

# Schwarze Löcher

Von Julius Pauleit

# Inhaltsverzeichnis

- 1. Schwarze Löcher
  - 1.1 Schwarze Löcher allgemein
  - 1.2 Schwarzschild Radius
  - 1.3 Kerr Lösung
  - 1.4 Akkretierende Schwarze Löcher
- 2. Objekte mit Akkretierenden Schwarzen Löchern
  - 2.1 Mikroquasare
  - 2.2 Aktive Galaxienkerne
    - 2.2.1 Beispiel: Quasar
- 3. Anhang
  - 3.1 Textquellen
  - 3.2 Bildquellen

# Schwarze Löcher Allgemein

- Wenn ein Stern all seine Energie verbraucht hat komprimiert ihn die Gravitation seiner eigenen Masse. Dabei gibt es 3 verschiedene Möglichkeiten:
  - 1. Weißer Zwerg: Die Masse des kompakten Objektes betrug weniger als 1,44 Sonnenmassen. Die einzelnen Atome des Sterns werden lückenlos zusammengequetscht. Dadurch entsteht eine Schockwelle, durch die die äußeren Schichten des Sterns abgestoßen werden. Sie werden dann planetarische Nebel genannt
  - 2. Neutronenstern: Bei einer Masse zwischen 1,44 und 3 Sonnenmassen, werden nicht nur die Atome sondern auch die Protonen und Elektronen in dem kompakten Objekt so stark zusammengepresst, dass sie sich zu Neutronen verbinden. Ab einem bestimmten Druck stoppt die Kontraktion schlagartig und Energie wird mit den äußeren Sternhüllen als Supernova in das All gesprengt. Neutronensterne haben durchschnittlich 20km Durchmesser.
- 3. Schwarzes Loch: Bei einer Masse von über 3 Sonnenmassen wird die Materie so stark zusammengepresst, dass es einen unendlichen Kollaps gibt.
- Es gibt 2 wichtige Arten von Schwarzen Löchern. Die einen rotieren um sich selbst, die anderen nicht. Schwarze Löcher rotieren, weil ihre Ursprungsterne rotiert haben und als diese kollabiert sind, hat sich das Schwarze Loch nach dem Drehimpulserhaltungsgesetz noch schneller gedreht. Durch bestimmte Faktoren, zum Beispiel durch die Jets (siehe Folie 1.4) verlangsamt sich die Rotationsgeschwindigkeit der Schwarzen Löcher bis zum Stillstand.
- Neben diesen stellaren Schwarzen Löchern mit einer Masse von ungefähr bis zu zehn Sonnenmassen gibt es noch Supermassereiche Löcher von  $10^6$  bis  $10^{10}$  Sonnenmassen. Vermutlich entstanden sie durch den Zusammenschluss stellarer Löcher und der Akkretion von viel Gas.
- Außerdem forscht man über die mögliche Existenz über Mittelschwere Schwarze Löcher die die Lücke zwischen stellaren und Supermassiven Schwarzen Löchern ausfüllen.

# Life Cycle of a Massive Star

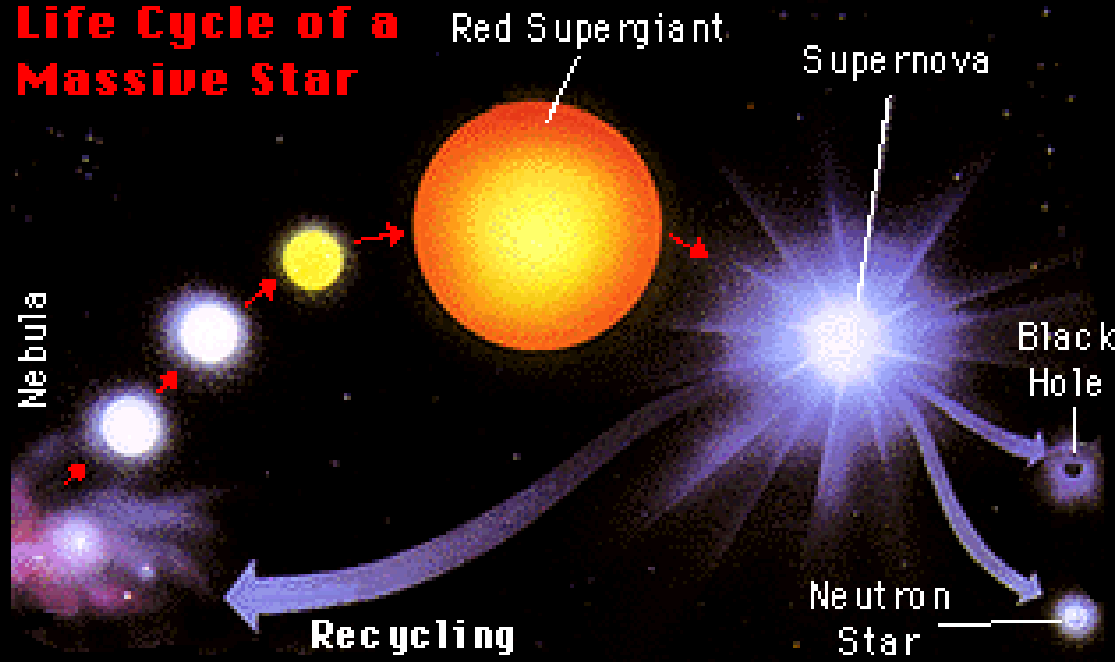
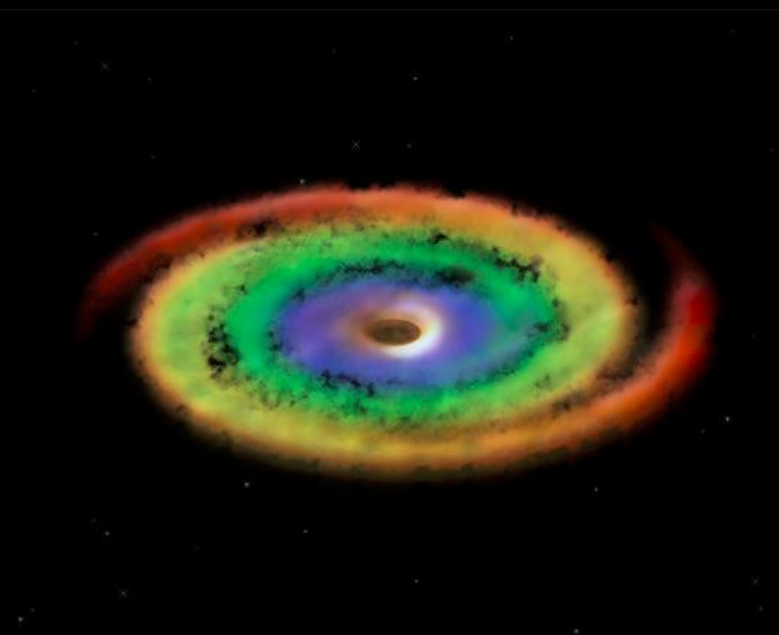
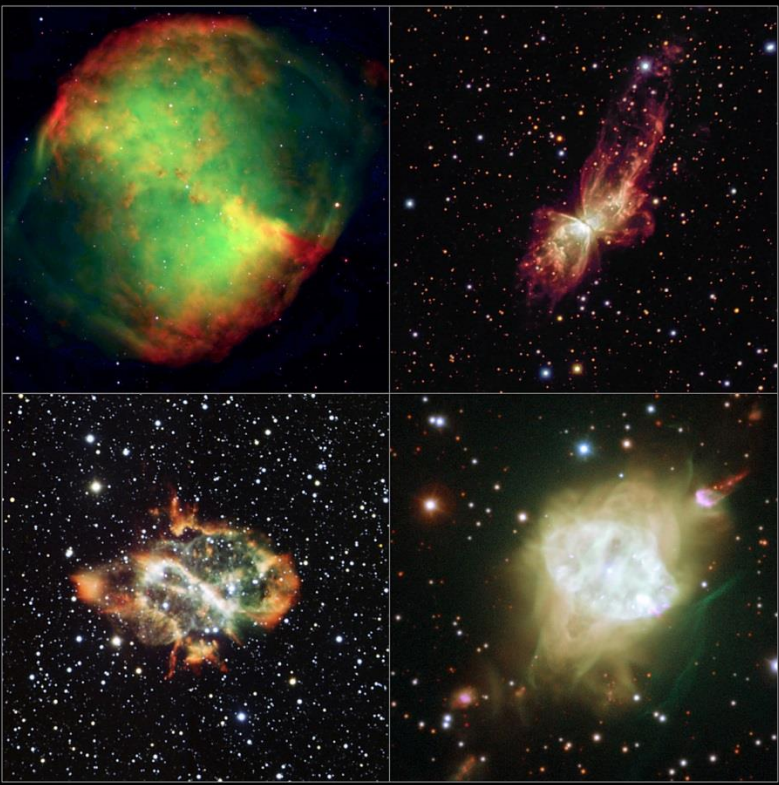
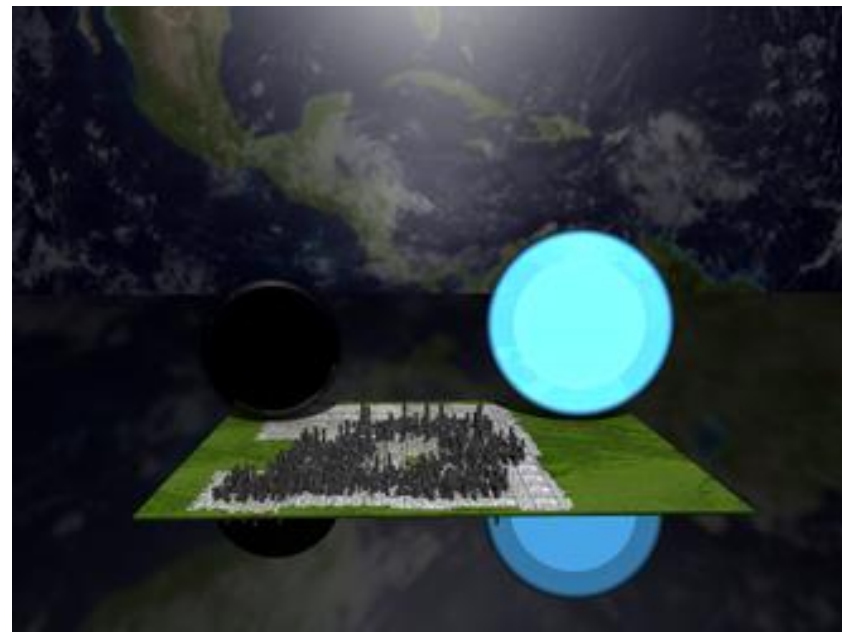


Abb.1 Aufnahmen der bipolaren planetaren Nebel von M27, NGC 6302, Fleming 1 und NGC 5189 von oben links im Uhrzeigersinn

Abb.2 Lebenszyklus eines Massereichen Sterns und dessen Verwandlung in ein Schwarzes Loch/Neutronenstern

Abb.3 Simulierte Temperatur einer Akkretionsscheibe. Blau: Heißer; Rot: Kälter

Abb.4 Diese Simulation zeigt einen Neutronenstern im Vergleich zu dem Eventhorizont eines Schwarzen Lochs und einer mittelgroßen Stadt (ca. 20 km)



# Schwarzschild Radius

- Der Schwarzschildradius ist der Bereich um das Schwarze Loch, ab dem die Fluchtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit erreicht und übersteigt, folglich kann ab da nichts mehr dem Schwarzen Loch entfliehen. Der Umkreis mit dem Schwarzschildradius als Radius wird als Ereignishorizont bezeichnet. Ab diesem Punkt kann nichts mehr dem Schwarzen Loch entfliehen, da die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist.

- Der Schwarzschildradius lässt sich aus der Masse des Schwarzen Lochs bestimmen

$$R = 3 \times M \text{ (R in Kilometern und M in Sonnenmassen)}$$

- Bei einer Masse M von drei Sonnenmassen beträgt der Schwarzschildradius 9 Kilometer. Bei einer Sonnenmasse von  $M=10^6$  beträgt der Schwarzschildradius  $3 \times 10^6$  Kilometer
- Der innere Rand der Akkretionsscheibe (siehe Folie 1.4) hat die dreifache Grösse des Schwarzschildradius, also die Anzahl der Sonnenmassen mal 9.
- Diese Berechnung funktioniert nur, wenn das Schwarze Loch nicht rotiert.

Schwarzschildradius

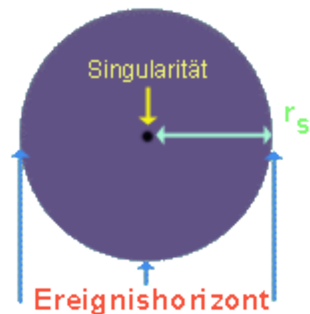


Abb.5 Ein Schwarzes Loch, mit dem Ereignishorizont und dem Schwarzschildradius

# Kerr Lösung

- Bei rotierenden Schwarzen Löchern ist die Größe des Ereignishorizonts abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit des Schwarzen Lochs. Das Resultat ist ein Wert zwischen dem halben und dem ganzen Schwarzschildradius.
- Der größte Unterschied zu statischen Schwarzen Löchern ist, dass der Ereignishorizont bei gleicher Masse des Schwarzen Lochs kleiner ist. Bei der Umdrehungsgeschwindigkeit  $a=1$ , das entspricht der Lichtgeschwindigkeit ist der Ereignishorizont halb so groß.
- Ausserdem gibt es noch die sogenannte Ergosphäre. Am Pol der liegt sie deckungsgleich mit dem Ereignishorizont. In Richtung Äquator entfernt sie sich immer weiter vom Ereignishorizont. Innerhalb dieses Bereichs wird alles (Materie, Licht, magnetische Felder, Raumzeit) von der Rotation mitgerissen.
- Im Gegensatz zu statischen Schwarzen Löchern (Schwarzschild Lösung) sagen manche Theorien vorher, dass rotierende Schwarze Löcher einen inneren und einen äußeren Ereignishorizont. Der Innere wird als Cauchy-Fläche bezeichnet, der Äußere entspricht dem klassischen Ereignishorizont.

# Kerr

$$0 < a/M < 0.7$$

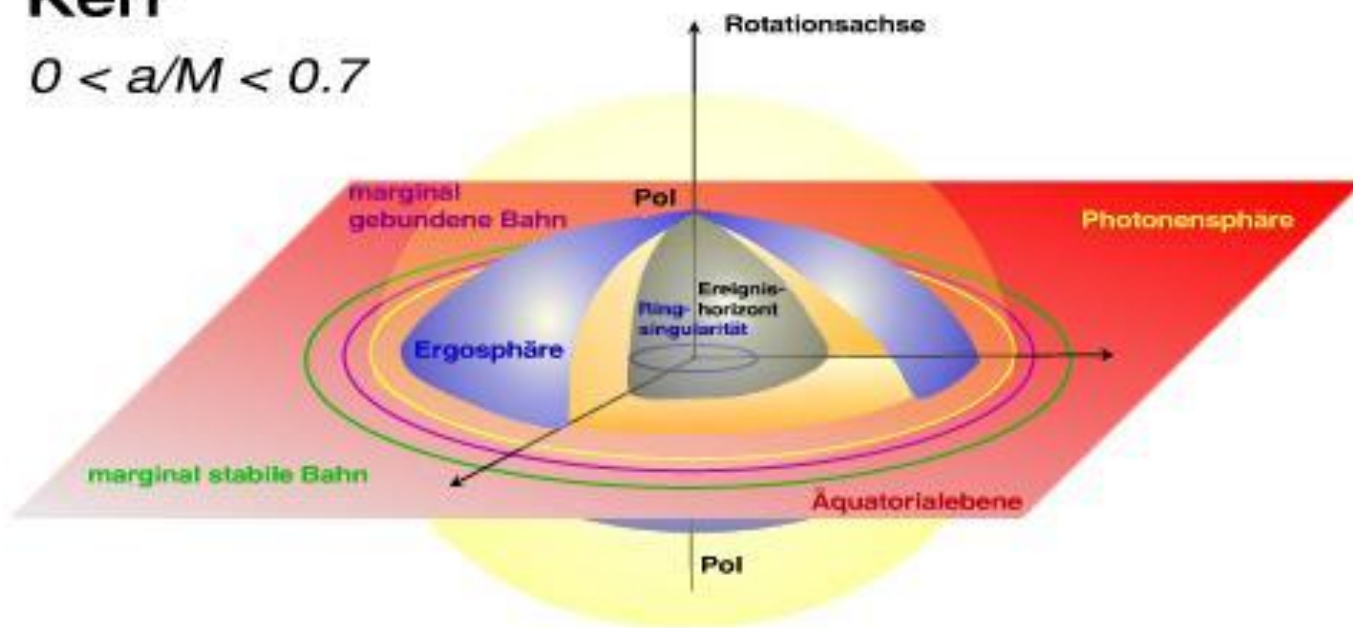
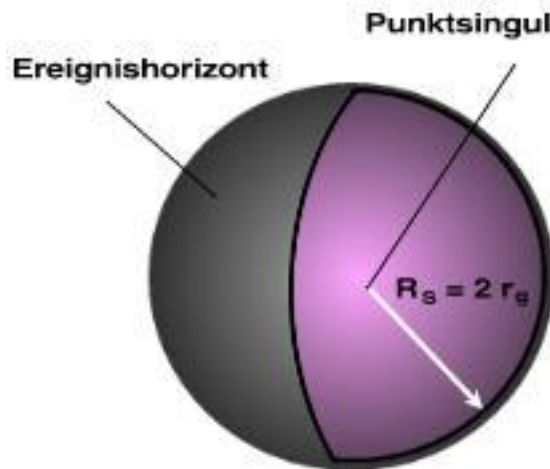


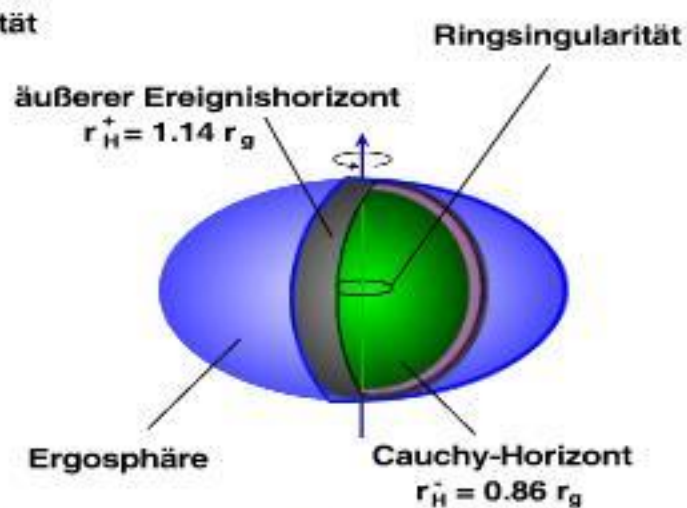
Abb.6 Bildliche, vereinfachte und nicht massstabsgetreue Zeichnung eines Kerr Lochs

Abb.7 Vergleich des Ereignishorizonts eines Schwarzschild Schwarzes Lochs mit einem Kerr Schwarzen Loch



**Schwarzschild**

$$a = 0$$



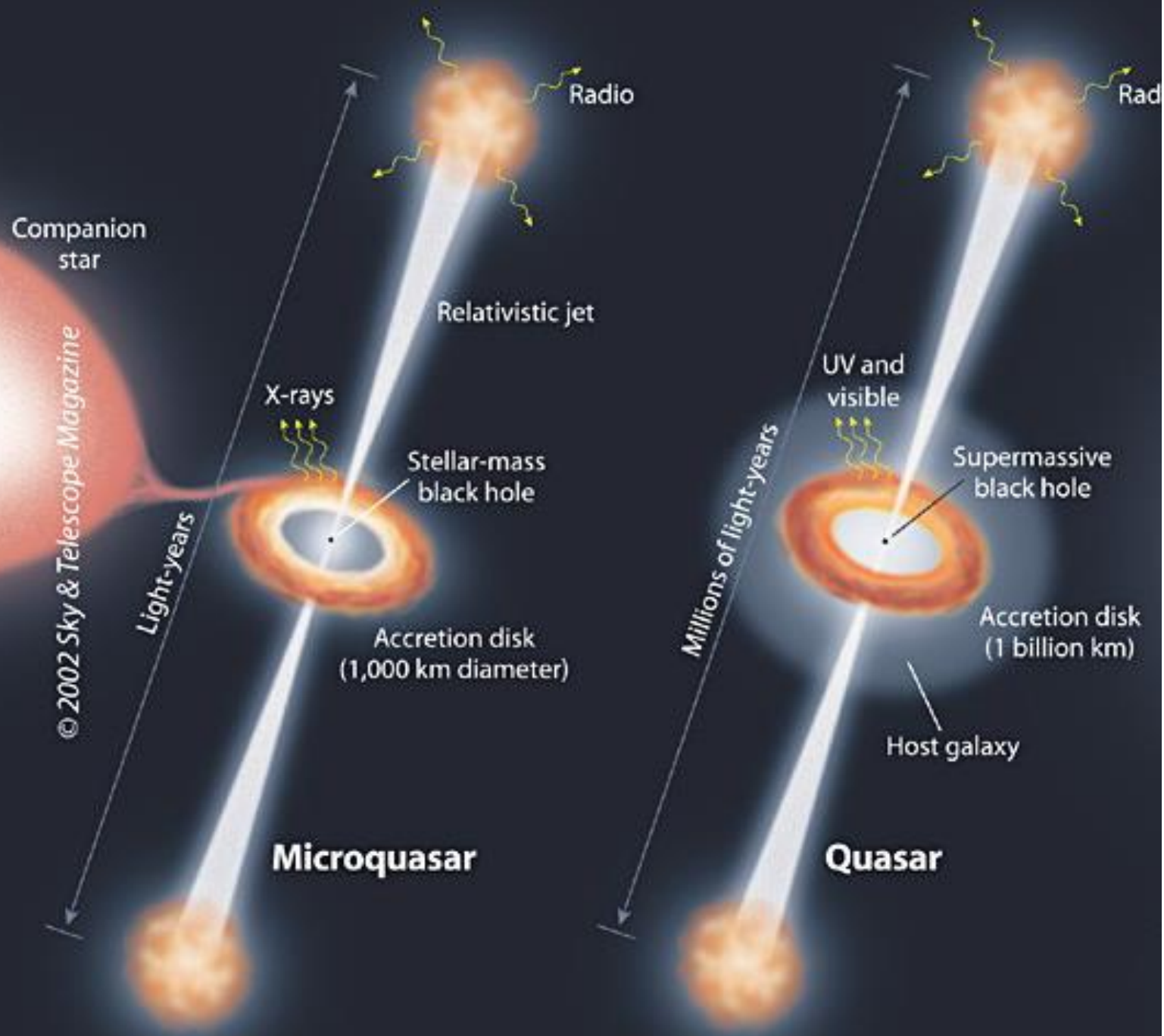
**Kerr**

$$a = 0.99 M$$

# Akkretierende Schwarze Löcher

- Akkretierende Schwarze Löcher sind Schwarze Löcher, die sich in Röntgendoppelsternen oder Aktiven Galaktischen Kernen (siehe Folie 2.2) befinden. Sie zeichnen sich durch die sogenannte Akkretionsscheibe und, in manchen Fällen durch zwei Jets aus.
- Eine Akkretionsscheibe entsteht, wenn das Schwarze Loch Materie aus dem Stern oder dem Gas um ihn herum entzieht. Diese ist zu schnell um einfach aufgesogen zu werden, sondern bildet eine Scheibe um das Schwarze Loch herum. Der Durchmesser dieser Akkretionsscheibe kann berechnet werden, wie in Folie 1.2 erklärt wurde.
- Ein Jet entsteht wenn ein Teil des auf das Schwarze Loch zuströmende Gas durch das magnetische Felder abgelenkt wird und dann im ungefähr 90 Grad Winkel zur Akkretionsscheibe in das All geschleudert wird. Das Gas kann dabei fast Lichtgeschwindigkeit erreichen und der Jet kann bei einem Aktiven Galaktischen Kern, Millionen von Lichtjahren lang sein.
- Akkretierende Schwarze Löcher bestehen also immer aus einem Schwarzen Loch, einer Akkretionsscheibe und manchmal zwei Jets ungefähr rechtwinklig zur Akkretionsscheibe





© 2002 Sky & Telescope Magazine

Abb.8  
 Hier ist der Vergleich eines Quasars mit einem Super-massereichem Schwarzen Loch und eines Mikroquasars mit einem stellaren Schwarzen Loch. Beides sind jedoch akkretierende Schwarze Löcher. Zu erkennen sind die drei Grundbestandteile: Schwarzes Loch, Akkretionsscheibe und Jet.

# Mikroquasare

- Mikroquasare entstehen aus einem Doppelsternsystem, bei dem ein Stern zu einem Stellaren Schwarzen Loch oder einem Neutronenstern kollabiert. Daraufhin beginnt das kompakte Objekt Materie aus dem anderen, noch existierenden Stern zu ziehen. Dabei strahlt die Akkretionsscheibe starke Röntgen- und Radiostrahlung aus.
- Das Schwarze Loch hat dabei normalerweise eine Masse von 3-15 Sonnenmassen; im Vergleich zu einem Supermassereichen Schwarzen Loch also winzig.
- Im Falle, dass das kompakte Objekt ein Neutronenstern ist, dann kann er sich zu einem Schwarzen Loch heranbilden, wenn er genug Materie von dem anderen Stern zu sich heran gezogen hat.

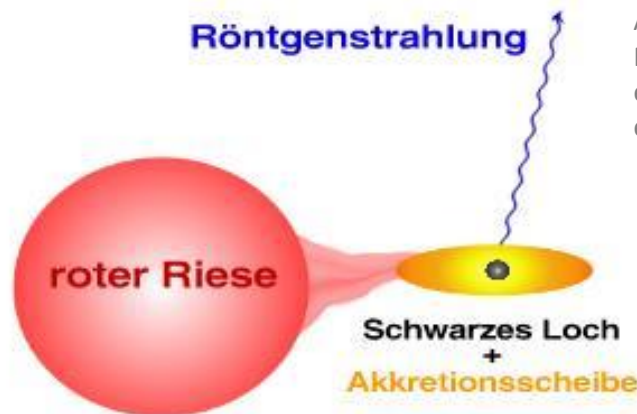
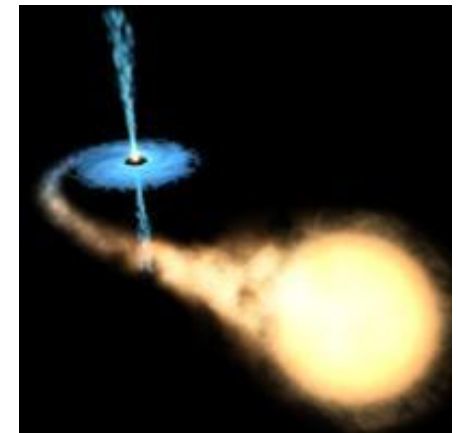


Abb.9 Schema eines Mikroquasars bestehend aus einem Roten Riesen und einem Schwarzen Loch

Abb.10 Dies ist die künstlerische Darstellung eines Mikroquasars



# Aktive Galaktische Kerne (AGN)

- Aktive Galaktische Kerne sind supermassenreiche akkretierende Schwarze Löcher, die sich im Zentrum einer Galaxie befinden und Staub und Gas aus dieser akkretieren. Jeder AGN besteht immer aus mindestens fünf Bestandteilen: Schwarzes Loch, Akkretionsscheibe, Staubtorus und ionisierte Wolken in der Broad Line Region und in der Narrow Line Region. Erstere der ionisierten Wolken senden Strahlung mit breiten Spektrallinien aus, zweite Strahlung mit dünnen Spektrallinien.
- Nach der neusten Theorie sind die Objekte Quasare, Blazare, Radiogalaxien und Seyfertgalaxien alles Aktive Kerne von Galaxien, die man früher für unterschiedliche Objekte gehalten hat. Um den AGN befindet sich nämlich ein Staubtorus von ungefähr gleicher Höhe wie Breite. Dieser Torus ist Strahlungsundurchlässig.
- Je nach Ausrichtung zur Erde wirkt die Aktive Galaxie wie ein anderes Objekt.
- Quasar: der Betrachter sieht direkt auf das Zentrum des Galaxienkerns
  - Radiolaut: die Aktive Galaxie hat zwei erkennbare Jets
  - Radioleise: die Aktive Galaxie hat keine erkennbaren Jets
- Blazare: der Beobachter sieht exakt auf den ihm entgegenkommenden Jet der Aktiven Galaxie
- Seyfertgalaxie: Der Beobachter sieht einer Aktiven Galaxie (ohne Jet) nicht direkt ins Zentrum
  - Typ 1: Der Beobachter sieht mit etwas Abweichung zum Quasar ins Zentrum
  - Typ 2: Der Beobachter sieht auf den Staubtorus
- Radiogalaxie: Der Betrachter sieht auf den Staubtorus und erkennt deshalb nur die Jets

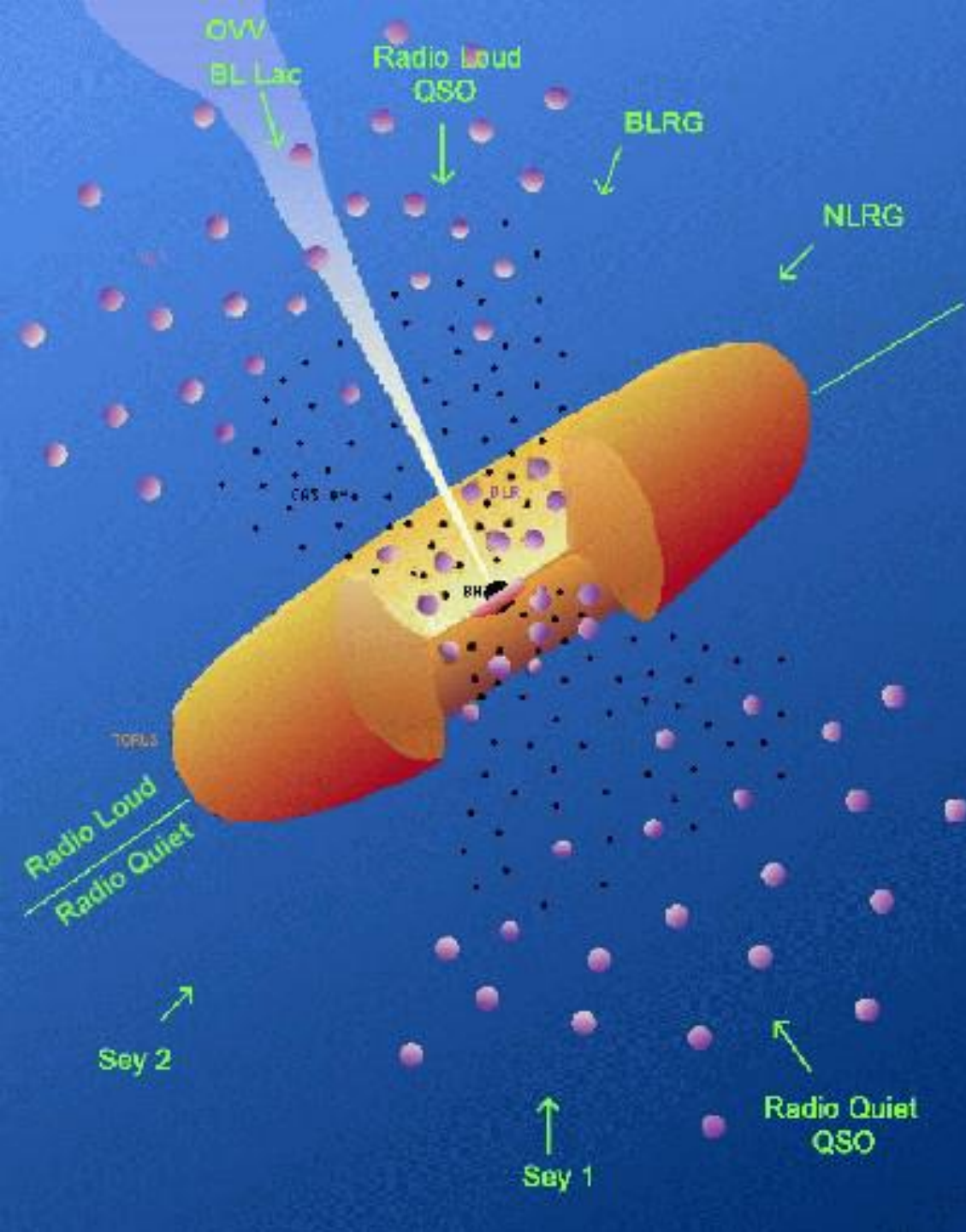


Abb.11 Diese schematische Darstellung zeigt sehr schön die 8 verschiedenen Typen eines Aktiven galaktischen Kerns. Radiogalaxie und Blazare wurden dabei nochmals in zwei Untergruppen unterteilt.

# Quasare

- Mit optischen Teleskopen sind sie von der Erde kaum von Sternen zu unterscheiden, da die Akkretionsscheibe nur ungefähr  $10^9$  km (das entspricht ungefähr unserem Sonnensystem) groß ist, aber 1000 mal heller leuchtet als die gesamte restliche Galaxie.
- Erst 1963 konnte mithilfe der Rotverschiebung bewiesen werden, dass sie sich in sehr großer Entfernung zur Erde befinden, also keine Sterne unserer Milchstraße sein können.
- Das Supermassenreiche Schwarze Loch im Quasar schluckt Materie aus der umliegenden Galaxie und beschleunigt sie und erzeugt so viel Energie. Diese Energie tritt auch als Licht auf: Der Quasar 3C 273 ist 20.000.000.000.000 mal heller als die Sonne.

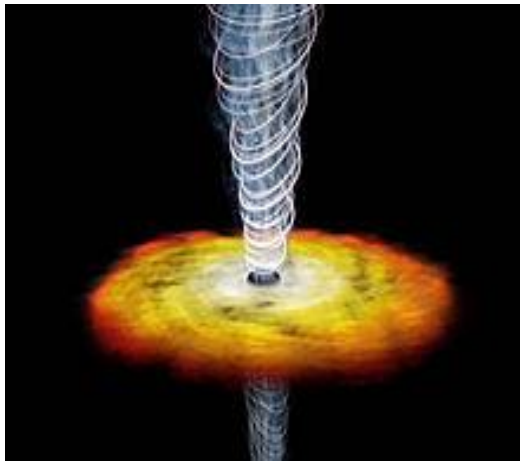


Abb.12 Zeichnung eines Quasars

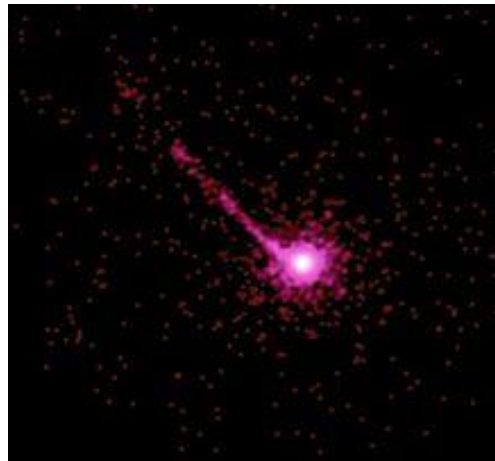


Abb.3 Quasar PKS 1127-145

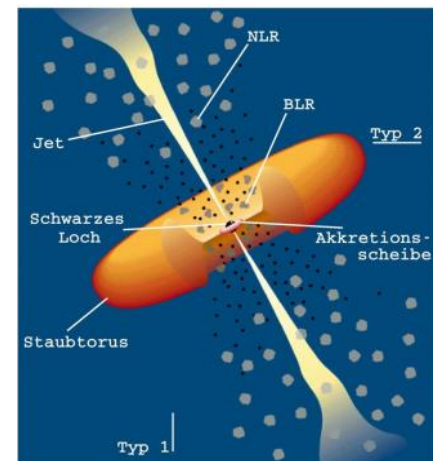


Abb.14 Schema eines Quasars

# Textquellen

- [http://www.mpifr-bonn.mpg.de/311302/leon\\_deninger.pdf](http://www.mpifr-bonn.mpg.de/311302/leon_deninger.pdf)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Quasar>
- <http://astrofotografie.hohmann-edv.de/aufnahmen/deepsky/quasare.php>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkretionsscheibe>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild radius](http://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_radius)
- [http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/astro\\_sl\\_kerr.html](http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/astro_sl_kerr.html)
- [http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/lexdt\\_e05.html](http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/lexdt_e05.html)
- [http://www.mpia-hd.mpg.de/home/jahnke/lectures/gqs\\_05/introduction1.pdf](http://www.mpia-hd.mpg.de/home/jahnke/lectures/gqs_05/introduction1.pdf)

# Bildquellen

- [Abb.1:http://www.eso.org/public/switzerland-de/images/eso1338b/](http://www.eso.org/public/switzerland-de/images/eso1338b/)
- [Abb.2:http://imagine.gsfc.nasa.gov/Images/basic/xray/supernova\\_cycle.gif](http://imagine.gsfc.nasa.gov/Images/basic/xray/supernova_cycle.gif)
- [Abb.3:http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/blackholes3.html](http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/blackholes3.html)
- [Abb.4:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/29/Earbhncity.png/330px-Earbhncity.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/29/Earbhncity.png/330px-Earbhncity.png)
- [Abb.5:http://abenteuer-universum.de/sl/sr.gif](http://abenteuer-universum.de/sl/sr.gif)
- [Abb.6:http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/images/intermed/SchwKerr2.jpg](http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/images/intermed/SchwKerr2.jpg)
- [Abb.7:http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/images/intermed/ergosphsmaller.jpg](http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/images/intermed/ergosphsmaller.jpg)
- [Abb.8:From the "Sky & Telescope Magazine](#)
- [Abb.9:http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/images/intermed/gbhc.jpg](http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/images/intermed/gbhc.jpg)
- [Abb.10:http://www.astronews.com/news/bilder/2002/0211-013.jpg](http://www.astronews.com/news/bilder/2002/0211-013.jpg)
- [Abb.11:http://www.integral.soton.ac.uk/outreach/images/agn\\_unification.jpg](http://www.integral.soton.ac.uk/outreach/images/agn_unification.jpg)
- [Abb.12:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9e/Gb1508\\_illustration.jpg/220px-Gb1508\\_illustration.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9e/Gb1508_illustration.jpg/220px-Gb1508_illustration.jpg)
- [Abb.13:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/60/PKS\\_1127-145\\_X-rays.jpg/220px-PKS\\_1127-145\\_X-rays.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/60/PKS_1127-145_X-rays.jpg/220px-PKS_1127-145_X-rays.jpg)
- [Abb.14:http://idw-online.de/pages/de/newsimage?id=20204&size=screen](http://idw-online.de/pages/de/newsimage?id=20204&size=screen)