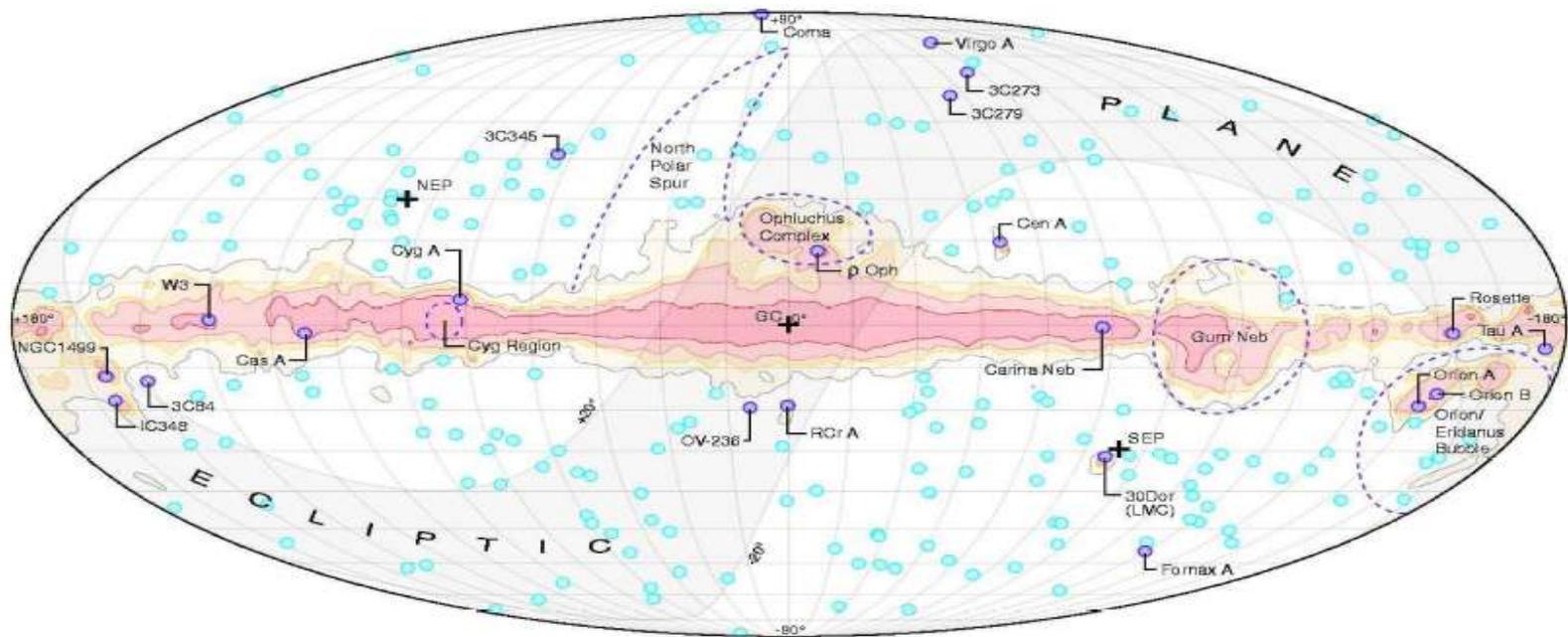
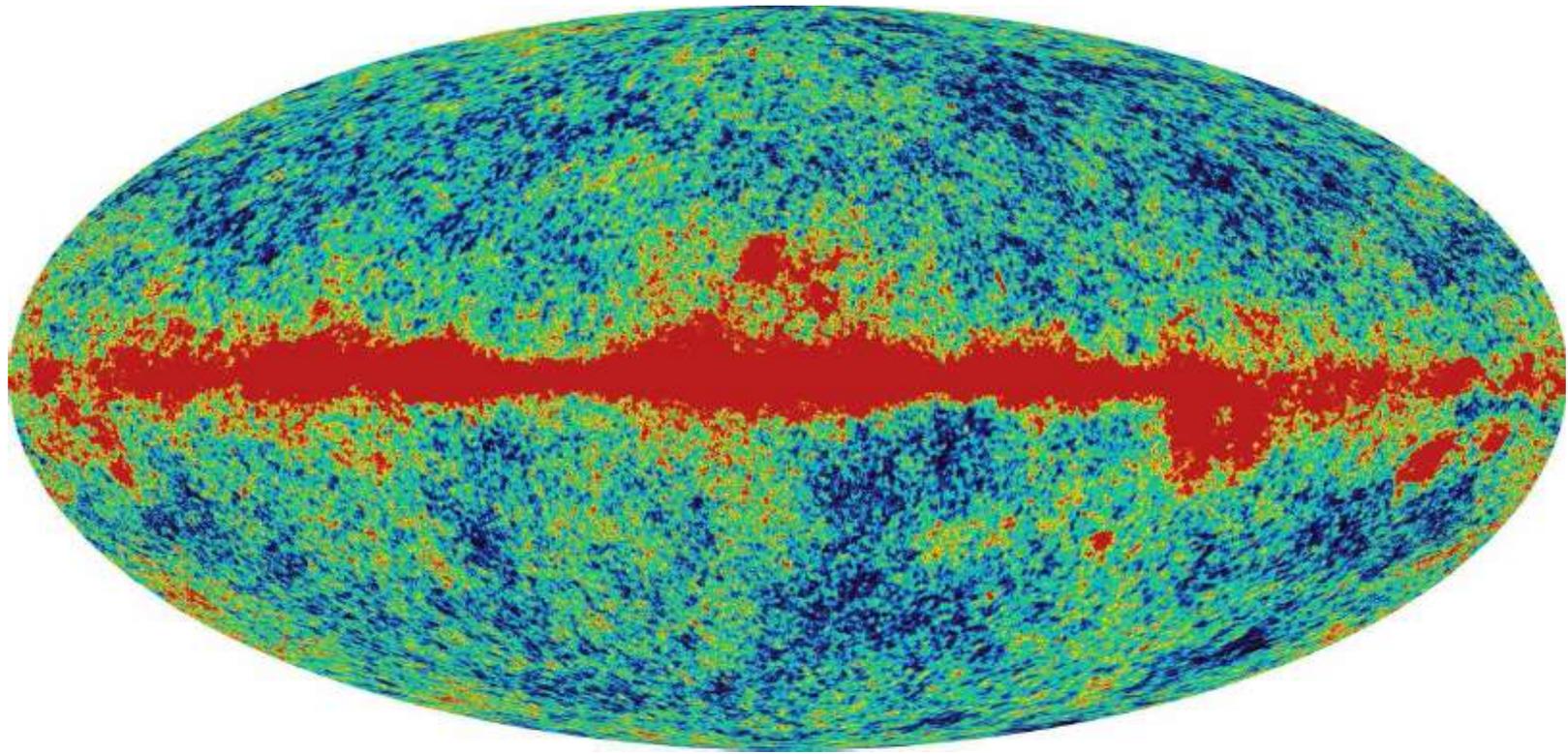


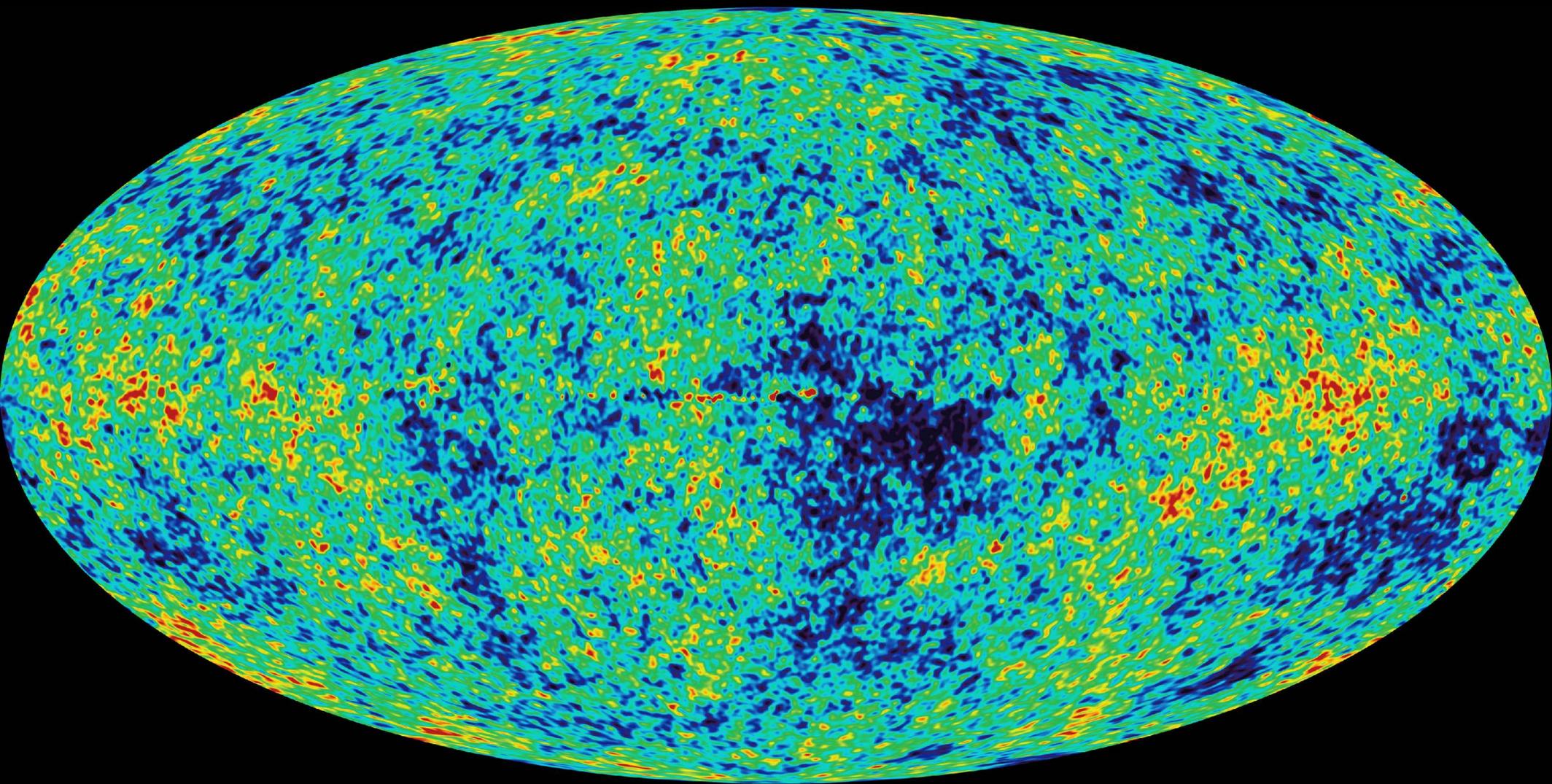
Entwicklung schwarzer Löcher im Kosmos

- **Frühes Universum**
Hintergrundstrahlung: Aufschluss über Strukturbildung
Entstehung der ersten schwarzen Löcher
- **Klassifizierung und Erkennungsmerkmale**
Quasarpopulation
- **Verhalten**
Quasaraktivität, Winterschlaf, Verschmelzung,
Gravitationswellen, Entropie, Verdunsten nach
Hawking-Effekt
- **Zukunft des Universums?**

WMAP: Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (2001)

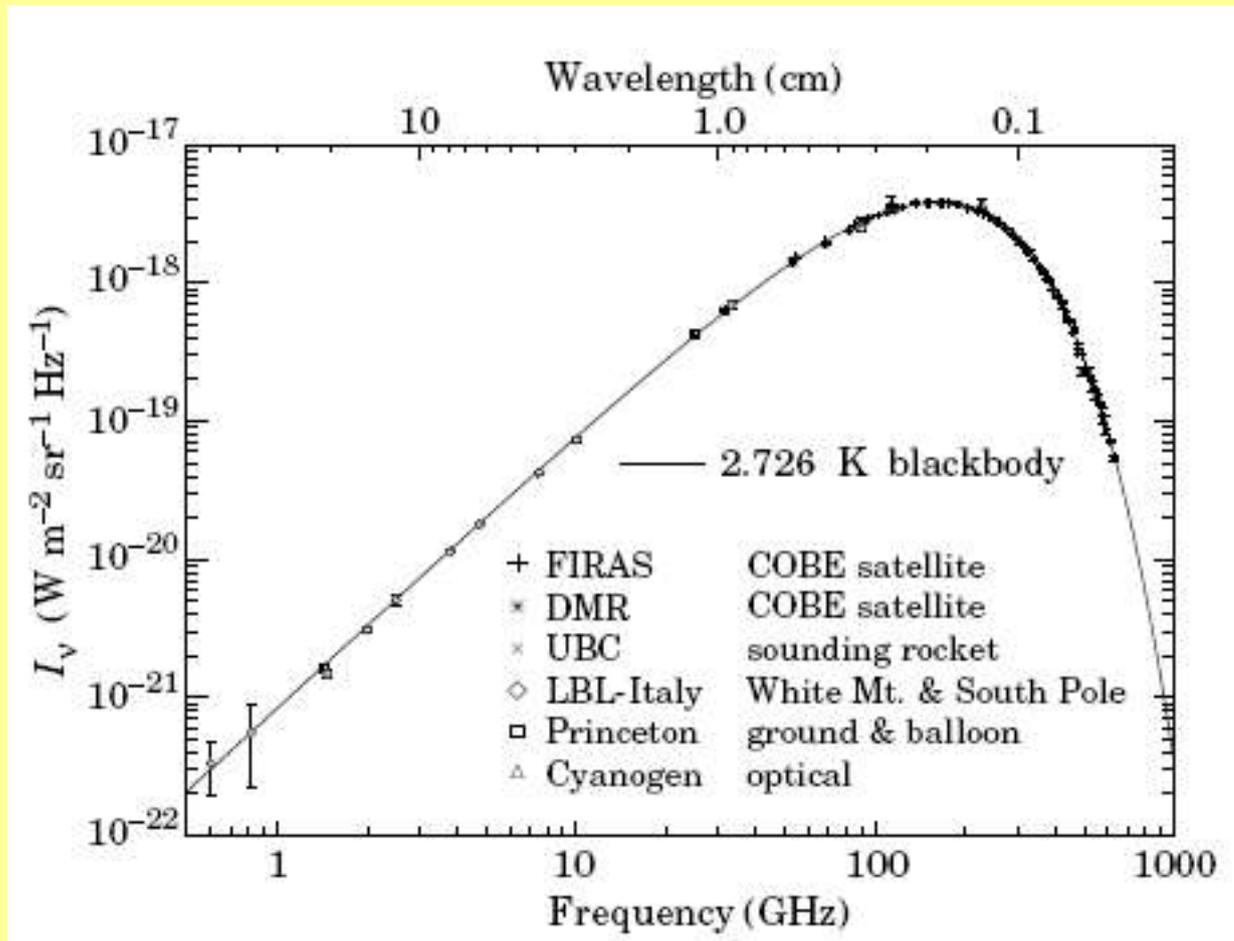


Kosmische Hintergrundstrahlung (Cosmic Microwave Background CMB)



theoretische Vorhersage 1940 von
George Gamow

Entdeckung 1965 von
Penzias, Wilson, Nobelpreis



→ Temperatur beträgt zehn Milliarden Grad in der ersten Sekunde nach dem Urknall

→ Expansion des Universums, Strahlung wird verdünnt, kann aber nicht verschwinden

→ Abkühlung bis heute auf 2,7 K, sehr homogen

Ursache der Hintergrundstrahlung? - Beginn des Universums!

• **Planck Ära:** bis 10^{-43} s

→ Planck-Temperatur 10^{23} K, Vereinheitlichung der Kräfte

→ Heutige Physik beschreibt Zustand noch nicht

• **GUT Ära:** bis 10^{-35} s

• Gleichgewichtszustand zwischen Strahlung und Materie

→ Kollision, Annihilation: $\gamma + \gamma \leftrightarrow \text{Elektron} + \text{Positron}$

→ Comptonstreuung

• Symmetriebruch: Anzahl der Materieteilchen beginnt Antimaterieteilchen um Faktor 1,000000001 zu übersteigen

→ Nach Annihilationen bleiben 10^{-7} % der Materie um Galaxien zu formen

• **Inflations Modell:** Exponentielle Expansion bis 10^{-32} s

→ Abschwächung der Unregelmäßigkeiten

→ Homogenität des heutigen Universums (auch Vorhersage der Inhomogenitäten im CMB)

→ Expansion kühlt Universum ab

→ Photonen Energie reicht nicht mehr aus, um Gleichgewicht zu halten

Hadronen Ära: bis $10^{-4} s$

- Ab 10^{12} Kelvin ist es kalt genug für die Kondensation von Hadronen (Protonen, Neutronen, Mesonen)

Leptonen Ära: bis $1 s$

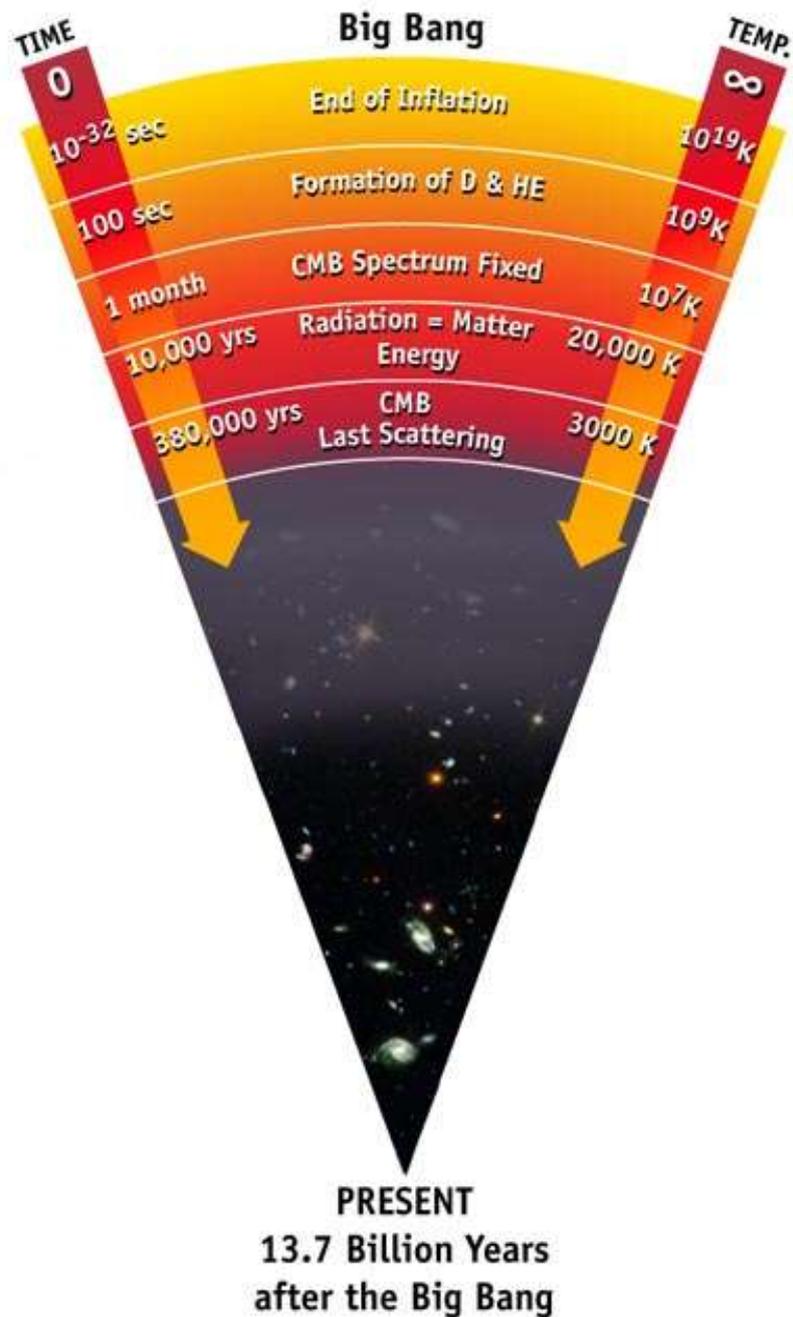
- Bildung leichter Teilchen: Elektron-Positron Paare
- Neutrino Entkopplung

Strahlungs Ära: bis $10^5 a$

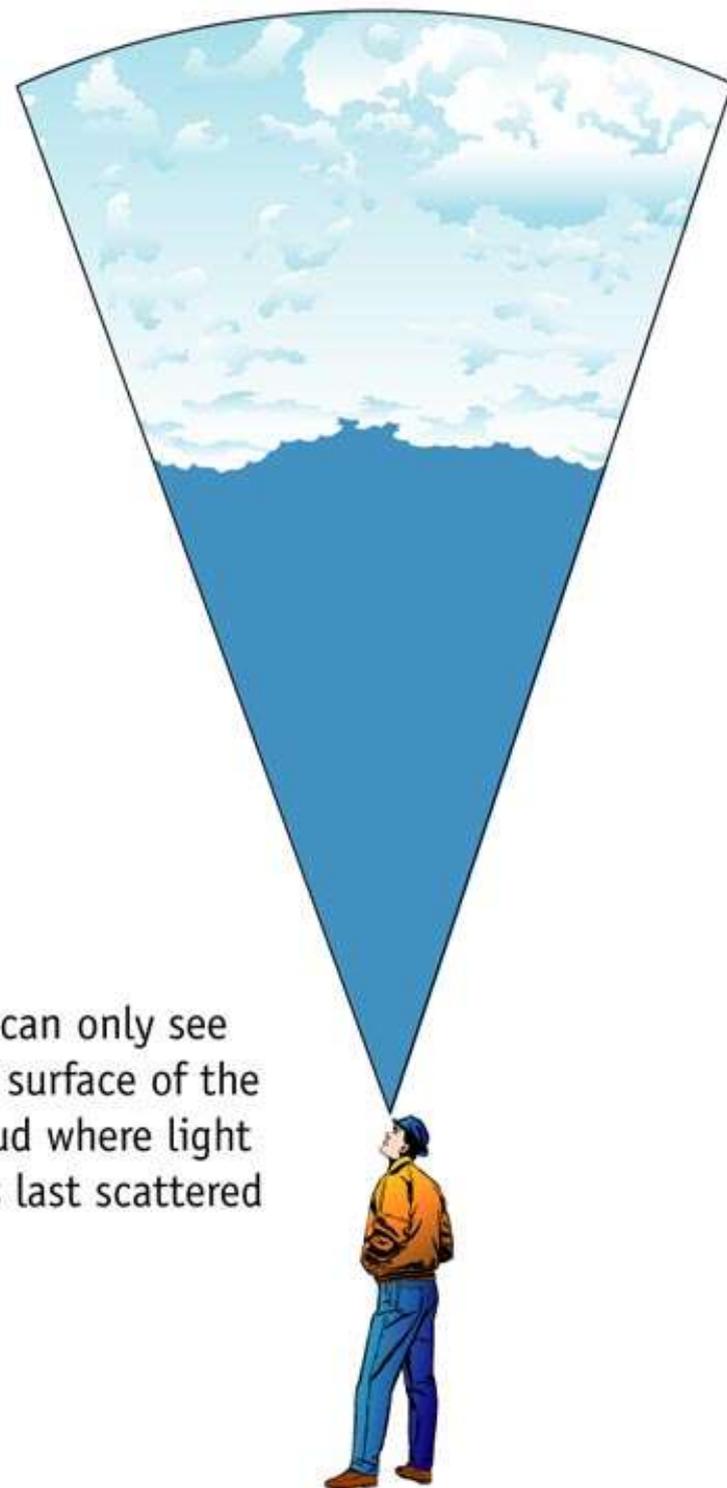
- Großteil der Energie liegt in Strahlung vor: $10^{10} \text{ bis } 10^3 \text{ Kelvin}$
- Synthese von Deuterium zu Helium bis Lithium

Materie Ära: bis heute

- Massendichte der Strahlung nimmt schneller ab als Dichte der Materie
- Entkopplung von Strahlung und Materie: Temperatur ist unter Ionisationstemperatur von Wasserstoff gefallen
 - Freie Elektronen und Protonen werden gebunden
 - Geringere Streuung der Photonen
 - Strahlung entkommt in den Kosmos (380.000 Jahre nach Urknall)
 - Struktur des Universums zu dieser Zeit ist aufgeprägt
 - CMB



The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Wie verhält sich die normale Materie in diesen Halos?

Hierarchische Gruppenbildung aufgrund von Gravitation:

$F \propto 1/r^2$ → Kleine Skalen kondensieren vor großen Skalen

→ Sterne → Galaxien → Galaxienhaufen

Allerdings: Gasdruck entgegen Gravitation

Jeans Limit: Mindestmasse einer Gaswolke, sodass Gravitation überwiegt

$$M_J \approx \frac{P^{3/2}}{\gamma^{3/2} \rho^2} \quad P : \text{Druck}, \quad \rho : \text{Dichte}$$

Vor Entkopplung: hoher Strahlungsdruck: $M_J = 10^{18} M_{\text{Sonne}}$

Nach Entkopplung: $M_J = 10^5 M_{\text{Sonne}}$

Entkommene **Strahlung** unterliegt **Rotverschiebung** in Abhängigkeit von der **Dichte** am jeweiligen Ort

Temperaturschwankungen im CMB von 0,001% erkennbar

Ursache: **Dichteschwankungen** im frühesten Universum

Was geschieht mit den Unregelmäßigkeiten?

- Gravitation wirkt Expansion entgegen
- Dichtere Regionen dehnen sich langsamer aus
- Entstehung von Strukturen in Form von Halos aus **dunkler Materie**

Ohne Dunkle Materie müssten Fluktuationen viel stärker gewesen sein, um sichtbare Strukturen zu erzeugen

Kollaps der ersten Gaswolken mit einigen hunderttausend Sonnenmassen (nach 400 Millionen Jahren)

↙
In viele einzelne **Sterne**

↘
In einen supermassiven Stern
↓
Prägalaktisches schwarzes Loch

- Gaswolke ist selbst-gravitativ und instabil
 - Energie aus Kontraktion entweicht als Strahlung
 - Drehimpuls-Erhaltung führt zu hoher Rotations-Geschwindigkeit
 - Fragmentation wird gefördert
 - Gas wird optisch dicht bei weiterer Kontraktion
 - Strahlung heizt Gas auf, Strahlendruck
 - Fragmentation wird gestoppt, Bildung von Molekülen verhindert
- Einheitlicher Kollaps ist möglich!

Falls Existenz von Schwarzen Löchern vor Galaxien:

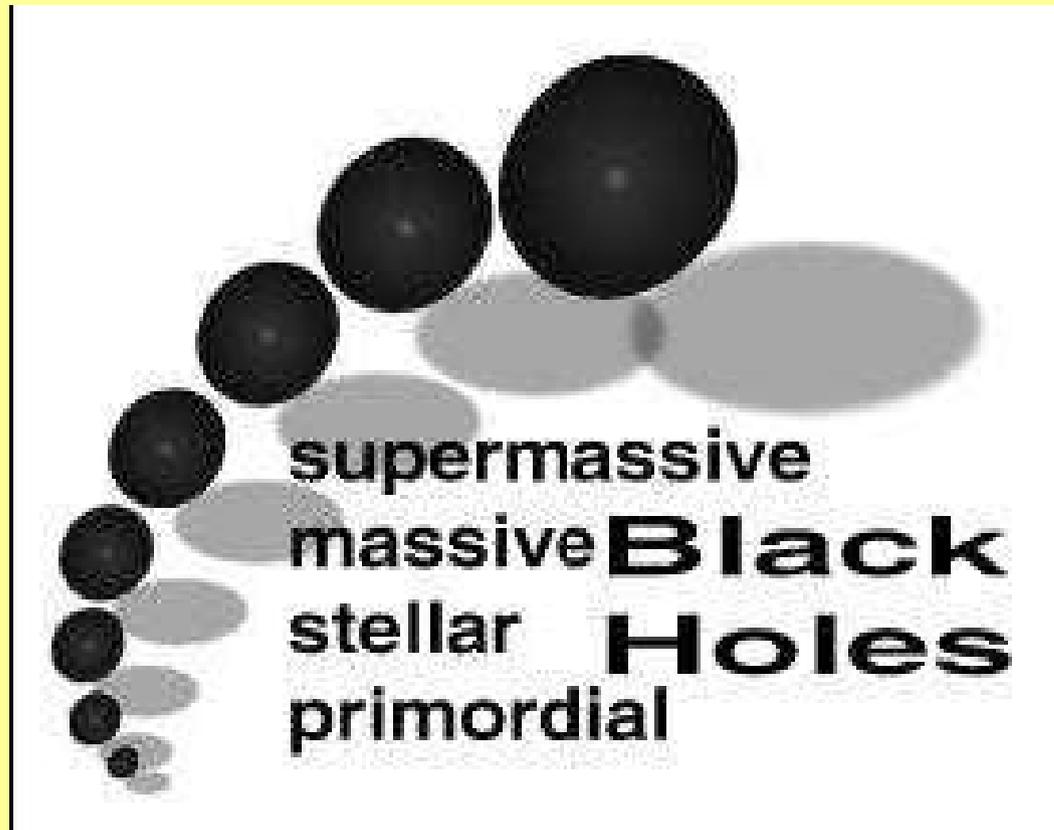
- Gruppierung zu gravitativ gebundenen Haufen
 - Materie aus weniger dichten Regionen wird eingebettet
 - Entwicklung von Sternen, Galaxienbildung (einige Milliarden Jahre nach Urknall)
 - Schwarze Löcher bilden Halo
 - Dunkle Materie in Form schwarzer Löcher?

- Verschmelzen zu SMBH im Zentrum
 - Entwicklung der Galaxie darum herum
 - Akkretion lässt schwarzes Loch wachsen

Klassifizierung und Entstehung weiterer schwarzer Löcher

Komprimierung einer Masse unter ihren Schwarzschild-Radius

↓
Schwarzes Loch



Im Kosmos: natürliche Prozesse zur Erzeugung schwarzer Löcher
Unterscheidungskriterien: Masse und Evolution

•Primordiale Mini-Löcher (um 10^{12} kg)

Heute: Entartungsdruck verhindert totalen Kollaps
geringer Massen (weißer Zwerg, Neutronenstern)

→Frühes Universum: hohe Dichte, hohe Temperaturen

→Mögliche Bildung von winzigen schwarzen Löchern, falls der Druck bei einer Volumenänderung nur langsam ansteigen sollte

→Entstehung nach Inflationsphase

→Wachstum durch Akkretion, Saatkörner für Galaxien?

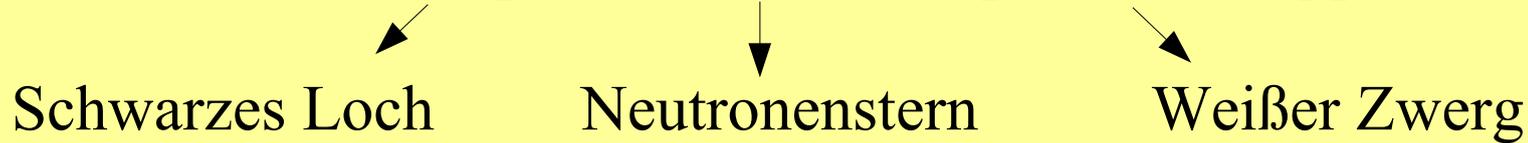
Radius des Ereignishorizonts ist proportional zur Masse: $r = 2 \gamma \frac{M}{c^2}$

Aus Masse der Erde $6 \times 10^{24} \text{ kg}$ folgt Radius von $9,5 \text{ mm}$

Allerdings noch keine experimentelle Bestätigung!

• **Stellare Schwarze Löcher** (bis 100 Sonnenmassen)

Gravitationskollaps eines Sterns, Supernova, Doppelsternentwicklung



Kandidaten: Cyg X-1 und SS 433

Ausschluss hoher Häufigkeiten wegen zu geringer Elementvorkommen

• **Massereiche Schwarze Löcher** (bis 10^6 Sonnenmassen)



Kugelsternhaufen G1

Vorkommen in **Kugelsternhaufen**

→ Hohe Sterndichte im Zentrum

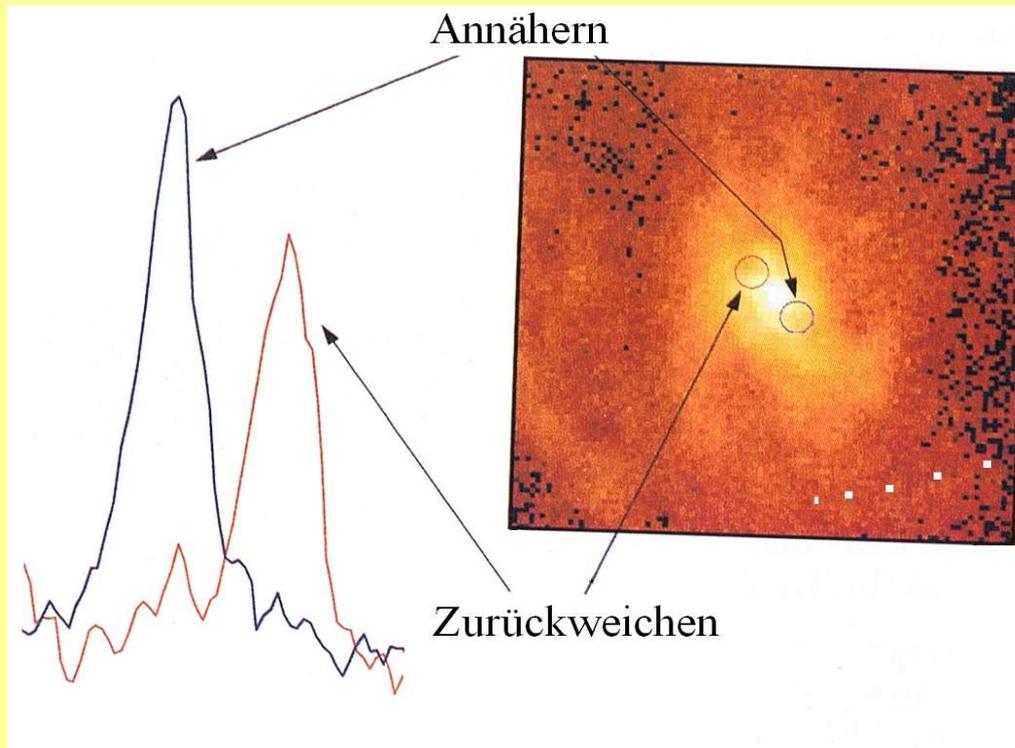
→ Geschwindigkeitsprofil der Sterne

→ Hohes Alter - kein Gas – hungerndes Loch

→ Strahlenausbrüche bei Akkretion ganzer Sterne beobachten!

Kandidaten: M15, G1; POX 52 (in Zwerggalaxie)

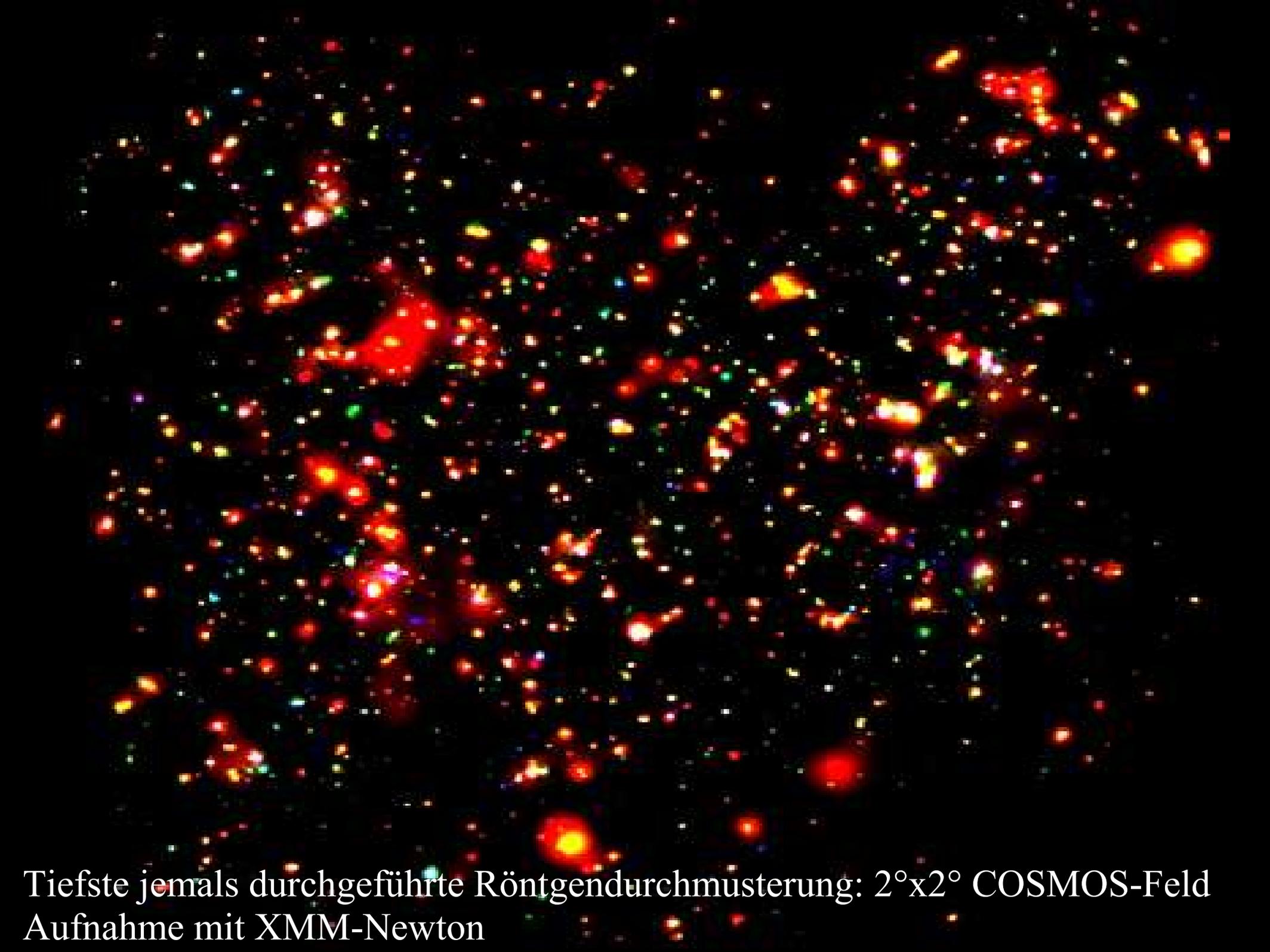
• Supermassive Schwarze Löcher SMBH (10^6 bis 10^9 Sonnenmassen)



Gasrotation
um Zentrum
von M 87

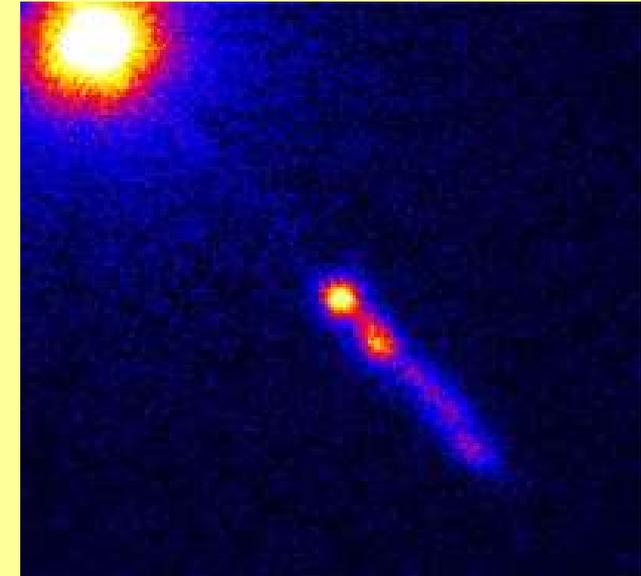
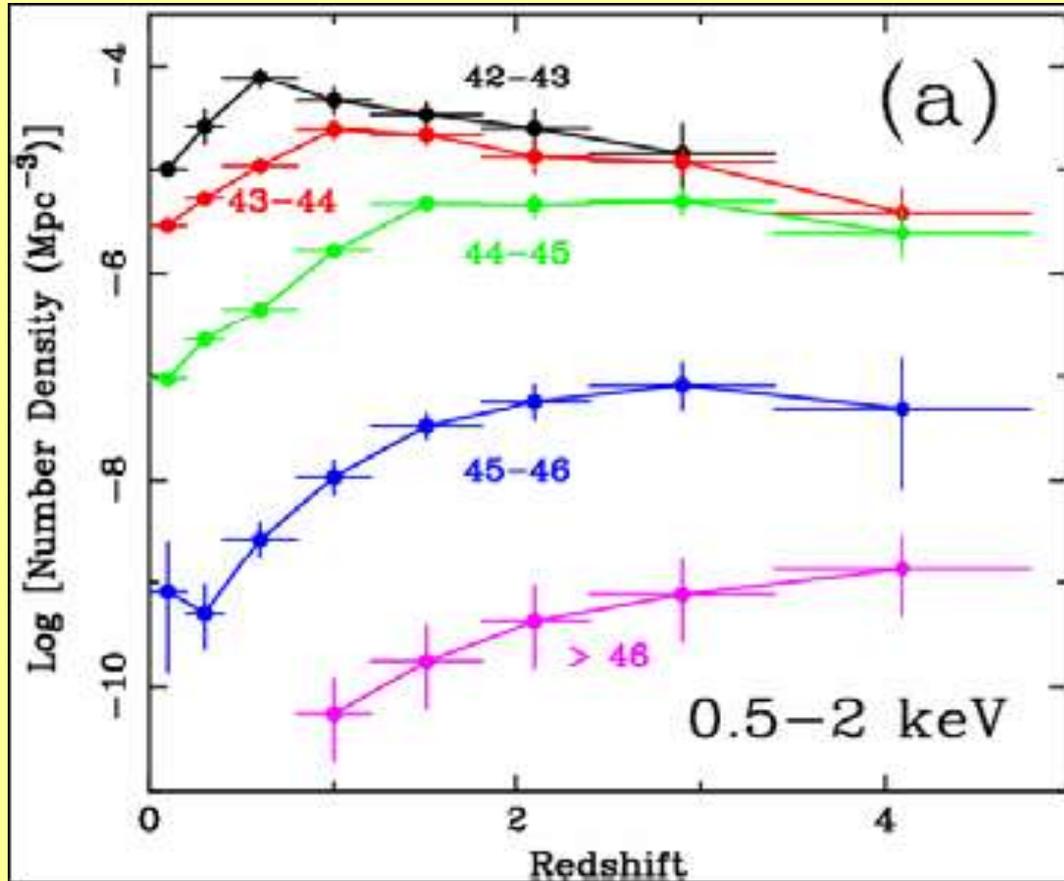
Vermutlich in den meisten **Galaxienzentren**

- Gravitatives Zentrum
- Geschwindigkeitsprofil der Sterne
- Verzerrung der Sternbahnen
- Verstärkte Sternen-Konzentration im Zentrum
- Charakteristische Spektren von schnell rotierendem Gas
- AGN-Leuchtkraft durch Akkretion auf SMBH



Tiefste jemals durchgeführte Röntgendurchmusterung: $2^\circ \times 2^\circ$ COSMOS-Feld
Aufnahme mit XMM-Newton

Quasarpopulation

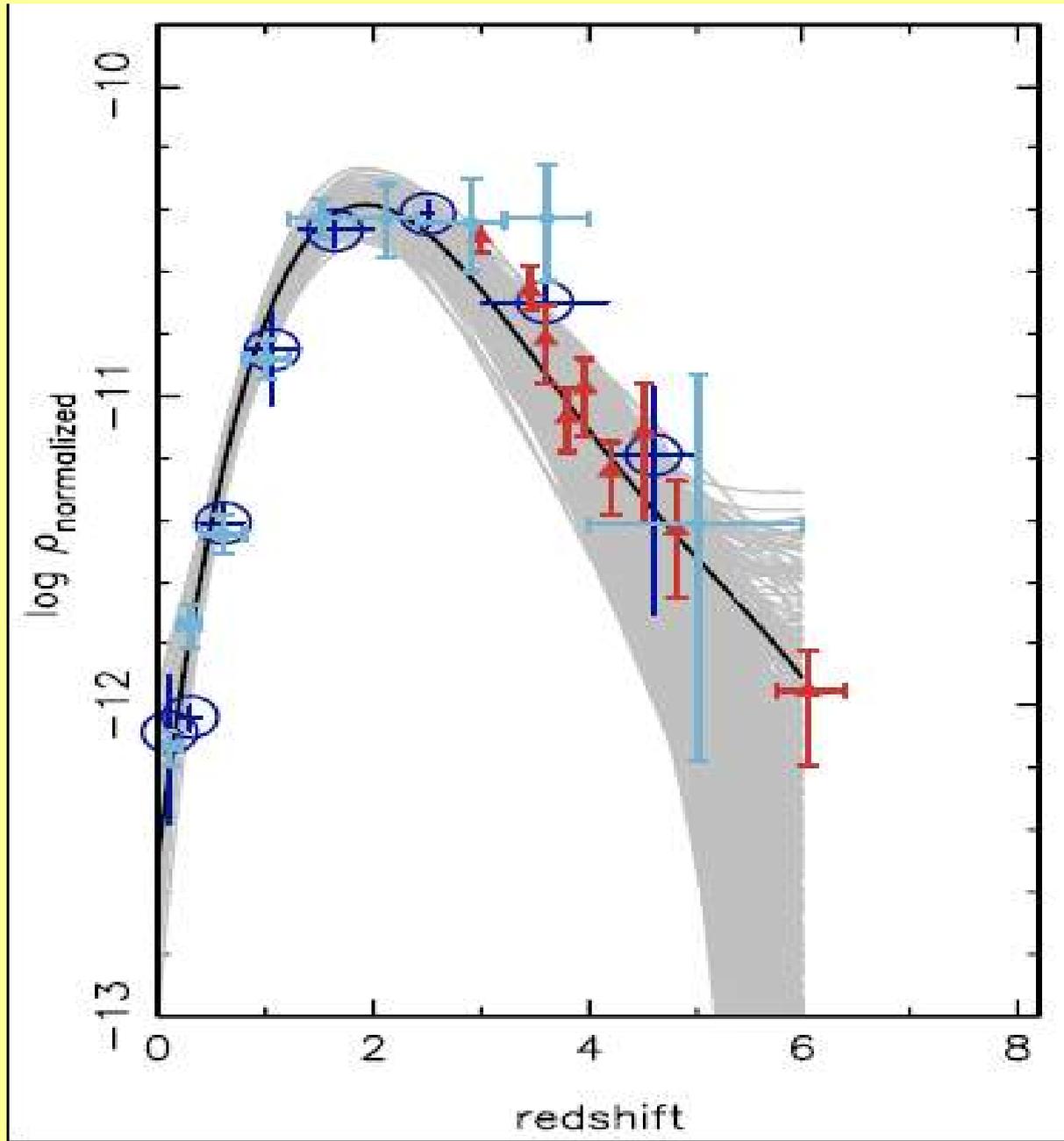


Quasar 3C 273

Beobachtung von AGN in verschiedenen Entfernungen

- Maximum leuchtkräftiger Quasare bei $z = 2 - 3$
- Maximum schwächerer Seyfert Galaxien bei $z = 1$
- Anzahl heutiger AGN reicht nicht für Überreste früherer Quasare aus
- Eddington Relation: Leuchtkraft \sim Masse
- **Antihierarchische Evolution**

Entwicklung der Raumdichte leuchtkräftiger Quasare bei höheren Rotverschiebungen



→Dramatischer Abfall bei $z > 3$

→Wir beobachten das Wachstum der frühesten massereichen schwarzen Löcher

Verhalten schwarzer Löcher

1. Quasaraktivität

- Menge des verfügbaren Gases
 - Mindestens eine Sonnenmasse pro Jahr
 - Nimmt mit Alter der Galaxie ab
 - Bindung des Gases in Sternen
 - Ausdehnung des Kosmos, Ausdünnung des Gases
 - Transportfähigkeit des Gases
 - Kann zeitlich stark variieren: Leuchtschwankungen
 - Verschmelzen mit gasreicher Galaxie liefert neuen Vorrat
- Masse des schwarzen Lochs
 - Mindestmasse $M \sim 10^8 M_{\text{Sonne}}$
 - Gravitation muss Strahlungsdruck überwiegen
 - Maximale Masse $M \sim 10^9 M_{\text{Sonne}}$
 - Untersuchung der Geschwindigkeit von Gaswolken

Leuchtintensität beschreibt Masse, Brennstoffverbrauch



Massenzunahme: Umwandlung $E = mc^2$
Wirkungsgrad höchstens 10%



Lebensdauer von Quasaren: 10^7 bis 10^8 Jahre

Zu keiner Zeit Quasare in mehr als 1% der Galaxien
Insgesamt haben aber 10% eine Quasarphase durchlaufen

Überreste?

NGC 7742 **Seyfertgalaxie**

NGC 1316 **Radiogalaxie**



2. Winterschlaf

frühere Aktivitätsphase → Brennstoffmangel → Abnahme der Rotation
→ Hunger → Anzeichen?

- Beobachtung naher Galaxien

- Zielobjekte: SMBH (Andromeda, Sombrero, Milchstraße)

- Centaurus A: Riesige Radioblasen ehemaliger Aktivität deuten auf massereiches Loch im Inneren

- NGC 4258 Maserquellen geben Aufschluss über Gasrotation um schwarzes Loch im Zentrum

Außerdem Anzeichen von Strahlungsausbrüchen nach Zerreißen von Sternen durch Gezeitenkräfte



Radioblasen von Centaurus A

3. Verschmelzung

- Begegnung zweier schwarzer Löcher (auch Folge verschmelzender Galaxien)
- Annäherung durch Energieverlust an andere Sterne, Abbremsung durch Gas
- Wechselwirkung übertrifft gemeinsame Anziehung aller umgebenden Sterne
- Energieverlust durch Gravitationsstrahlung
- Verringerung des Radius, Erhöhung der Geschwindigkeit
- Verschmelzen der Horizonte
- Abwurf der Asymmetrien („Keine-Haare-Theorem“)

+ drittes Loch: Drei-Körper-System

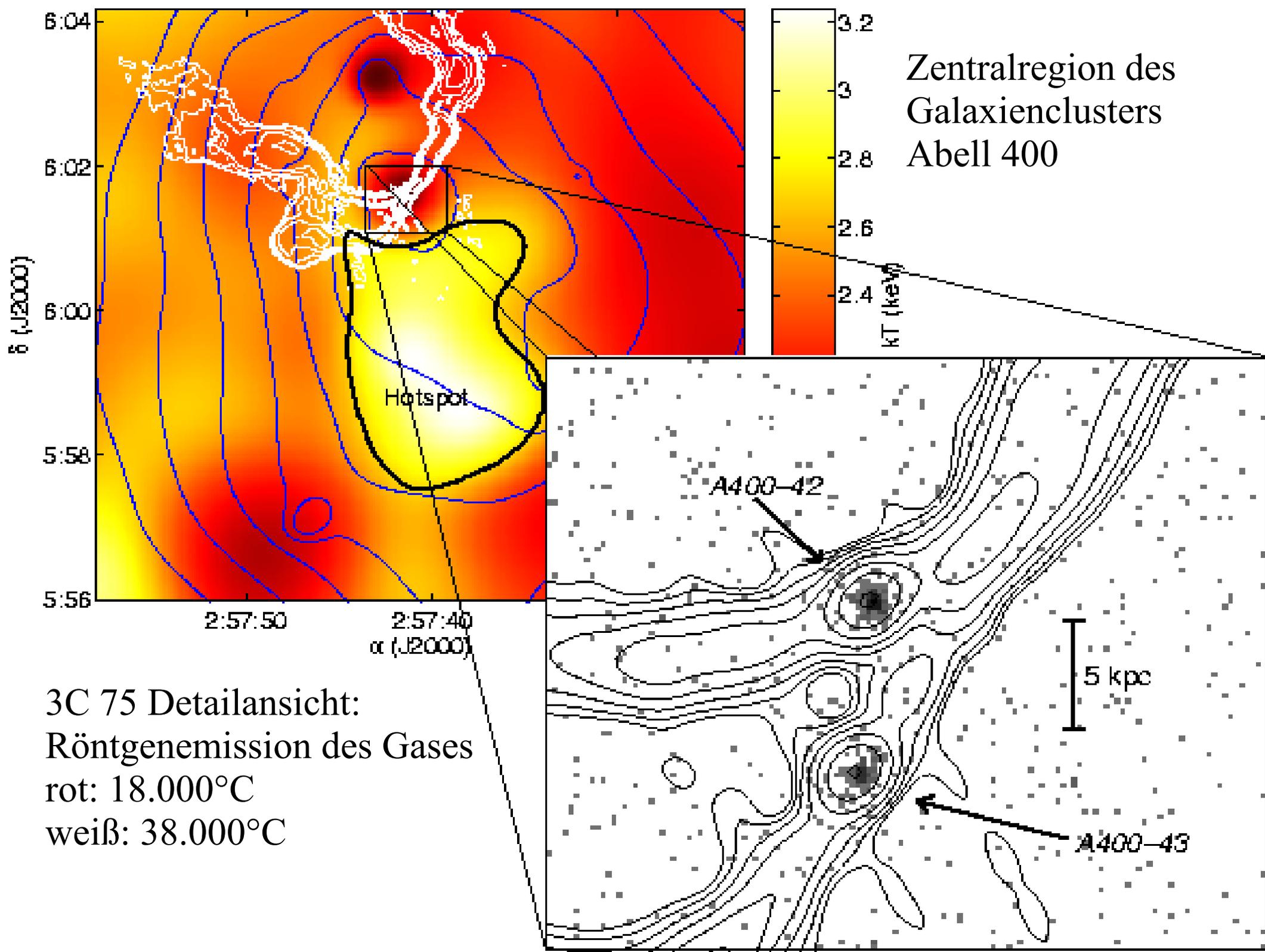
Instabil!

Herausschleudern eines Lochs oder aller Löcher

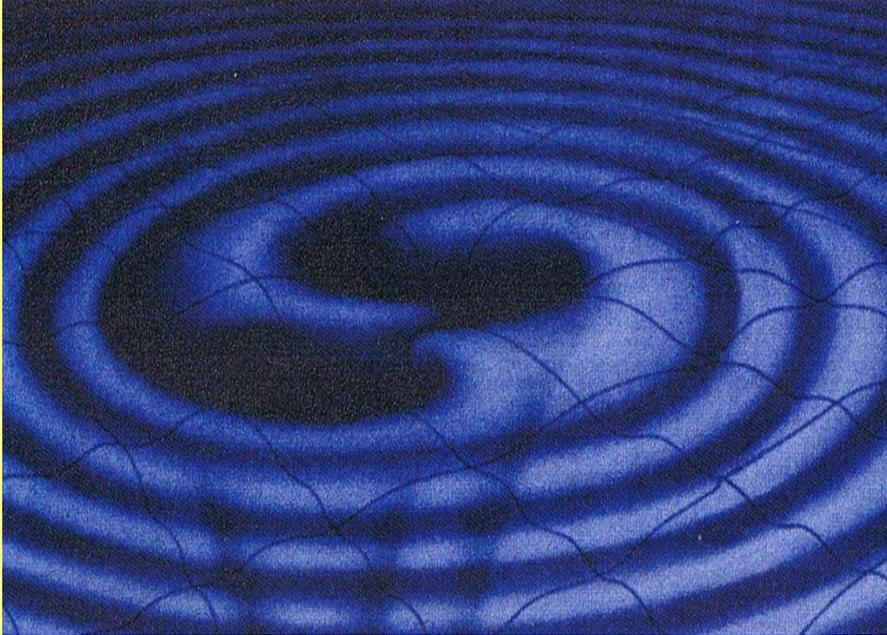
→ Freie Löcher können von Galaxien ohne zentrales Loch eingefangen werden



Drei-Körper Simulation:
<http://www.freewebz.com/vitaliy/triApplet/triGrav.html>



4. Gravitationsstrahlung



Theoretische Vorhersage der ART:
Ein **beschleunigtes, asymmetrisches System** entsendet Gravitationswellen

Änderungen der Raumzeitkrümmung breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus

Übertragung von Energie, Information

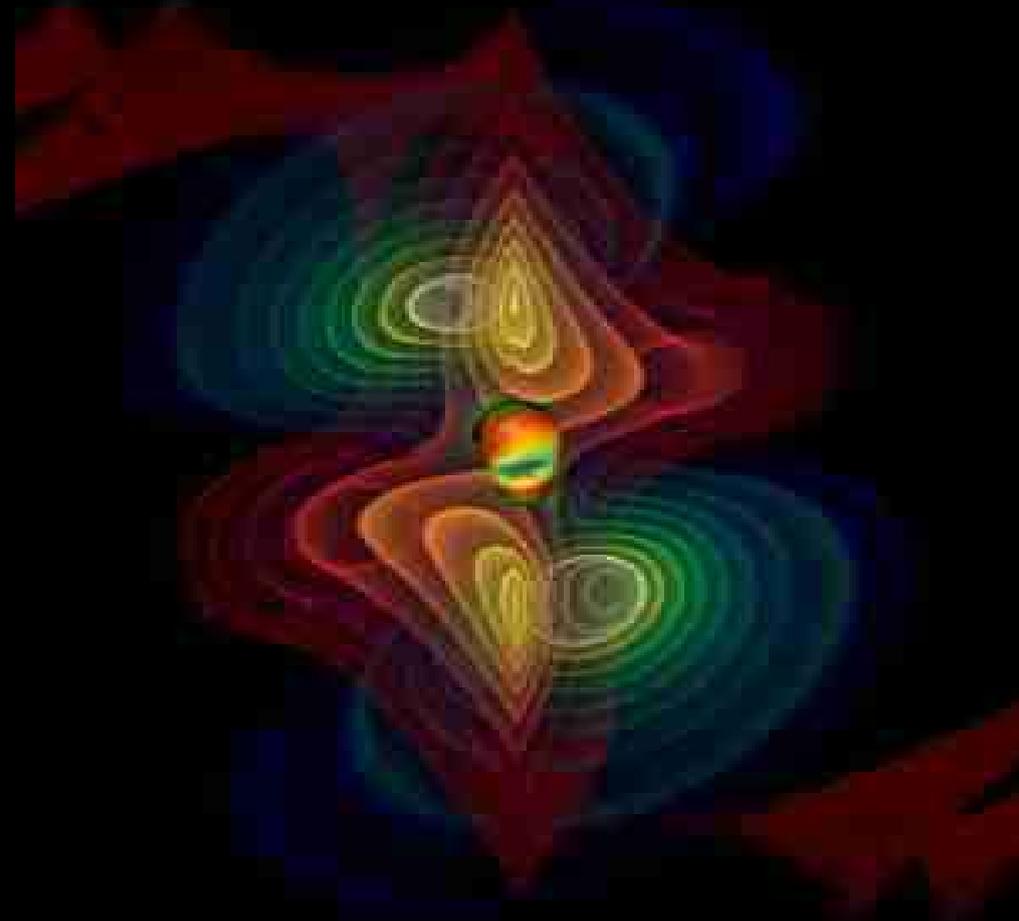
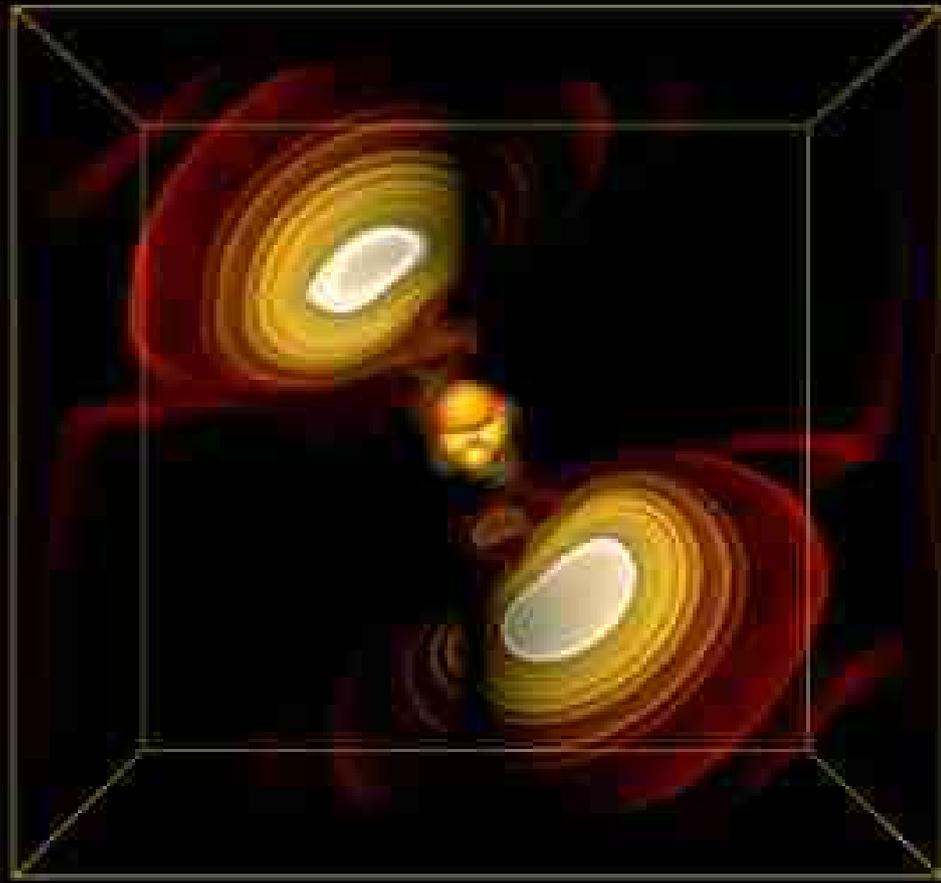
Beobachtung eines Doppelsternsystems schwarzer Löcher:

Elektromagnetische Wellen	Gravitationswellen
Verhalten von Elektronen	Änderung der Raumzeitkrümmung
Zustand einer Gaswolke	Verhalten der schwarzen Löcher
Indirekte Kennzeichen	Direkte Kennzeichen
Große Entfernung zum Loch	Aussendung am Ort des Geschehens
Verzerrung, Streuung, Absorption	Keine Beeinflussung durch Materie

→Suche nach Gravitationswellen

Informationsgehalt der Gravitationswelle:

Eindeutige Signatur: Massen, Umlaufgeschwindigkeit, Gestalt der Umlaufbahn, Position am Himmel, Entfernung der schwarzen Löcher



5. Horizontvergrößerung und Entropie

Masse eines schwarzen Lochs soll stets zunehmen!

→ Fläche des Horizontes $\sim M^2$ muss wachsen

Verschmelzung zweier Löcher mit Massen M_1 , M_2 zu Masse M_3 :

$$\begin{aligned} M_1 + M_2 &\leq M_3 \\ M_1^2 + M_2^2 &\leq M_3^2 \leq (M_1 + M_2)^2 \\ M_1^2 + M_2^2 &\leq M_3^2 \leq M_1^2 + M_2^2 + 2M_1M_2 \end{aligned}$$

Die Differenz $2M_1M_2$ kann als Gravitationswellen abgestrahlt werden

Schlussfolgerung:

Die Gesamtfläche aller schwarzen Löcher in einem abgeschlossenen System kann sich nicht verkleinern

Analogon zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Anwendung thermodynamischer Gesetze auf schwarze Löcher:

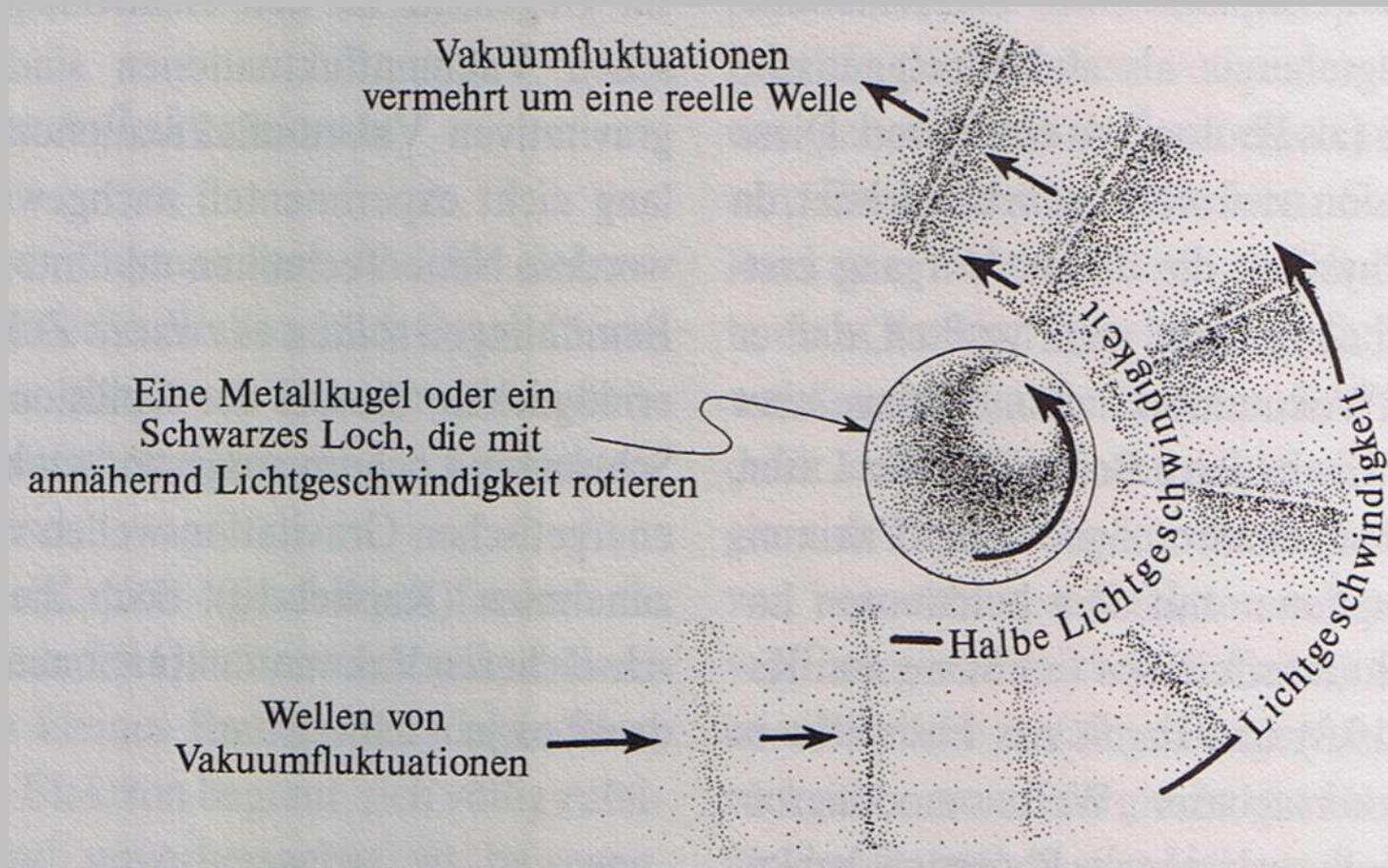
Entropie ~ Horizont

= Logarithmus der Möglichkeiten, wie das schwarze Loch entstanden sein könnte

Temperatur ~ Oberflächengravitation

Was ist die Temperatur eines schwarzen Lochs?

6. Verdampfende schwarze Löcher



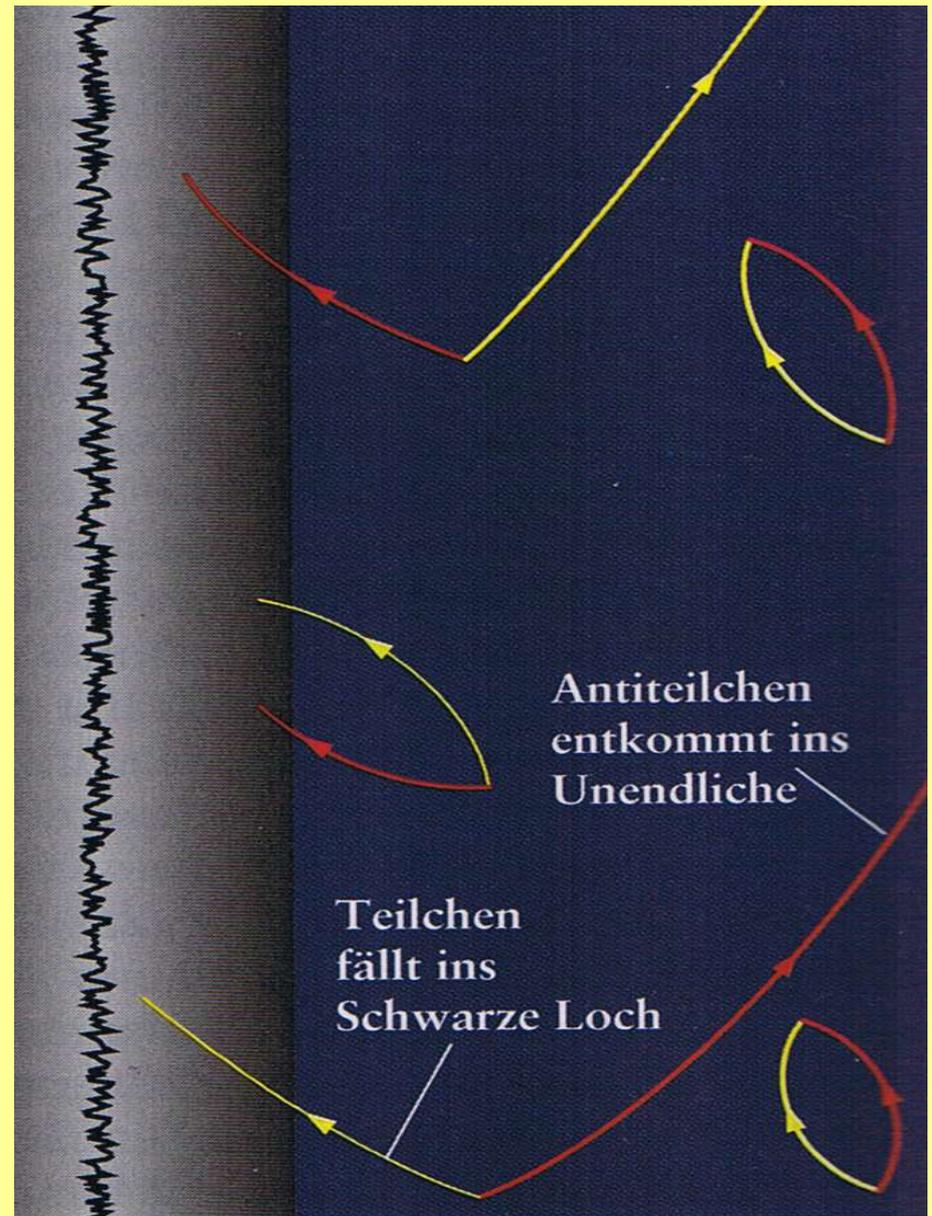
Quantenfluktuationen eines Feldes:

- Entstehung von spontanen Schwingungen, deren Energie im Mittel Null ist
 - rotierendes schwarzes Loch verstärkt Fluktuationswelle auf Kosten der Rotationsenergie
 - rotierendes schwarzes Loch strahlt, bis **Rotationsenergie verbraucht** ist!

Hawking-Effekt

Strahlung nicht-rotierender schwarzer Löcher

- Verhalten von Quantenfeldern in gekrümmter Raumzeit
- Entstehung von „virtuellen“ Teilchenpaaren
- Gezeitenkräfte ziehen Teilchenpaar auseinander
- Energieaufnahme bis zur Ruhemasse
- Teilchen werden „reell“ mit negativer und positiver Energie
- Eines stürzt ins Loch, das andere entkommt
- Massenabnahme des Lochs und Strahlung



- Lebensdauer virtueller Teilchen ist durch Unschärferelation begrenzt
 - Verwandlung zu reellen Teilchen nur, falls ihr Abstand geringer als die Wellenlänge ist
 - Andererseits: ausreichend Energie aus Gezeitenkraft nur, falls Abstand mindestens ein Viertel des Horizontumfangs beträgt
- Wellenlänge der Strahlung \sim Horizontumfang \sim Masse
- Temperatur \sim Frequenz \sim $1/\text{Wellenlänge}$ \sim $1/\text{Masse}$
- So wie theoretisch vorhergesagt:
- Temperatur \sim Oberflächengravitation \sim $1/\text{Masse}$
- Kleine Löcher strahlen stärker und verdampfen schneller!
- Lebensdauer $\sim M^3$

Masse in Sonnenmassen	Lebensdauer
10^{-20}	10^{10} <i>Alter des Universums</i>
2	10^{67}
20	10^{70}

Zukunft des Universums

Ewiges Ausdehnen oder Endkollaps?

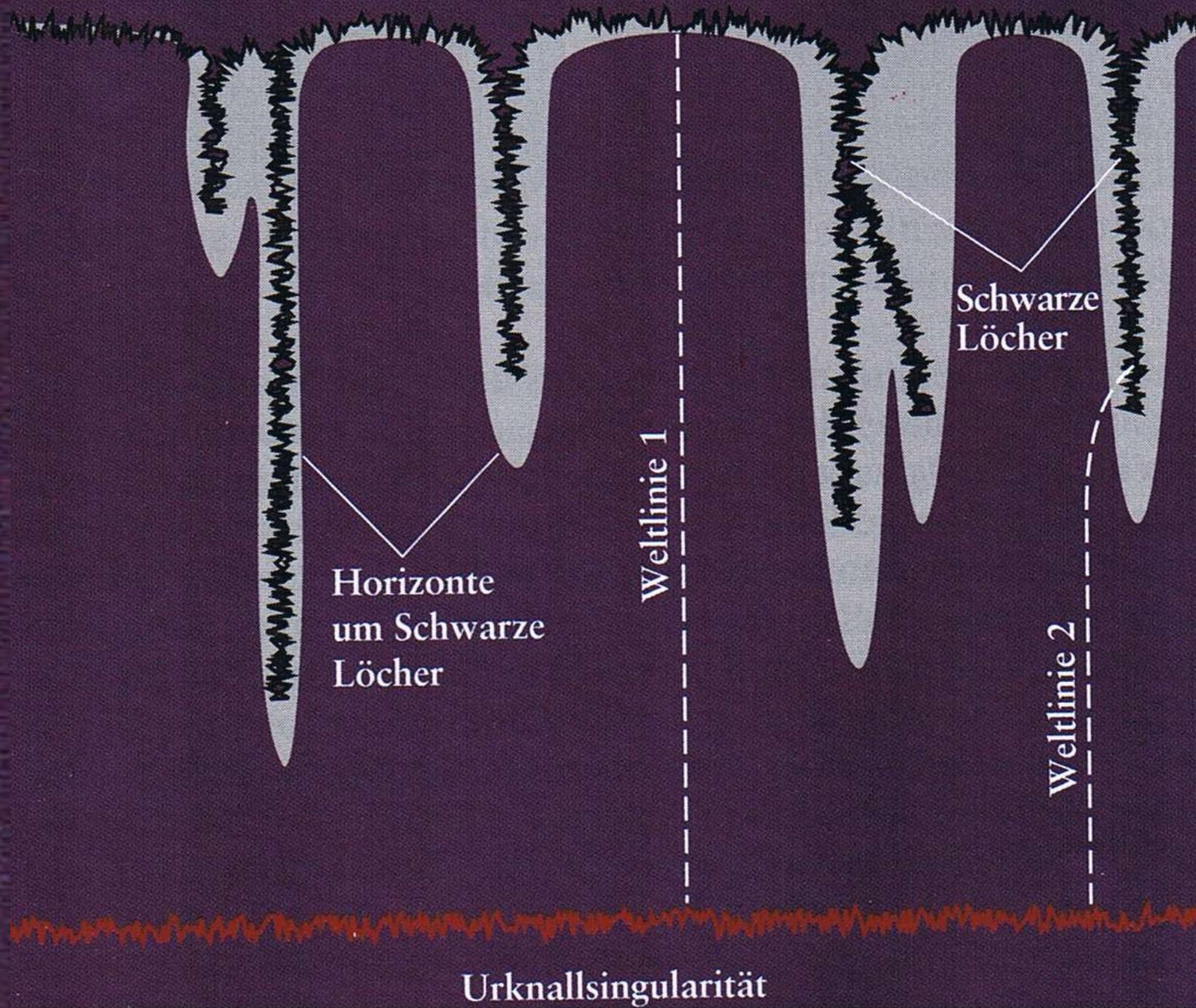
- **offenes Universum:**

- alle Sterne enden als weißer Zwerg, Neutronenstern oder schwarzes Loch
- Schwarze Löcher in Galaxienzentren werden immer dominanter
- Vereinigungen von schwarzen Löchern
- Nach 10^{96} Jahren sind alle Löcher verdampft
- Nach 10^{260} Jahren Tunneleffekt: Umwandlung weißer Zwerg – Neutronenstern – schwarzes Loch – Verdampfung
- Abkühlung gegen 0 K

- **geschlossenes Universum:**

- Kritische Dichte: Gravitation überwiegt Expansion
- Endkollaps - Vereinigung in einem universalen schwarzen Loch

Endknallsingularität



Quellen:

- Alberto Franceschini, Guenther Hasinger, Takamitsu Miyaji, Diego Malquori: On the relationship between galaxy formation and quasar evolution
- Andreas Müller: Schwarze Löcher – Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- Andreas Müller: Astro-Lexikon
- A. Marconi: Galaxies, active galactic nuclei and black holes: Evolution and Interaction
- Michell C. Begelman, Martin J. Rees: Gravity's fatal attraction
- Jörn Wilms: Introduction to Astronomy
- Hanno Karttunen: Introduction to Astronomy
- Kip Thorne: Gekrümmter Raum und verbogene Zeit - Einsteins Vermächtnis
- Ross J. McLure, James S. Dunlop: The cosmological evolution of quasar black hole masses
- Zoltán Haiman, Eliot Quataert: The formation and evolution of the first massive black holes

Bildnachweise:

- Seite 2, 4: <http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms/teach/intro/introchap9toc.html>
- Seite 2, 3: <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- Seite 7: http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni/uni_101bbtest3.html
- Seite 12: http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_sl_mass.html#mass
- Seite 14: <http://de.wikipedia.org/wiki/Andromedanebel>
- Seite 15: Begelman, Rees: Gravity's fatal attraction; S. 172
- Seite 16: <http://www.mpe.mpg.de/XMMCosmos/>
- Seite 17: http://chandra.harvard.edu/xray_sources/3c273/3c273_2.html
- Seite 20: http://de.wikipedia.org/wiki/NGC_7742
- Seite 20: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050628.html>
- Seite 21: <http://apod.nasa.gov/apod/ap020812.html>
- Seite 22: <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/a400/>
- Seite 23: http://www.astro.uni-bonn.de/~dhudson/Press_Release/Press.html
- Seite 24: Begelman, Rees: Gravity's fatal attraction; S. 199
- Seite 28: Kip Thorne: gekrümmter Raum und verbogene Zeit; S.496
- Seite 29: Begelman, Rees: Gravity's fatal attraction; S. 225
- Seite 32: Begelman, Rees: Gravity's fatal attraction; S. 233