzt noch nicht wichtig):

$$\gamma + {}^{4}He \leftrightarrows 2p + 2n$$



Wie kommt es zum Kollaps?

Dynamische Instabilitäten

• Neutronisierung des Kerns



$$e^- + (Z, A) \longrightarrow \nu_e + (Z - 1, A)$$

 $e^- + p \longrightarrow \nu_e + n$

läuft erst ab einer Dichte von etwa $1.14 \times 10^9 \ g \ cm^{-3}$ ab.

Dies gilt im allgemeinen nur für Zentraldichten im Inneren von kompakten Objekten:

- weißer Zwerg
- Neutronenstern
- schwarzes Loch

Degenerierte Elektronen tragen zum Gesamtdruck bei, der dem gravitativen Kollaps entgegenwirkt.

verringert Druck



Einsetzen des Kollaps ...

... oder: Was die nächsten 3 ms passiert.



Einsetzen des Kollaps

Weaver, Zimmerman, and Woosley (1978): Stern mit 15 $M_\odot\,$ hat beim Einsetzen des Kollaps $M_{\rm core}=1.5M_\odot$ und nahe des Kerns folgende Eigenschaften

$$T_{c,i} \approx 8 \times 10^9 \ K$$

$$\rho_{c,i} \approx 3.7 \times 10^9 \ g \ cm^{-3}$$

$$Y_{e,i} \approx 0.42$$

$$s_i/k \approx 0.91$$

Bei 50% Disintegration von Fe erreichen wir $~Tpprox 11 imes 10^9~K$ Ab dann setzt der Kollaps ein.



Energie-Abtransport ... Wie?

Neutrinoemisison

Im Kern eines massiven Sterns wird Energie in Form von Neutrinostrahlung abgegeben:

- Neutronisierung
- Thermische Emission
- 1.Paar Vernichtung $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$

2.Plasmon Zerfall $(plasma\ excitation) \rightarrow \nu + \bar{\nu}$

3.Photoannihilation $e^- + \gamma \rightarrow \nu + \bar{\nu} + e^-$

4.Bremsstrahlung $e^- + (Z, A) \rightarrow (Z, A) + e^- + \nu + \bar{\nu}$



Energie-Abtransport ... Wie?

Neutrinoemisison

Im Kern eines massiven Sterns wird Energie in Form von Neutrinostrahlung abgegeben:

Dieser Prozess überwiegt im Kern:

• Thermische Emission

im Kern eines massereichen Sterns, bis ...

- Neutronisierung
 - der Kollaps voll im Gange ist.



Beschleunigung des Kollaps

Wie schon erwähnt, hängt $M_{
m Ch}$ von Y_e ab.

Durch die Neutronisierung wird Y_e gesenkt. Ab einem gewissen Zeitpunkt ist

 $M_{\rm core} > M_{\rm Ch}(Y_e)$

Der Strahlungsdruck ist so weit gesenkt, dass dem gravitativen Kollaps nicht mehr viel entgegenzusetzen ist.

Mit weiterer Dichtezunahme durch die Kontraktion,

wird die Neutronisierung voran getrieben,

der Strahlungsdruck weiter gesenkt und somit

der Kollaps beschleunigt.



Photodisintegration kehrt sich um

Bei höherer Dichte führt die geringe Entropie pro Baryon (z.B. Neutron, Proton, etc.) zur

- Stabilität von sehr schweren Atomen, da
- Proton Drip verhindert werden muss.

Bei sehr hohen Dichten ist die Bedingung für einen stabilen Atomkern und den

Verbleib der Protonen im Kern:

$$\frac{Z}{A} \lesssim 0.3 - 0.4$$

Somit ist es energetisch ungünstig schwere Kerne zu trennen, denn diese haben die Möglichkeit einen geringen Z/A-Wert zu erreichen.

Schwere Kerne sind bis zu nuklearen Dichten erhalten.



Zustand der Teilchen - Entartungsdruck

Während des Kollaps sind die Nukleonen und Atomkerne

nichtentartete und nichtrelativistische

Fermi-Gase.

Dies ändert sich erst, wenn die Neutrinos gefangen sind bei Dichten

$$\rho > \rho_{\rm trap} \approx 3 \times 10^{11} \ g \ cm^{-3}$$





Neutrino-Trapping

Jeder Neutrinoprozess hat einen inversen Prozess, der zur Absorption gehört.

1.free nucleon scattering

$$\nu + n \rightarrow \nu + n \quad \nu + p \rightarrow \nu + p$$

2.scattering by heavy nuclei

$$\nu + (Z, A) \longrightarrow \nu + (Z, A)$$

3.nucleon absorption

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

4.electron-neutrino scattering

$$e^- + \nu \rightarrow e^- + \nu$$



Neutrino-Trapping

Jeder Neutrinoprozess hat einen inversen Prozess, der zur Absorption gehört.

4.electron-neutrino scattering

Führt zu erheblichem Energieverlust der Neutrinos,

wenn diese mit entarteten Elektronen wechselwirken.

Der Prozess trägt zur Thermalisierung der Neutrinos bei.

lokales thermisches Gleichgewicht

Fermi-Dirac Verteilung:



Limitierung der Neutrino-Emissionsprozesse

Bei hohen Dichten:

• Protonen im Kern

→ Elektroneneinfang bei freien Protonen ist **vernachlässigbar**

$$e^- + (Z, A) \longrightarrow \nu_e + (Z - 1, A)$$

 $e^- + p \longrightarrow \nu_e + n$

Neutronen-Drip energetisch ungünstig

Zellkerne haben viele Neutronen Energielevel soweit aufgefüllt

E=m_n c^2

Neutron wird erzeugt und ist außerhalb des Kerns



Limitierung der Neutrino-Emissionsprozesse

Bei hohen Dichten:

Neutronen-Drip energetisch ung
ünstig und

Neutronen-Drip

1.Zellkerne haben viele Neutronen2.Energielevel soweit aufgefüllt, dass E=m_n c^23.Neutron wird erzeugt und ist außerhalb des Kerns

findet NICHT statt, denn ...

die Präsenz eines Fermi-Sees von Neutrinos treibt Reaktionen wie

 $e^- + (Z, A) \implies (Z - 1, A) + \nu$

nach links! ------> Stabilität von schweren Atomkernen



Speicherung der freiwerdenden Energie während Neutrino-Trapping

Energieformen:

- Thermische Energie
 - Schwarzkörperstrahlung
 - Kinetische Energie
- Energie von angeregten atomaren Zustände
- In Neutrinos gespeicherte Energie



Hydrodynamik – Aufspaltung des Fe,Si - Kerns

Der Kern teilt sich auf in

• Innerer homologer Kern

 $M_{hc} \approx (0.6 - 0.8) M_{\odot}$

• Äußerer "normal" einfallender Kern





Ende des Kollaps

Die meiste potentielle Gravitationsenergie ist mittlerweile in den Energieformen gespeichert:

$$E_{
m grav} pprox 3 imes 10^{53} \ erg$$

- 99% Neutrino-Emission
- 0,1% kinetische Energie der Schockwelle
- 0,001% Elektromagnetische Strahlung

Sobald ein Vielfaches der nuklearen Dichte erreicht wird,

 $\rho_{nuc} \approx 2.8 \times 10^{14} \ g \ cm^{-3}$

reichen Kernkräfte aus um den Kollaps zu stoppen.

D.h. der homologe Kern dehnt sich wieder aus, bis er eventuell ein hydrostatisches Gleichgewicht erreicht.

 \rightarrow

Schockwelle in äußeren Kern, der mit $70.000 \ km/s$ auf den Inneren einfällt.





Druckwelle stoppt

Da die <u>Stabilitätsumgebung</u> der schweren Kerne aufgehoben ist,

zerfallen diese in ihre Bestandteile.

Die dazu aufgewendete Energie beträgt

$$\Delta E_{\rm loss} \approx 8 \ MeV/nuc = 1.6 \times 10^{51} \ erg/0.1 M_{\odot}$$

und reicht aus, um






Verzögerte Explosion

- Neutrinos entweichen aus dem dichten Kern
- Deponierung weniger Prozent ihrer Energie in den Schichten zwischen Neutrinsphäre und der Stoßwelle während ca. 100ms

durch

Absorption von Elektronneutrinos und – antineutrinos auf die freien Neutronen bzw. Protonen

• Wiederbelebung des Stoßes ... Wie?





Konvektive und Rayleigh-Taylor Instabilitäten





Konvektive und Rayleigh-Taylor Instabilitäten





Konvektive und Rayleigh-Taylor Instabilitäten







Typ 1aVorher: Weißer ZwergNachher: ISM (Zwerg komplett zerstört!)

Typ 2Neutronensterne oder Stellare Schwarze Löcher







Weiterhin:

Alle Elemente schwerer als Eisen werden bei Supernovae aufgebaut. Nur die Schockwellen können die ISM so verdichten, dass Neutronendichten von bis zu 1020 pro cm-3 erreicht werden. Hier setzen der s-,r- und seltener der p-Prozess ein.



Supernovaremnant (SNR)

Expandierende Schockwellen (blast waves) in das ISM mit Bildung eines zunehmend durchlässiger werdenden Sternennebels



Überreste einer SN

Krebsnebel (Sternbild Taurus)

Aufnahme von Chandra



SN1054 Krebsnebel 1973-2000



Stellar Black Holes / Pulsars (1 M_{cc} < M_{BH} < 100 M_{cc})





Pulsars as precise cosmical clocks
probes for strong gravity : space-time in violent conditions

 Direct Detection & study of gravitational wave background by pulsar- timing arrays





SN 1998dh in NGC 7541



SN 1998S in NGC 3877

- Übersteigt die Masse des Kerns nach einer Supernova 3*M_{sol} so kann die Neutronenentartung nicht mehr entgegenwirken- Der Kern kollabiert zu eine Singularität
- = ein Schwarzes Loch

Zwei verschiedene GRB-Typen

Gamma-ray bursts

- Es gibt 2 Typen von GRBs:
 - Die langen GRBs: <u>2-1000 sek</u>, junge, sehr massereiche Sterne (O-Sterne, oder Wolf-Rayet-Sterne) kollabieren und enden in einer <u>Hypernova</u>. Hypernovae sind noch heftigere Sternexplosionen als Supernovae, aber von der Physik her verwandt. Das <u>Nachleuchten</u> in anderen Wellenlängenbereichen wurde bisher nur bei den langen GRBs beobachtet!! Voläufersterne sind junge, massereiche Sterne
 - Die kurzen GRBs: 0.01-2 sek, <u>Verschmelzungsprozesse von</u> <u>kompakten Objekten</u>: Doppelsternsysteme aus Neutronensternen NS-NS merging, oder NS-BH merging; alte Neutronensterne sind Vorläufersterne; <u>Kein Nachleuchten</u> jemals beobachtet
- Sie setzen in zehn Sekunden mehr Energie frei als die Sonne in Milliarden von Jahren. Für die Dauer seines Leuchtens ist ein Gammablitz heller als alle übrigen Gammastrahlenquellen am Himmel. Die gigantischsten Explosionen, die im Universum bekannt sind.
 - Freiwerdende Energie bei kurzen GRBs: 1048-1050 erg
 - Lange GRBs: 10⁵¹-10⁵³ erg; 1 erg= 10⁻⁷ Joule

Hypernova



Credit: Dana Berry



Credit: D. Armbrecht

- Super-supernova death of star ~ 100 M_o
- Material remaining after burst → afterglow

Catastrophic Mergers



Credit: Dana Berry



- Death spiral of 2 neutron stars or black holes
- Possible origin of short bursts

Gamma-ray bursts







- Anisotropes Feuerball-Modell (anisotropic fire ball) is aktuell favorisiertes physikalisches Modell, um GRBs zu verstehen
- GRB-Motor: Hypernova oder Kollaps von mindestens 2 kompakten Objekten treibt Schockfront nach außen
- Schockfront trifft auf interstellares Medium
- 99.99995% der Vakuumlichtgeschwindigkeit, ultra-relativistische Geschwindigkeiten
- Am Bugschock wird die kinetische Energie des Feuerballs auf die Elektronen und Photonen des CBM (Circum Burst Medium) übertragen
- In der innersten Schale entstehen die Gammaquanten des GRBs: prompte Emission, dahinter entsteht das Nachleuchten der anderen Wellenlängenbereiche – Nachleuchten im UV, Optischen, Infraroten und Radiobereich



- Schlüsselelement: stellare, ultra-relativistische Jets, entstehen im Kollaps des Vorläufersterns oder des Vorläufersystems
- Beamingfaktor: relativistischer Doppler-Faktor, ein Maß dafür, wie sehr die elektromagnetischen Wellen, die vom GRB-Jet ausgehen, verschoben werden; Blauverschiebungseffekt, GRB-Strahlung wirkt energiestärker als sie ist; Gebeamte Strahlung ist energetischer und heller!!
- Hier entsteht ein stellares Schwarzes Loch rotierende SL spielen vermutlich die entscheidende Rolle (Kerr-Lösung)















•



http://www.nasa.gov/vision/uni verse/watchtheskies/short_burst .html



Figure 11 A selection of the host galaxies of long-duration (*top row*) and short-duration (*bottom row*) γ -ray bursts, as imaged by the *Hubble Space Telescope*. An attempt has been made to choose pairs of long- and short-burst host galaxies with comparable redshifts; lower-redshift hosts are emphasized because these reveal their structure more readily in short exposures. Images are oriented with north up and east to the left, and the physical length scale for a one-arcsecond angular distance is indicated in each panel (except for GRB051227); arrows point to the location of the burst where this is known to approximately pixel precision. Individual burst notes: GRB030329 was the first classical long GRB to be associated with a well-observed spectroscopic supernova (Hjorth et al. 2003, Stanek et al. 2003); XRF020903 was the first X-ray flash event to yield a redshift measurement (Soderberg et al. 2004); GRB050709 was the first short burst with optical afterglow—indicated by the arrow—detected (Fox et al. 2005, Hjorth et al. 2005b); GRB050509B was the first short burst with detected afterglow (Gehrels et al. 2005, Bloom et al. 2006); GRB051227 has a faint candidate host, of unknown redshift probably >1, visible at the optical afterglow location; the spiral galaxy to the east has redshift *z* = 0.714 (Foley et al. 2005). Long-burst host images from Wainwright, Berger & Penprase (2007); short-burst host images from Fox et al. (2005) and this review.



Figure 16 High-z record holders. The history of most distant objects detected in categories of galaxies, quasars, and GRBs. (R. McMahon & N. Tanvir, private communication)









Für dieses Bild von GRB 090423 wurden Daten des UV/optischen-Teleskops (blau, grün) und des Röntgenteleskops (orange, rot) von Swift kombiniert.

Bild: NASA / Swift / Stefan Immler

Rekordausbruch

- GRB090423, Sternbild Löwe, 10 sec
- 630Mio Jahre nach dem Urknall
- Tod eines Sterns und Geburt eines Schwarzen Lochs
- Kein optisches Nachglühen:UV-Licht würde Richtung sichtbares Licht rotverschoben, UV-Licht wird durch dort vermehrt vorhandenes Wasserstoffgas absorbiert
- 3h nach GRB: Infrarotquelle entdeckt (Mauna Kea); Entfernung mit Gemini North-Teleskop: 13 Milliarden Lichtjahre Entfernung
- Rotverschiebung: 8.2 !!



Figure 15 A 360° vista showing the entire sky, with visible structures stretching back in distance, time, and redshift. The most distant light we observe comes from the radiation leftover from the Big Bang: the CMB. As we descend the chart, we find the most distant objects known, followed by a web of Sloan Digital Sky Survey (SDSS) quasars and galaxies. Closer to home, we start to see a collection of familiar "near" galaxies (purple triangles). Also marked are all Swift GRBs with known distances (blue stars); SN 1997ff, the most distant type la supernova at z = 1.7; and the archetypal large galaxy cluster, the Coma cluster. The redshift distances of most distant GRBs are comparable to the most distant galaxies and guasars [adapted from Ramirez-Ruiz (2006a)].

Die Gewichtsklassen • Mittelschwere SL?

Diesmal wirklich?

•

•



Chandra: blau HST: grün, orange Spitzer: rot

- Chandra & XMM-Newton entdeckt möglicherweise zwei mittelschwere Schwarze Löcher nahe des Zentrums einer Starburst-Galaxie M82 (12 Mio Lichtjahre Entfernung)
- Kettenreaktion von Sternkollisionen im kompakten Sternhaufen?

Programm für das SoSe 2010

16.04. Die Themen des Semesters im Überblick 30.04. LOFAR & Pathfinder SKA

- 21.05. Schwarze Löcher Teil I
- 04.06. Schwarze Löcher Teil II
- 18.06. Die Länge des Tages, Erdbeben & Astronomie
- 02.07. Die fundamentalen Gesetze der Natur
- 16.07. Neues am LHC?