

Physikalisches Seminar
*Kosmologische Entwicklung
supermassiver Schwarzer Löcher (SMBH)*

Bastian Falkner

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

30.05.11

Gliederung

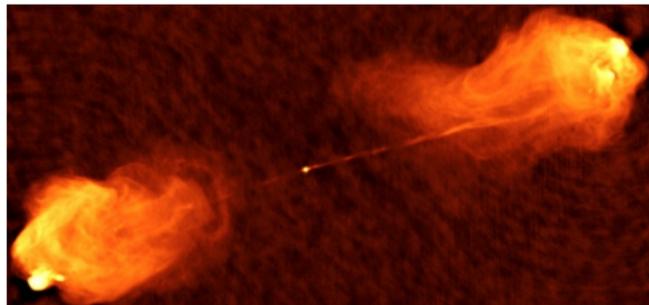
- 1 SMBHs als Energiequelle von Aktiven Galaxiekernen (AGN)
- 2 Kosmologie
- 3 Mögliche Keime der SMBHs
- 4 AGN Surveys
- 5 Direkte Messung: Gravitationswellen

Gliederung

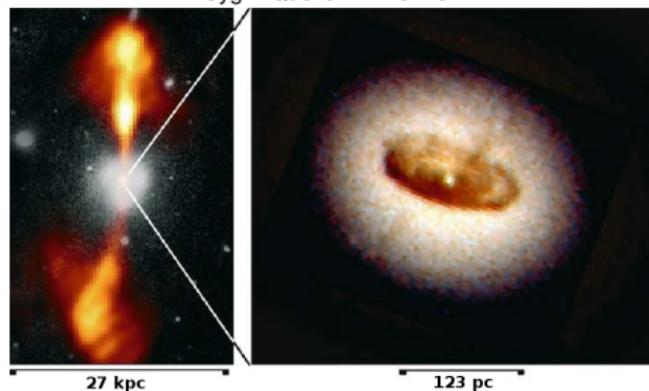
- 1 SMBHs als Energiequelle von Aktiven Galaxiekernen (AGN)
- 2 Kosmologie
- 3 Mögliche Keime der SMBHs
- 4 AGN Surveys
- 5 Direkte Messung: Gravitationswellen

Entdeckung

- 1932 K. Jansky: Unerklärlich helle Radio Quelle
- 1940 G. Reber: Erste Himmelskartographie im Radiobereich
- 1963 Quellen sind extragalaktischen Ursprungs mit extremen Leuchtkräften auf kleinen Raumgebieten
- 1964 Idee von akkretierende SMBH als Energiequelle

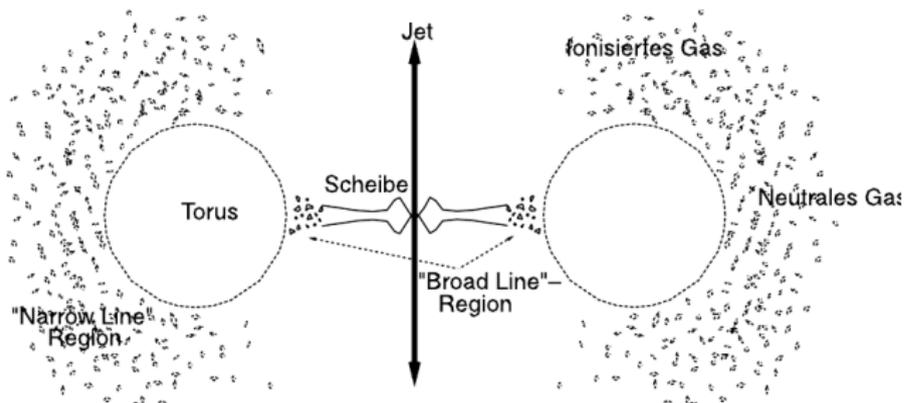


Cyg A Quelle: NRAO-AUI



NGC 4261 Quelle: [Schneider]

Standardmodell von AGN



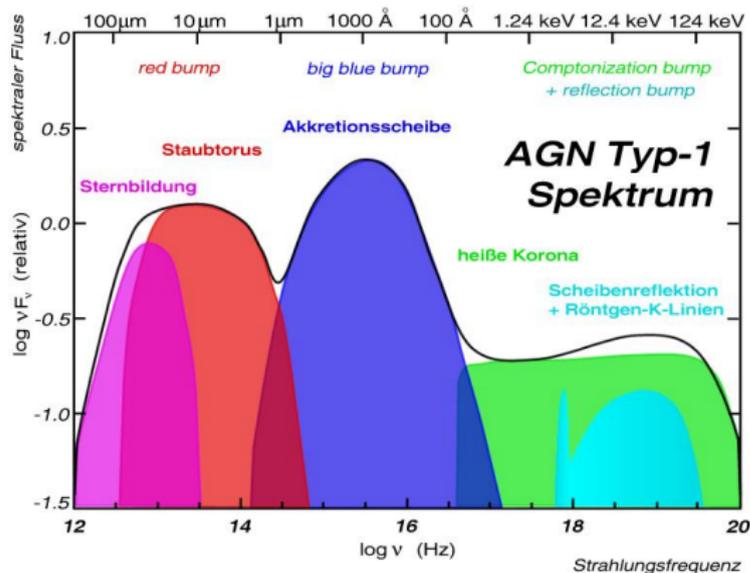
Standardmodell AGN Quelle: [Schneider]

Komponenten:

- rotierendes SMBH
- Akkretions-scheibe
- Staubtorus
- (Jets)

- AGN sind lokalisiert in Zentren von Galaxien
- Leuchtkräfte im Bereich: $L \sim 10^{43} - 10^{47} \text{ erg s}^{-1} \sim 10^9 - 10^{13} L_{\odot}$

Spektren von AGN



Standardmodell AGN Quelle: wissenschaft-online.de

Multiwellenlängenspektrum

- Akkretionsscheibe → UV bis Röntgen (Comptonisierung)
- Torus → IR
- (Jets → Radio)

Eddington Limit

Eddington Leuchtkraft L_{Edd}

Die Leuchtkraft, bei welcher der **Strahlungsdruck** den **Gravitationsdruck** aufwiegt, heißt Eddington Leuchtkraft:

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} = 1.3 \cdot 10^{38} \frac{M}{M_\odot} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

$$= 3.3 \cdot 10^4 \frac{M}{M_\odot} L_\odot$$

Abschätzung einer Unterschranke ($L < L_{\text{Edd}}$):

$$M_{\text{SMBH}} \gtrsim \frac{L}{3.3 \cdot 10^4 L_\odot} M_\odot \gtrsim 10^5 - 10^9 M_\odot$$

Eddington Akkretion

Akkretion von Materie produziert Licht mit einer Effizienz $\epsilon \approx 0.1$.

$$L = \epsilon \dot{M} c^2 \quad \Longrightarrow \quad \frac{dM}{dt} = \frac{L}{c^2 \epsilon} = \frac{L}{L_{\text{Edd}}} \dot{M}_{\text{Edd}}$$

Mit der **Eddington Akkretionsrate**:

$$\dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{L_{\text{Edd}}}{c^2 \epsilon} \approx 2 \left(\frac{M}{10^8 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right)^{-1} \frac{M_{\odot}}{\text{yr}}$$

\Rightarrow Akkretionsraten von bis zu einigen M_{\odot} .

Gliederung

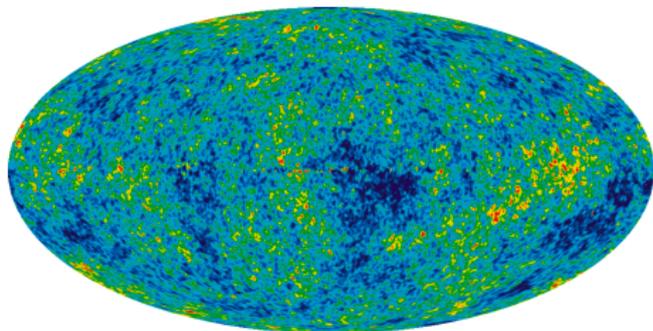
- 1 SMBHs als Energiequelle von Aktiven Galaxiekernen (AGN)
- 2 Kosmologie**
- 3 Mögliche Keime der SMBHs
- 4 AGN Surveys
- 5 Direkte Messung: Gravitationswellen

Kosmologisches Prinzip

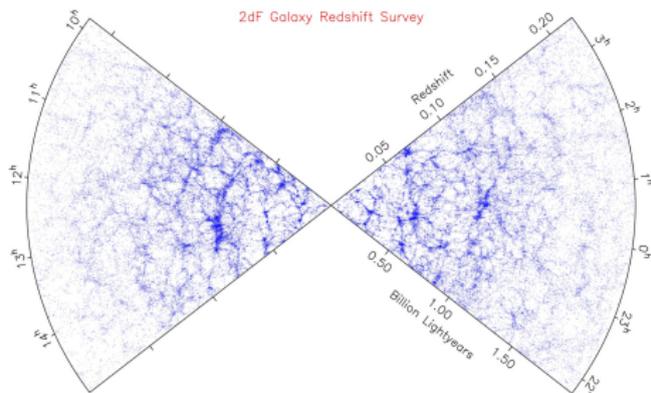
Kosmologisches Prinzip

Das Universum ist **isotrop** und **homogen** auf entsprechenden Längenskalen (~ 100 Mpc).

⇒ Das Universum sieht von jedem Punkt aus betrachtet gleich aus.

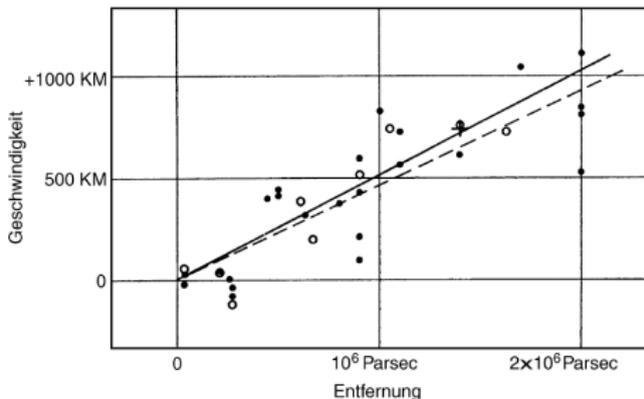


CMB Quelle: wmap.gsfc.nasa.gov



2dFGRS Quelle: aao.gov.au

Expansion des Universums



Hubble-Diagramm Quelle: [Schneider]

1928 E. Hubble beobachtet Galaxienflucht, d.h. weiter entfernte Galaxien bewegen sich schneller von uns weg.

Hubble-Gesetz

$$v = H_0 D = cz \quad (z \ll 1)$$

$$H_0 \approx 73 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}$$

Rotverschiebung:

$$z := \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}}$$

Achtung:

Zwei verschiedene Ursachen: Pekulargeschwindigkeit & kosmologische "Fluchtgeschwindigkeit"

ART: Friedmann-Gleichung

Aus der ART folgt die Friedmann-Gleichung zur Beschreibung der Expansion des Universums:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

ρ : Energiedichte
 K : Krümmungsparameter
 Λ : kosmologische Konstante
 a : **Skalenfaktor**

↳ Expansionsrate: $H(t) := \frac{\dot{a}}{a}$

↳ Rotverschiebung: $\frac{\lambda(t)}{a(t)} = \frac{\lambda(t_0)}{a(t_0)}$ $\rightarrow \lambda(t) = a(t)\lambda_0$
wobei $a(t_0) = a_0 := 1$

$$z = \frac{a_0 - a(t)}{a(t)} = \frac{1}{a(t)} - 1 \quad \text{bzw.} \quad a(t) = \frac{1}{z+1}$$

$\Rightarrow z, a$ und t sind eng verknüpft

Urknallmodell

Expansion → Abkühlen

Thermische Entwicklung des Universums:

- Entkopplung der Neutrinos → Neutrinohintergrund ($C\nu B$)
- Paarvernichtung
- Primordiale Nukleosynthese
 - ↳ 75% H-Kerne, 25% He-Kerne
 - ↳ (fast) keine schwereren Kerne
- Rekombination → Mikrowellenhintergrund (CMB)
 - ↳ Wichtige Phase für die Strukturbildung

T



Strukturbildung

DM weist Dichtefluktuationen auf

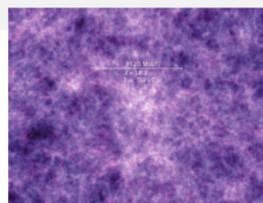
- ↳ Ursache in wahrscheinlich Inflation begründet:
Quantenfluktuationen \Rightarrow makroskopischen Schwankungen

Vor Rekombination:

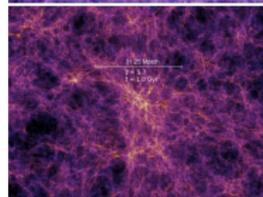
- Photonen WW mit Baryonen nicht aber mit DM
- Baryonen durch Photonendruck nicht an Gravitationspotential der DM gebunden

Nach Rekombination:

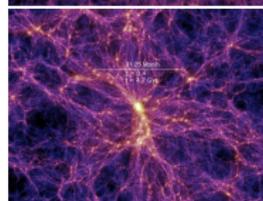
- Baryonen folgen dem Gravitationsfeld der DM
- Aus CMB \rightarrow kalte DM (CDM)
 \Rightarrow Kleine Strukturen bilden sich zuerst
(Hierarchische Strukturbildung)



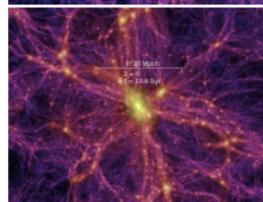
$z = 18.3$
 $t = 0.21$ Gyr



$z = 5.7$
 $t = 1.00$ Gyr



$z = 1.4$
 $t = 4.70$ Gyr



$z = 0$
 $t = 13.6$ Gyr

Struktur Simulation Quelle:
<http://www.mpa-garching.mpg.de>

Gliederung

- 1 SMBHs als Energiequelle von Aktiven Galaxiekernen (AGN)
- 2 Kosmologie
- 3 Mögliche Keime der SMBHs**
- 4 AGN Surveys
- 5 Direkte Messung: Gravitationswellen

Was wir wissen

- Massen von $M_{\text{SMBH}} \sim 10^5 - 10^9 M_{\odot}$:
 - ↳ Massenentwicklung (Schätzung): $M(t) = M(0) \exp\left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{t}{t_{\text{Edd}}}\right)$
 Mit $M(0) \sim 10^2 - 10^5 M_{\odot}$ ($\epsilon \approx 0.1$, $t_{\text{Edd}} = 0.45$ Gyr) folgt
 Entwicklungsdauer von $T \sim 0.8 - 0.5$ Gyr
- Quasare mit $z > 6$ ($t \sim 1$ Gyr nach Urknall) beobachtet.
- SMBH (AGN) scheinbar überwiegend im Zentrum von Galaxien zu finden
 - ↳ Möglicher Hinweis auf eine parallele Entwicklung von Galaxien und SMBHs

Überblick einiger möglicher Szenarien

Materie Halos bedingt durch DM Halos

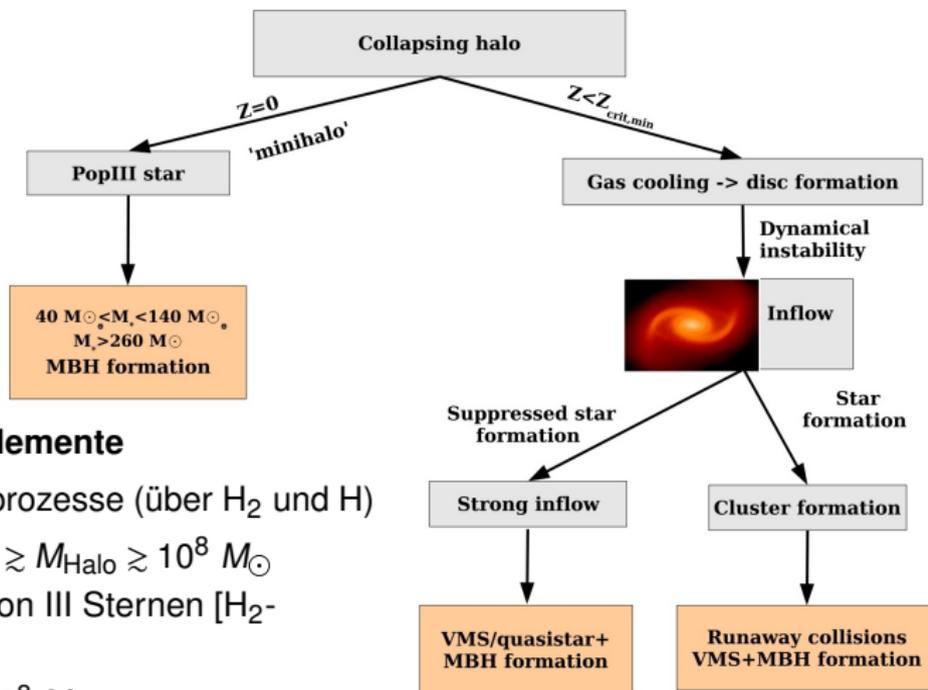
↳ Zunächst kleinere dann größere Halos

Keine schweren Kerne/Elemente

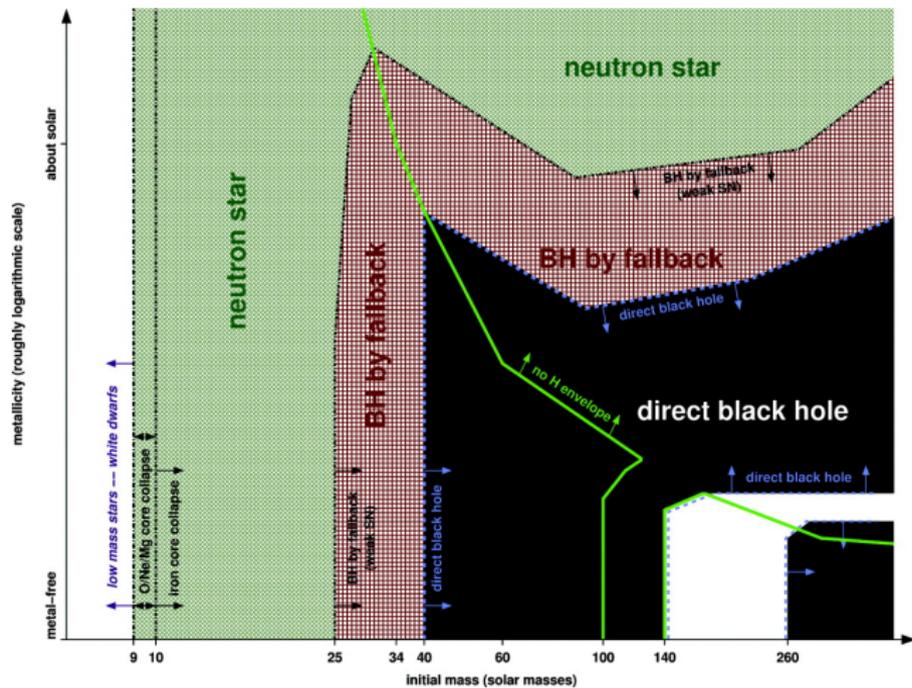
⇒ Nur ineffiziente Kühlprozesse (über H_2 und H)

↳ Minihalos: $10^6 M_\odot \gtrsim M_{\text{Halo}} \gtrsim 10^8 M_\odot$
 Bildung von Population III Sternen [H₂-Kühlung]

↳ Halos: $M_{\text{Halo}} \gtrsim 10^8 M_\odot$
 Bildung von supermassiven Sternen (SMS) [H-Kühlung]



Population III Überreste: Minihalos



Endzustände Quelle: [Volonteri]

$$M_{\text{init}} \sim 25 - 140 M_{\odot}$$

$$\hookrightarrow M_{\text{BH}} \sim 0.4 M_{\text{init}}$$

$$M_{\text{init}} \sim 140 - 260 M_{\odot}$$

\hookrightarrow Kein BH:
Paarerzeugung \rightarrow
Kollaps \rightarrow
explosives O,S
Brennen

$$M_{\text{init}} \gtrsim 260 M_{\odot}$$

$\hookrightarrow M_{\text{BH}} \sim 0.5 M_{\text{init}}$
Photodesintegration
verhindert Explosi-
on

Supermassive Sterne (SMS) - $M_{\text{Halo}} \gtrsim 10^8 M_{\odot}$

Bildung von SMS:

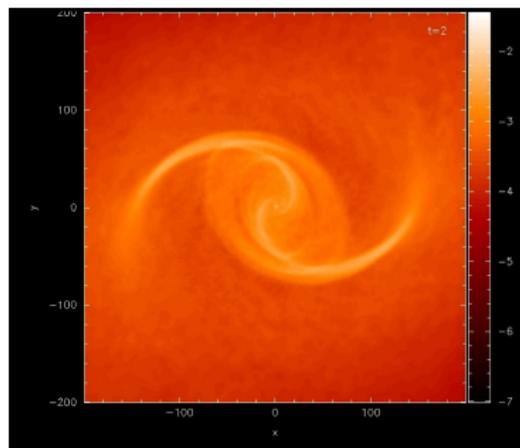
- Unterdrückte Sternbildung (keine H_2 -Kühlung)
 - Abtransport von Drehimpulse durch dynamische Instabilitäten ("bars-within-bars")
- ↳ $M_{\text{SMS}} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$

SMS ohne Akkretion:

- ↳ Direkter Kollaps in ein SMBH mit
 $M_{\text{SMBH}} \sim 0.9 M_{\text{SMS}}$

SMS mit Akkretion:

- ↳ Bildung eines "normalen" BH im Kern.
- ↳ Anwachsen des BH durch Akkretion aus der Hülle
- ↳ Nach Erreichen eines kritischen Punkts wird Hülle abgestoßen und ein SMBH mit $M_{\text{SMBH}} \sim 10^4 M_{\odot}$ entsteht



Sternbildung Quelle: [Volonteri]

Andere Mechanismen

- **Dynamische Sternprozesse:**

Sternbildung \Rightarrow Sternkollision \Rightarrow

VMS $\Rightarrow M_{\text{BH}} \sim 10^2 - 10^4 M_{\odot}$

- **Dunkle Sterne:**

\hookrightarrow keine Fusion, sondern WIMP-Annihilation

$\hookrightarrow M_{\text{DS}} \sim 500 - 1000 M_{\odot}$

\Rightarrow BH Massen bis zu $M_{\text{BH}} \sim 1000 M_{\odot}$

- **Primordiale Schwarze Löcher:**

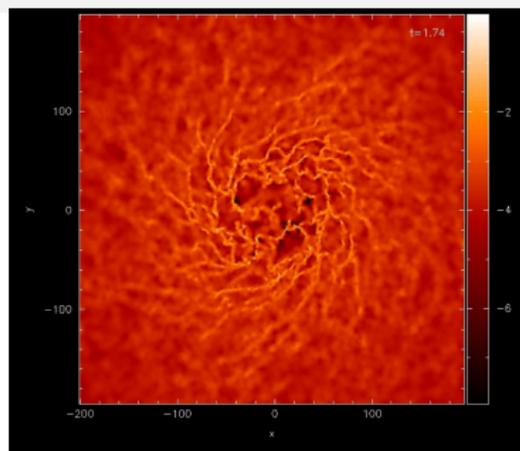
\hookrightarrow Entstehung **kurz** nach dem Urknall

\hookrightarrow Entstehung in starken Dichtefluktuationen (Gravitation $>$ Druck)

\hookrightarrow Masse bestimmt durch Teilchenhorizont:

Unteres Limit: $10^{-18} M_{\odot}$ (Hawking Strahlung)

Oberes Limit: $10^3 M_{\odot}$ (CMB)



Sternbildung Quelle: [Volonteri]

Gliederung

- 1 SMBHs als Energiequelle von Aktiven Galaxiekernen (AGN)
- 2 Kosmologie
- 3 Mögliche Keime der SMBHs
- 4 AGN Surveys**
- 5 Direkte Messung: Gravitationswellen

Ziele & Methoden

Fragestellung

Wie entwickeln sich AGN (SMBH) ?

(Wie hängt die Entwicklung von AGN und Galaxien zusammen ?)

Vorgehensweise

- **Tiefe Beobachtung:**

Nachweis von Quellen mit großer Rotverschiebung z

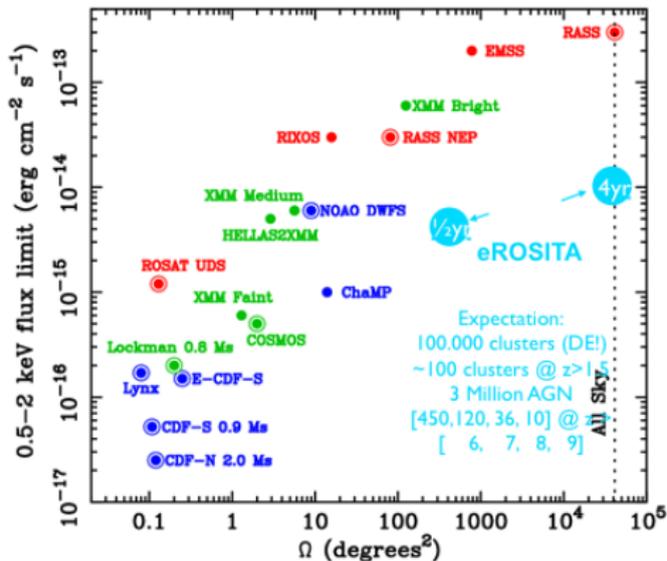
⇒ Weiter Blick in die Vergangenheit

- **Flächendeckende Beobachtung:**

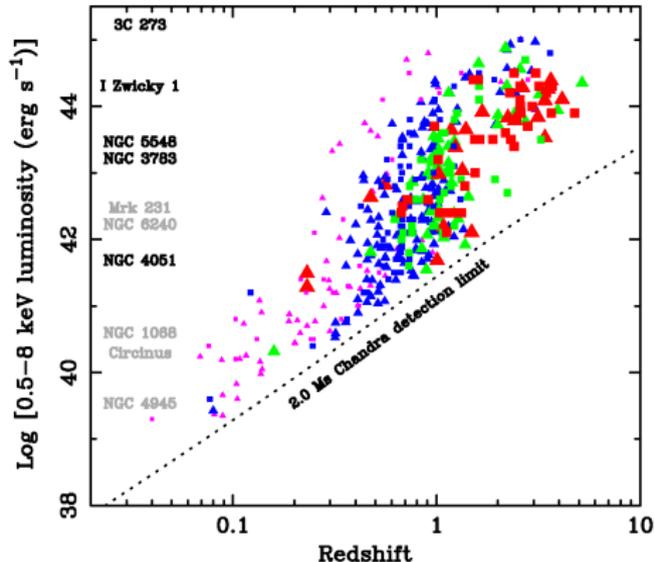
Nachweis vieler Quellen

⇒ gute Statistik

Tiefe gegen Flächenabdeckung

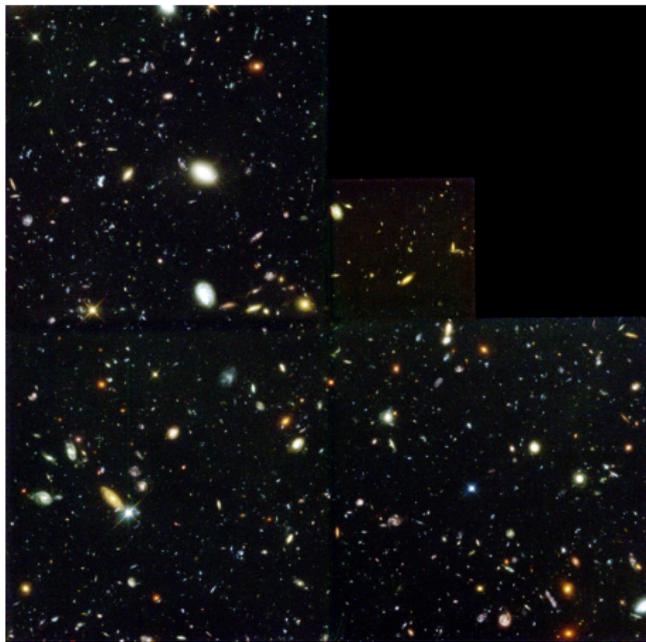


Survey Missionen Quelle: [Brandt & Hasinger]



Chandra 2Ms Quelle: [Brandt & Hasinger]

Optische vs. Röntgen Beobachtungen (I)

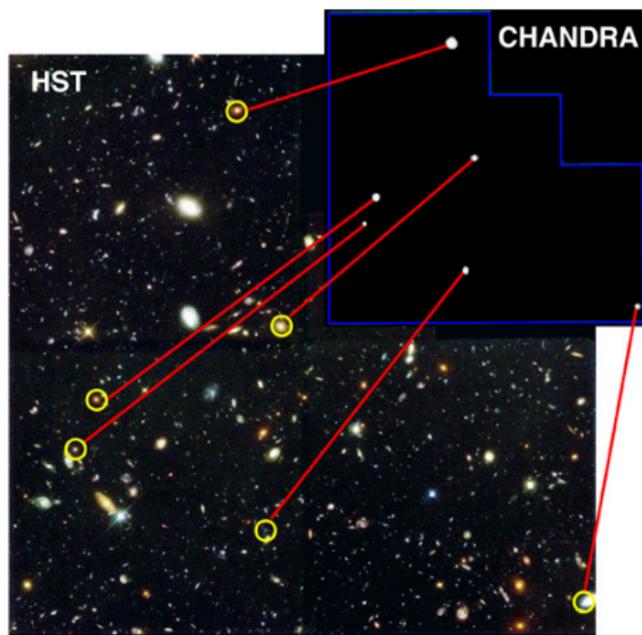


HST Deep Field North *Quelle: <http://hubblesite.org/>*



Chandra Deep Field North *Quelle: <http://chandra.harvard.edu/>*

Optische vs. Röntgen Beobachtungen (II)



Röntgen:

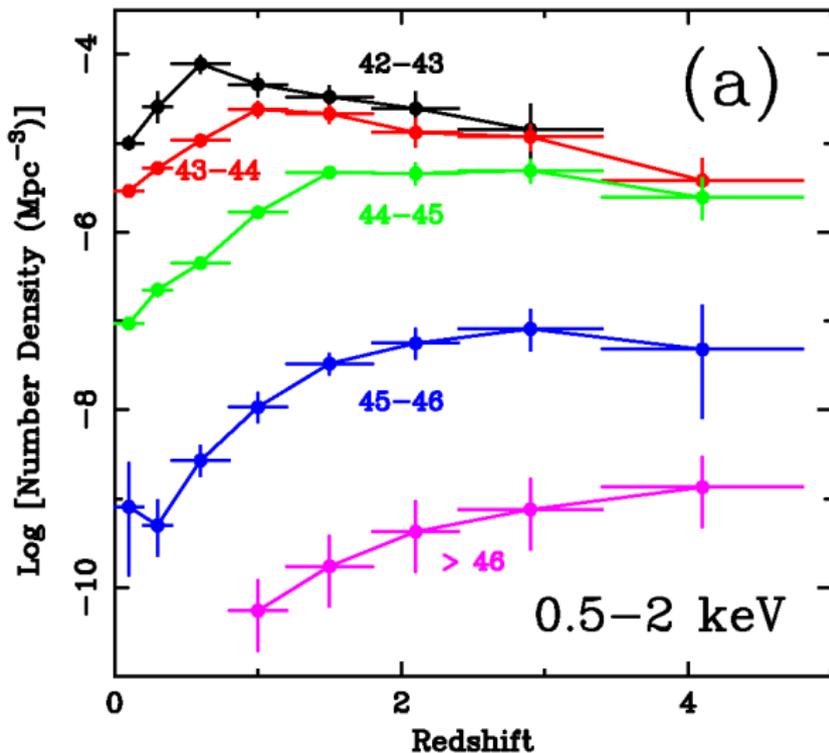
- ↳ geringe Absorption
- ↳ fast ausschließlich AGN
- ⇒ Nachweis & Lokalisation von AGN

Optisch:

- ↳ hohe Auflösung
- ⇒ Bestimmung der Rotverschiebung z

HST & Chandra DPN Quelle: <http://chandra.harvard.edu/>

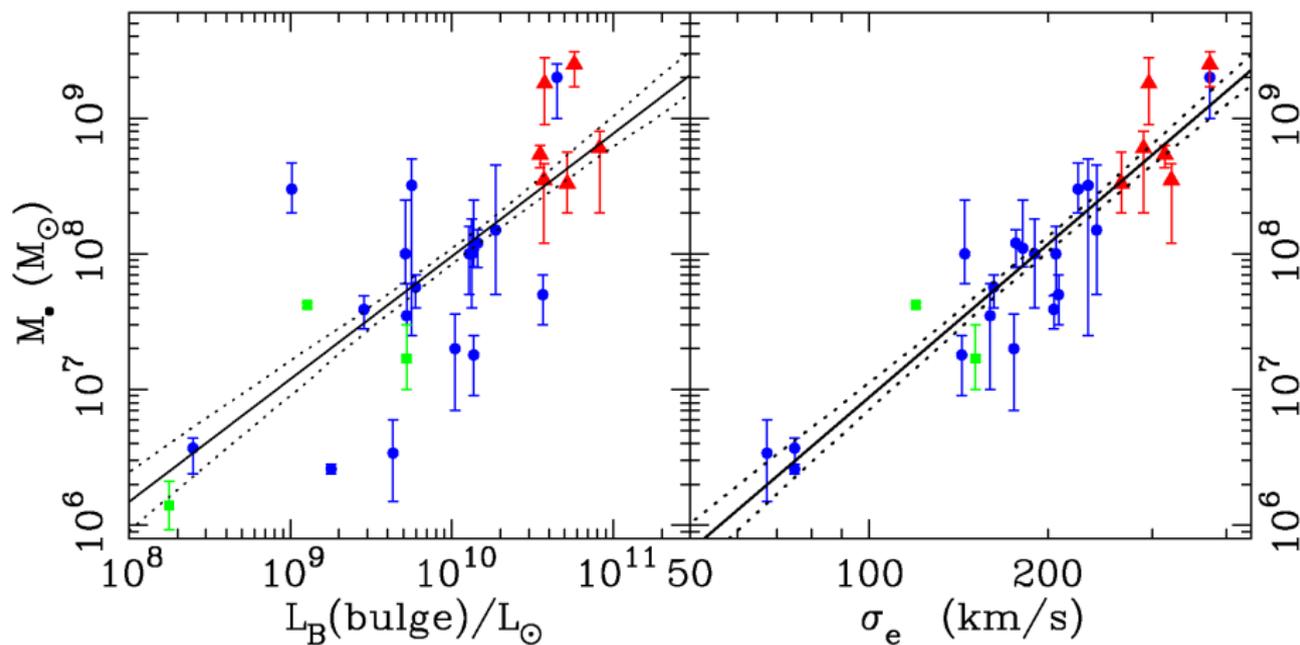
Anti-hierarchisches Wachstum



Survey Missionen Quelle: [Brandt & Hasinger]

- Peak für kleinere L_X bei kleineren z
 - Entwicklungsrate bis zum Peak langsamer für kleine L_X
- ⇒ Wenn L_X verknüpft mit M_{BH} → Große BH haben sich schneller entwickelt als kleinere

Korrelationen zwischen M_{BH} und Hostgalaxie

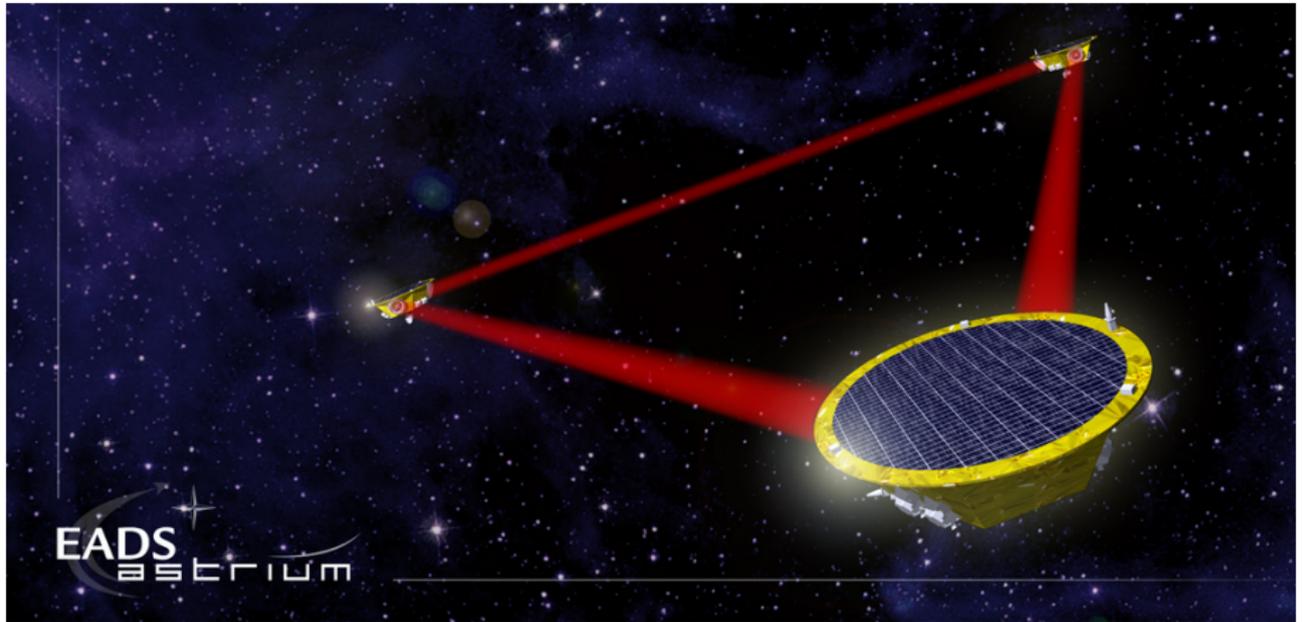


Bulge Helligkeit & Geschwindigkeitsdispersion *Quelle: [Gebhardt]*

Gliederung

- 1 SMBHs als Energiequelle von Aktiven Galaxiekernen (AGN)
- 2 Kosmologie
- 3 Mögliche Keime der SMBHs
- 4 AGN Surveys
- 5 Direkte Messung: Gravitationswellen**

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)



LISA Quelle: ESA

- Abstandsmessung von Testmassen
- Abstand: $5 \cdot 10^6$ km
- Prinzip: Michelson-Interferometer
- Empfindlichkeit: 0.03 mHz - 0.1 Hz

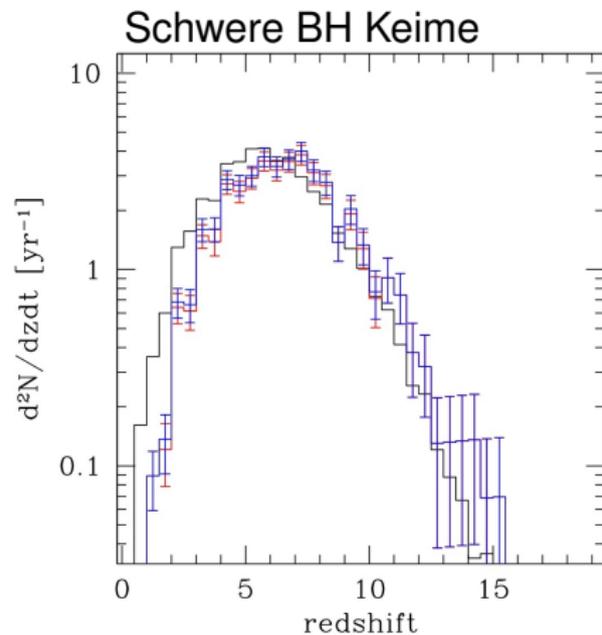
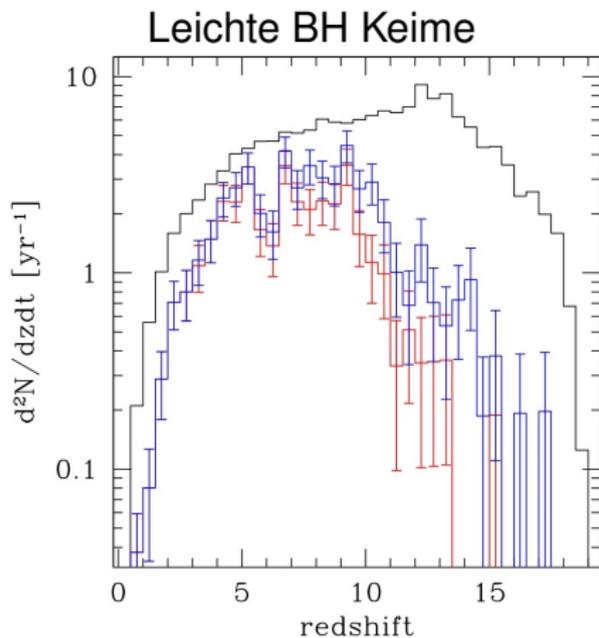
Gravitationswellen

Gravitationswellen

- wellenartige Raumzeitdeformationen
- verursacht durch beschleunigte Massen
- Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit
- transportieren Energie

- Effiziente Methode für massereiche Binärsysteme Energie zu verlieren
- ⇒ Verschmelzung von SMBHs begleitet von starken Gravitationswellen

Messbare Signatur (LISA)



LISA MC Quelle: [Volonteri]

Zusammenfassung

- SMBHs stellen die Energiequelle von AGNs
 - Die Entstehung von SMBHs in den Anfängen des Universums.
 - ↳ Viele theoretische Ansätze
 - ↳ Noch keine hinreichenden Messdaten
 - ↳ Neue Erkenntnisse durch LISA
 - Rückschluss auf zeitliche Entwicklung von SMBHs durch AGN Surveys
- ⇒ Verständnis für SMBH und Kosmologie ist eng verknüpft

Quellen

- Julian H. Krolik, *Active galactic nuclei*, Princeton University Press 1999
- Peter Schneider, *Extragalaktische Astronomie und Kosmologie*, Springer Verlag 2008
- Kip S. Thorne, *Gekrümmter Raum und verborgene Zeit*, Bechtermünz Verlag 1994
- <http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/>
- <http://wmap.gsfc.nasa.gov>
- <http://www2.aao.gov.au/>
- <http://pulsar.sternwarte.uni-erlangen.de/wilms/teach/>
- <http://lisa.jpl.nasa.gov/>
- <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=27>
- M. Volonteri, *Formation of Supermassive Black Holes*, arXiv:1003.4404v1
- W.N. Brandt & G. Hasinger, *Deep Extragalactic X-ray Surveys*, arXiv:astro-ph/0501058v2
- K. Gebhardt *A Relationship Between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion*, arXiv:astro-ph/0006289v2

Eddington Limit - Herleitung

Allgemein:

Auswärts gerichtete Kraft der Strahlung: $\vec{F}_{\text{rad}} = \frac{1}{c} \int d\nu \vec{\mathcal{F}}_{\nu} \kappa(\nu) \rho$

mit dem Strahlungsfluss pro Frequenz: $\vec{\mathcal{F}}_{\nu} \equiv \int d\Omega \hat{n}(\Omega) I_{\nu}(\Omega)$

Transportgleichung für Intensität I_{ν} :

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{n} I_{\nu}) = \int d\Omega' \int d\nu' \kappa_{\nu', \hat{n}'}^{\text{S}}(\nu, \hat{n}) I_{\nu'}(\hat{n}') - (\kappa_{\nu}^{\text{S}} + \kappa_{\nu}^{\text{A}}) I_{\nu}(\hat{n})$$

Eddington Näherung:

- Komplette ionisiertes Gas \rightarrow Thomson Opazität (elastisch für $hc/m_e c \rightarrow 0$)
- Sphärisch symmetrische Elektronen Verteilung

$$\mathcal{F}_{\nu} = \frac{L_{\nu}}{4\pi r^2} \implies F_{\text{rad}} = \sigma_{\text{T}} n_e \int d\nu \frac{L_{\nu}}{4\pi c r^2} \implies g_{\text{rad}} = \frac{\sigma_{\text{T}}}{\mu_e} \frac{L}{4\pi c r^2}$$

$$\implies \frac{g_{\text{rad}}}{g} = \frac{\sigma_{\text{T}} L}{4\pi c \mu_e GM} = \frac{L}{L_{\text{Edd}}} \quad \text{mit} \quad L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi c GM \mu_e}{\sigma_{\text{T}}}$$