

WS 2004/05

# Hochauflösende Radiobeobachtungen aktiver Galaxienkerne

Silke Britzen

MPIfR, Bonn



Max-Planck-Institut  
für  
Radioastronomie

**Jede 2. Woche!**

**Termine:**

**05.11.2004**

**Im Internet auf:**

**19.11.2004**

**<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen>**

**03.12.2004**

**pdf Version der Vorlesung im Internet**

**17.12.2004**

**Vorlesungsfreie Zeit**

**14.01.2005**

**Meine e-mail:**

**[sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)**

**28.01.2005**

**Heute:**

**11.02.2005**

**Kosmologische Evolution der AGN**

## Nachtrag: Strahlungstemperatur – Compton Limit

- *Kellermann & Pauliny-Toth, 1996, ApJ 155, L71*
- Für eine homogen und isotrope Quelle, die Intensität der Invers Compton Strahlung relativ zu der Synchrotron Emission ( $L_C/L_S$ ) ist das Verhältnis der Energiedichte im Strahlungsfeld zu

der im Magnetfeld:

$$L_C/L_S \sim 0.5 \left( \Gamma_{\max}/10^{12} \right)^2 \tau_c \left[ 1 + 0.5 \left( \Gamma_{\max}/10^{12} \right)^2 \tau_c \right]$$

Streuung 2. Ordnung

$F_c$  ist cutoff Frequenz des Radio Spektrums in MHz:

## Nachtrag: Strahlungstemperatur – Compton Limit

Wenn  $f_c \sim 10^{5+/-1}$

so ist für  $T_{\max} < 10^{11}$  K,  $L_C/L_S < 1$ , aber für

$T_{\max} > 10^{12}$  K, Streuung 2. Ordnung wird wichtig und

$L_C/L_S \sim (T_{\max}/10^{11})^{10} \Rightarrow$  ist somit die maximale

Strahlungstemperatur größer als  $10^{12}$  K, dann werden die

Energieverlust aufgrund von invers Compton Streuung katastrophal

Und die Strahlungstemperatur sinkt auf Werte zw.  $10^{11}$  und  $10^{12}$  K,

invers Compton Verluste von der gleichen Größenordnung

wie die Synchrotronverluste sind.

## Nachtrag: Strahlungstemperatur – Compton Limit

Bsp.: maximale Strahlungstemperatur bei 1 GHz

⇒ Halbwertszeit eines Elektrons ist  $10^4$  Jahre

wenn  $T_{\max} \sim 10^{11} \text{K}$

⇒ Halbwertszeit 1 Tag wenn  $T_{\max} \sim 10^{12} \text{K}$

IDV RESULTS (published)

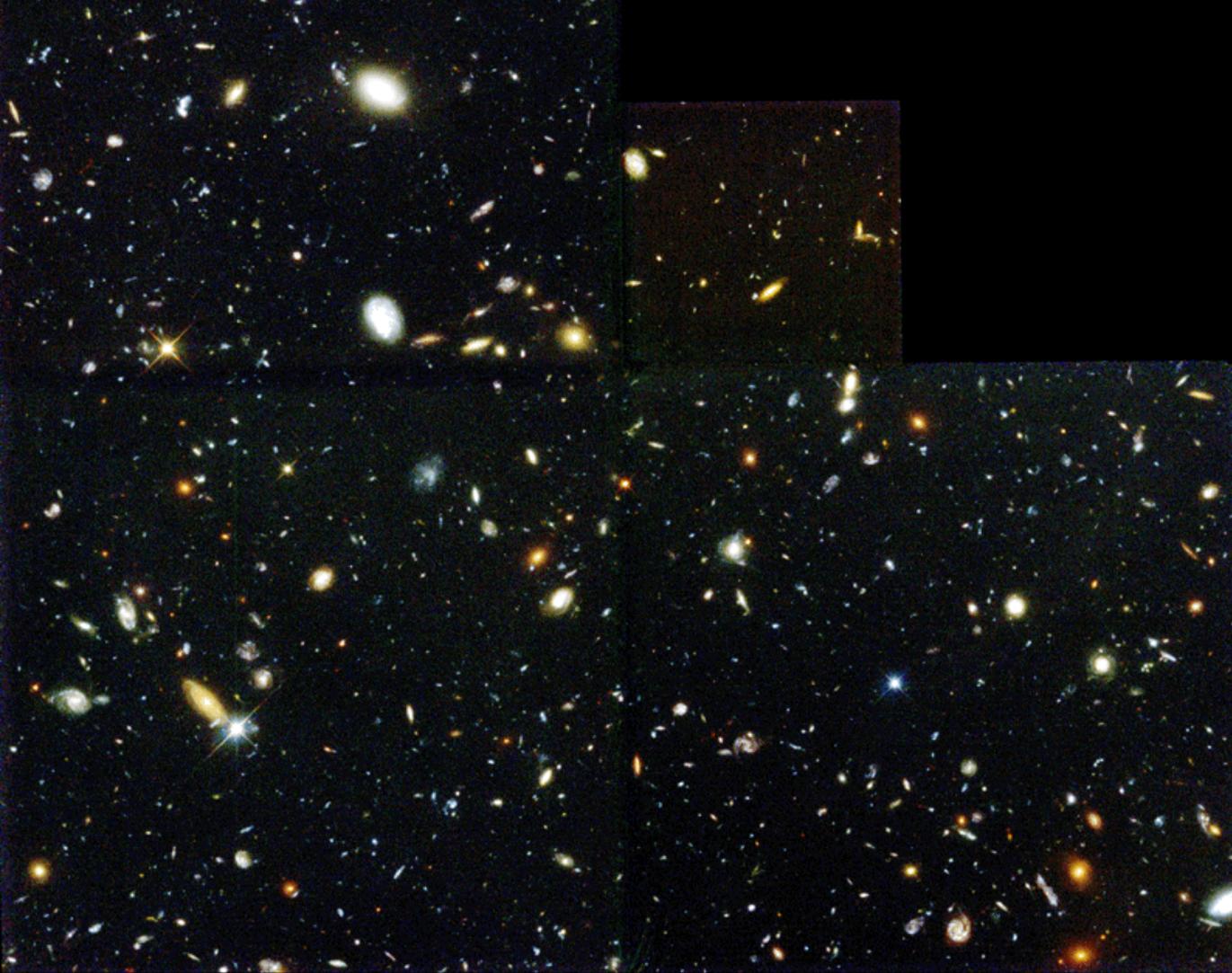
source	$\lambda$ cm	$\theta$ mas	L pc	$T_b$ K	$\delta$ Doppler	comments
0917+62	6, 11,20	0.06 0.11, 0.2	200	$6 \times 10^{12}$	6	Isotropy assumed
0405-38	3.8	0.03	30	$2 \times 10^{13}$	20	4:1
J1819+38	6	0.1 0.9	12 4	$5 \times 10^{11}$	$\sim 1$	6:1
1257-33	3.8, 6	0.02-0.04	10-15	$4 \times 10^{12}$ - $2 \times 10^{13}$	4 - 20	An- isotropy

# Literatur

## ■ Articles:

- *The Space Distribution of Quasars*, F.D.A. Hartwick & D. Schade, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1990. 28: 437-89
- *Dynamics of Interacting Galaxies*, J.E. Barnes & L. Hernquist, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1992. 30: 705-42
- *The Fueling and Evolution of AGN: Internal and External Triggers*, S. Joglee, astro-ph

# Kosmologische Entwicklung der AGN



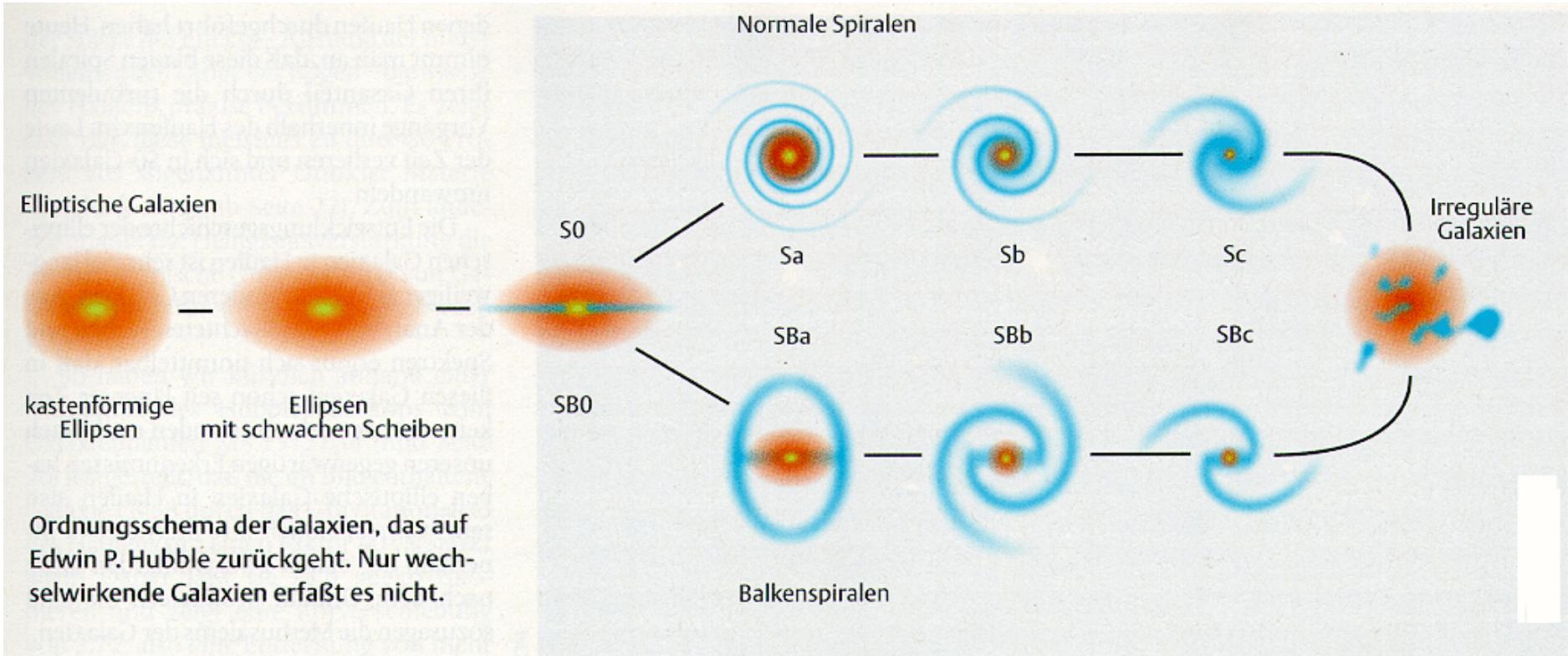
**Hubble Deep Field**

**HST WFPC2**

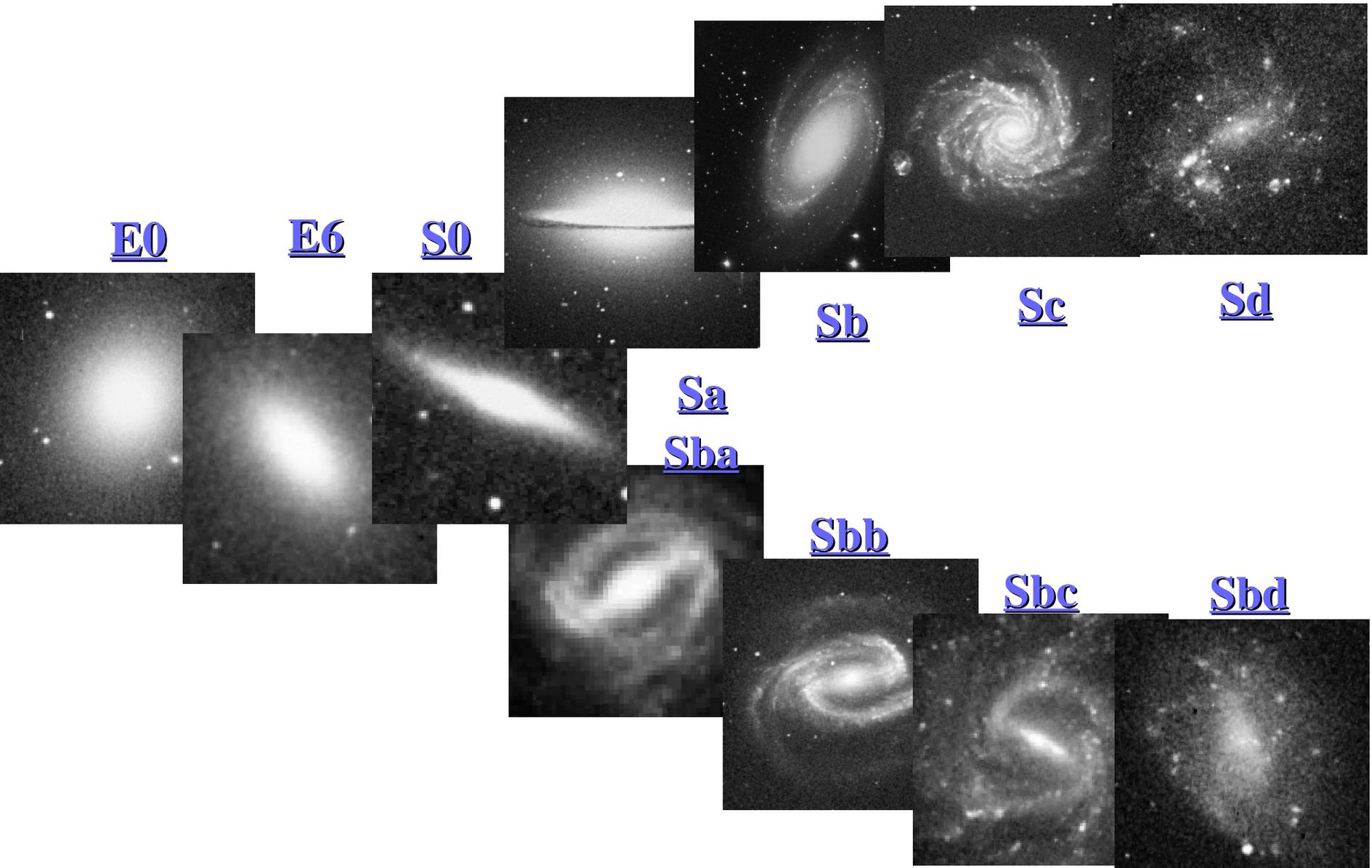
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

# Die "normalen" Galaxien: Klassifikation

## Morphologische Klassifikation: die Hubble Sequenz



# Die "normalen" Galaxien: Hubble Sequenz illustriert mit Galaxienaufnahmen





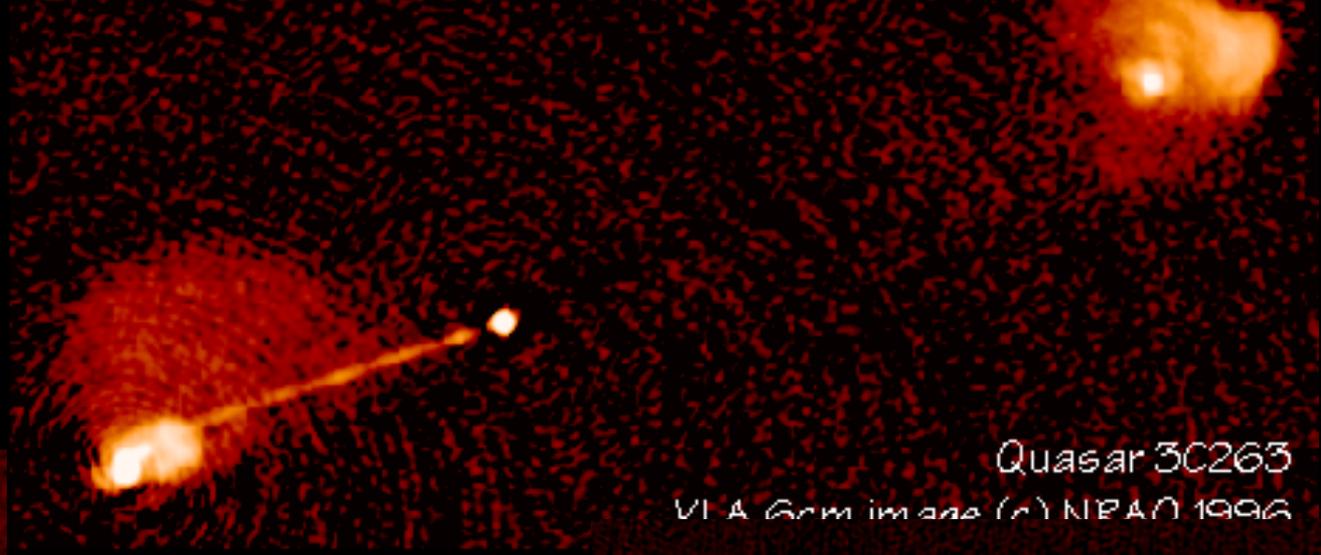
# Quasars



Quasar 3C204



YLA 6cm image (c) NRAO 1996



Quasar 3C265

YLA 6cm image (c) NRAO 1996



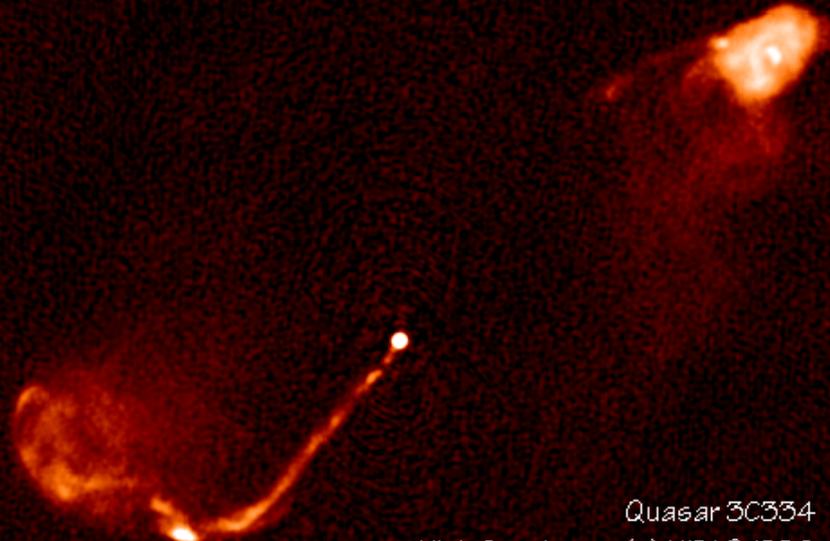
Quasar 3C175

YLA 6cm image (c) NRAO 1996



Quasar 3C334

YLA 6cm image (c) NRAO 1996



# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

- **verschiedene Arten von Durchmusterungen:**
  - **finde einen Quasar !**
    - zB um Existenz zu beweisen, hochrotverschobene Objekte, ..
  - **finde nur Quasare !**
    - Selektionseffekte, komplett, hohe Effizienz notwendig
  - **finde nur Quasare und sage voraus, was nicht gefunden werden wird !**
    - **anspruchsvoll !!** die Wahrscheinlichkeit der Selektion als Funktion von absoluter Magnitude, Rotverschiebung, SED

# Quasare

## Auf der Suche nach Quasaren

- Quasare als Testobjekte für die Entwicklung des Universums
- 2 Ziele:
  - 1) Charakteristiken der Population als Funktion der Rotverschiebung
  - 2) die entferntesten Objekte als Markierungsobjekte für das Einsetzen der Galaxienbildung im Universum
- aus Durchmusterungen erhofft man sich: die **Quasar Oberflächendichte**: die Zahl der Quasare pro Quadratgrad als Funktion der Flußdichte und der Rotverschiebung -> **Leuchtkraft-Funktion**: relative Anzahl der AGN bei einer bestimmten Leuchtkraft +  
Raumdichte: Gesamtzahl der Quellen pro mitbewegtem

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

- Probleme: Quasare leuchtschwach und Oberflächendichte gering
- große Anzahl an Objekten nötig: **geringe Oberflächendichte: um 200 Quasare zu detektieren: 100 000 Objekte beobachten !! ....**
- Vorselektion notwendig (falsche Kandidaten und Populationen eliminieren)-> Gefahr der Verfälschung der Aussagen durch Auswahl effekte
- im Wesentlichen Durchmusterungen im Optischen (UV-Exzess, breite Emissionslinien), Radio, Röntgen

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

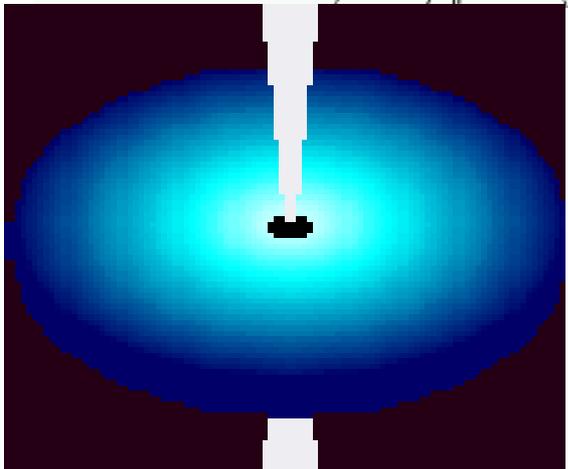
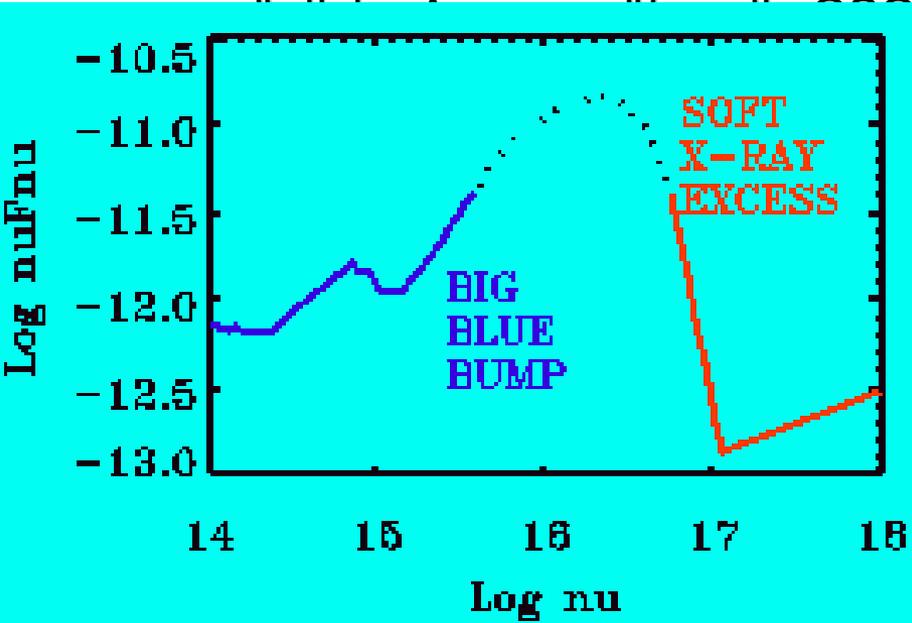
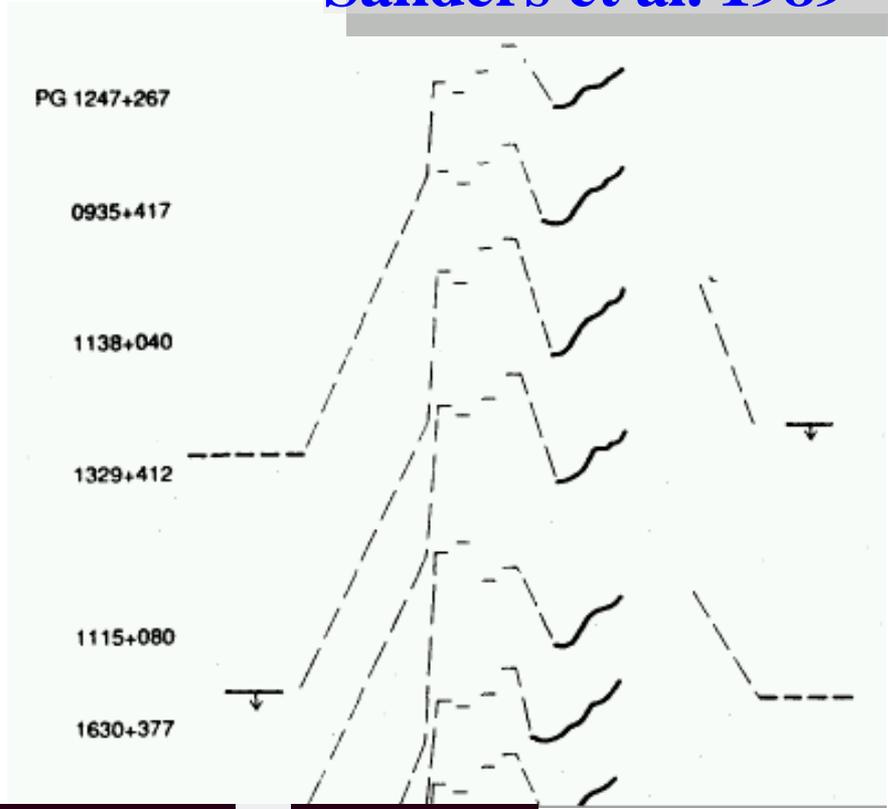
## ■ einige erfolgreiche Suchen:

- Radio Position: die ersten Quasare wurden gefunden durch die Koinzidenz von Radioquellen mit sternartigen optischen Quellen
- Problem: hohe Anforderung an die Genauigkeit der Radioposition [single-dish Beobachtungen, Interferometer ergeben genauere Position];
- ergibt nur radiolaute Objekte, 5-10% aller AGN sind radiolaut -> nicht repräsentativ für die AGN
- schwächste Quellen ..

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

Sanders et al. 1989

- Radio Position + UV Exzess (= "big blue bump"): recht effizient,
- aber: nur radiolaute Objekte,
- Rotverschiebungsabhängige Selektionseffekte zerstören jede



# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

## ■ einige erfolgreiche Suchen:

- Farben: traditionell UV-Exzess, heute auch "Vielfarben"  
Daten von sternartigen Objekten
- Slitless Spektroskopie: Spektren von vielen Objekten in einem Feld gleichzeitig, mit QSO SEDs und starken Emissionslinien können die QSOs von Sternen unterschieden werden;
- Problem: Signal-zu-Rauschen ist gering

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

## ■ einige erfolgreiche Suchen:

- Röntgen Emission: starke Röntgenstrahlung ist allgemeine Eigenschaft von AGN und möglicherweise der beste Weg um einen kompletten Überblick über die AGN zu erhalten, wenigstens bei niedrigen Rotverschiebungen
- Problem: limitierte Flussdichte Sensitivität und räumliche Auflösung erschweren die Identifikation von allen Quellen die nicht nahe und extrem leuchtkräftige Objekte sind

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

- erfolgreichste Methoden: Farbselektion und slitless Spektroskopie
- ~40-80% Erfolgsrate fuer die Kandidatenlisten nach Vorselektion; Grund: Daten im digitalen Format
- die Effizienz mit der QSOs entdeckt werden können mit spezifischer Technik ist Funktion von: Leuchtkraft, Rotverschiebung und SED -> Stichproben Selektions Funktion
- Problem: **Leuchtkraft Funktion** muss nicht überall dieselbe sein, die **Leuchtkraft Funktion** der QSO jetzt

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

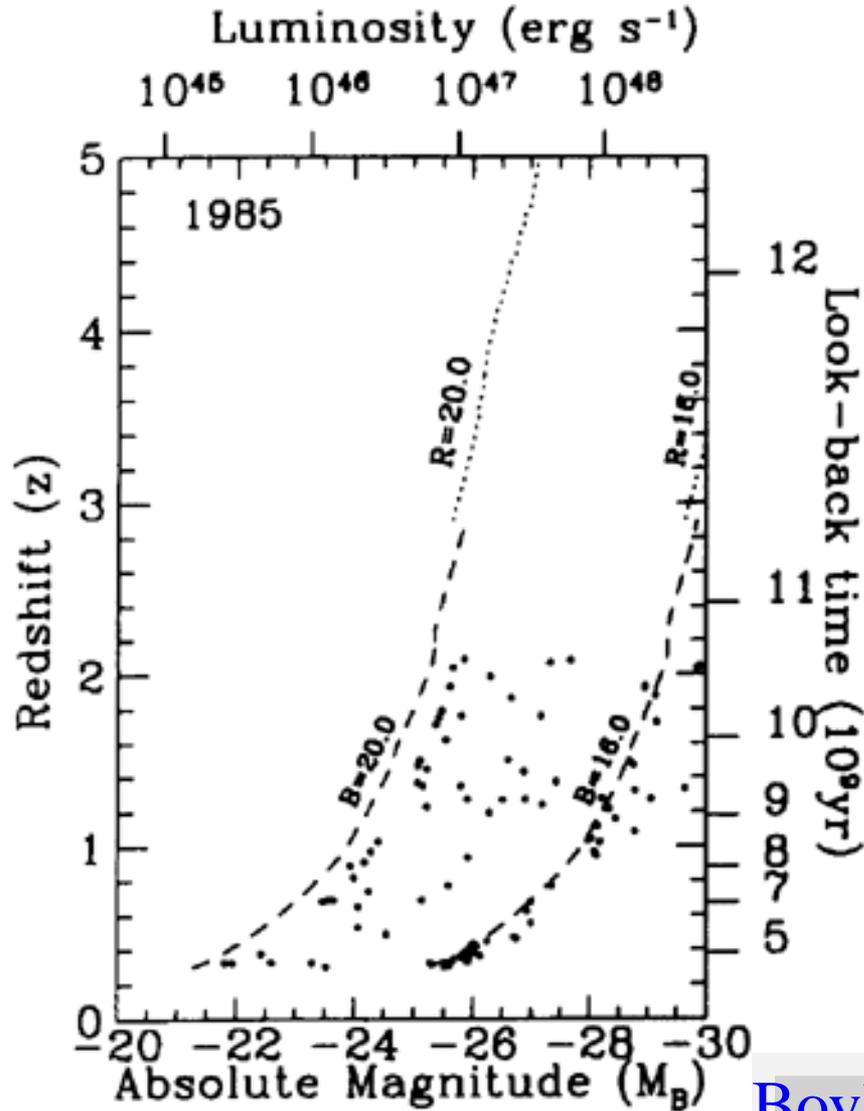
- Problem: komplett zu sein: alle Quellen mit Flüssen höher als Grenzfluß müssen detektiert werden
- Problem: „Eddington bias“: zufällige Fehler in den Bestimmungen der Magnitude können die QSO Zahlen systematisch verändern
- -> es ist unmöglich in der realen Welt eine komplette Stichprobe an QSO mit einem vernünftigen Flußdichtelimit zu erhalten (Vergleiche: König Arthus und die Suche nach dem heiligen Gral); normalerweise lautet der Schlußsatz: " **Die in unserer Durchmusterung gefundene Oberflächendichte ist so groß wie in bereits anderen publizierten Durchmusterungen, die meisten bereits vorher bekannten Quasare in dem Gebiet**

# Quasare: Auf der Suche nach Quasaren

- zusätzlich zu der Abhängigkeit von Leuchtkraft, Rotverschiebung, SED, andere Parameter tragen zur **Detektionswahrscheinlichkeit** bei:
  - Variabilität
  - Emissionslinien Äquivalentbreite
  - Absorptionslinien
  - Interne Absorption
- **Praxis: mit Stichproben-Unvollständigkeit umgehen lernen** indem man die **Selektionsfunktionen** in realistischer Weise **quantitativ erfaßt!!**

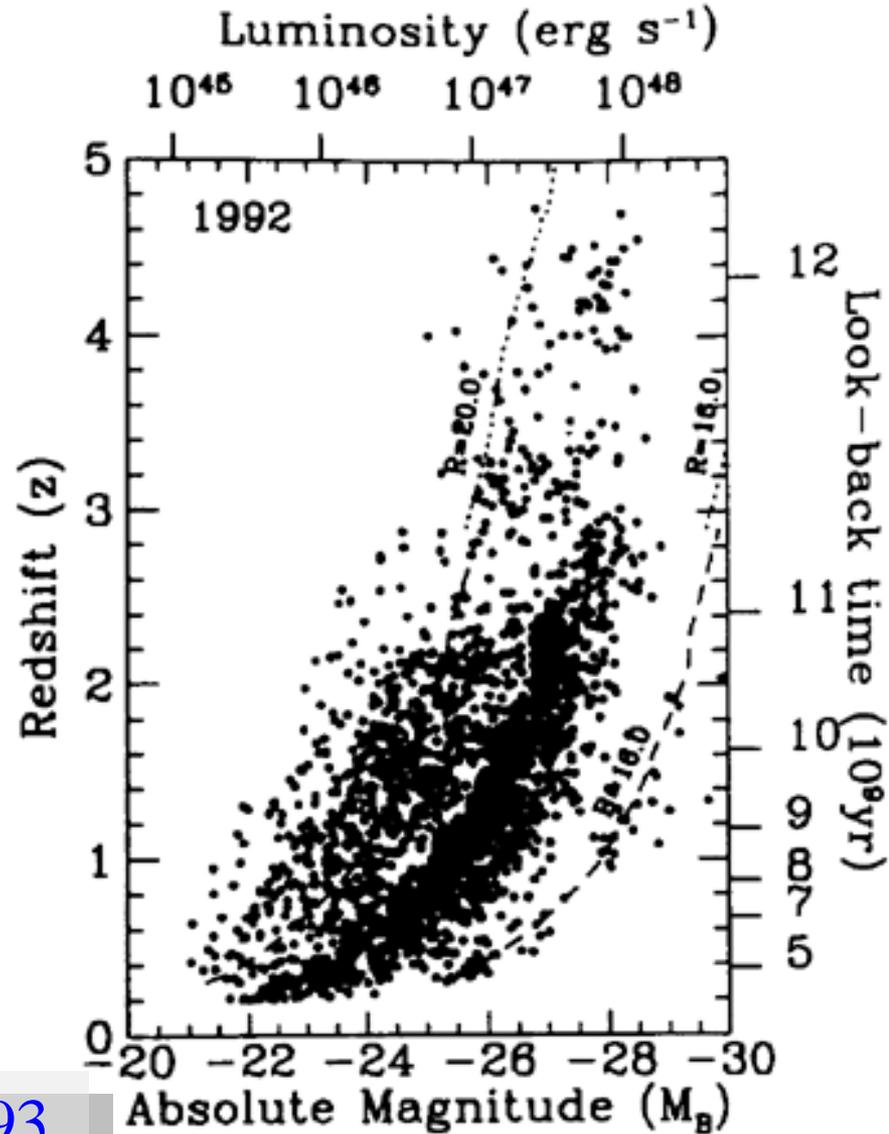
# Quasare: Durchmusterungen

1986



Boyle, 1993

1992, Juni



# Quasare: Rotverschiebungen

- die einzigen Objekte, welche sehr leicht bei hohem  $z$  beobachtet werden können
- -> wichtige kosmologische Tester
- wichtig: Anzahl der Quasare pro Einheitsvolumen erreicht Maximum um  $z \sim 2$ , bei hohem  $z$  ziemlich rar !!

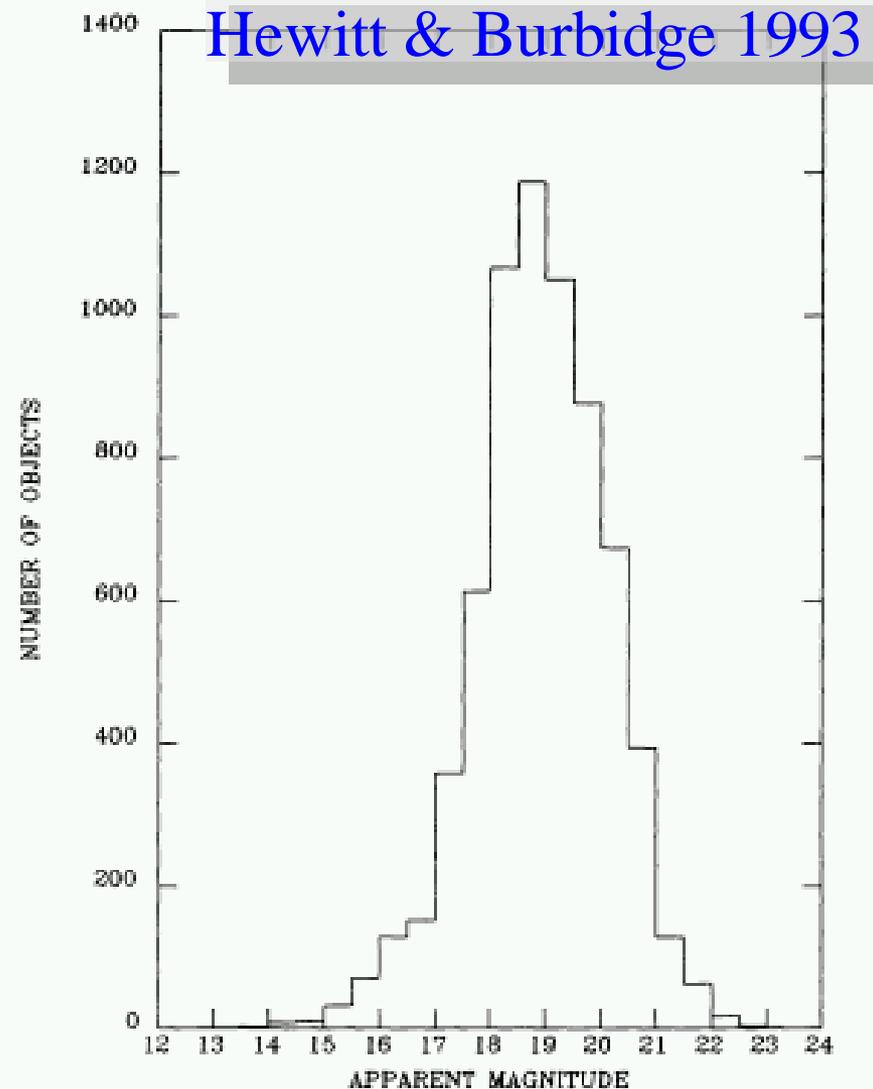


FIG. 2.—Histogram showing the distribution of apparent magnitude of all of the QSOs in Table 1.

# Quasare

## Leuchtkraftfunktion und Evolution

- mitbewegte Dichte der QSOs variiert stark mit der Rotverschiebung, mit besonders hoher Anzahl der Objekte bei  $z \sim 2$
- aber: hier arbeitet UV-Exzess Technik besonders gut, was ist Grund für den Überschuß bei  $z \sim 2$  ??
- -> Untersuchungen ergeben: die Population entwickelt sich mit der Zeit

# Quasare

## Leuchtkraftfunktion und Evolution

- Standard Bild:
- Stichproben im Radio, Optischen, Röntgen zeigen für  $z < 2$  einen rapiden Anstieg in der Raumdicke als Funktion der look-back time
- aus optischen Stichproben folgt ein Anstieg in der Raumdicke um Faktor  $> 200$
- -> Parametrisierung der Leuchtkraftfunktion als 2 Komponenten Potenzgesetz mit unterschiedlichen Steigungen bei hohen und niedrigen Leuchtkräften und einem "Umbruchpunkt" an dem sich die Steigung ändert

# Quasare

## Leuchtkraftfunktion und Evolution

- Boyle et al. 1991 finden best-fit Werte für den Bereich von  $0.3 < z < 2.9$
- **Leuchtkraft Funktion** für  $z > 3$  ist noch nicht genau bestimmt, obwohl Ergebnisse übereinstimmend -> dramatischer Rückgang an Objekten bei  $z \sim 3$ , aber kein Hinweis auf cut-off

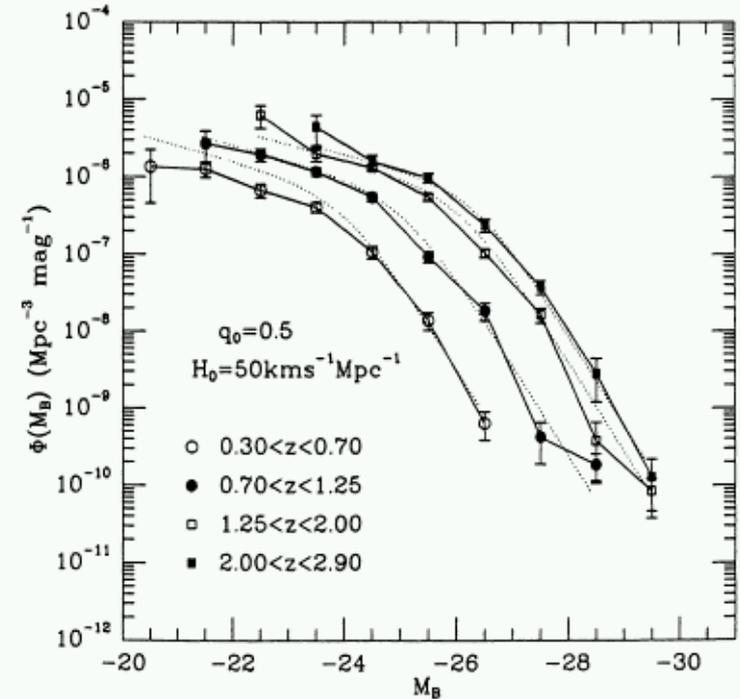
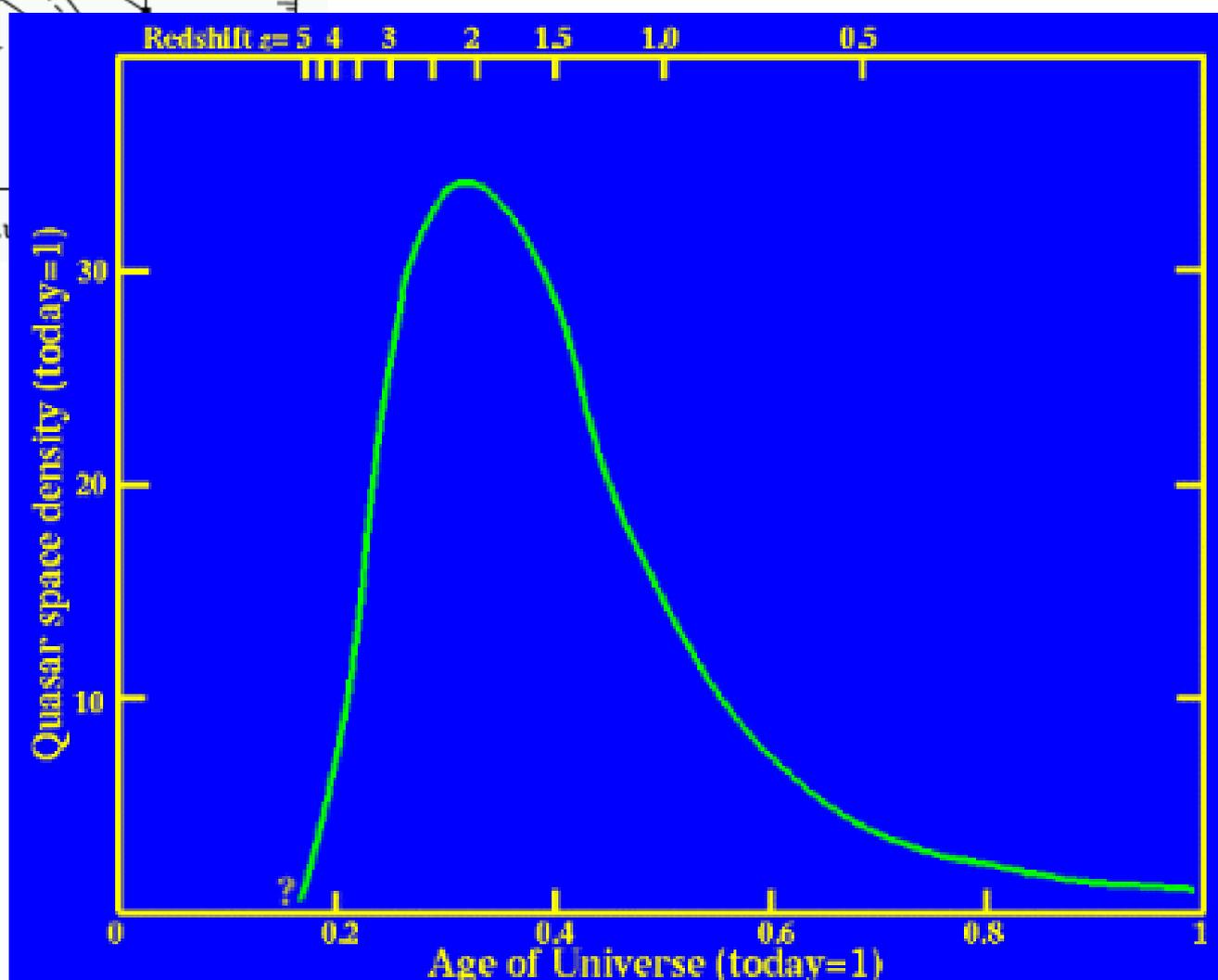
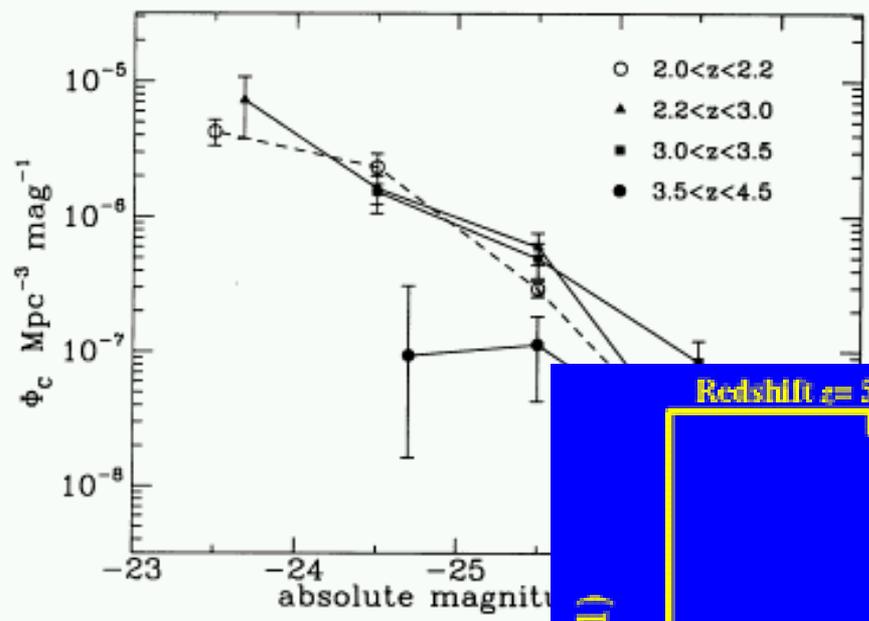


Fig. 1.  $1/V_d$  estimate for the  $z < 2.9$  QSO LF in a  $q_0 = 0.5$  universe. Redshift bins represent equal intervals in  $\log(1+z)$ . The error bars are based on Poisson statistics. The dotted lines indicate the derived model fit to the data.



# Quasare: Evolution

- Wie entwickelt sich ein Quasar? 2 Möglichkeiten existieren:
- a) ein kleiner Teil der hellen Galaxien beherbergt ein AGN und die Leuchtkraft dieser Objekte ändert sich systematisch mit der Zeit (**Leuchtkraft Evolution; luminosity evolution, Raumdichte bleibt konstant mit Zeit aber Objekte sind heute schwächer als sie es waren**)
- alle hellen Galaxien beherbergen AGN, aber zu jeder Zeit sind die meisten im "Schlafzustand", der Anteil der Quellen im "aktiven Zustand" ändert sich mit der Zeit

# Quasare: Evolution

## ■ reine Dichte Evolution?

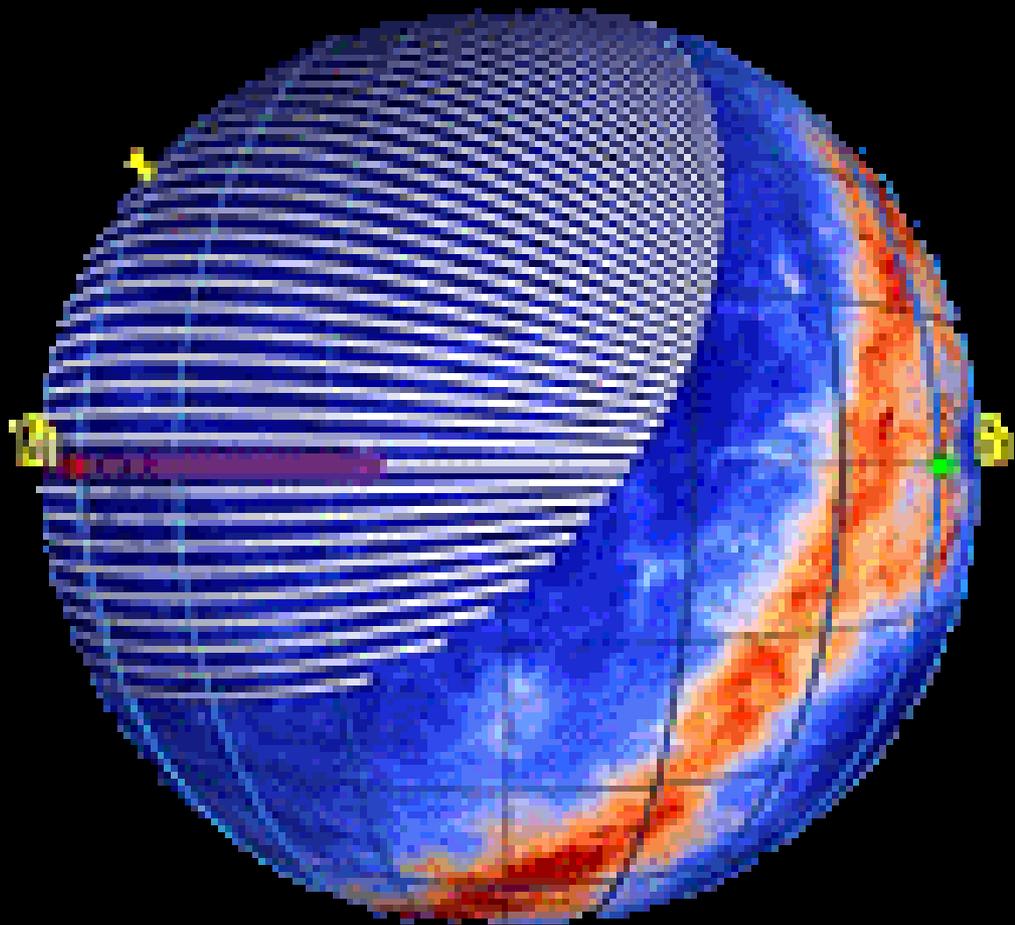
- Nicht möglich, sehr helle AGN waren zu häufig verglichen mit moderat hellen AGN in der Vergangenheit, als daß reine Dichte Evolution genügen würde - sagt zu viele hochleuchtkräftige Objekte für die jetzige Zeit voraus!!

## ■ reine Leuchtkraft Evolution?

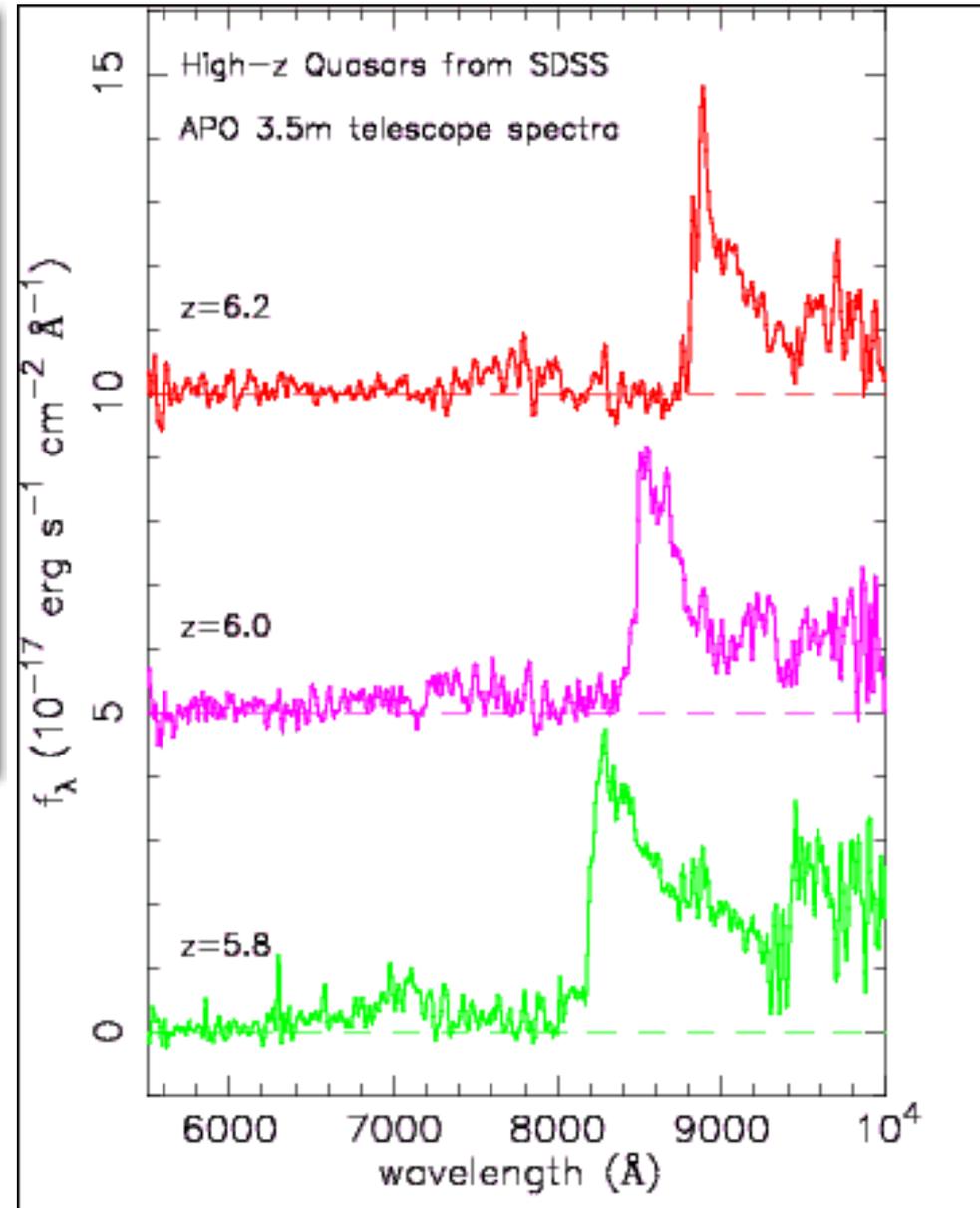
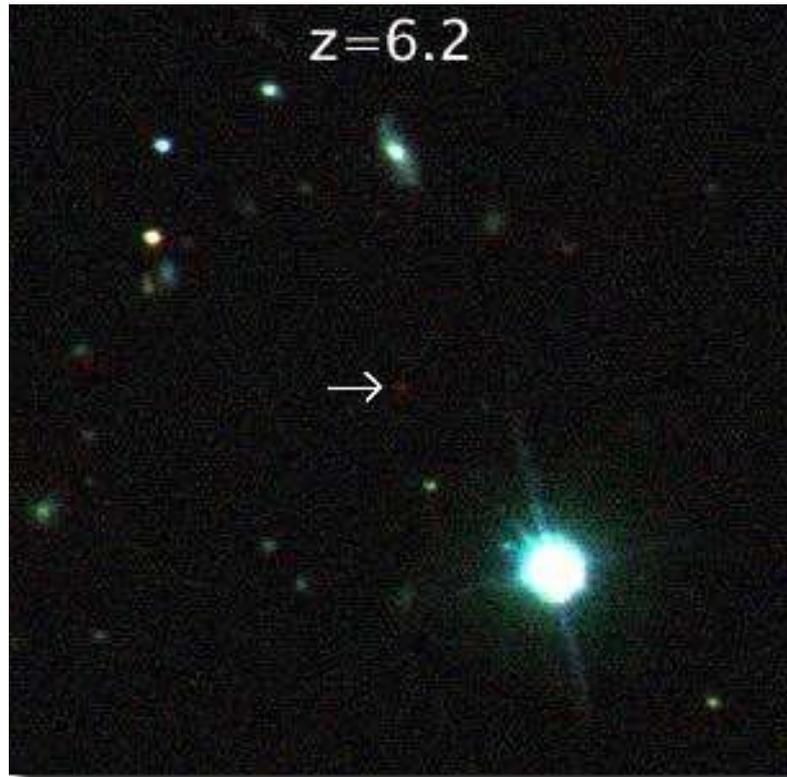
- alle akkretierte Masse muss in den existierenden AGN konzentriert sein -> Wo sind die Galaxien heute?
- sowohl **reine Dichte Evolution** als auch **reine Leuchtkraft Evolution** führen zu Problemen
- Realität ist vermutlich ein Kombination: leuchtkraft-

# Quasar- & Galaxienforschung heute

# SDSS-SLOAN DIGITAL SKY SURVEY



# Quasars: Evolution; SDSS; Ly $\alpha$



## Quasare: Evolution

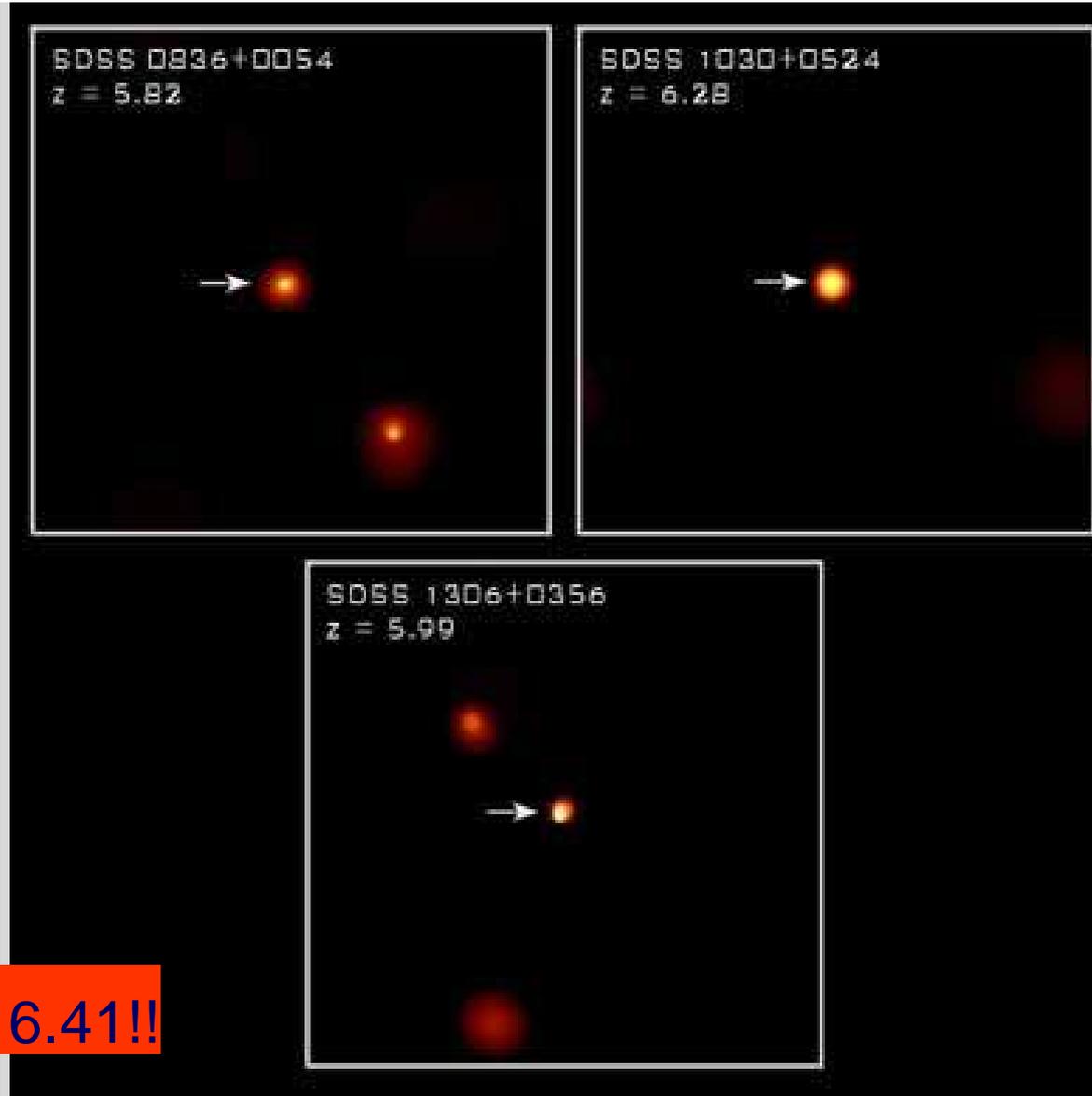
- 3 Quasare in ca. 13 Milliarden Lichtjahre Entfernung:

Universum hatte 7% des heutigen Alters  
-> Objekte sehen aus, wie doppelt so alt: junge Quasare unterscheiden sich nicht groß von älteren

- +14 Quasare, 12-

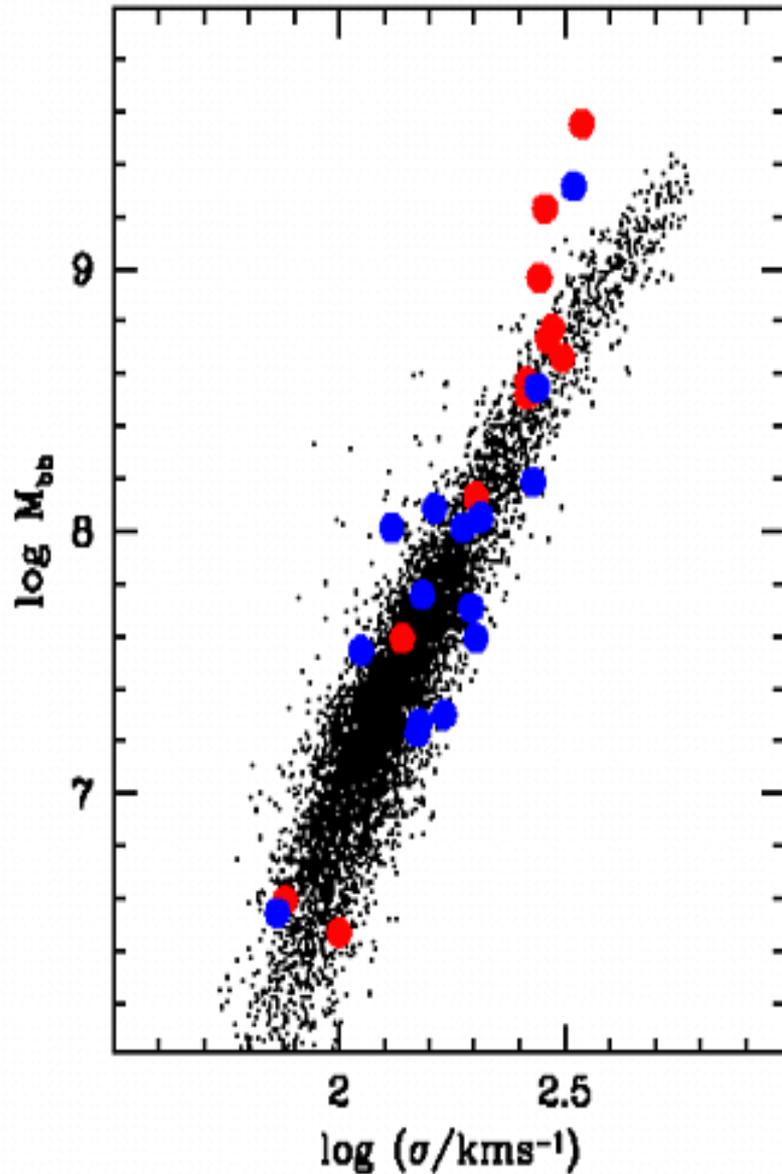
Neuer Rekord-Quasar: 6.41!!

Junge Galaxie: 10!!!!!!



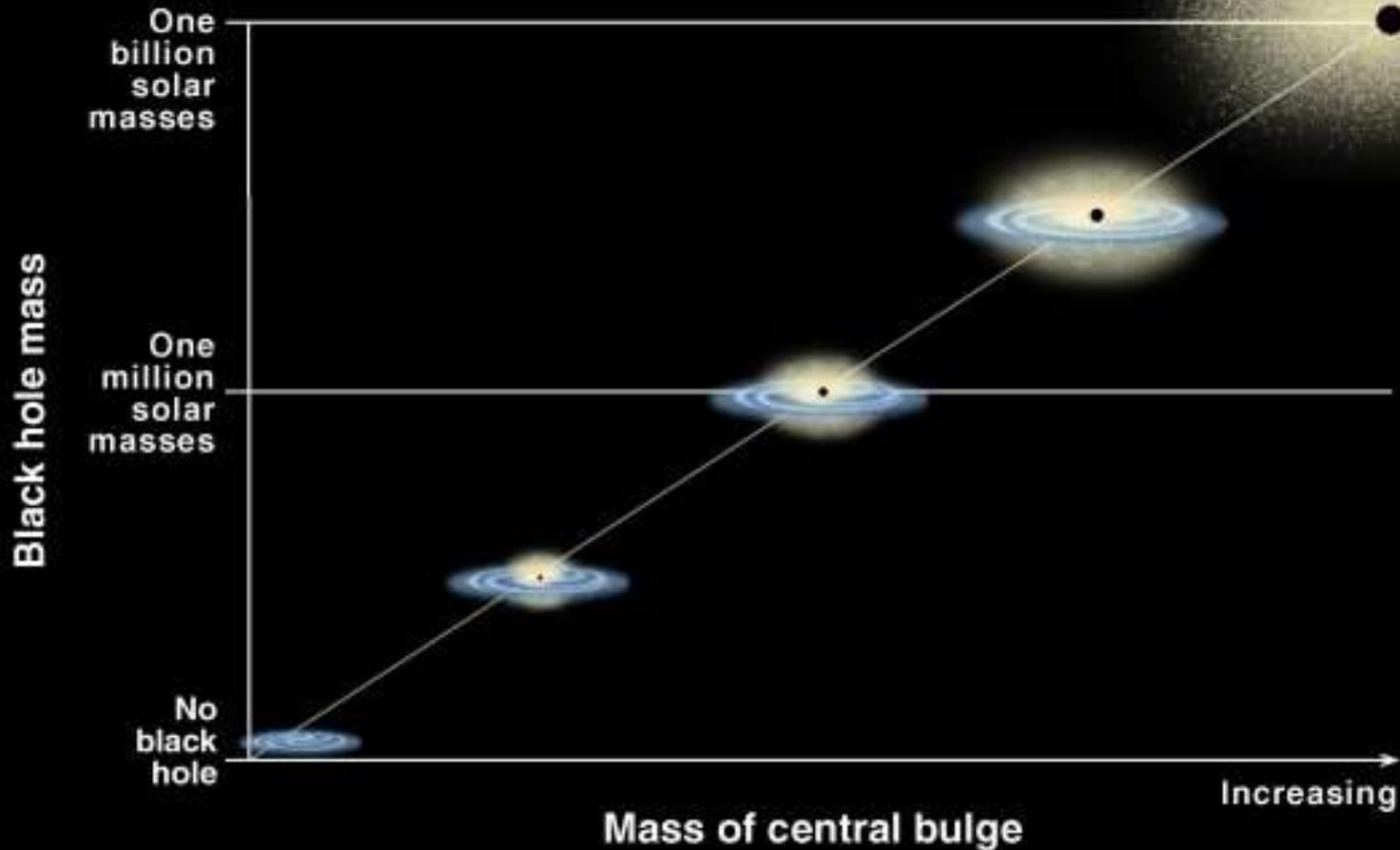
# Neue Ergebnisse: Quasar-Entwicklung

- **Supermassive Schwarze Löcher in allen massiven Galaxien  
=> alle Galaxien vermutlich durch eine aktive Phase  
gegangen**
- **Starke Korrelation zwischen Masse des BH und bulge  
Masse: direkte Verbindung zwischen Entwicklung des BH  
und der host Galaxie**



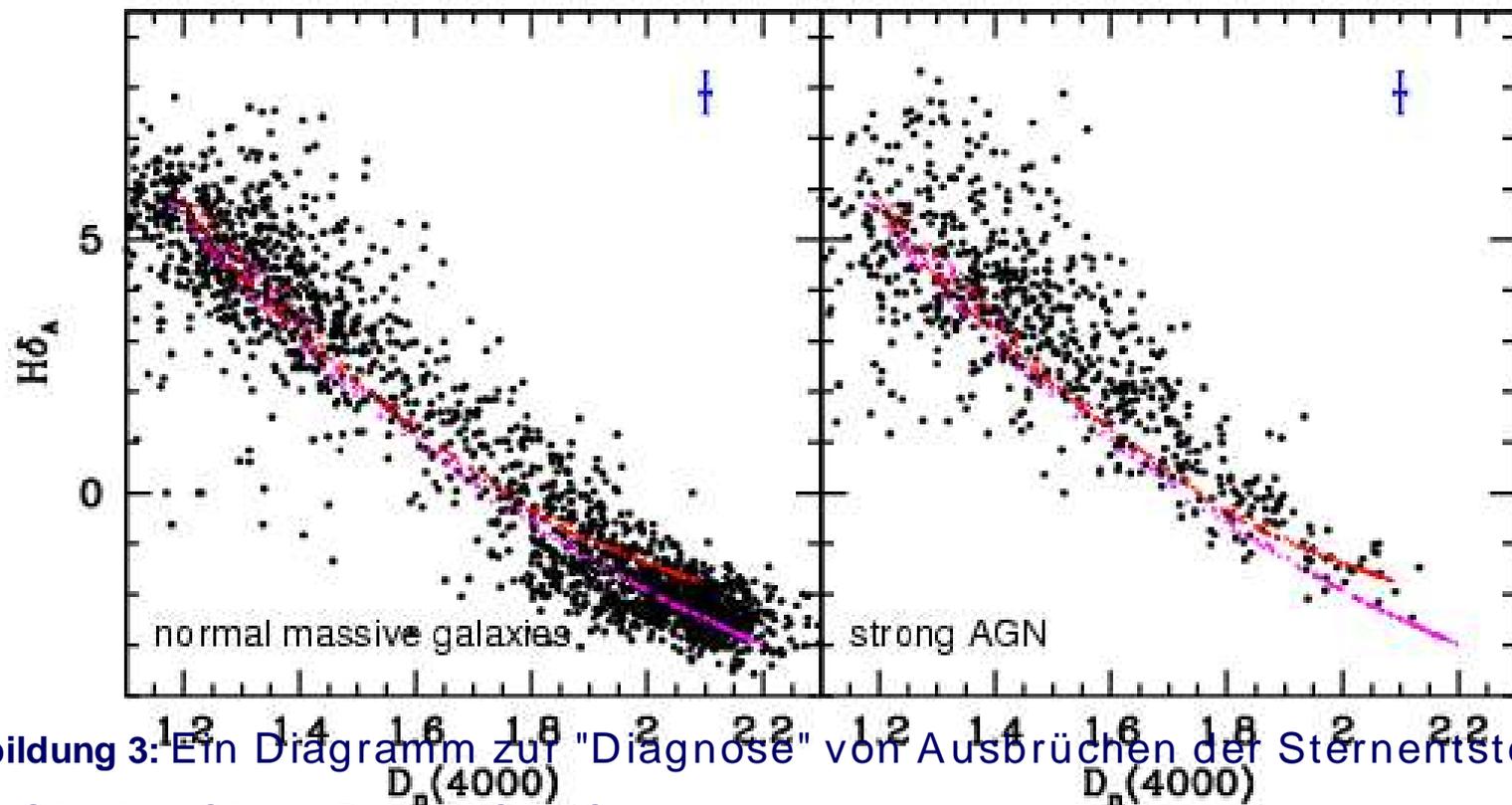
Masse des supermassiven schwarzen Loches vs. Geschwindigkeitsdispersion der Galaxie für benachbarte Galaxien. Die roten und blauen Datenpunkte sind aus Ferrarese & Merritt und Gebhardt et al.

# Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



22 000 Systeme .... Emissionslinien, Sternentstehung

Ferrarese & Merritt 2000; Kauffmann et al.



**Abbildung 3:** Ein Diagramm zur "Diagnose" von Ausbrüchen der Sternentstehung in AGN des *Sloan Digital Sky Survey*.

Die roten und magentafarbenen Punkte zeigen die vorausgesagten Positionen von Galaxien,

die mit kontinuierlichen Sternentstehungsraten entstanden sind.

Die meisten gewöhnlichen Galaxien (links) liegen nahe an diesen theoretischen Voraussagen. Eine beträchtliche Zahl leuchtkräftiger AGNs (rechts) ist allerdings von der Linie,

die von den Modellen mit kontinuierlichen Sternentstehungsraten belegt wird, verschoben. Dies zeigt, daß diese Objekte vor kurzem einen

# Neue Ergebnisse: Quasar-Entwicklung

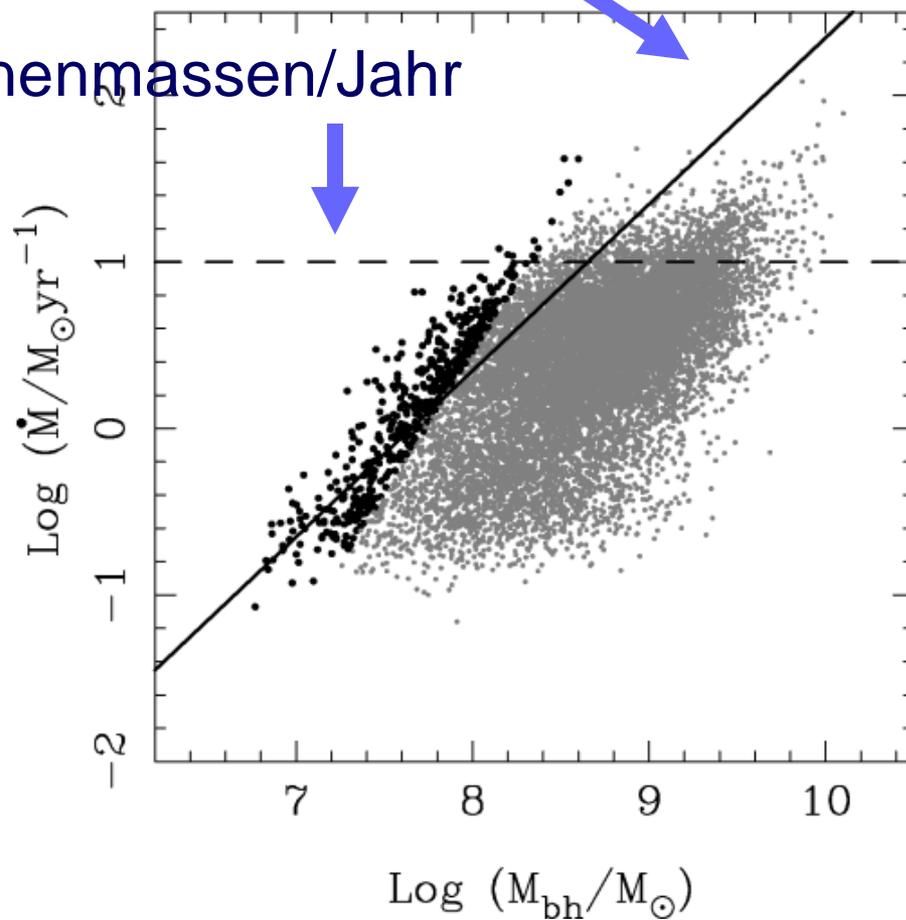
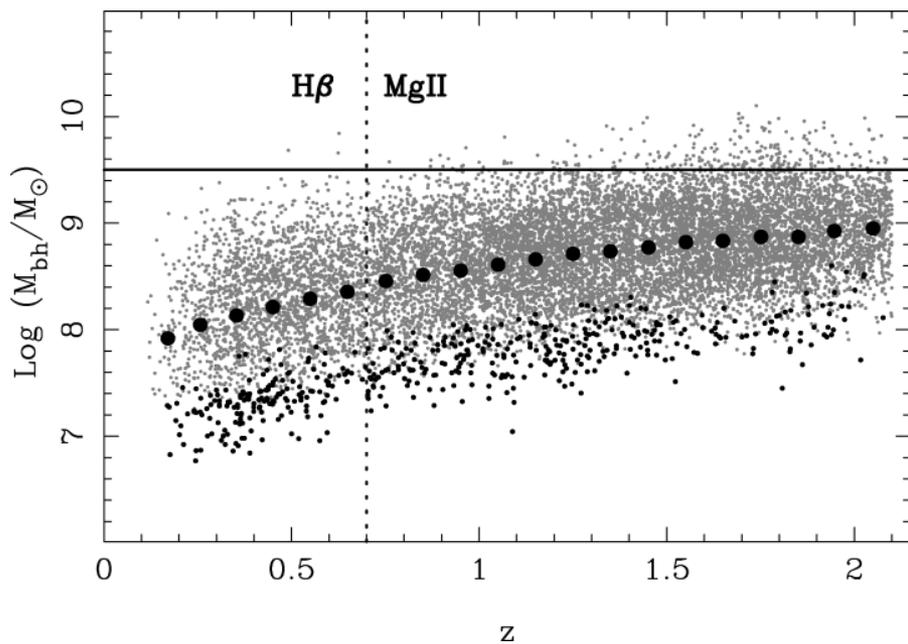
- Sloan Digital Sky Survey: 17000 Spectra von Quasaren zwischen  $z=0.08$  und  $2.3$
- **BH-Massenbestimmung für 12698 Quasare**
  - Obere Grenze für BH liegt bei  $3 \times 10^9$  Sonnenmassen
  - Die Eddington Raten zeigen nur geringe Evolution über den Rotverschiebungsbereich von  $0.0 < z < 2.1$ , von  $L_{\text{bol}} \sim \underline{0.15} L_{\text{Edd}}$  bei  $z \sim 0.2$  zu  $L_{\text{bol}} \sim \underline{0.5} L_{\text{Edd}}$  bei  $z \sim 2.0$ .

# Neue Ergebnisse: Quasar-Entwicklung

- totale Massendichte schlafender BH:  $\rho_{bh} = (2.8 \pm 0.4) \times 10^5$  Sonnenmassen  $\text{Mpc}^{-3}$ .
- Der Aktivierungsanteil Supermassiver Schwarzer Löcher bei  $z \sim 2$  ist ansteigende Funktion der Masse
- Quasar Lebenszeiten sind in zunehmendem Maße Funktionen der BH-Masse
- Grenze der Lebenszeit eines Quasars liegt bei einer Masse von  $10^{9.5}$  Sonnenmassen  $> 2 \times 10^8$  Jahre. BH dieser Masse können nicht auf Massen  $> 10^{10}$  Sonnenmassen ansteigen, physikalischer Prozeß (nicht Eddington Grenze), verhindert Akkretionsrate  $> 10$  Sonnenmassen pro Jahr.

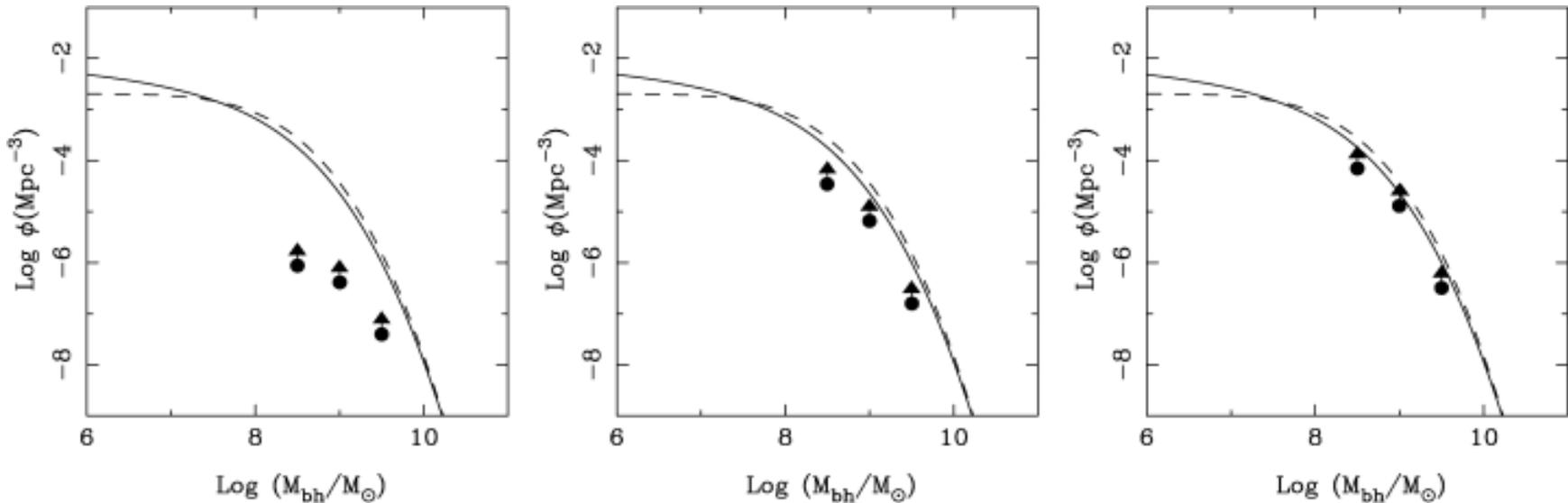
Akkretionsrate 10 Sonnenmassen/Jahr

Eddington Grenze



# „Schlafende Schwarzes Loch“ Massenfunktion

- Z=2, Anzahldichten für aktive supermassive Schwarze Löcher



Korrigiert für Beziehung Anzahldichten um Faktor  
zw. Quasar Lebenszeit & BH-Masse

& BH-Masse

# DAMALS ... Quasare: "host Galaxien"

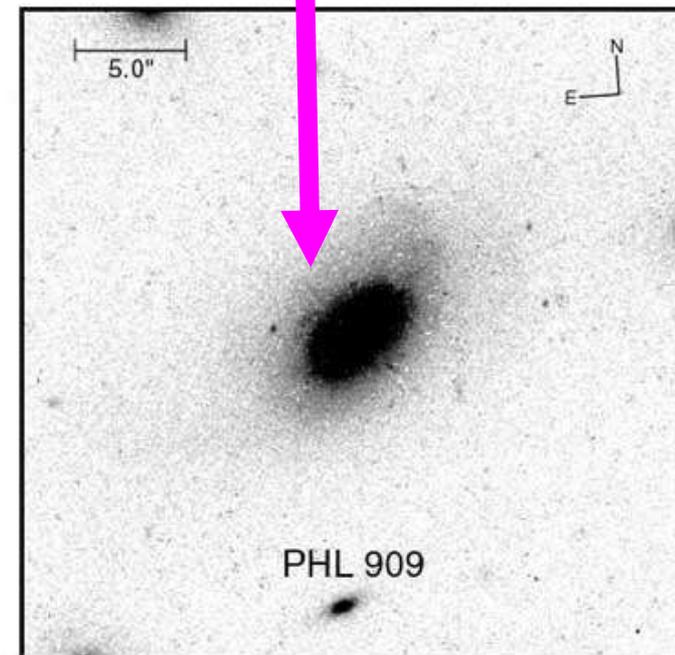
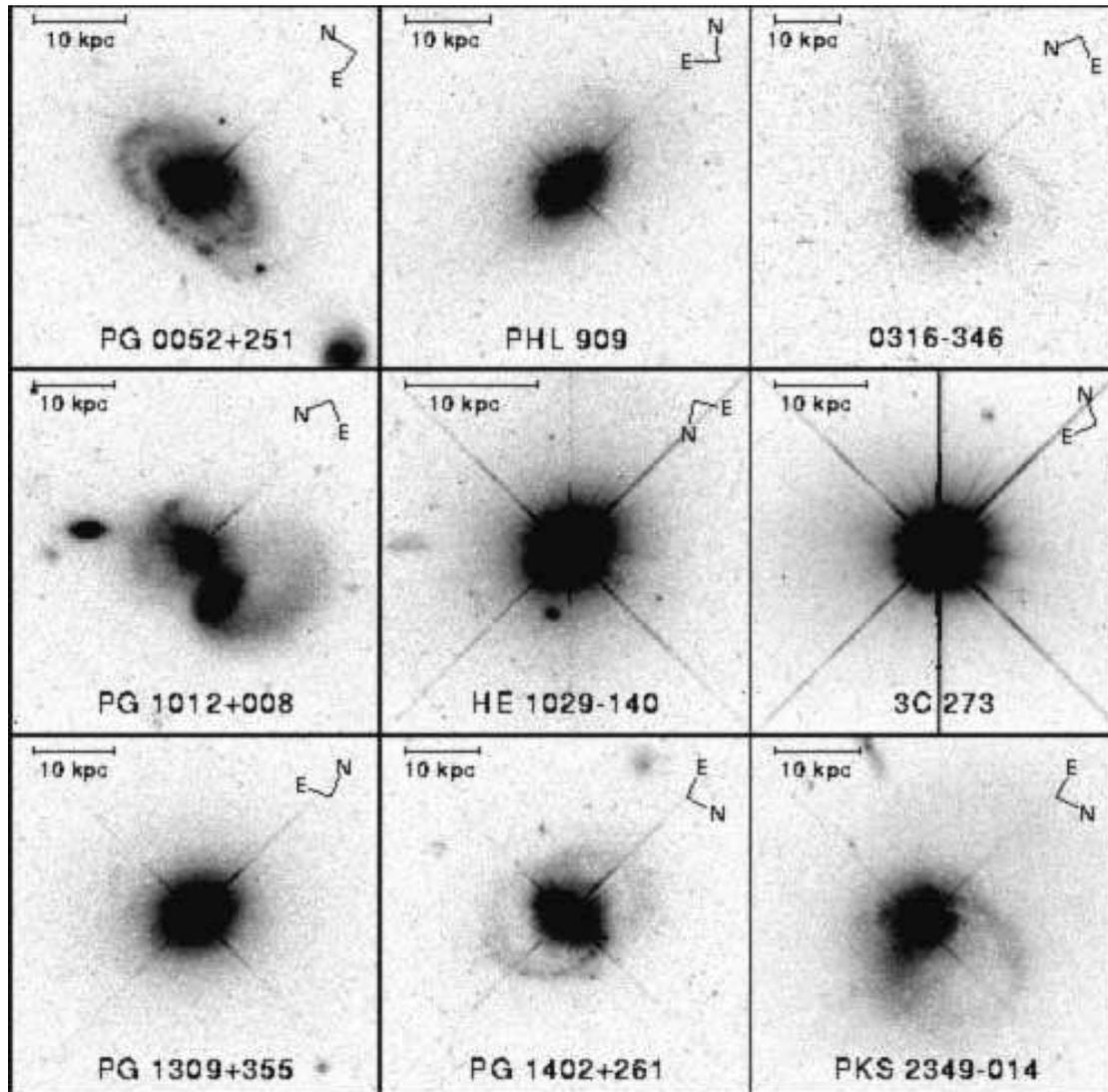
- die host Galaxien der Quasare zu finden: Problem, könnte man sie sehen, wäre das Objekt nicht quasi-stellar!
- diffuse Emission wird für alle Quellen mit  $z < 0.4$  beobachtet: Galaxie
- Spektroskopie schwierig, Möglichkeit: Quellen mit jungen stellaren Populationen (oft radio-laut); Quellen mit rötlicherer diffuser Emission mit Emissionslinien beleuchtet durch QSO (radio-leise)

Wie sehen die „host galaxies“  
aus?

# VII) Quasare "host galaxies"

■ HST Aufnahmen von  
20 nahen  
leuchtkräftigen  
Quasaren

■ anscheinend normale  
elliptische Galaxie host  
Galaxie eines radio-

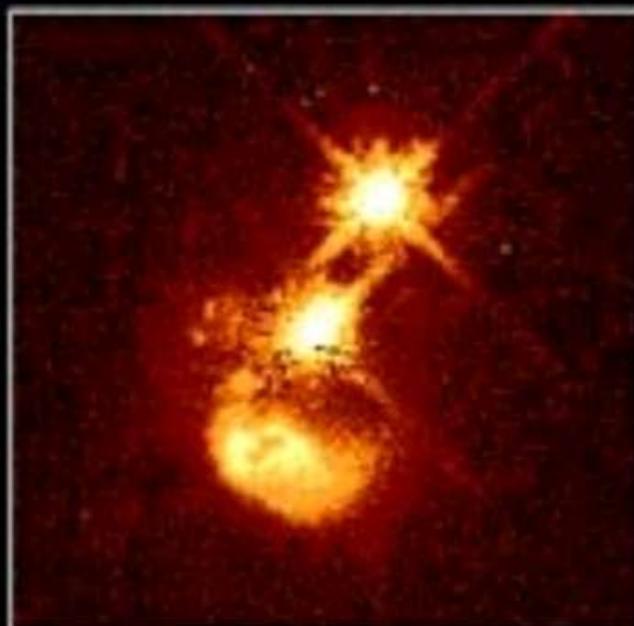
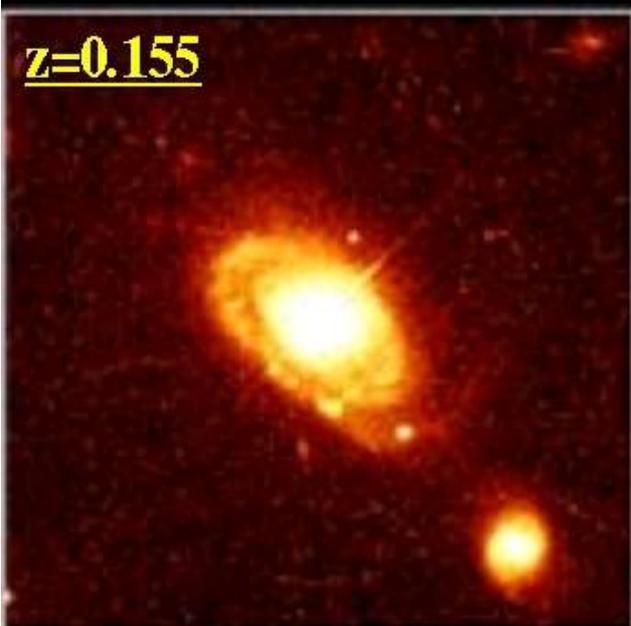


normale Spiralgalaxie

zerrissen,  $z=0.286$

?,  $z=0.265$

$z=0.155$



$z=0.171$



normale elliptische Galaxie

"merger",  $z=0.187447$

"merger",  $z=0.205102$

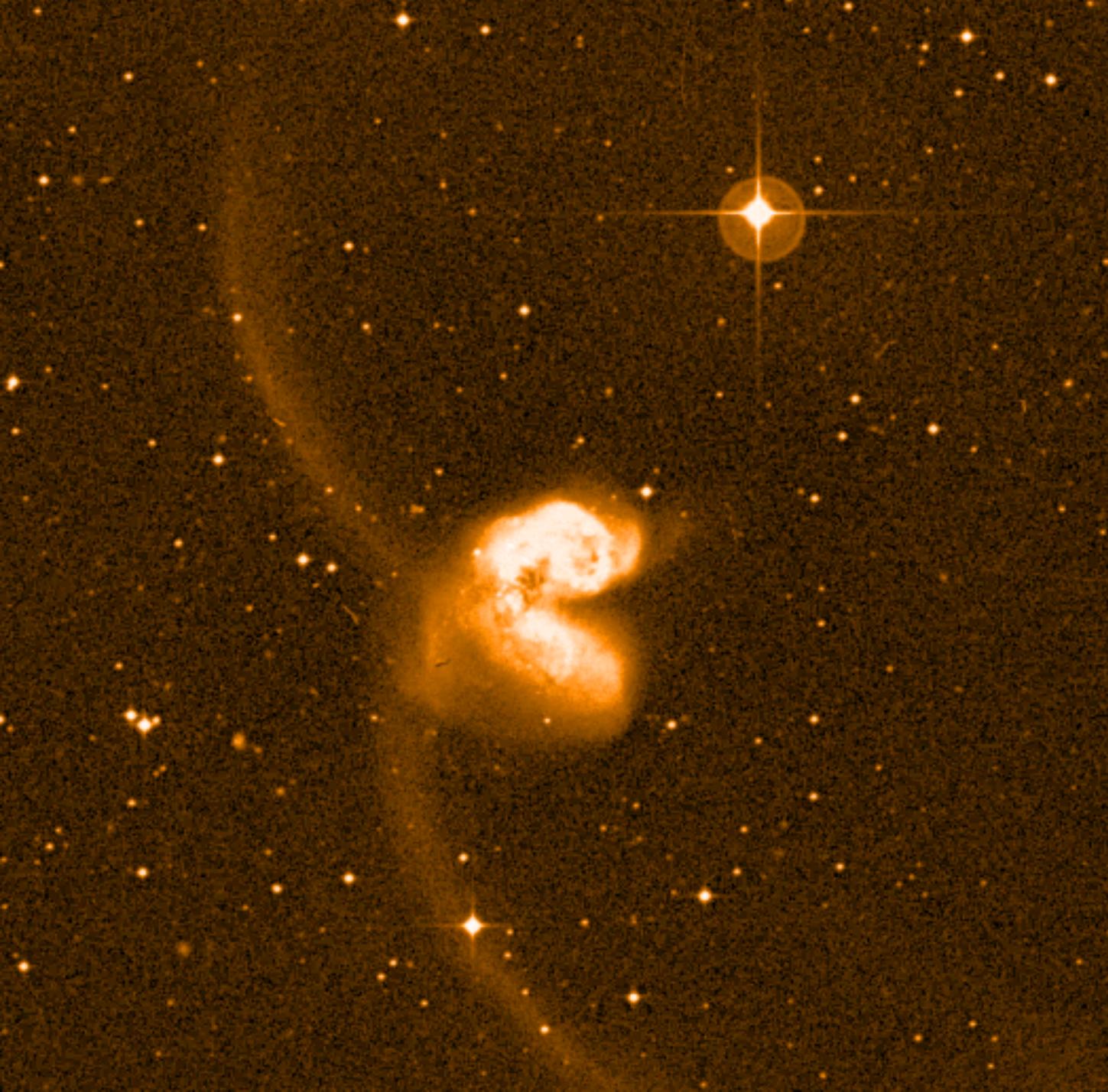
# Kosmische Spektakel - Kollisionen

Galaxienentwicklung – hierarchisches Modell –

Wechselwirkung & Aktivität

Galaxies NGC 2207 and IC 2163





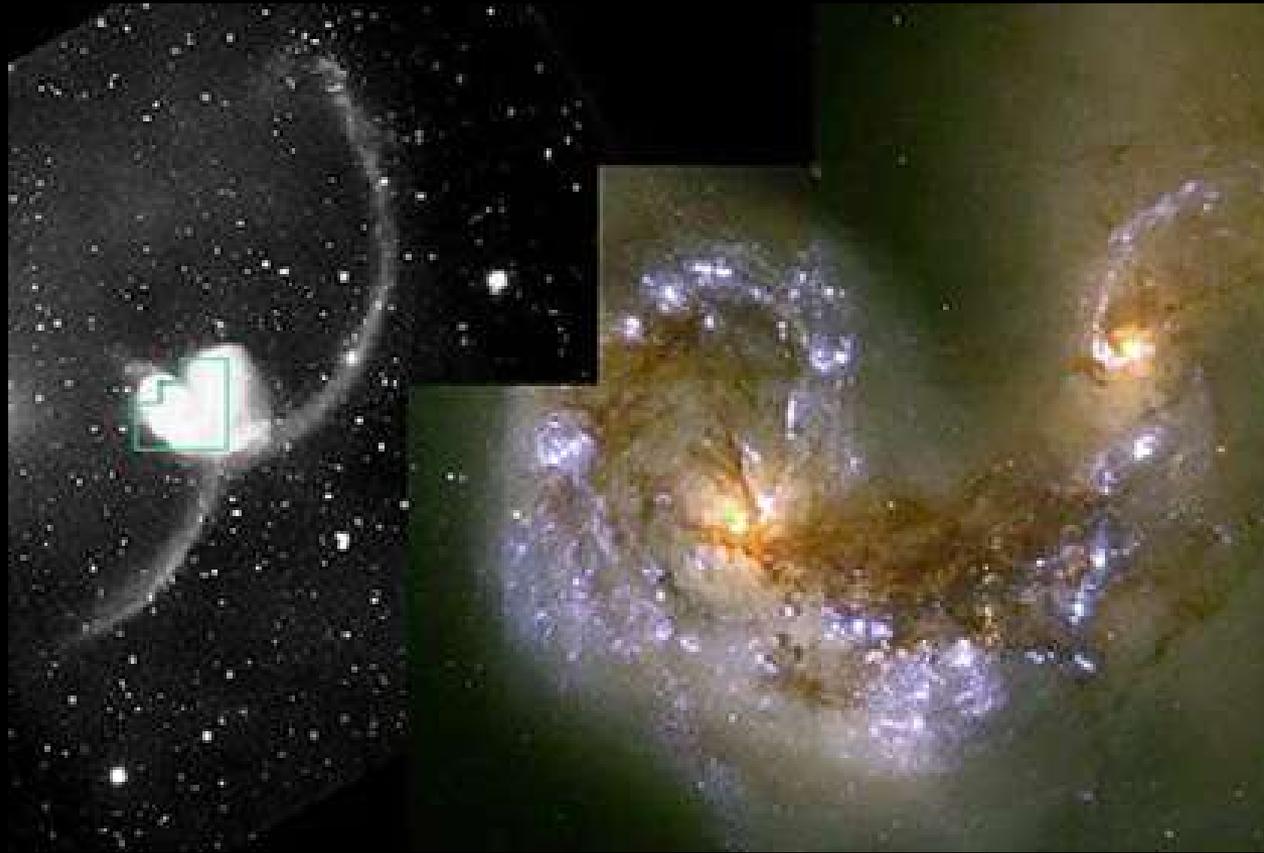
NGC4038/4039

Antennengalaxie

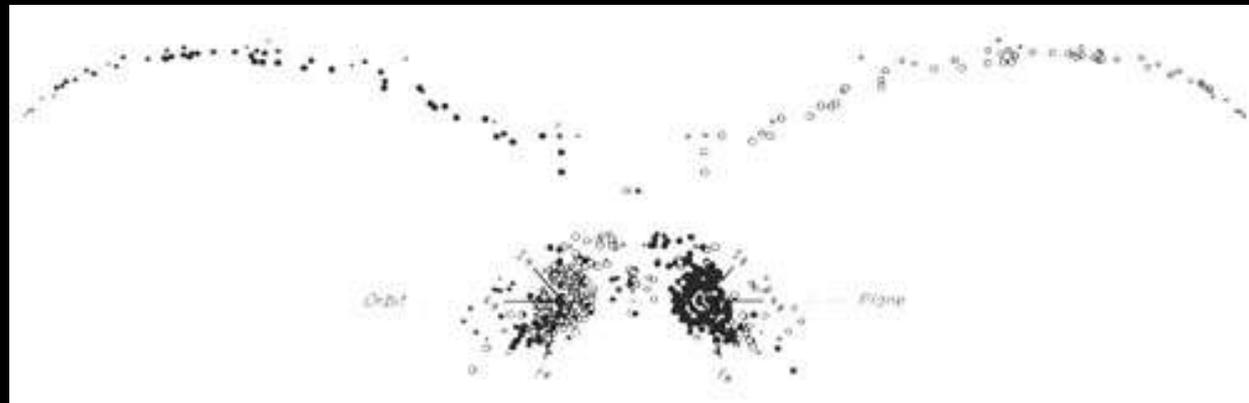
The interacting galaxies

NGC 4038/4039

(Antennae galaxies)



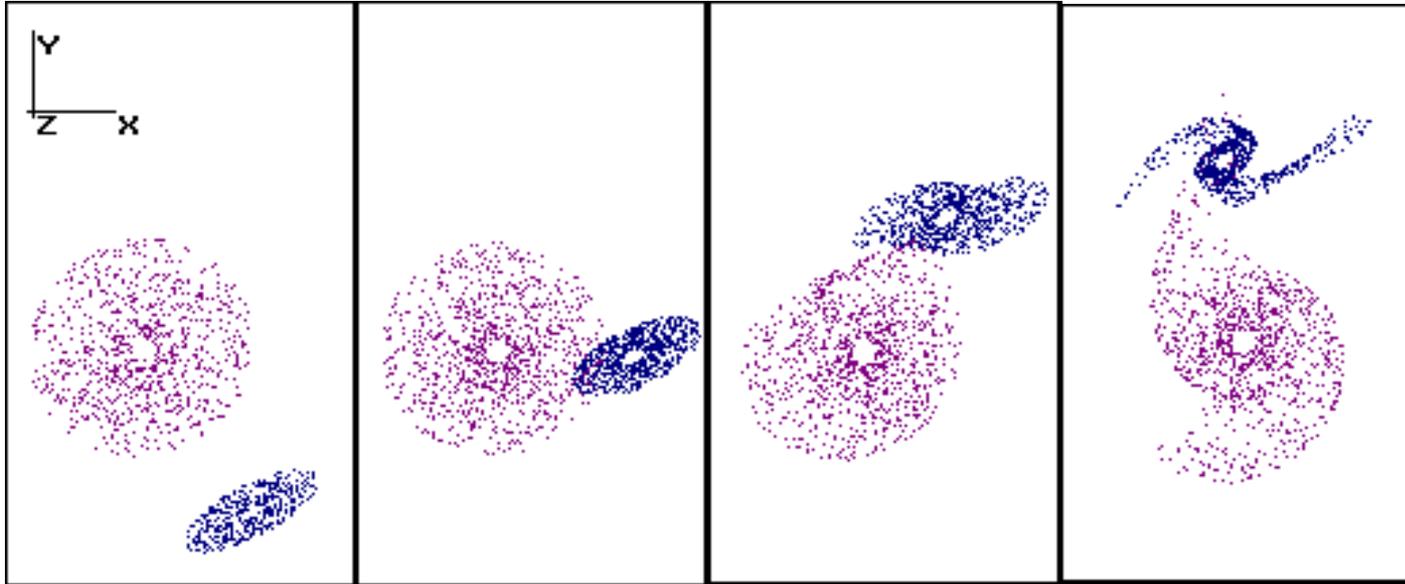
Toomres' model  
of the galaxy pair



# *Kosmisches Spektakel: Wechselwirkende*

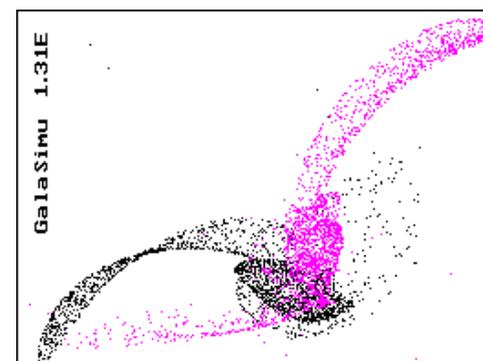
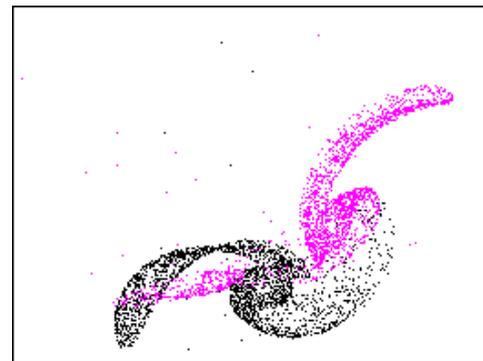
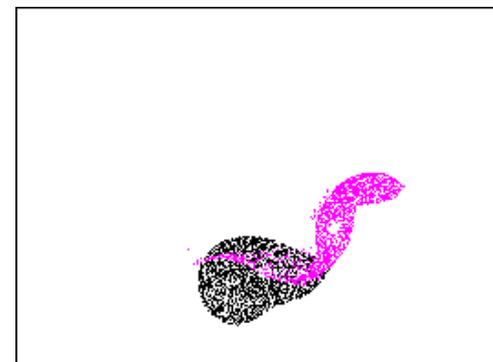
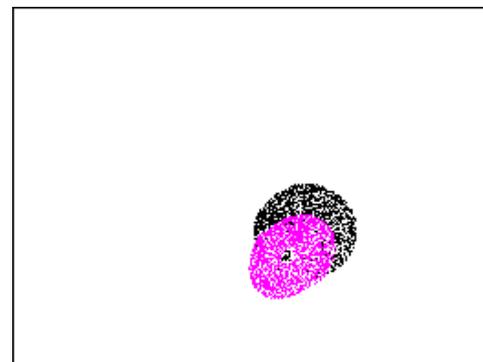
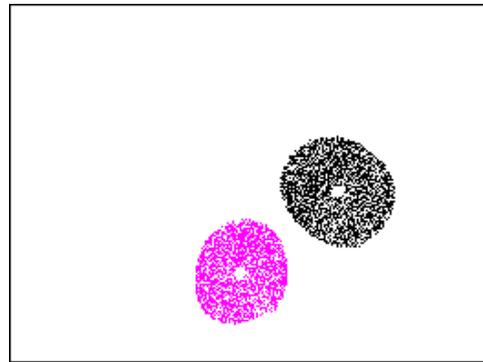
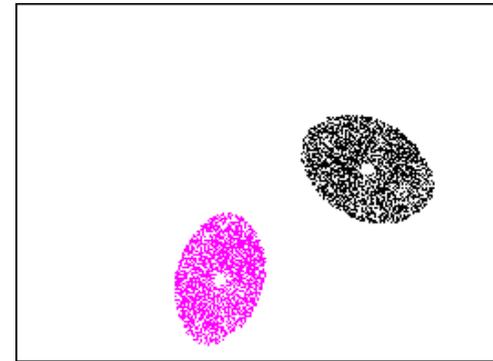
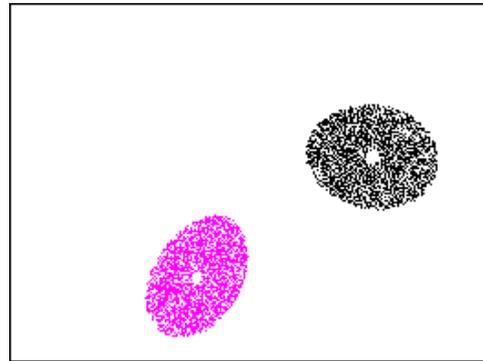
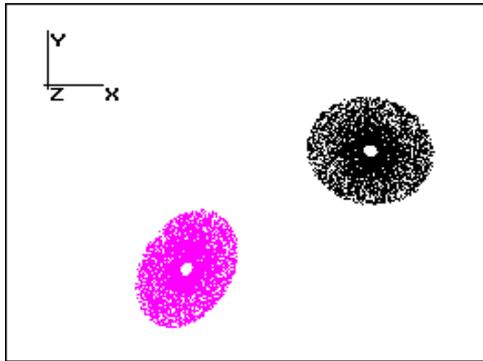


# Die "normalen" Galaxien: Galaxienentwicklung

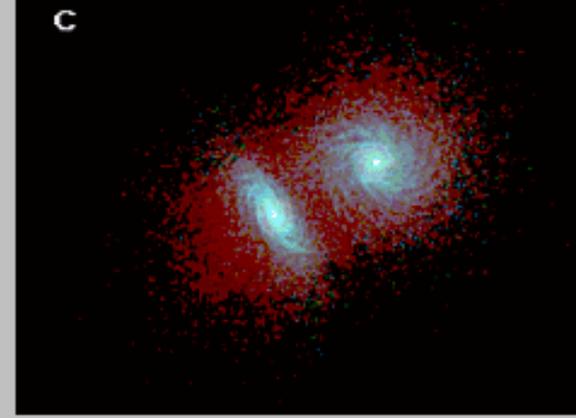
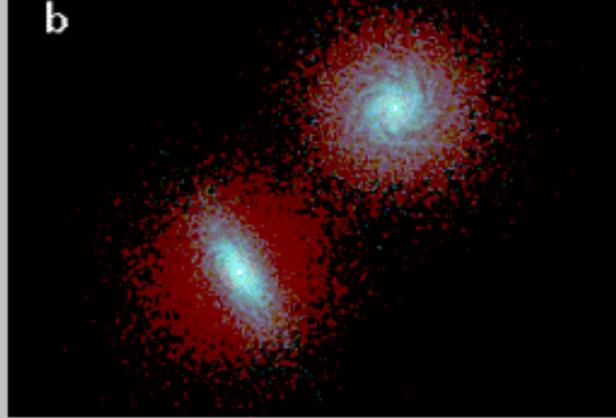
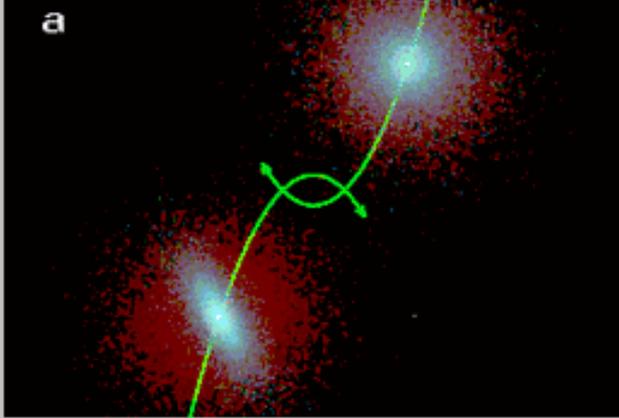


**480 Millionen Jahre**

# Die "normalen" Galaxien: Galaxienentwicklung

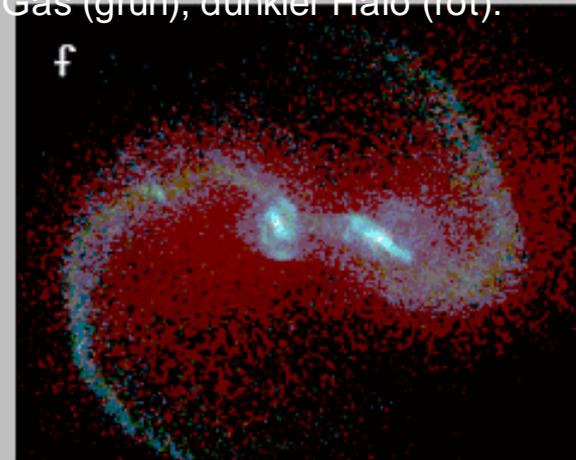
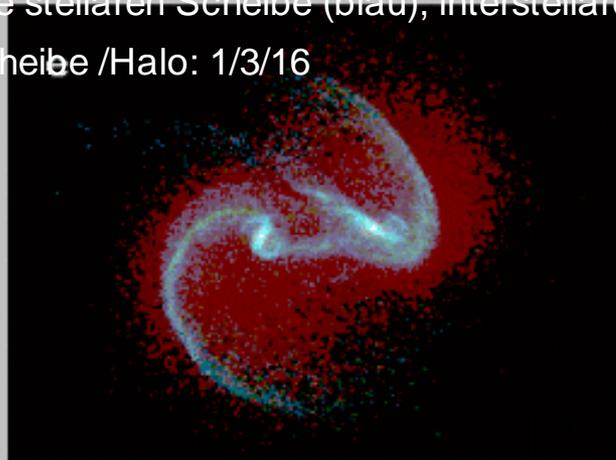


**630 Millionen Jahre,**  
**gleiche Massen**

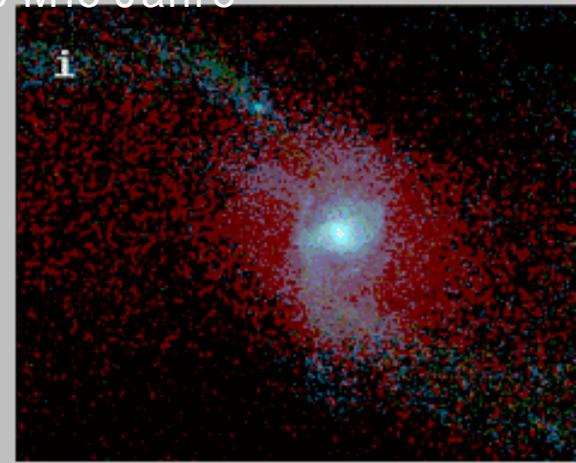
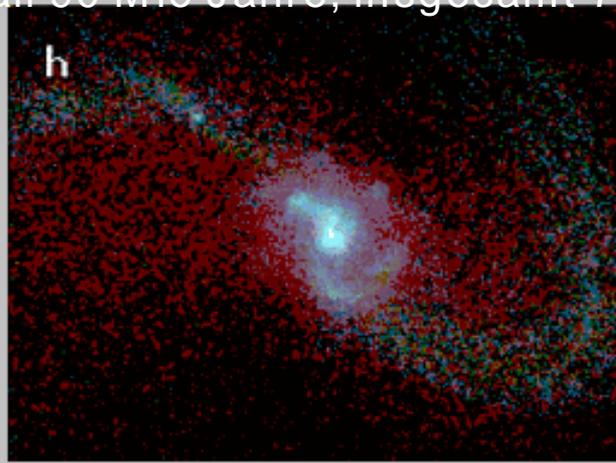
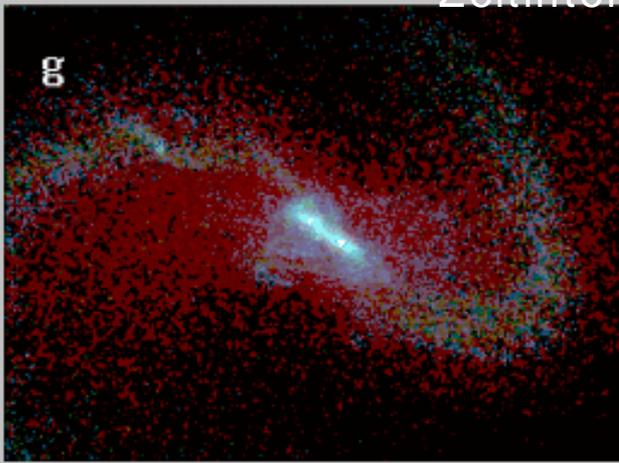


Sternenbulge (gelb), dünne stellare Scheibe (blau), interstellares Gas (grün), dunkler Halo (rot).

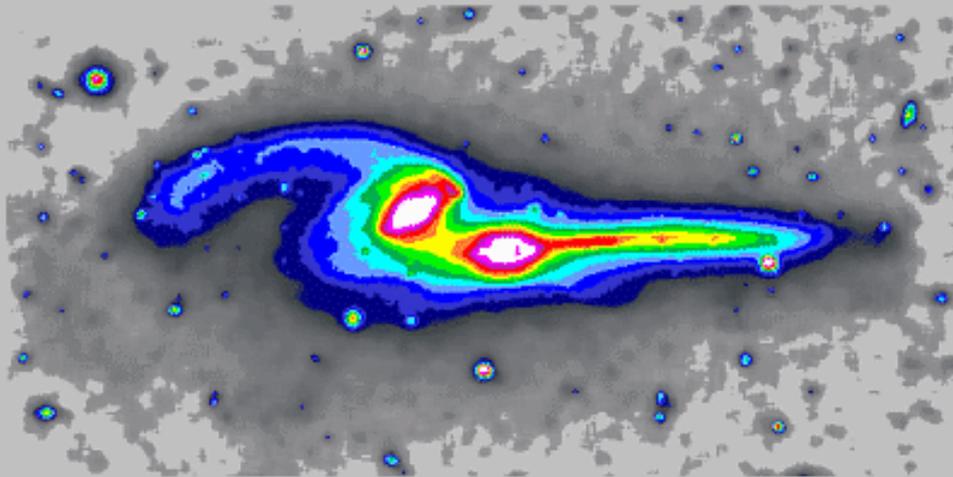
Massenverhältnis: Bulge /Scheibe /Halo: 1/3/16



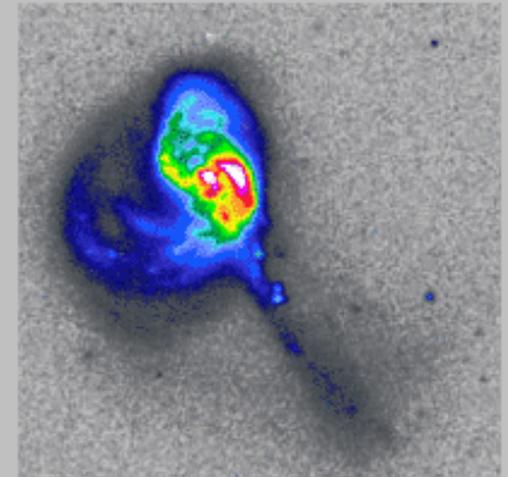
Zeitintervall 90 Mio Jahre, insgesamt 750 Mio Jahre



"The Mice" - NGC 4676



NGC 1614



- tatsächlich existierenden Objekte - Momentaufnahmen von Galaxienverschmelzungen

# Wechselwirkungen

- Zwicky (1956, 1959) beschrieb das Spektrum der verschiedenen ausgedehnten Strukturen als: „clouds, filaments and jet of stars which are ejected massively from galaxies in collision“ by „large scale tidal effects“.
- Brücken: in wechselwirkenden Scheiben-Galaxien, große Galaxien in WW mit kleinen Begleitern
- „Wagenrad“ Galaxie: Galaxien mit deutlichen Ringen, wenn Begleiter-Galaxie senkrecht durch die Ebene des Opfers fällt, Oszillationen in der Ziel-Scheibe werden angeregt
- Gestörte Elliptische Galaxien: interessanter wenn WW zwischen elliptischen Galaxien, denn in reichen Haufen sind die WW schneller und die gestörten elliptischen Galaxien produzieren „Sprays“ an Sternen statt schmalen Filamenten; Systeme werden nicht zerstört sondern Halos entstehen; dumbbell galaxies: letztes Stadium von

- **Zwicky (1959) beschrieb als erster ein mögliches Szenario einer Verschmelzung naher Begleiter: „considerable disruption of both systems [or] total mutual capture“.**
  - Sphärische Systeme: kein gebundenes Paar von Galaxien kann dem Verschmelzen entgehen, Zerfallszeit kann in Einzelfällen lang sein, es bildet sich eine ausgedehnte Region; Kernradien vergleichbar der Opfergalaxien, zentrale Dichten und Geschwindigkeitsdispersionen aber größer; einfache Formen und Kinematik
  - Scheiben/Halo Systeme: Dynamik wird bestimmt durch die WW der ausgedehnten dunklen Halos; auch wenn sich die optischen Komponenten

# Aktive Galaxien

- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Aktivität und Wechselwirkung und wie sieht er aus?

## ■ Starburst Galaxies

- Larson & Tinsley (1978): pekuliäre Galaxien im Arp-Atlas (1966) sind blauer als isolierte Counterparts; beste Anpassung durch intensive Sternentstehung; Hinweise auf induzierte Sternentstehung zwischen kollidierenden Galaxien; mögliche Erklärung: WW beschleunigen Sternentstehung wenn Gas komprimiert wird in Schocks und Wolken-Wolken WW

## ■ Infrarot Galaxien

- Extreme Beispiele von Starburst-Galaxien: Emission wird vorwiegend im Kern erzeugt; WW verantwortlich; Verschmelzungen zw. Scheiben vergleichbarer Masse erzeugen substantielle nukleare Gaskonzentrationen (Arp 220); sieht so aus als ob alle ultraleuchtkräftigen IRAS Objekte doppelte Kerne besäßen, Intensität der Emission ist korreliert mit der

- **Seyfert Galaxien**

- Assoziiert mit späten Galaxientypen, häufiger in reichen Feldern; werden in wechselwirkenden Galaxien mit nahen Begleitern gefunden; einige Seyferts zeigen multiple Kerne und Gezeiten-Effekte, viele amorph oder anders gestört



Galaxie im Sternbild Circinus,  
Typ 2 Seyfert Galaxie. 2 starburst  
Ringe (Hubble, NASA, A. Wilson et al.)

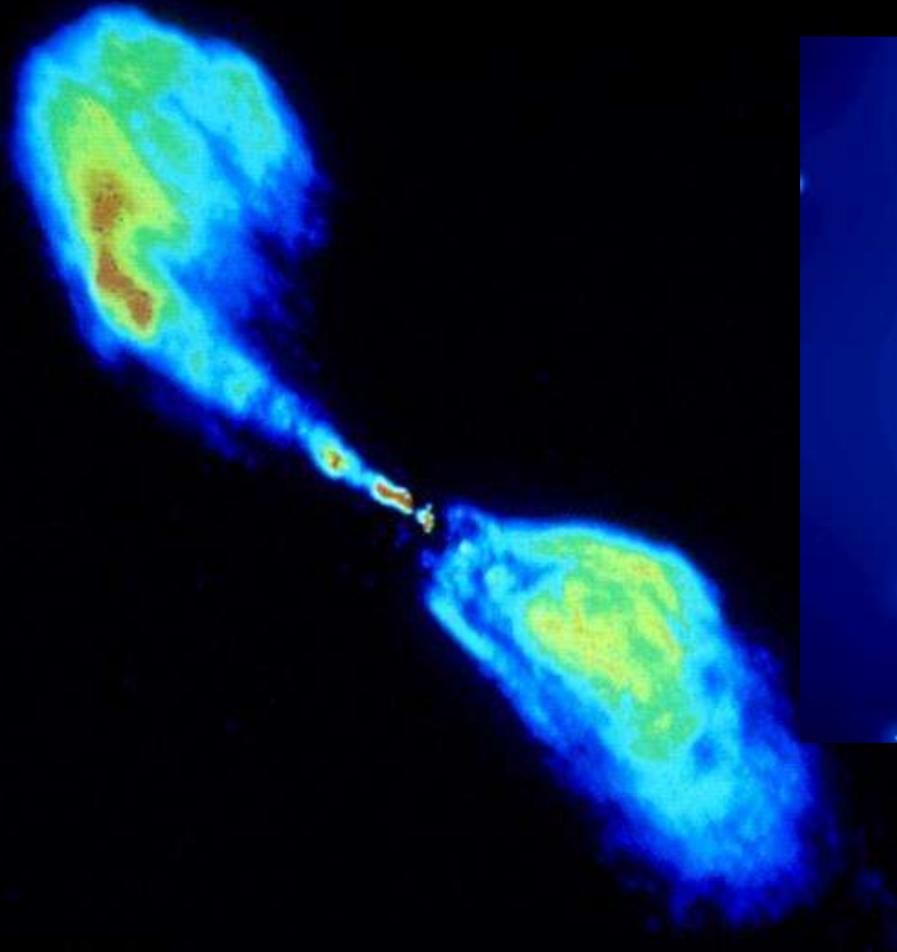
## ■ QSOs und Quasare

- Quasar Aktivität wird durch Galaxien Kollisionen getriggert; 70% der nahen Objekte haben Begleiter; viele leuchtkräftige IRAS Galaxien sind „buried quasars“; oder Systeme die sich in Quasare entwickeln werden

## ■ Radio Galaxien

- Viele Radio Galaxien sind die Produkte von kürzlichen Verschmelzungsprozessen; Verschmelzungsreste sind morphologisch vergleichbar den elliptischen Galaxien => Centaurus A

# Radio Galaxien

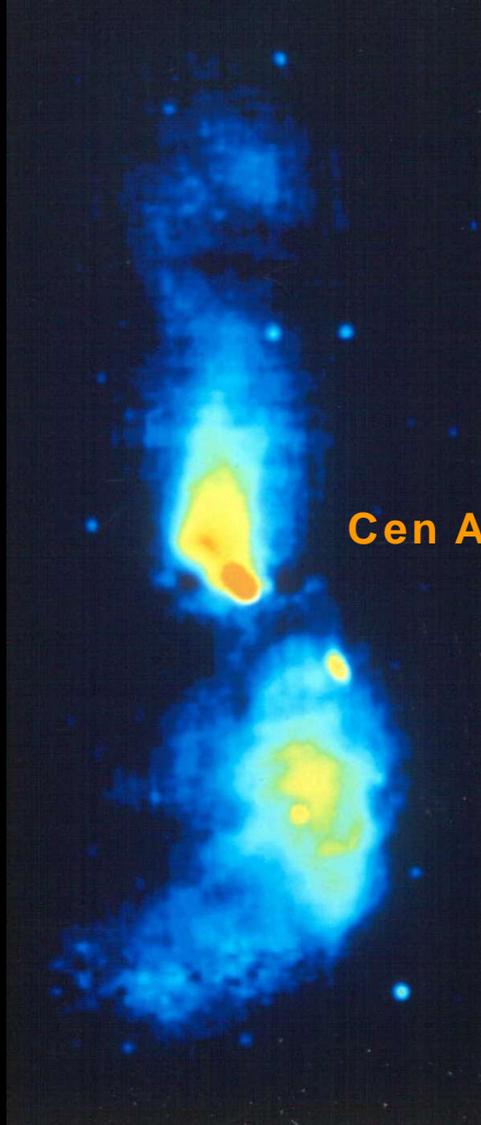


CHANDRA Röntgen Bild,  
Lichtlänge: 30000 Lichtjahre

Centaurus A Radio (Clegg, Burns & Price  
(right, Anglo-Australian Telescope, VLA)



Mond



Cen A

Bilder: N. Junkes, R. Gendler

Centaurus A

Das Bild zeigt die gesamte Ausdehnung der Radiostrahlung von Centaurus A bei 6 cm Wellenlänge. Die scheinbare Ausdehnung am Himmel beträgt über 8 Grad; das entspricht 16 Mondbreiten. In einer Entfernung von ca. 10 Millionen Lichtjahren ist das eine lineare Ausdehnung von über 2 Millionen Lichtjahren.

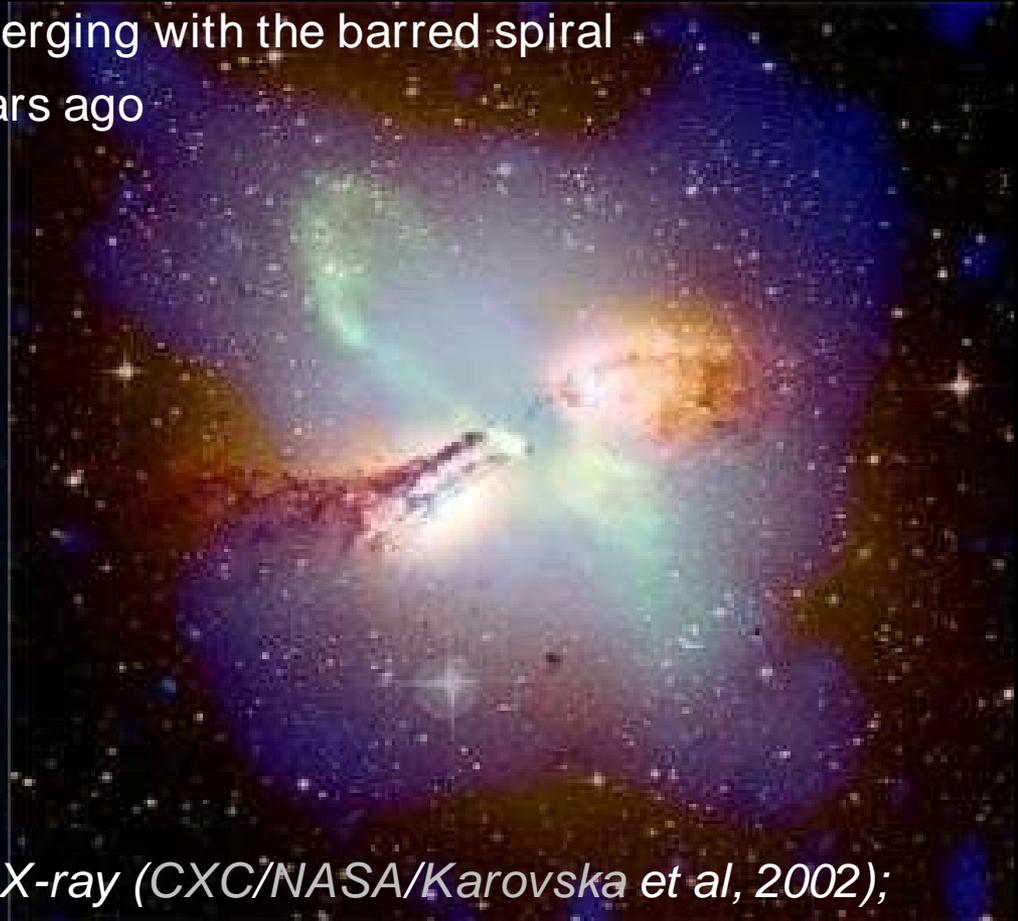
# *Centaurus A (NGC 5128)*

X-ray, radio, and optical images suggest that the galaxy is in tremendous turmoil with energetic arcs and jets after merging with the barred spiral some 100 million years ago

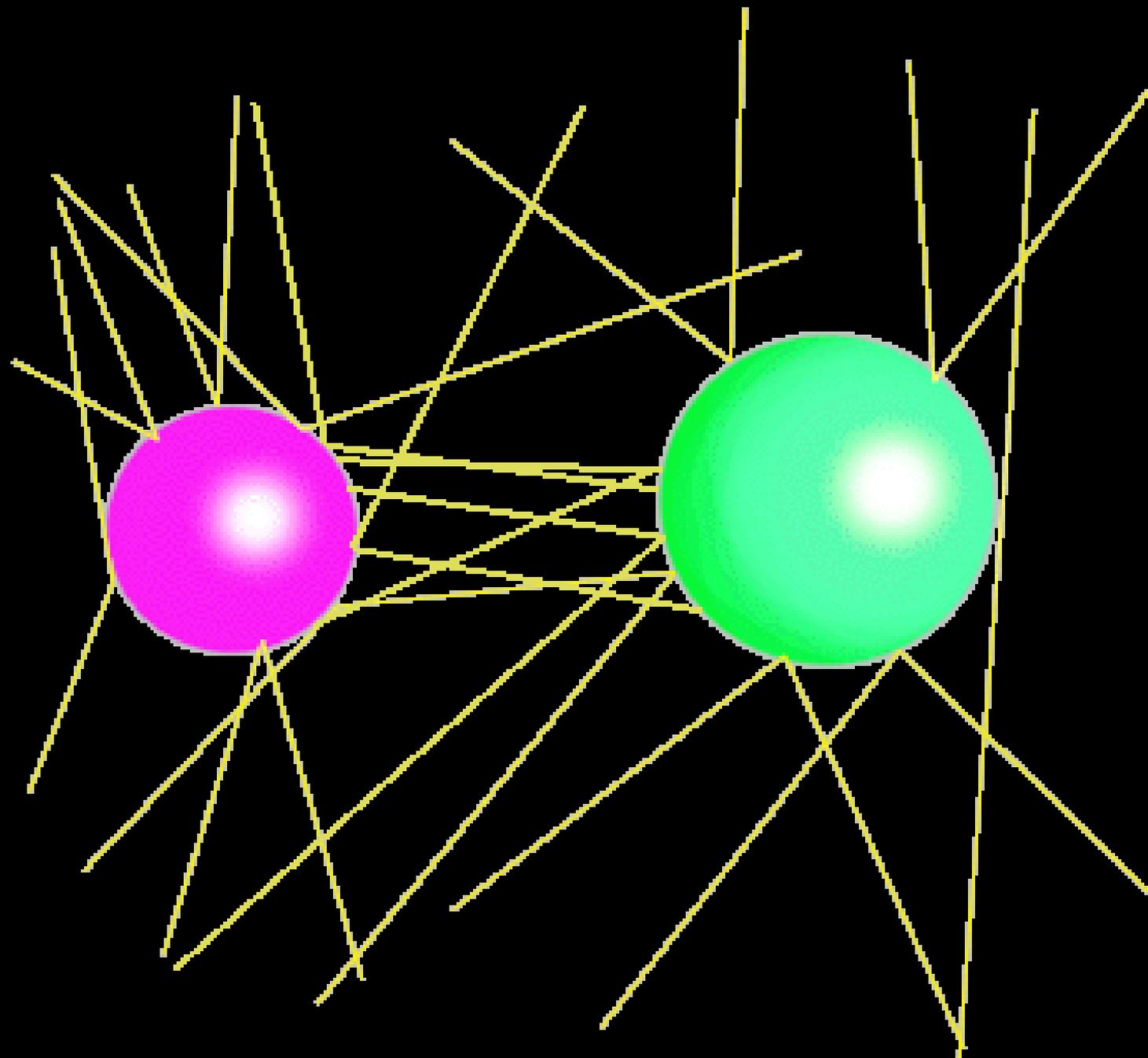
1. Juni 2004, Infrarot-Beobachtungen



*The warped and twisted disk of a spiral galaxy devoured by Centaurus A has dust shaped like a parallelogram around 1,000 ly wide (Spitzer Space Telescope)*



*X-ray (CXC/NASA/Karovska et al, 2002); radio 21-cm (NRAO/VLA/Schiminovich et al), and continuum (NRAO/VLA/Condon et al); and optical (Digitized Sky Survey/UK Schmidt/STScI)*



# Black Hole Merger Rates

- Hierarchical clustering predicts halo mergers...
  - if the halos merge, eventually so do the MBHs inside
- Final stages of MBH binary coalescence result in emission of low-frequency gravitational radiation...
  - the kind that LISA will be able to detect
- LISA detections...
  - Can probe into galaxy formation at high redshifts
  - Could help answer some of the major questions still unanswered about hierarchical clustering

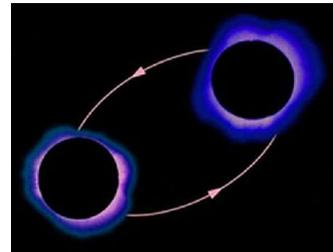
LISA: Laser Interferometer Space

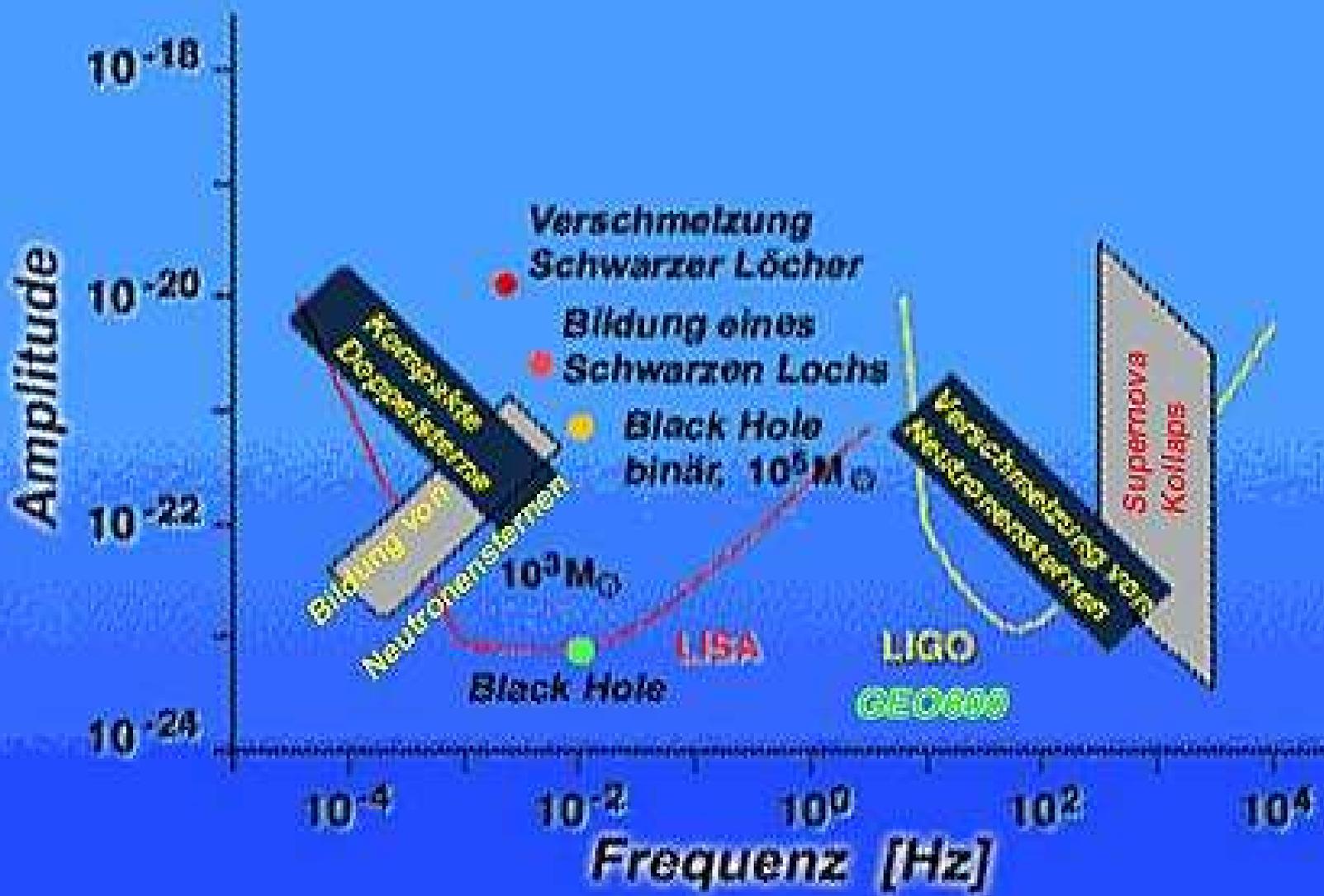
URL : <http://lisa.jpl.nasa.gov/>

LISA

Opening a new window on the Universe

Laser Interferometer Space Antenna





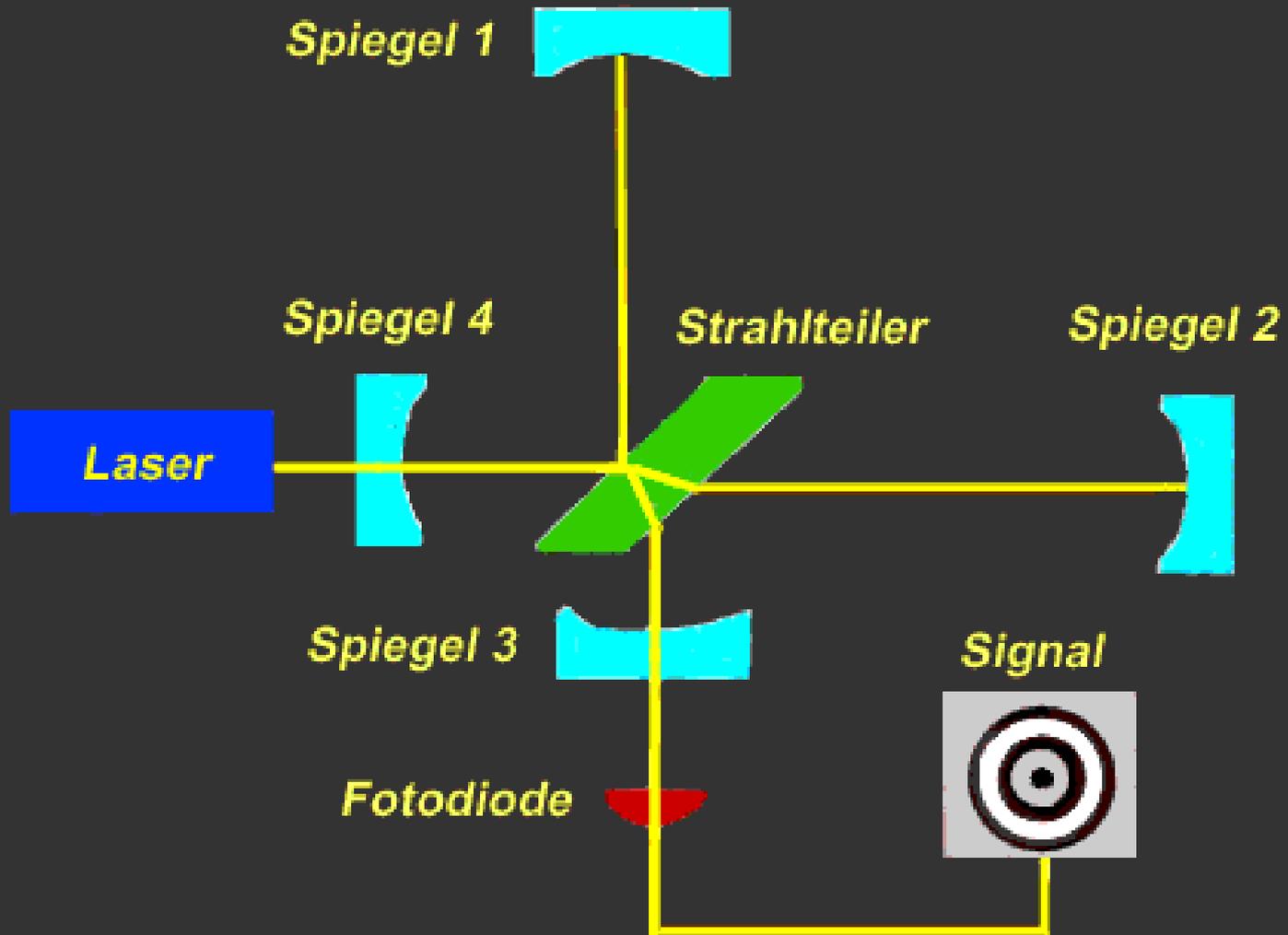
# Gravitationsexperimente

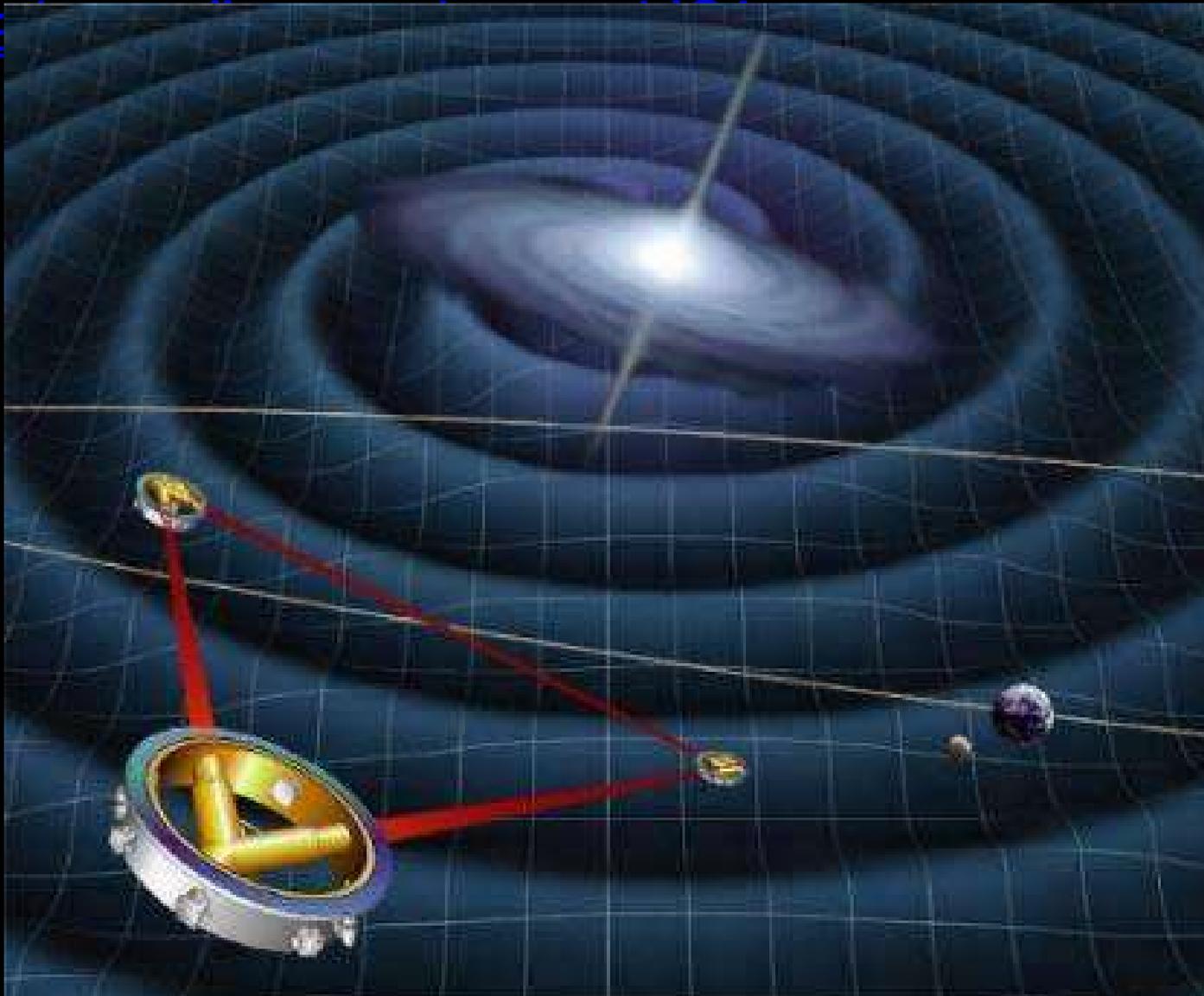
- LISA, ein Weltraumprojekt von 5 Millionen km Länge
- LIGO, ein USA- Bodenexperiment von 4 km Ausdehnung
- VIRGO, italienisch- französisches Gemeinschaftsprojekt, 3 km
- GEO600, britisch- deutsches Projekt in Hannover, 600 m
- TAMA300, japanisch, 300 m

# Gravitationswellenexperimente

- Dies alles sind Experimente, die auf der Interferometrie (Überlagerung von Wellen) beruhen. Es laufen jedoch auch Projekte, welche die Längenveränderung von massiven Körpern ausnutzen:
- GRAIL, ein holländisches Projekt
- EXPLORER, Italien
- Weitere Experimente mit ebenfalls klingenden Namen sind **TIGA**, USA; **SFERA**, Italien; **OMEGA**, Italien **GRAVITON**, Brasilien; **ALLEGRO**, USA, **NAUTILUS**, Italien sowie **AURIGA**, ebenfalls in Italien.

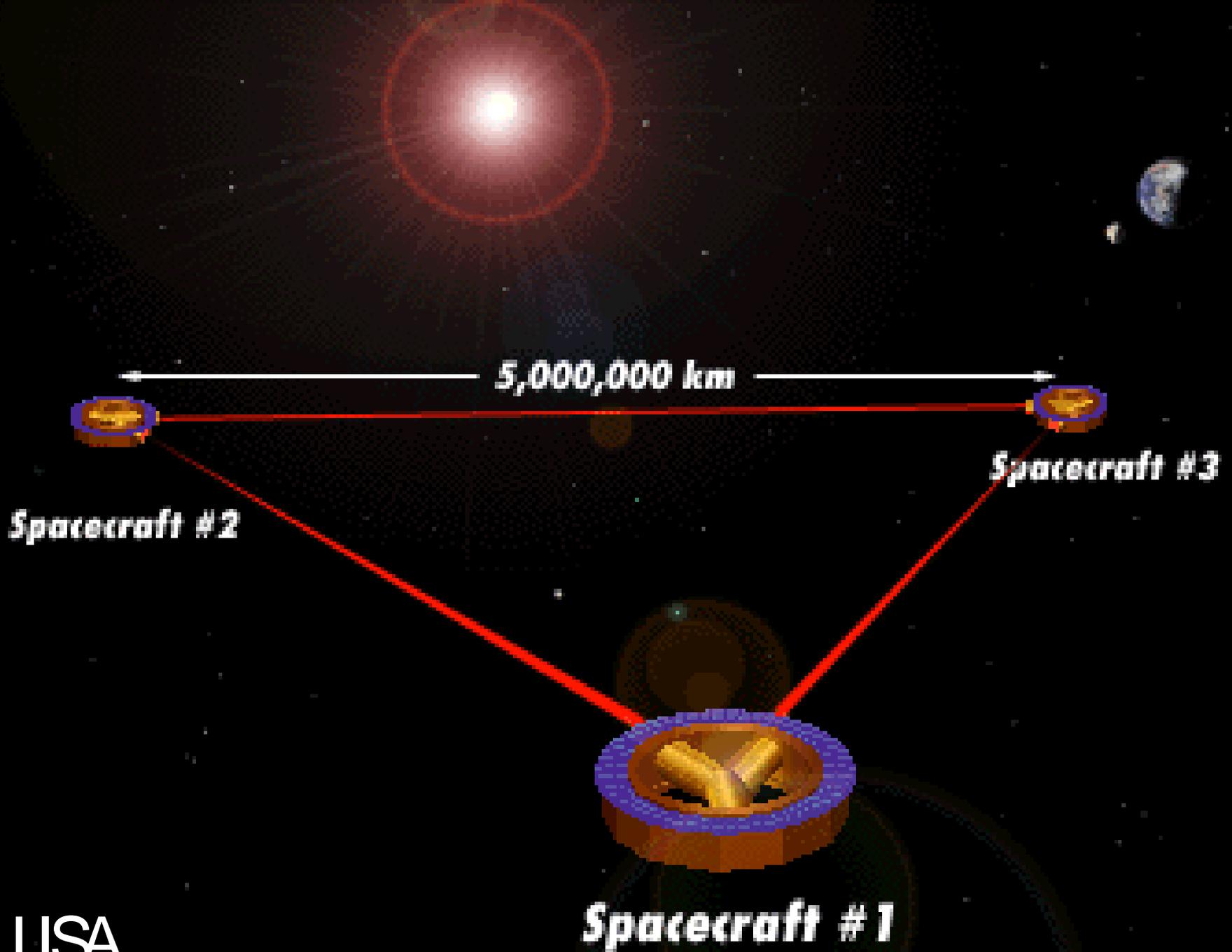
# Gravitationswellenexperimente



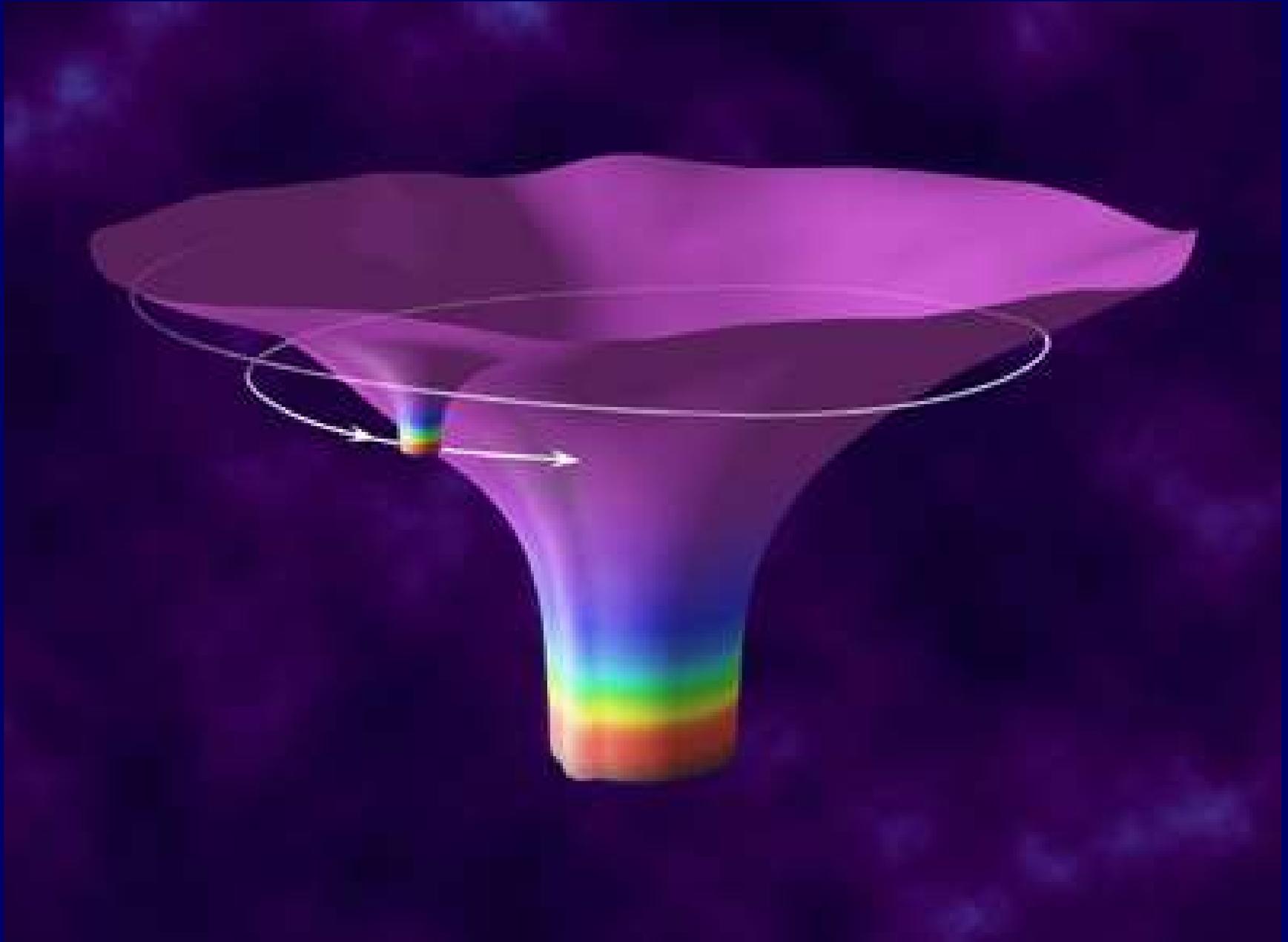


LISA (**L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna), geostationäre Umlaufbahn,  
3 Zylindern von 1,80 m Durchmesser und 30 cm Höhe,

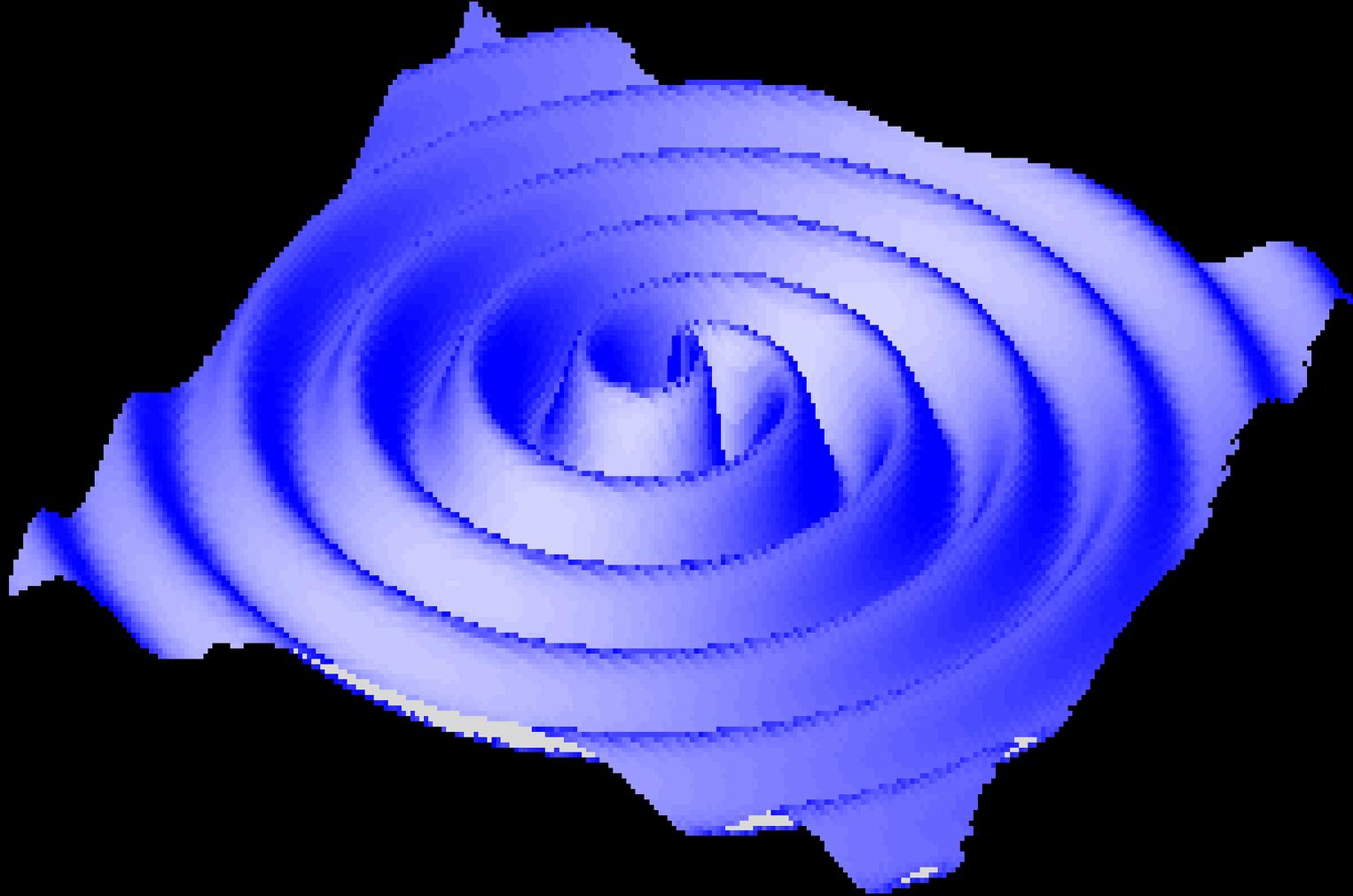
LISA



# LISA: Todesspirale eines Sterns



# LISA: geriffelte Raum-Zeit



# Gravitational Waves Escape from the Earliest Moments of the Big Bang

**BIG BANG**

Big Bang plus  $10^{-43}$  Seconds

Big Bang plus 300,000 Years

Big Bang plus 15 Billion Years

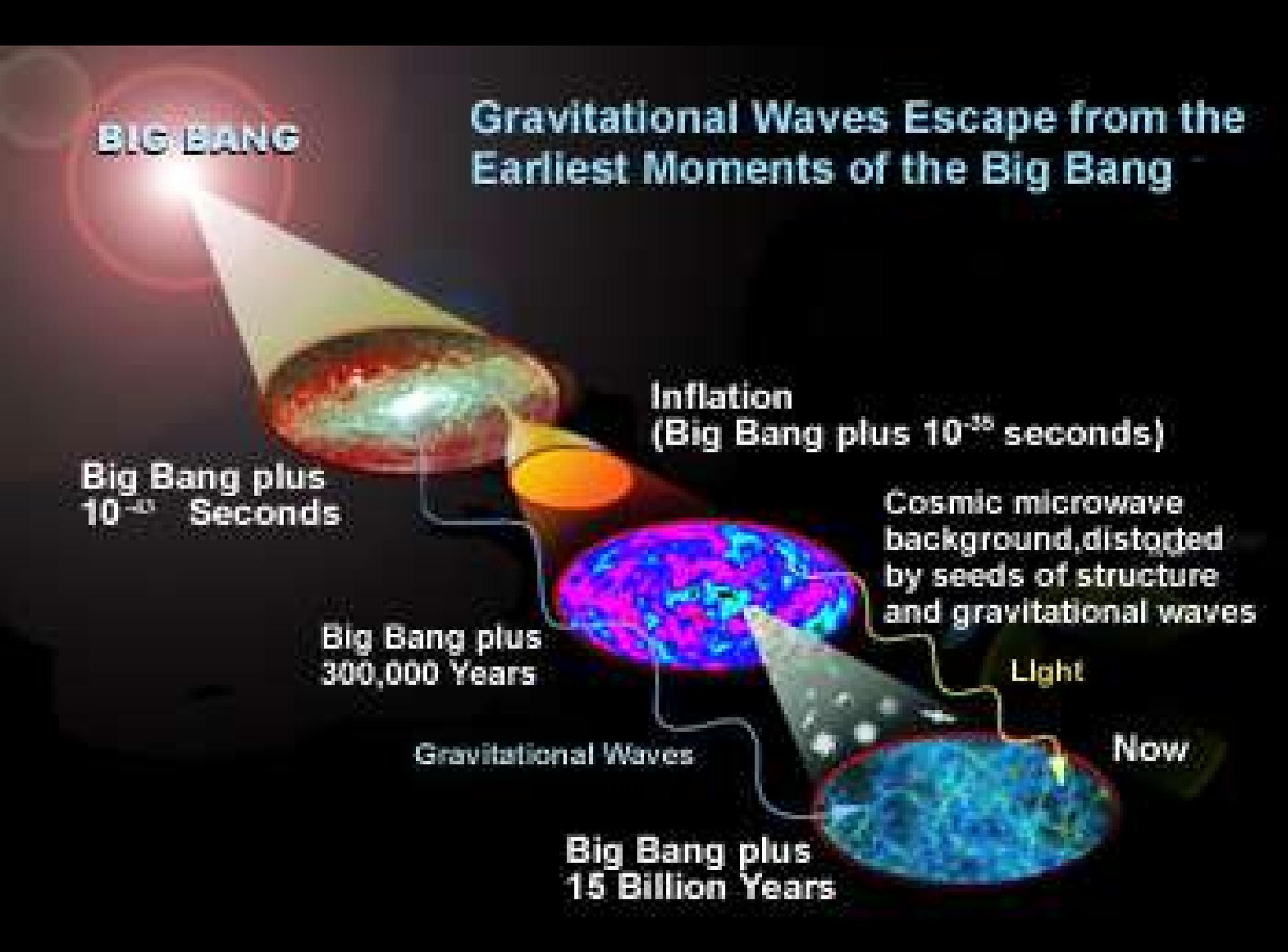
Inflation (Big Bang plus  $10^{-36}$  seconds)

Cosmic microwave background, distorted by seeds of structure and gravitational waves

Light

Gravitational Waves

Now





- **MISSION NAME:** Laser Interferometer Space Antenna, a Structure and Evolution of the Universe 2003 Roadmap, "Beyond Einstein" Great Observatory mission.
- **OBJECTIVE:** To detect gravitational waves from sources involving galactic (within the Milky Way) binaries and extra-galactic (outside our Galaxy) massive black holes.
- **MISSION DURATION:** Five years for nominal mission (10 years extended mission).
- **ORBIT:** 20 degrees behind Earth's orbit of the Sun, at 1 AU (astronomical unit) from the Sun, with the plane of orbit inclined at 60 degrees to the ecliptic.
- **SPACECRAFT MASS:** Each spacecraft has a mass of 203 kilograms (447.5 pounds). Each propulsion unit weighs 132 kilograms (291 pounds) and requires 27 kilogram (59.5 pounds) of propellant. Total launch mass is 1407 kilograms (3102 pounds).
- **INSTRUMENT:** identical in each of LISA's three spacecraft —30 centimeter (almost 12 inches) diameter f/1 Cassegrain telescope
- **POWER SUPPLY:** Gallium Arsenide solar array and 9 amps per hour lithium ion battery

# Gravitationswellenexperimente



- Die Anlage GEO600 bei Hannover. Jede der beiden rechtwinklig angeordneten Lichtlaufstrecken hat eine Länge von 300 m. Sie ist so empfindlich, dass man sogar besondere Vorkehrungen treffen musste, damit nicht die Wellen der Nordsee in über 200 km Entfernung zu Fehlmessungen führen.

- *Luftaufnahme von*  
*DEUTSCHE LUFTBILD W*