

**Seminar über nukleare Astrophysik**

# Schwarze Löcher

Referent: René Pfeiffer  
Betreuer: Prof. Dr. V. Metag

6. Februar 1995

# Thematische Übersicht

- Entstehung von schwarzen Löchern
  - aus Supernovae
  - aus Massenaakkretion
  - aus Dichteschwankungen beim Big Bang
  - aus supermassiven Sternen oder Sternenhaufen
- Eigenschaften von schwarzen Löchern
- Einfang von Teilchen
  - Darstellung des Potentials
  - Unterscheidung zwischen Teilchen mit und ohne Ruhemasse
- HAWKING-Strahlung, Lebensdauer Schwarzer Löcher
- Möglichkeiten des experimentellen Nachweises von Schwarzen Löchern
- Zusammenfassung

## Entstehung von Schwarzen Löchern

einziges Erfordernis: hohe Verdichtung von Materie, so daß Gravitation alle anderen Wechselwirkungen übersteigt

- Verdichtung während einer Supernova bei Sternmasse  $M \gtrsim 60 M_{\odot}$ 
  - Umwandlung des Kerns bis zum Neutronengas mit  $\rho \approx 10^{14} \frac{g}{cm^3}$
  - Schockwelle wird von nachfallender Masse gestoppt
  - CHANDRASEKHAR-Grenzmasse <sup>1</sup> für Neutronensterne  $\leq 3 M_{\odot}$  im Kern des Sterns wird überschritten
  - Sternrest unterschreitet Stabilitätsradius  $R_{krit}$  der allgemeinen Relativitätstheorie  $\rightarrow$  Schwarzes Loch
- Massenakkretion eines Neutronensterns
  - durch Akkretion  $\rightarrow$  ständige Massenzunahme
  - dadurch Überschreitung der Grenzmasse  $\leq 3 M_{\odot}$
  - Stabilisierung durch Neutronengas reicht nicht aus
  - Gravitationskraft kontrahiert den Neutronenstern weiter  $\rightarrow$  Schwarzes Loch

---

<sup>1</sup>Es existieren mehrere errechnete Grenzmassen. Die Obergrenze ist  $5.8 M_{\odot}$ .

- Urzeitliche Schwarze Löcher
  - Entstehung aus Dichteschwankungen während des Big Bang
  - sehr kleiner Radius  $R \approx 1$  Fermi
  - sehr kleine Masse  $M_{\bullet} \approx 10^{15} g \ll M_{\odot}$
- Kollaps supermassiver Sterne  $M \approx 10^5 \dots 10^9 M_{\odot}$ 
  - Sammlung von Wasserstoff in supermassiven Akkretionsscheiben  $\longrightarrow$  heißes Plasma
  - $\dot{E} < 0, \dot{\rho} > 0 \longrightarrow$  Kontraktion bis unterhalb Stabilitätsradius
  - Kollaps der Materie
    - \*  $M \leq 3 \cdot 10^5 M_{\odot} \longrightarrow$  Explosion
    - \*  $M \geq 3 \cdot 10^5 M_{\odot} \longrightarrow$  supermassives Schwarzes Loch mit  $M_{\bullet} \simeq 10^5 \dots 10^9 M_{\odot}$
  - *jedoch*: theoretischer Prozeß
- Kollaps in Sternclustern
  - Sterne in dichten Regionen ziehen sich durch Gravitation an
  - Entstehung eines sehr massereichen Objekts
  - umgebende Sterne werden dann
    - \* auch hineingezogen  $\longrightarrow$  starke Energieausbrüche
    - \* oder auf Umlaufbahnen mit hohen Geschwindigkeiten gezwungen

- Prozeß in dichten Zentralbereichen von Galaxien denkbar<sup>2</sup>, Masse des Schwarzen Loches bis zu  $M_{\bullet} = 10^{10} M_{\odot}$   $\rightarrow$  Energiequelle für Quasare

Ausdehnung des Schwarzen Loches hängt später allein von der kollabierenden Masse  $M$  ab.

### Charakteristika verschiedener „Schwarzer Löcher“

Objekt	relative Masse $\frac{M}{M_{\odot}}$	$R_S$	$\rho$ [ $\frac{g}{cm}$ ]
Erde	$3 \cdot 10^{-6}$	9 mm	$2 \cdot 10^{24}$
Sonne	1	4 km	$2 \cdot 10^{16}$
Galaxie	$10^{11}$	0.03 ly	$2 \cdot 10^{-6}$
Universum	$10^{22}$	$3 \cdot 10^9 ly$	$2 \cdot 10^{-28}$

---

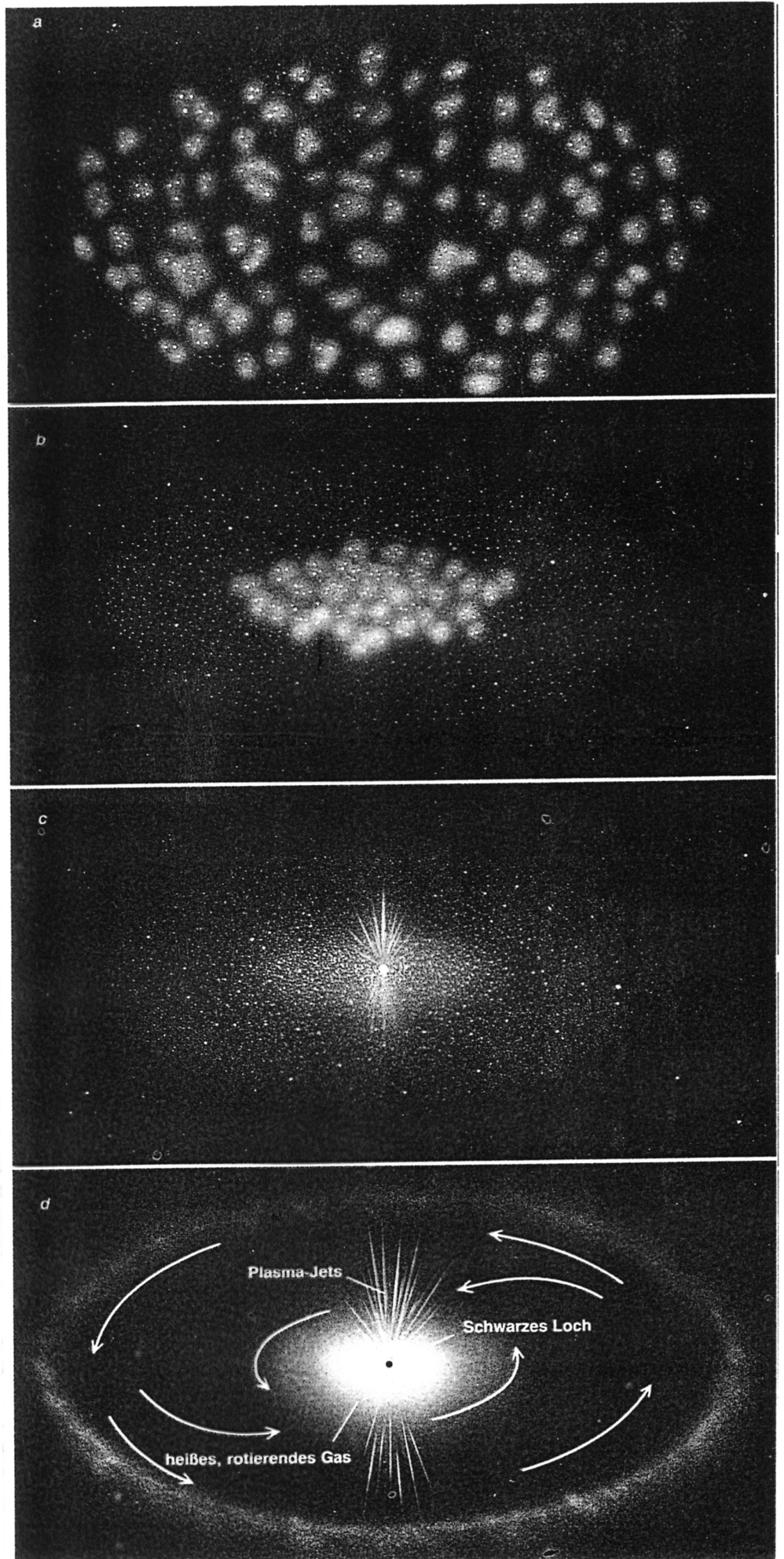
<sup>2</sup> $\rho \approx 10^9 M_{\odot} \frac{1}{(pc)^3}$

Die Masse eines sich derart bildenden Schwarzen Lochs ist vermutlich von dem Typ der Galaxie abhängig. Bei einer elliptischen Galaxie wird die im Zentrum angesammelte Masse wohl proportional zur Gesamtmasse sein, während in spiralförmigen Scheibengalaxien wie der Milchstraße eher die Masse des dicht mit Sternen besetzten, aber weit kleineren Zentralbereichs maßgebend sein dürfte. Die leuchtkräftigsten Quasare entsprechen wahrscheinlich den massereichsten Schwarzen Löchern, die sich also in elliptischen Galaxien gebildet haben sollten. Spiralgalaxien hätten dann nie energiereiche Quasare entwickeln können.

Freilich brauchen nicht alle elliptischen Galaxien wirklich Schwarze Löcher zu beherbergen; und selbst wenn es in einer Galaxie einmal ein Schwarzes Loch gab, so kann es mittlerweile verschwunden sein: Derzeit vermuten manche Theoretiker, daß eine elliptische Galaxie beim Durchdringen von zwei oder mehreren Galaxien entsteht. Die Bahnen ihrer Sterne würden dann durchmischt, und der resultierende Sternhaufen nähme eine elliptische Gestalt an. Falls die ursprünglichen Galaxien in ihren Zentren Schwarze Löcher enthielten, würden diese auf spiralförmigen Bahnen ins Zentrum der neuen Welteninsel wandern und umeinander rotieren. Weil der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins zufolge sich ihre Bahnenergie durch Abstrahlung von Gravitationswellen verringern muß, näherten sich beide sodann einander immer weiter an, bis sie sich letztlich vereinigen würden: Ein gewaltiger Ausbruch an Gravitationsstrahlung wäre dann die Folge, der das resultierende einzelne Schwarze Loch womöglich den intergalaktischen Raum hinauskatapultieren könnte (Bild 2). Im Prinzip ist es möglich, diese mächtigen Gravitationswellen mit Forschungssatelliten nachzuweisen und so die Gültigkeit von Einsteins Theorie zu bestätigen.

Leider bleiben alle diese Ideen auf frustrierende Weise spekulativ. Die For-

**Bild 1:** Die Entstehung von Galaxien könnte eng an die Bildung von Schwarzen Löchern gekoppelt sein. Einer Theorie zufolge kollabiert eine große Gaswolke unter ihrer eigenen Schwerkraft (a) und bildet eine flache Scheibe mit einem dichten Kerngebiet aus, in dem viele Sterne zuerst verschmelzen (b). Die dichteste innere Region fällt dann in sich zu einem Schwarzen Loch zusammen; hochbeschleunigtes Material der Umgebung strahlt hell, während es in diese Gravitationsfalle stürzt (c). Vermutlich hängt die Größe des entstehenden Schwarzen Lochs von der Größe des galaktischen Zentralgebiets ab. Die massereichsten Schwarzen Löcher schließlich erscheinen für uns als gleißend helle Quasare (d).



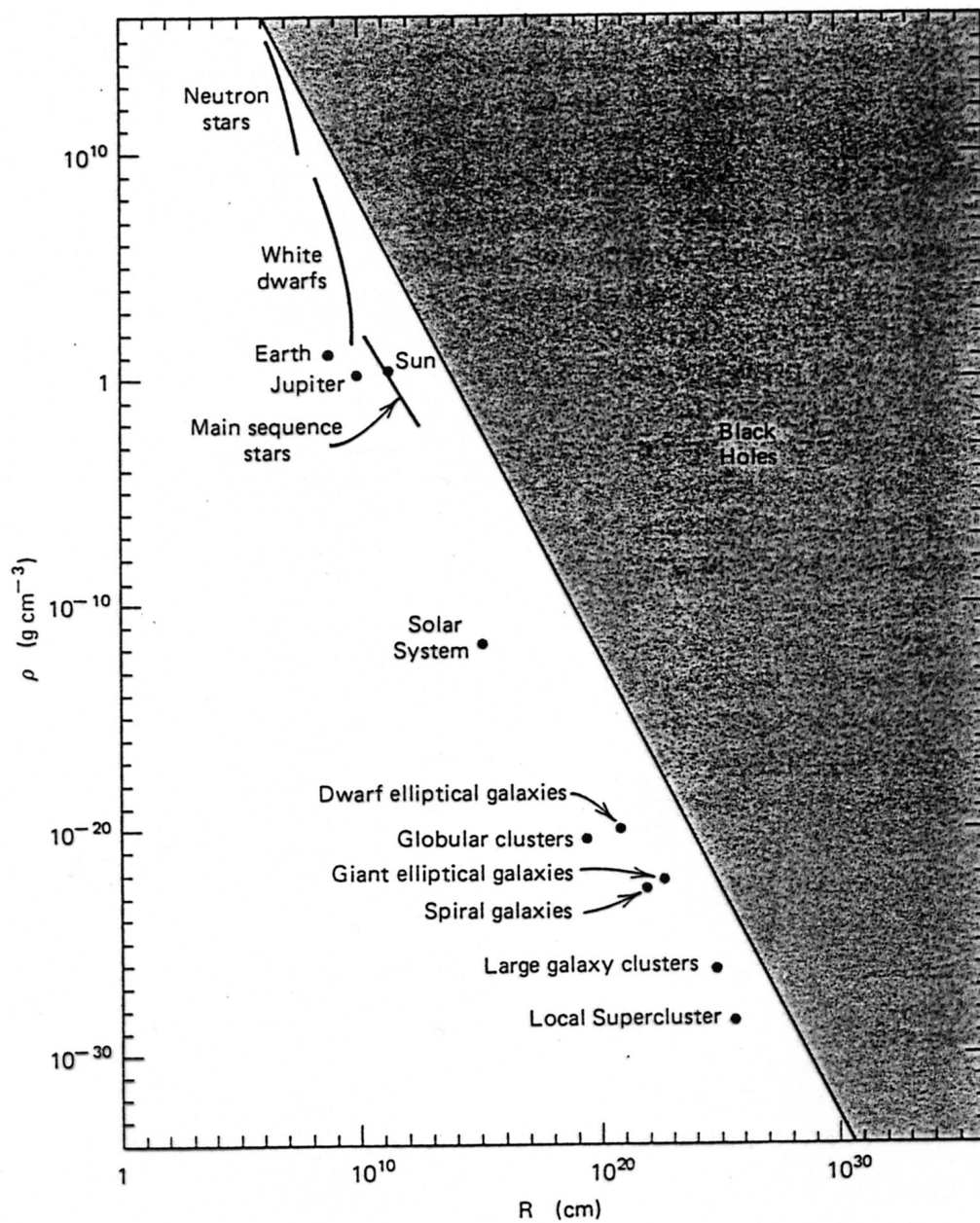


Abbildung 1: Verschiedene Dichten und Massen für einige stellare Objekte.

## Grundlegende Eigenschaften

Betrachtung eines SCHWARZSCHILD Schwarzen Loches mit Masse  $M_{\bullet}$ , Drehimpuls  $J_{\bullet} = 0$ , Ladung  $Q_{\bullet} = 0$  und sphärischer Symmetrie:

- extrem starke Gravitationsfelder in näherer Umgebung

– Abschätzung der Fluchtgeschwindigkeit für ein Teilchen aus Energiebilanz  $E_{kin} = E_{pot}$

$$\frac{1}{2}mc^2 = G \frac{M_{\bullet}m}{R_S} \iff R_S = \frac{2GM_{\bullet}}{c^2}$$
$$\stackrel{c^2 = G = 1}{\iff} R_S = 2M_{\bullet}$$

Herleitung auch durch allgemeine Relativitätstheorie möglich, dort ist

$$R_{krit} = \left(\frac{9}{8}\right) \cdot R_S$$

der minimale Radius eines stabilen Sterns für  $R < R_{krit}$  kein Sterngleichgewicht

- SCHWARZSCHILD-Radius  $R_S$  stellt eine Grenze dar, da keine Information innerhalb  $R_S$  für uns zugänglich ist  $\longleftrightarrow$  Ereignishorizont
- Singularität befindet sich im Inneren, Singularitäten treten nie beobachtbar auf  $\longrightarrow$  COSMIC CENSOR CONJECTURE<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>PENROSE, 1979



- Einfall eines Masseteilchens aus zwei Perspektiven
  - mitbewegter Beobachter bemerkt bei  $r = R_S$  nichts
  - ein statischer Beobachter an  $r > R_S$  sieht die Masse bei Annäherung immer langsamer werden  $\rightarrow$  asymptotischer Verlauf

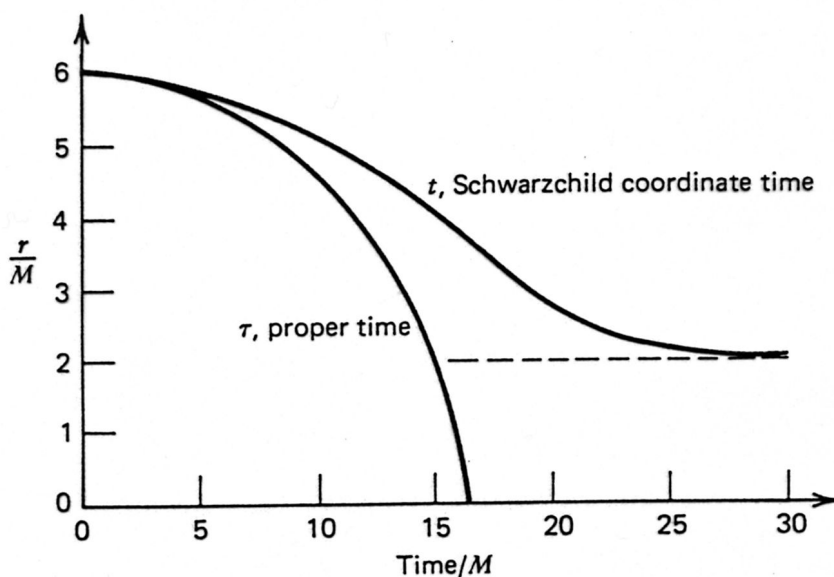


Abbildung 2: Darstellung des Masseneinfangs für ein Teilchen mit Ruhemasse aus der Sicht eines mitbewegten Beobachters am Ort des Teilchens und eines stationären Beobachters entfernt vom Schwarzen Loch.

# Einfang von Teilchen - Potentialverlauf

Betrachtung der SCHWARZSCHILD-Metrik mit

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2M}{r}} dr^2 + r^2 d\vartheta^2 + r^2 \sin^2 \vartheta d\varphi^2$$

und dem metrischen Tensor

$$(g^{\alpha\beta}) = \text{diag} \left( - \left(1 - \frac{2M}{r}\right), \frac{-1}{1 - \frac{2M}{r}}, r^2, r^2 \sin^2 \vartheta \right)$$

Die LAGRANGE-Funktion relativistisch mit Parameter  $\lambda = \frac{\tau}{m_0}$  für *Teilchen mit Ruhemasse*  $m_0$  ist allgemein

$$L = \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} \dot{x}^\alpha \dot{x}^\beta = \frac{1}{2} g_{\alpha\alpha} \dot{x}^\alpha \dot{x}^\alpha = \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} p^\alpha p^\beta = \frac{1}{2} p^\alpha p_\alpha$$

$$2L = - \left(1 - \frac{2M}{r}\right) \dot{t}^2 + \frac{1}{1 - \frac{2M}{r}} \dot{r}^2 + r^2 \dot{\vartheta}^2 + r^2 \sin^2 \vartheta \dot{\varphi}^2$$

Dabei ist  $\dot{t} = \frac{dt}{d\lambda} = p^t$  und entsprechend für  $r, \vartheta$  und  $\varphi$  ebenfalls

Für Ableitungen gilt dann  $\frac{d}{d\lambda} = m \cdot \frac{d}{d\tau}$

LAGRANGE-Gleichungen folgen aus

$$\frac{d}{d\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}^\alpha} \right) - \frac{\partial L}{\partial x^\alpha} = 0$$

$$\vartheta\text{-Komponente} \quad \frac{d}{d\lambda} (r^2 \dot{\vartheta}) - r^2 \sin \vartheta \cos \vartheta \dot{\varphi}^2 = 0$$

$$\varphi\text{-Komponente} \quad \frac{d}{d\lambda} (r^2 \sin^2 \vartheta \dot{\varphi}) = 0$$

$$t\text{-Komponente} \quad \frac{d}{d\lambda} \left[ \left(1 - \frac{2M}{r}\right) \dot{t} \right] = 0$$

$$\text{Viererimpuls} \quad g_{\alpha\beta} p^\alpha p^\beta = p^\alpha p_\alpha = -m_0^2$$

Für  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$  hat man für die Impulskomponenten

$$p_\varphi = r^2 \dot{\varphi} \equiv l = \text{const.}$$

$$-p_t = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) \cdot \dot{t} \equiv E = \text{const.}$$

Mit dem Lagrangian und dem Viererimpuls gilt

$$-m_0^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \dot{t}^2 + \frac{1}{1 - \frac{2M}{r}} \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 = 2L$$

$$-m_0^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \frac{E^2}{\left(1 - \frac{2M}{r}\right)^2} + \frac{m_0^2}{1 - \frac{2M}{r}} \left(\frac{dr}{d\tau}\right)^2 + r^2 \frac{l^2}{r^4}$$

$$\left(\frac{dr}{d\tau}\right)^2 = \frac{E^2}{m_0^2} - \underbrace{\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \cdot \left(1 + \frac{l^2}{m_0^2 r^2}\right)}_{\equiv V_{eff}(r)}$$

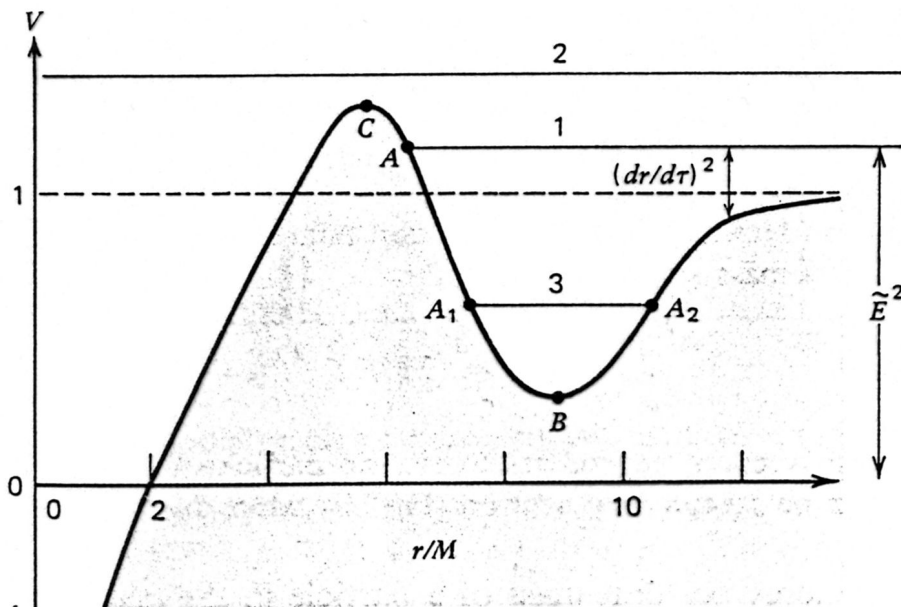


Abbildung 3: Darstellung des effektiven Potentials  $V_{eff}(r)$  für ein bestimmtes Teilchen der Ruhemasse  $m_0$  und mit Bahndrehimpuls  $l$ .

Es existieren drei mögliche Fälle:

1. *nicht gebundener Orbit* - Teilchen nähert sich bis Punkt  $A$  und entfernt sich wieder

2. *Einfang-Orbit* - Teilchen überquert  $R_S$

Wirkungsquerschnitt für Einfang ist

$$\sigma_{\text{Einf.}} = \pi b_{\text{max}}^2 = \pi \left( \frac{4M}{v_\infty} \right)^2 = \frac{4\pi(2M)^2}{v_\infty^2}$$

mit maximalem Stoßparameter  $b_{\text{max}}$

Vergleich mit

$$\sigma_{\text{NEWTON}} = \pi R^2 \left( 1 + \frac{2M}{v_\infty^2 R} \right)$$

liefert für  $\sigma_{\text{Einf.}} = \sigma_{\text{NEWTON}} \Rightarrow 4 \cdot R_\bullet = R_{\text{NEWTON}}$

3. *gebundener Orbit* - Teilchen umkreist das Schwarze Loch

Dieser Fall tritt nicht immer auf. Dazu Potentialbetrachtung (mit  $\tilde{l} = \frac{l}{m_0}$ )

$$\frac{dV}{dr} = 2M \left( 1 + \frac{l^2}{m_0^2 r^2} \right) r^{-2} - \left( 2 - \frac{4M}{r} \right) l^2 m_0^{-2} r^{-3}$$

$$= \frac{2M}{r^2} - \frac{2l^2}{m_0^2 r^3} + \frac{6Ml^2}{r^4 m_0^2} = 0$$

$$= Mr^2 + r\tilde{l}^2 + 3M\tilde{l}^2 = 0$$

$$\Rightarrow \tilde{l} > 2M\sqrt{3}$$

stabile Umlaufbahnen existieren nur für Teilchen mit diesem Mindestbahndrehimpuls

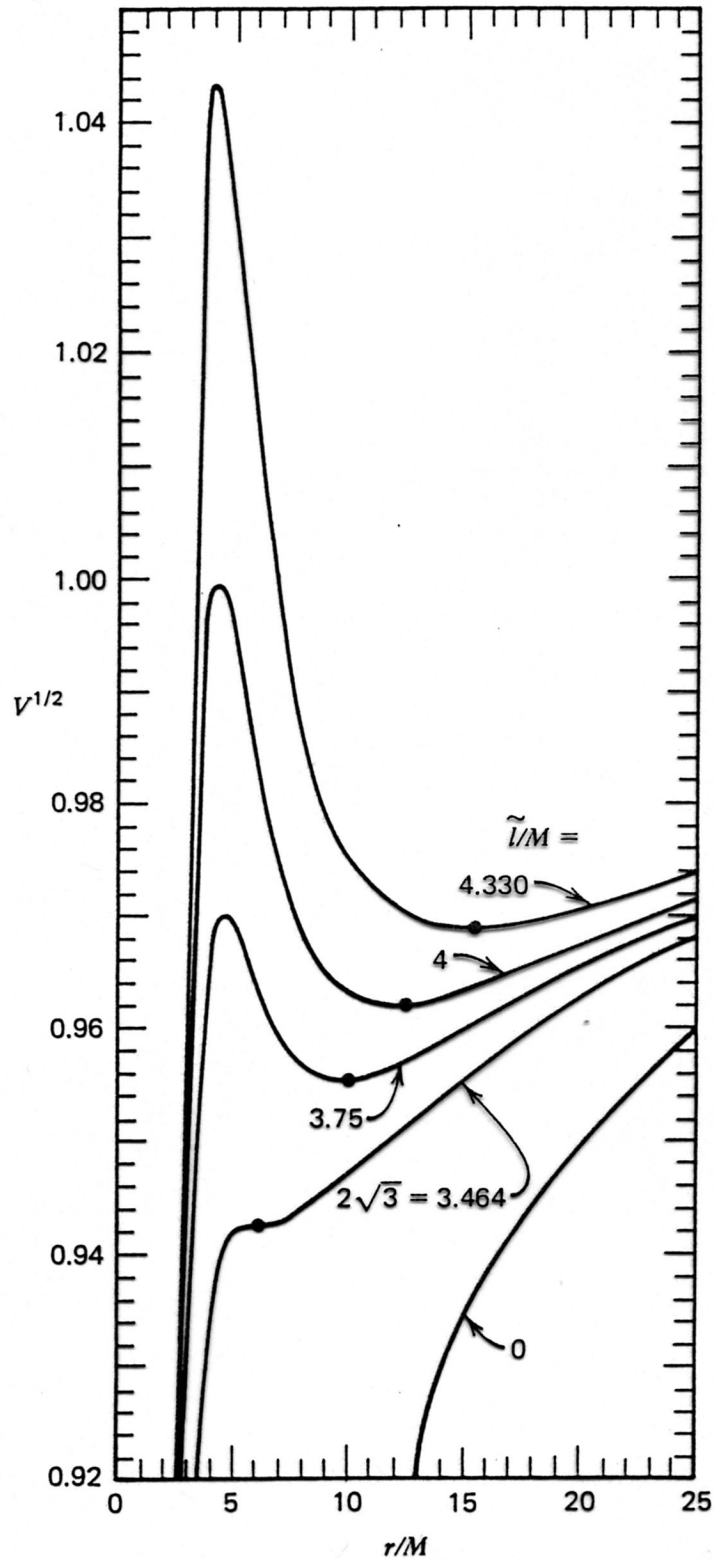


Abbildung 4: Verschiedene Potentialverläufe für verschiedene Werte von  $\tilde{l}$ . Stabile Umlaufbahnen sind nicht für jeden beliebigen Bahndrehimpuls möglich.

Teilchen ohne Ruhemasse haben anderen Weltlinienparameter  $\lambda_\gamma = l \cdot \lambda$

Damit erhält man

$$\left(\frac{dr}{d\lambda_\gamma}\right)^2 = \frac{1}{b^2} - \underbrace{\frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)}_{\equiv V_{eff}^\gamma(r)},$$

mit dem Stoßparameter  $b = \frac{l}{E}$

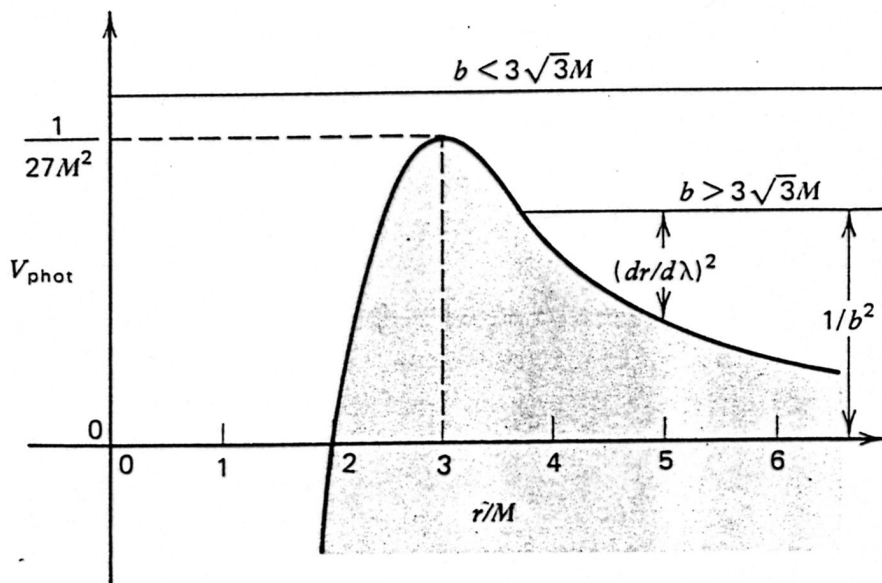


Abbildung 5: Verlauf des Potentials  $V_{eff}^\gamma(r)$  für Teilchen ohne Ruhemasse.

Wirkungsquerschnitt für Einfang ist

$$\sigma_\gamma = \pi b_c^2 = \pi \left(3 \cdot \sqrt{3} \cdot M\right)^2 = 27\pi \cdot M^2$$

$b_c$  Grenzparameter zwischen Streuung und Einfang

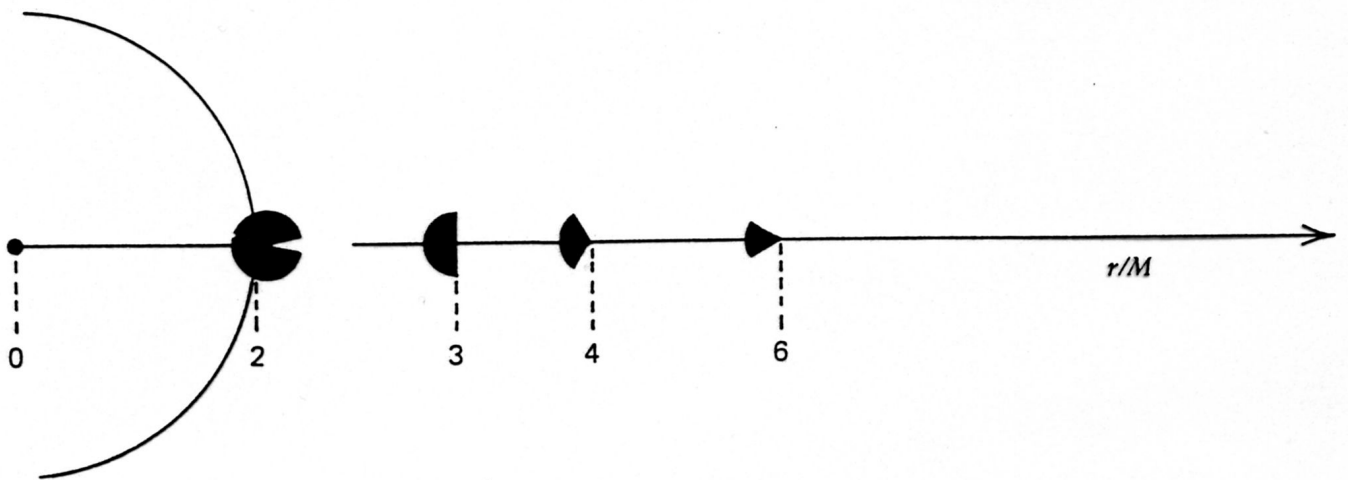


Abbildung 6: Gravitationseinfang von Photonen. Emissionen in den schwarzen Gebieten werden eingefangen. Ein in Richtung des Schwarzen Loches bewegtes Photon entkommt im Winkelbereich  $\psi$  am Abstand  $r$ , wenn gilt  $\sin \psi > (27)^{\frac{1}{2}} \frac{M}{r} \cdot \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{\frac{1}{2}}$ .

## Andere Arten von Schwarzen Löchern

Insgesamt unterscheidet man

- KERR-NEWMAN-Metrik mit  $M_{\bullet} \neq 0$ ,  $J_{\bullet} \neq 0$  und  $Q_{\bullet} \neq 0$
- KERR-Metrik mit  $M_{\bullet} \neq 0$ ,  $J_{\bullet} \neq 0$  und  $Q_{\bullet} = 0$
- REISSNER-NORDSTRÖM-Metrik mit  $M_{\bullet} \neq 0$ ,  $J_{\bullet} = 0$  und  $Q_{\bullet} \neq 0$
- SCHWARZSCHILD-Metrik mit  $M_{\bullet} \neq 0$ ,  $J_{\bullet} = 0$  und  $Q_{\bullet} = 0$

Betrachtung  $Q_{\bullet} \neq 0$  gewöhnlich nicht nötig, da ein solches Objekt vom umgebenden Plasma neutralisiert wird

Gravitationsfelder nähern sich daher asymptotisch der KERR-Metrik

Parameter  $M_{\bullet}$ ,  $J_{\bullet}$  und  $Q_{\bullet}$  reichen zur Beschreibung des Schwarzen Loches aus („*No-Hair*“-Theorem<sup>4</sup>)

↔ Sternparameter  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ ,  $M$ ,  $L$ ,  $\kappa$ ,  $\epsilon$

keine Gleichgewichtsgleichungen mehr vorhanden

---

<sup>4</sup>WHEELER



# Hawking-Theorem, Hawking-Strahlung

Oberfläche eines Schwarzen Loches nimmt während Wechselwirkungen nie ab  $\rightarrow dA_{SL} \geq 0$

Vermutung: Ähnlichkeit zur Thermodynamik  $\rightarrow$  verwandte Größe ist Entropie  $dS \geq 0$

HAWKING-Strahlung: Schwarze Löcher strahlen ein thermales Spektrum ab mit der Eigentemperatur

$$T_{\bullet} = \frac{\hbar}{2\pi k M_{\bullet}} \approx 10^{-7} K \left( \frac{M_{\odot}}{M_{\bullet}} \right)$$

zum Vergleich: Strahlungstemperatur der kosmische Hintergrundstrahlung  $T_{kH} = 2,7 K$

Deutung der Strahlung durch spontane  $e^+e^-$ -Paarbildung: nötige Energie für diesen Prozeß ist

$$\Delta E = 2m_e - B$$

mit  $B$  Bindungsenergie

Normale Zeitspanne für virtuellen Prozeß ist

$$\Delta t \propto \frac{1}{\Delta E} = \frac{1}{2m_e - B}$$

In starken Feldern gilt jedoch

$$B \rightarrow m_e \implies \Delta t \rightarrow \infty$$

Werden die Teilchen während  $\Delta t$  um eine COMPTON-Wellenlänge  $\lambda_C$  getrennt, so werden sie reell

Abstrahlung bedeutet Masseverlust („Verdunsten“ des Schwarzen Loches)  $\rightarrow$  Verletzung des Flächen-theorems

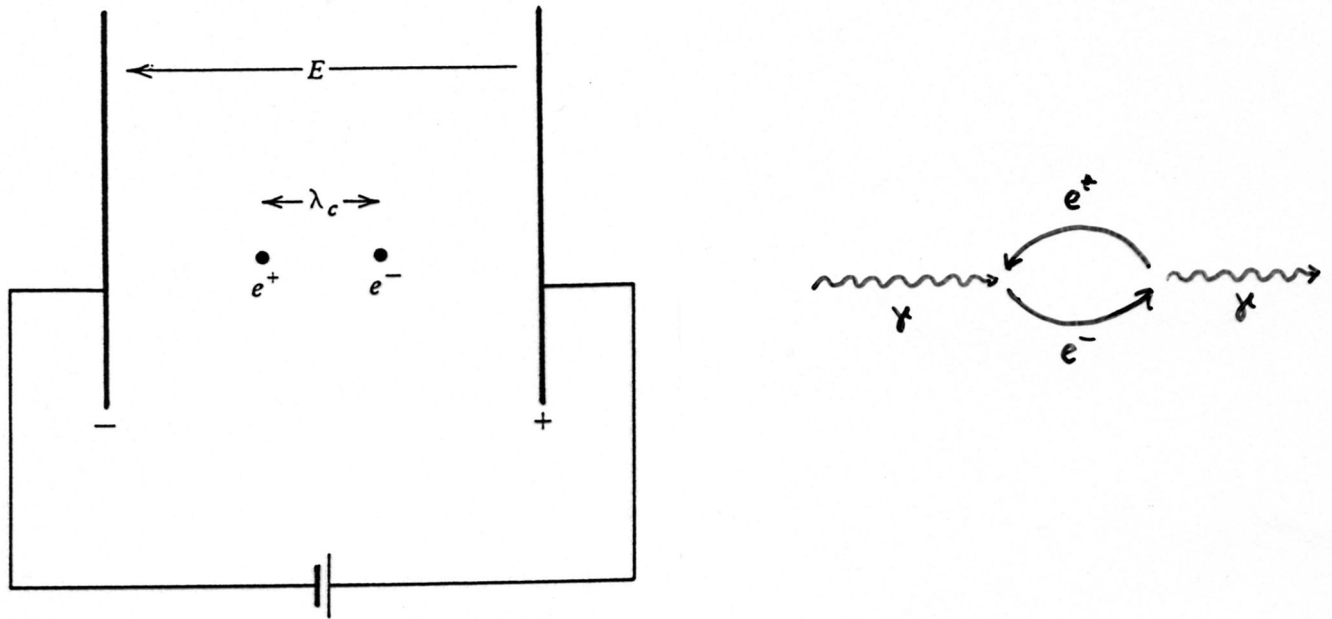


Abbildung 7: Spontane Paarerzeugung in einem starken elektrischen Feld

Flächentheorem wird durch 2. Hauptsatz der Thermodynamik ersetzt

$$d\left(\sum_i S_{SL}^i + \sum_i S_{Materie}^i\right) \geq 0$$

Zeitskala für den Massenverlust

$$\frac{dE}{dt} \propto A \cdot T^4 \propto M_{\bullet}^2 \cdot M_{\bullet}^{-4} \propto M_{\bullet}^{-2}$$

$$\tau \propto \frac{E}{\frac{dE}{dt}} \propto M_{\bullet}^3 \propto 10^{10} \left(\frac{M_{\bullet}}{10^{15}g}\right)^3 a$$

Abstrahlung ist nur für sehr leichte Schwarze Löcher relevant

Durch Abstrahlung nimmt  $M_{\bullet}$  ab,  $T_{\bullet}$  steigt bis zur Explosion  $\rightarrow$  mögliche Beobachtbarkeit eines solchen Ereignisses

Aus vorhergesagtem Energiespektrum <sup>5</sup>  $\gamma$ -Quanten mit

$$\begin{aligned} \hbar\omega &\approx 100 \text{ MeV} \left( \frac{10^{15} \text{ g}}{M_{\bullet}} \right) \\ \text{Beispiel: } \hbar\omega &\approx 100 \text{ MeV} \left( \frac{10^{15} \text{ g}}{M_{\odot}} \right) \\ &= 10^9 \cdot \frac{10^{15}}{2 \cdot 10^{33}} \text{ eV} = 10^{-9} \text{ eV} \end{aligned}$$

$\rightarrow$  möglicher Beitrag zur  $\gamma$ -Hintergrundstrahlung

$\rightarrow$  *jedoch*: keine Strahlung aus diesen Quellen beobachtet

---

<sup>5</sup>PAGE und HAWKING, 1976

# Experimenteller Nachweis

Schwarze Löcher sind nur indirekt durch Wirkung auf Umgebung festzustellen durch Beobachtung von

- Sternbahnen in Regionen hoher Sterndichte
  - einzelne Sterne nicht zu beobachten (zu hohe Sterndichte)
  - LOSVD<sup>6</sup> - Messung der optischen Spektren des überlagerten Lichtes
  - Geschwindigkeit folgt aus rot- und blauverschobenen Spektrallinien (zur Erde hin- bzw. weg- bewegte Quellen)
  - daraus Ermittlung der Zentralmasse

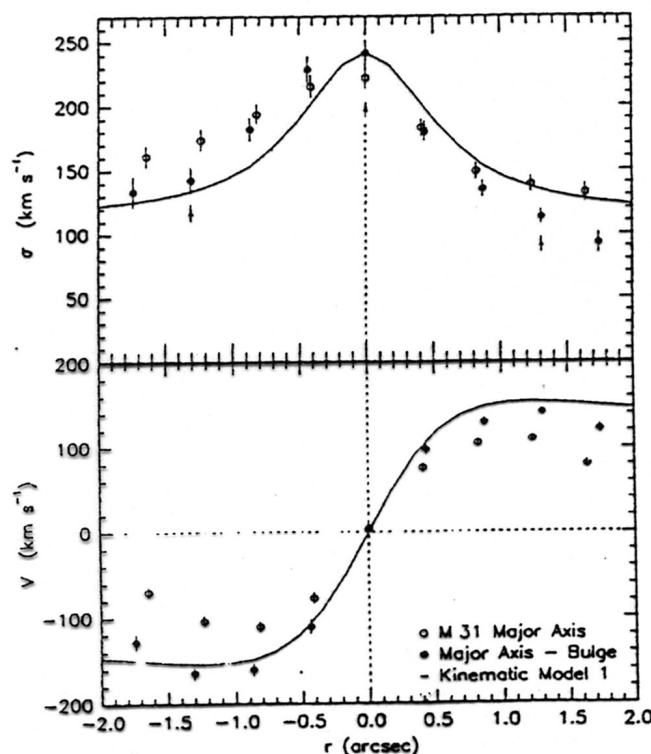


Abbildung 8: Gemessene Geschwindigkeitsverteilung der Galaxie M31.

<sup>6</sup>Line-Of-Sight Velocity Distribution

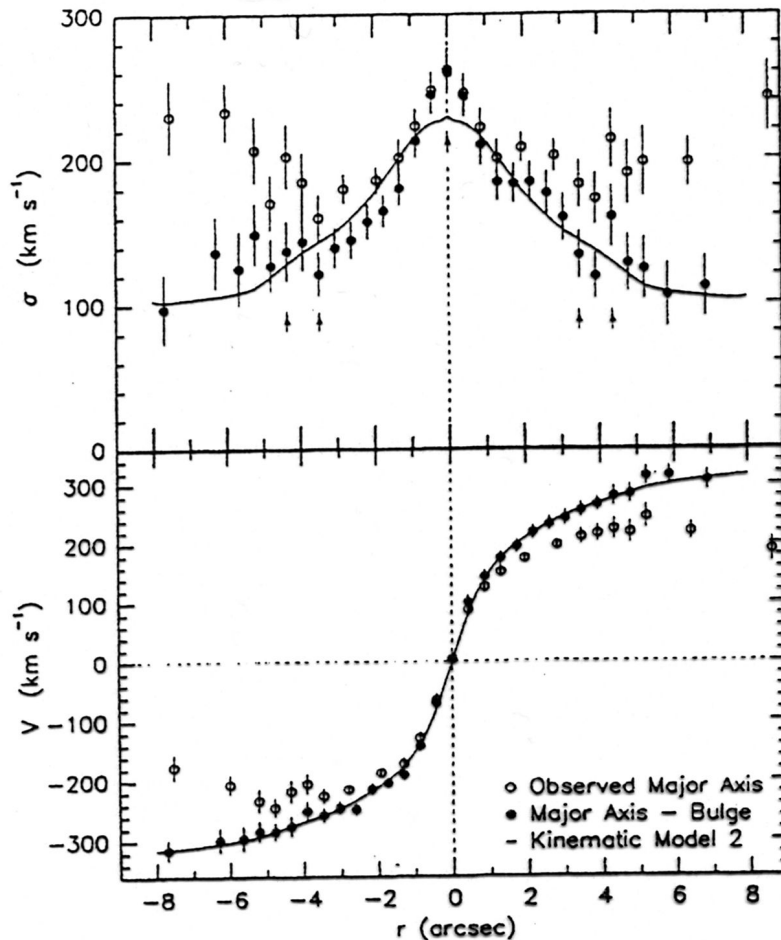


Abbildung 9: Gemessene Geschwindigkeitsverteilung der Galaxie NGC4594.

- energiereichen Strahlungsquellen (→ Quasare)
  - einfallende Massen erreichen fast Lichtgeschwindigkeit
  - kurzzeitige Strahlungsausbrüche durch Sterneinfang
  - supermassives Schwarzes Loch könnte Energielieferant sein
  - *jedoch*: auch eine Gruppe anderer kompakter Objekte kann diese Eigenschaften erklären (Neutronensterne, Weiße Zwerge)

TABLE 1 Parameters of molecular disk traced by water-vapour masers

Inner radius	4.1 mas (0.13 pc)*
Outer radius	8.0 mas (0.25 pc)*
Inner rotation velocity	$1,080 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$
Outer rotation velocity	$770 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$
Inner rotation period	750 yr
Outer rotation period	2,100 yr
Position angle	$86 \pm 2^\circ$
Inclination	$83 \pm 4^\circ$
Position velocity slope (dr/dv)	$3.89 \pm 0.01 \text{ microarcsec per (km s}^{-1}\text{)}$
Central mass	$3.6 \times 10^7 M_\odot$
Disk mass	$< 4 \times 10^6 M_\odot$
Central mass density	$> 4 \times 10^9 M_\odot \text{ pc}^{-3}$
Centripetal acceleration†	$9.5 \pm 1.1 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
Disk systemic velocity‡	$476 \pm 2 \text{ km s}^{-1}$
Galactic systemic velocity‡§	$472 \pm 4 \text{ km s}^{-1}$
Radial motion	$< 10 \text{ km s}^{-1}$
Thickness of disk	$< 0.003 \text{ pc}$
Maser beam angle	$7^\circ$
Disk-galaxy angle	$119^\circ$
Apparent maser luminosity	$110 L_\odot$
Model luminosity¶	$7 L_\odot$
Distance	$6.4 \pm 0.9 \text{ Mpc}$

Abbildung 10: Zusammenstellung gemessener Daten der Galaxie NGC4258.

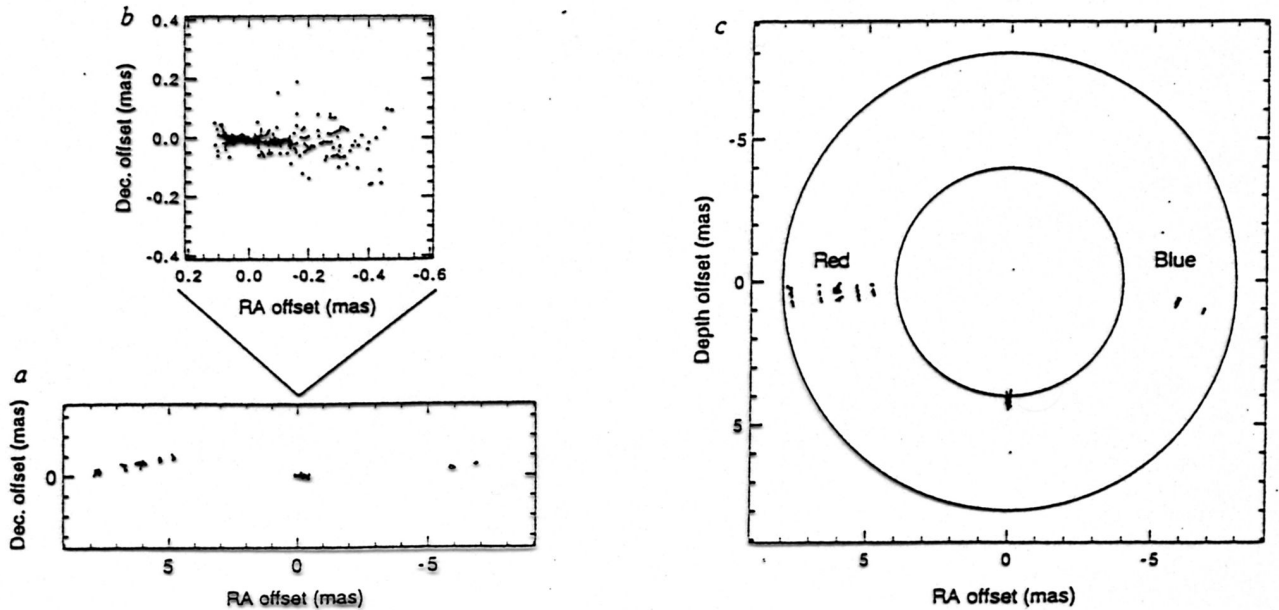
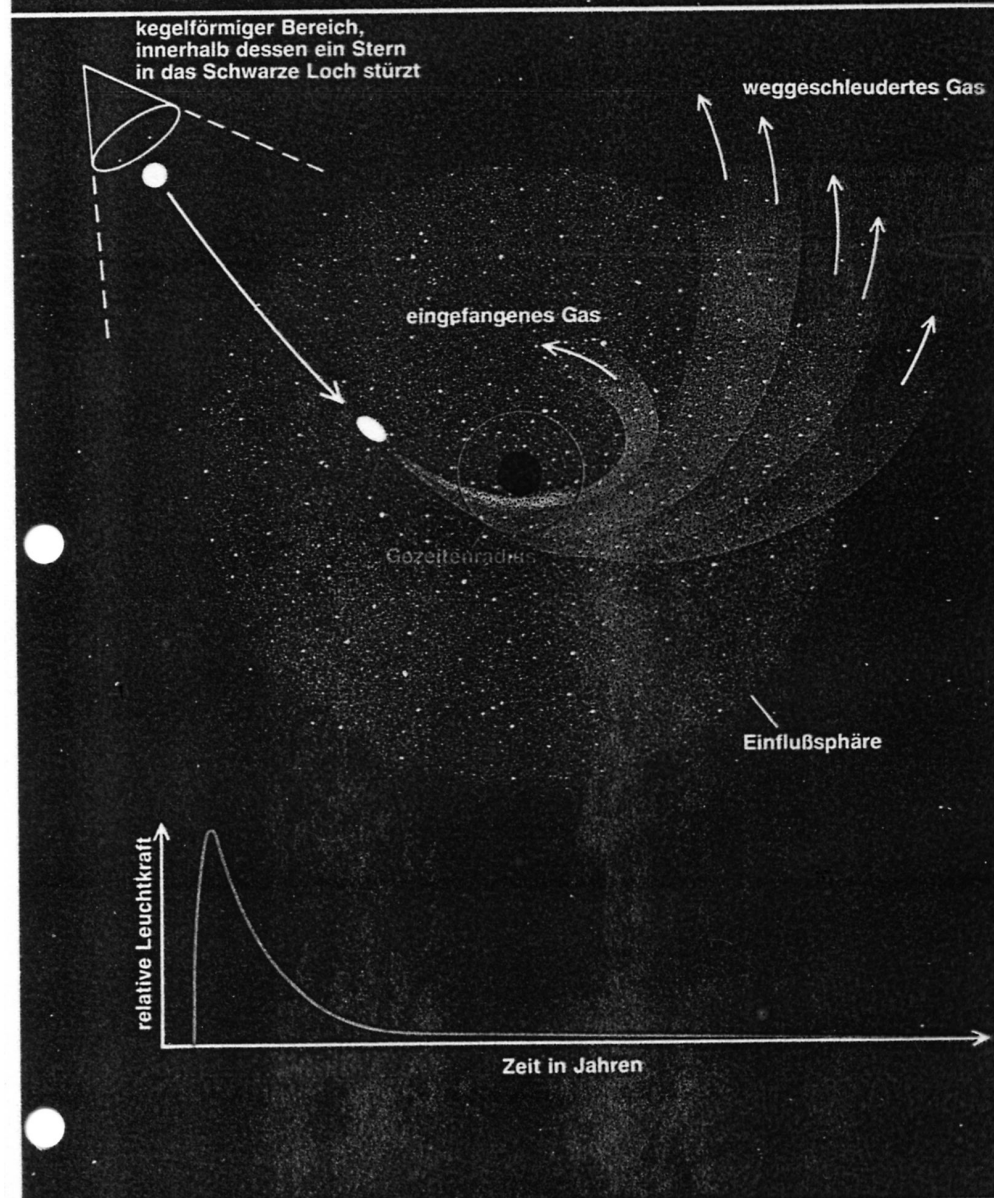
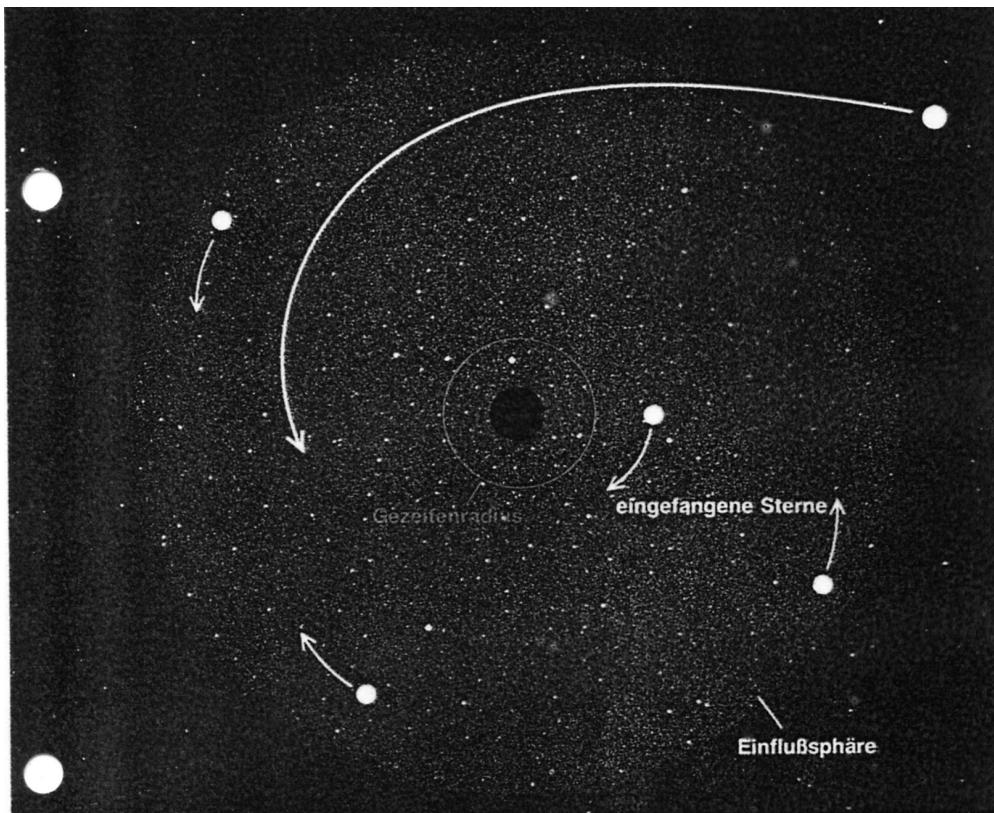


FIG. 2 a, Map of the distribution of the water masers in the NGC4258 (RA, right ascension; dec., declination). All features greater than  $5\sigma$  are plotted (20–40 mJy). The position errors are  $\sim 5 \times 10$  microarcsec for the systemic features, and  $\sim 20 \times 40$  microarcsec for the high-velocity features. The origin of the coordinates is referred to the feature at  $512.5 \text{ km s}^{-1}$ . b, Expanded view of the emission near the systemic velocity of the galaxy. The features at  $\text{RA} < -0.2 \text{ mas}$  are weak and the scatter in positions is due to measurement noise. c, Top view of the

molecular disk. The positions along the line-of-sight (depth) direction were calculated from the line-of-sight velocities and the calculated velocity field of a simple edge-on disk based on the binding mass required by the high-velocity features. Only those features that were measured accurately enough to provide errors in the depth direction of  $< 0.15 \text{ mas}$  are plotted. The circles mark the inner and outer edges of the observed molecular disk.

Abbildung 11: Darstellung der beobachteten Strahlungsquellen in der Galaxie NGC4258.



Existenz kann allerdings nicht ausgeschlossen werden.

Beobachtungen mit noch höherer Auflösung hülften weiter. Ließe sich anhand der Umlaufgeschwindigkeit der Sterne zeigen, daß die dunkle Masse sogar auf einen zentralen Bereich von nur einem Lichtjahr Durchmesser konzentriert ist, schieden viele der dunklen Sterntypen als Kandidaten aus. Denn ein solch kompaktes System wäre wegen der häufigen nahen Begegnungen der Sterne untereinander nicht stabil: Innerhalb kurzer Zeit würden sich die schwersten Sterne im Zentrum ansammeln und zu einem einzigen Körper, wohl einem Schwarzen Loch, verschmelzen. Es ist höchst unwahrscheinlich, daß ein dichter Sternhaufen eine Zeitspanne von 10 Milliarden Jahren im Zentrum einer Galaxie unverseht überstehen könnte.

#### Wie verrät sich die zuschnappende Gravitationsfalle?

Der Begriff des Schwarzen Lochs wurde eingeführt, um einige der leuchtkräftigsten und effizientesten Strahlungsquellen im Universum zu erklären; sollte sich aber bewahrheiten, daß auch in den Zentren gewöhnlicher Galaxien massereiche Schwarze Löcher vorhanden sind, dann müssen sie sich extrem ruhig verhalten. So emittiert die Andromeda-Galaxie nicht mehr als ein Zehntausendstel der Strahlung eines Quasars; auch die Sombrero-Galaxie und M32 zeigen keine Anzeichen gesteigerter Aktivität. Womöglich ist in den meisten Galaxien der innere Bereich von Gas bereits nahezu leergefegt, so daß der Materienachschub für eine weitere Aktivität fehlt.

Aber auch ein inaktives Schwarzes Loch könnte gleichsam als gespannte Materiefalle bei Gelegenheit immer noch einmal zuschnappen und sich dadurch verraten – wenn es ihm gelänge, einen Stern aus dem inneren Bereich der Galaxie zu erhaschen. Unter dem gemeinsamen Einfluß aller anderen Sterne und des Loches selbst durchläuft jeder Stern der

**Bild 6:** Die starke Anziehungskraft eines Schwarzen Loches fängt alle Sterne innerhalb eines bestimmten Einflußbereichs ein und zwingt sie auf enge Umlaufbahnen hoher Geschwindigkeit. Dabei entsteht eine auffällige Ansammlung sich schnell bewegender Sterne (oben). Solche, die sich dem Loch unter kleinen Winkeln nähern, geraten ins Innere der Gezeitenzone, wo die Gravitationswirkung des Lochs sie schließlich zerreißt (Mitte). Ein Teil des stellaren Gases stürzt in das Loch und erzeugt dabei einen kurzzeitigen Helligkeitsausbruch; die meiste Zeit aber verbringt das Schwarze Loch in einem Ruhezustand (unten).

- abgestrahlter Gravitationsstrahlung
  - beschleunigte Massen strahlen Gravitationswellen ab
  - möglicher Nachweis durch Ortung von Strahlungsquellen
  - Einblick in Wechselwirkungen Schwarzer Löcher mit Umgebung
  - „Doppelsternsysteme“ Schwarzer Löcher
  - *Problem*: geeigneter Detektor
  - mehrere Detektoranlagen in Planung



## Zusammenfassung

- Schwarze Löcher: durch Gravitation kollabierte Objekte ohne Gleichgewichtsgleichung
- Vollständig charakterisiert durch  $M_{\bullet}$ ,  $J_{\bullet}$  und  $Q_{\bullet}$
- Keine Information für  $R \leq R_S$  zugänglich ( $R_S$  - SCHWARZSCHILD-Radius, Ereignishorizont)
- Potentialbetrachtung
  - Teilchen mit Ruhemasse - Einfang, Streuung, stabile Umlaufbahnen (Mindestbahndrehimpuls)
  - Teilchen ohne Ruhemasse - Einfang, Streuung
- Thermodynamische Beschreibung möglich (Flächentheorem, Zweiter Hauptsatz, HAWKING-Strahlung)
- Existenz noch nicht eindeutig experimentell bewiesen
- Mögliche Erweiterung der ART ohne Singularitäten denkbar