

Entwicklung der AGN-Population

Statistische Erfassung

Vorab einige Konzept- und Begriffsklärungen:

Kosmische Zeit: Rotverschiebung z wird hier direkt als relative Zeitachse interpretiert; Umrechnung in Jahre / Sekunden über Lichtlaufzeit längs Geodäte ab z .

Entwicklung: Wird hier im statistischen Sinn für die mittleren Eigenschaften der AGN-Population (s.u.) verstanden. Ändern sich diese Eigenschaften als Funktion von z , spricht man von Entwicklung (engl. *evolution*).

Population: Gesamtheit aller AGN bei fester kosmischen Epoche $z \pm \Delta z$. Ggf. Unterpopulation mit bestimmten *intrinsischen* Eigenschaften (z.B. radiolaut / radioleise; Leuchtkraft relativ zur Zentralmasse; etc.)

Stichprobe: Menge der bei einem oder mehreren Survey(s) gefundenen AGN, mit wohldefinierten Auswahlkriterien. Eine gute Stichprobe ist *repräsentativ* für die Population bzw. eine Unterpopulation.

Volumen und Dichte: Im folgenden immer zu verstehen als *mitbewegtes* Raumvolumen, d.h. bezogen auf ein mit dem Universum expandierendes Koordinatensystem.

Der $\log N - \log S$ -Test

Anzahl-Helligkeits-Relation für helle Quasare und andere AGN (siehe Abschnitt über Quasar-Surveys) zeigt durchweg eine Steigung, die steiler ist als für eine homogene Verteilung im statisch-euklidischen Universum

⇒ Qualitativer Hinweis auf Zunahme der AGN-Zahlen mit wachsendem z .

Aufgrund der komplizierten Abhängigkeit von $\mathcal{A}(f)$ von kosmologischen Annahmen ist dieser Test für quantitative Analyse der Entwicklung weniger geeignet.

Der Leuchtkraft-Volumen-Test

Älteste quantitative Diagnostik für kosmologische Populations-Evolution, noch heute verwendet: Leuchtkraft-Volumen- oder V/V_{\max} -Test (Schmidt 1968).

Betrachte Survey über Raumwinkel Ω mit Flusslimit f_{lim} . Eine Quelle mit Fluss f wird detektiert, wenn $f > f_{\text{lim}}$. Rotverschiebung z der Quelle sei bekannt (dann auch Leuchtkraft L).

Das von der Quelle „eingeschlossene“ Raumvolumen ist:

$$V(z) = \Omega \cdot \int_{z'=0}^z \frac{dV}{dz} dz .$$

Analog ergibt sich das *Maximalvolumen*, über das die Quelle hätte detektiert werden können, aus der maximalen Rotverschiebung z_{\max} , für die gilt: $f(L, z_{\max}) = f_{\text{min}}$; dann ist $V_{\max} = V(z_{\max})$.

Für eine homogene Verteilung der Objekte im Raum hat die Variable $x = V/V_{\max}$ sehr einfach beschreibbare statistische Eigenschaften, die vor allem unabhängig vom genauen kosmologischen Modell gültig sind.

- Offenbar gilt immer: $0 \leq V/V_{\max} \leq 1$;
- Der *Erwartungswert* ist $\langle V/V_{\max} \rangle = 0.5$;
- Die *Verteilung* der Einzelwerte von V/V_{\max} ist *gleichförmig* über $[0,1]$.

Aufgabe also: Aus Stichprobe von Objekten (z.B. Quasaren) mit bekannten f , z und bekannter Surveycharakteristik sollen Mittelwert und Verteilungsform der Variablen V/V_{\max} berechnet werden. Diagnostik anhand des Mittelwertes:

- $V/V_{\max} \simeq 0.5$: Konstante Raumdichte, keine Entwicklung.
- $V/V_{\max} > 0.5$: Positive Entwicklung, Raumdichte nimmt mit z zu.
- $V/V_{\max} < 0.5$: Negative Entwicklung, Raumdichte nimmt ab.

Typischer Wert für Quasar-Stichproben: $V/V_{\max} \simeq 0.6\text{--}0.7$
 \Rightarrow Deutliche Evidenz für positive Evolution!

Leuchtkraftfunktion

Wichtigste AGN-Populationsstatistik: Verteilungsfunktion der Leuchtkräfte.
In der Praxis nur für quasi-monochromatische Leuchtkräfte ermittelbar (für feste Ruhesystem-Wellenlänge, unter Einbeziehung der K-Korrektur, s.o.).

Def.: *Kumulative Leuchtkraftfunktion* $\psi(L, z) =$ Anzahldichte von AGN mit Leuchtkraft $> L$;

Entsprechend *differentielle Leuchtkraftfunktion*: $\phi(L, z) = d\psi/dL$.

Für Raumdichte benötigt: Volumen einer infinitesimalen Kugelschale bei z :

$$dV = 4\pi d_p^2 dr$$

mit Eigendistanz d_p und mitbewegtem Linienelement dr .

Geschlossene Ausdruck für dV/dz nur für $\Omega_\Lambda = 0$:

$$\frac{dV}{dz} = \frac{c}{H_0} \frac{d_p^2}{(1+z)(1+\Omega_m z)^{1/2}}.$$

Eingeschlossenes Volumen $V(z)$ durch numerische Integration.

Beachte: LF ist doppelt abhängig von gewähltem kosmologischen Modell:

1. Für Leuchtkräfte wird $d_L = d_L(z; H_0, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$ benötigt.
2. Berechnung des Volumenelements

Praktische Bestimmung der Leuchtkraftfunktion verkompliziert durch Tatsache, dass Stichproben nie volumen-, immer bestenfalls flussbegrenzt sind. D.h. Berechnung als $\psi = n/V$ nicht verwendbar.

Üblich: Berechne $\psi(L)$ als Summe der Beiträge jedes Einzelobjekts k mit $L_k \geq L$

$$\psi = \sum_k \frac{1}{V_{\max, k}}$$

unter Verwendung der oben definierten Größe $V_{\max}(L_k, z_k)$. Analog gilt:

$$\phi(L) = \sum_{L-\Delta L}^{L+\Delta L} \frac{1}{V_{\max k}},$$

Parametrisierung der Leuchtkraftfunktion

Alternative zur Punkt-für-Punkt-Berechnung der LF über $1/V_{\max}$ -Statistik: Analytischer Ansatz für Verteilungsfunktion $\phi(L; p_1, p_2, \dots)$, wobei freie Parameter aus Anpassung an Beobachtungsdaten bestimmt werden müssen.

Einfachste Form für Verteilungsgesetz ist

$$\phi(L) dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\gamma dL.$$

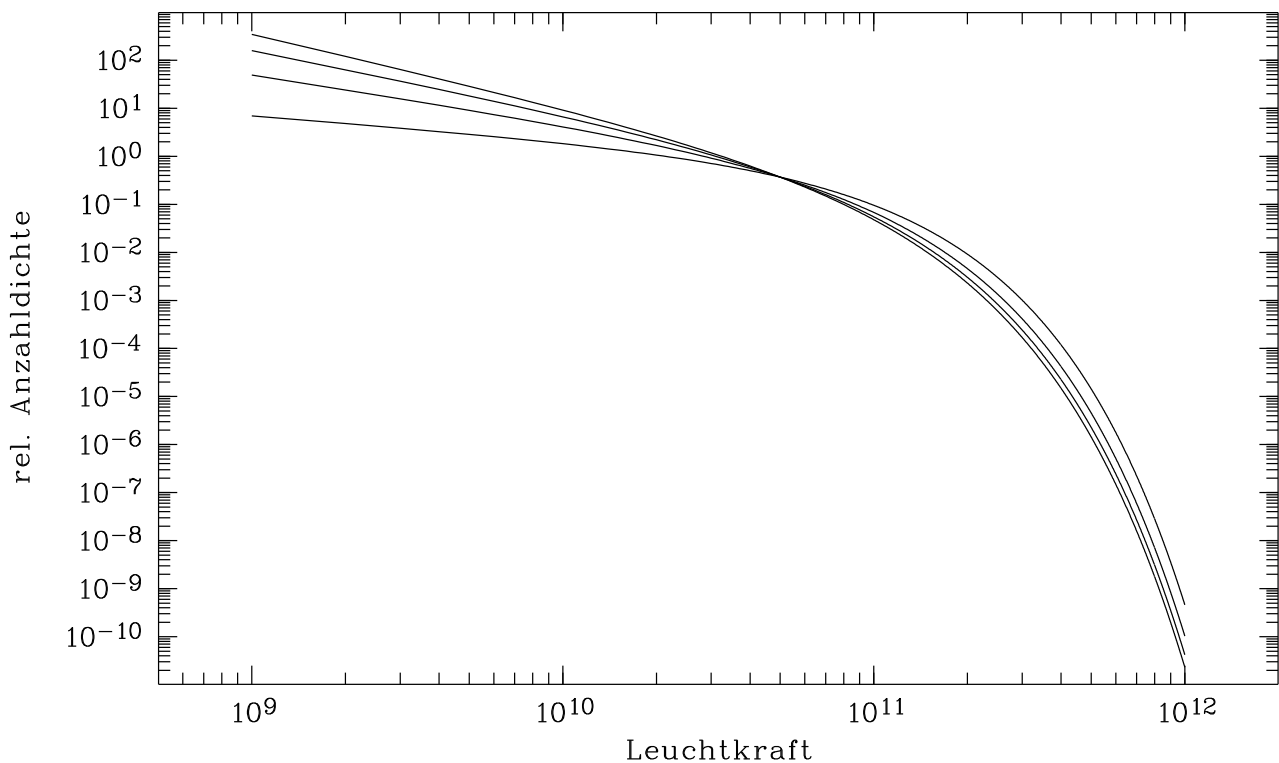
mit den freien Parametern ϕ^* und γ . Kann aber bestenfalls zur stückweisen Approximation dienen, da Potenzgesetz grundsätzlich nicht integrierbar:

- $\gamma < -1$: Integral über ϕdL divergiert für $L \rightarrow 0$.
- $\gamma > -1$: Integral über ϕdL divergiert für $L \rightarrow \infty$.

Physikalisch motivierter Ansatz für Leuchtkraftfunktion von Galaxien:

$$\phi(L) = \phi^* \cdot \left(\frac{L}{L^*} \right)^\gamma \cdot e^{-L/L^*},$$

also für $L \rightarrow 0$ ein Potenzgesetz, aber mit exponentiellem Abfall für $L > L^*$. Ansatz geht zurück auf P.L. Schechter (1976) – „Schechter-Leuchtkraftfunktion“.

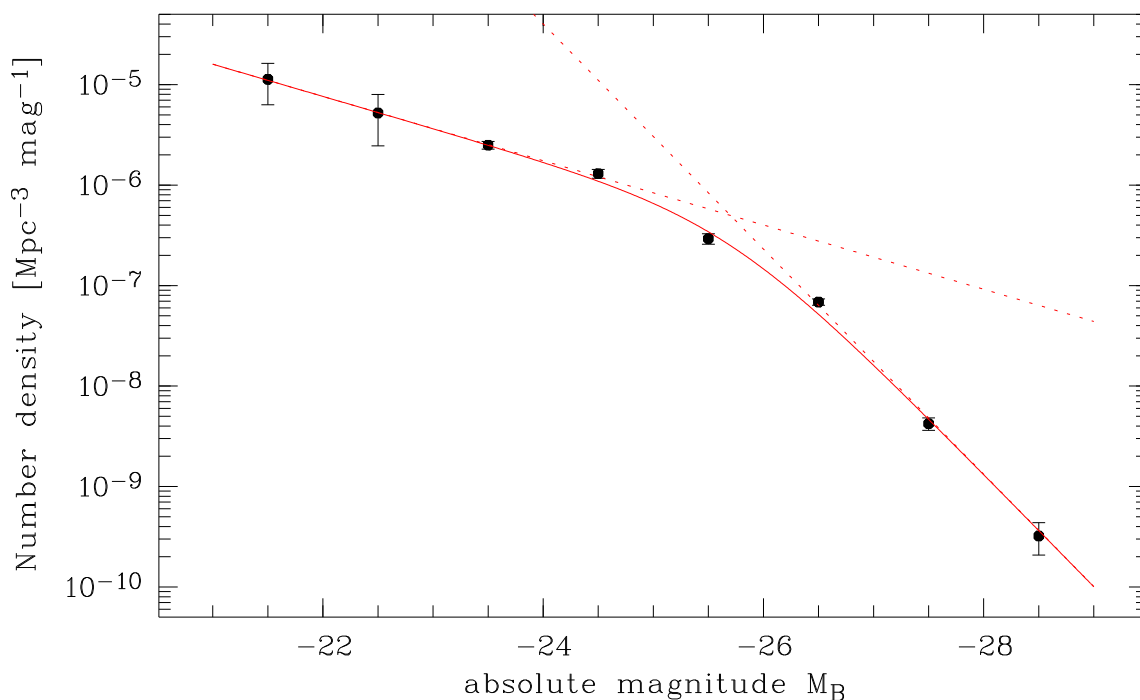


Schechter-LF hat drei freie Parameter:

- γ : Logarithmische Steigung am schwachen Ende;
- L^* : Charakteristische Leuchtkraft, Abknickpunkt;
- ϕ^* : Bruchteil $1/e$ der differentiellen Anzahldichte bei $L = L^*$.

Schechter-LF ist integrierbar über alle L , wenn $\gamma > -1$. Andernfalls ist physikalisch ein Abbruch bei kleinen L zu fordern.

Beobachtungen der AGN-Leuchtkraftfunktion: Schechter-Formel schlechte Beschreibung; insbesondere: kein exponentieller Abbruch zu hohen L !



Besserer und weit verbreiteter Ansatz:

$$\phi(L) = \phi^* \left[\left(\frac{L}{L^*} \right)^{\gamma_1} + \left(\frac{L}{L^*} \right)^{\gamma_2} \right],$$

„Gebrochenes Potenzgesetz“ (doppeltlogarithmisch: 2 Geradensegmente).

Immer noch sehr einfache Form, aber für geeignete γ_1, γ_2 sind sowohl ϕ als auch $L \cdot \phi$ integrierbar.

Achtung: Keine unmittelbare physikalische Rechtfertigung für diese (oder irgendeine andere) Form der AGN-LF! Rein beschreibender Ansatz.

Fehlt noch eine Parametrisierung der Evolution. Simple Ansätze (beide mit einfacher physikalischer Interpretation, wird unten weiter diskutiert):

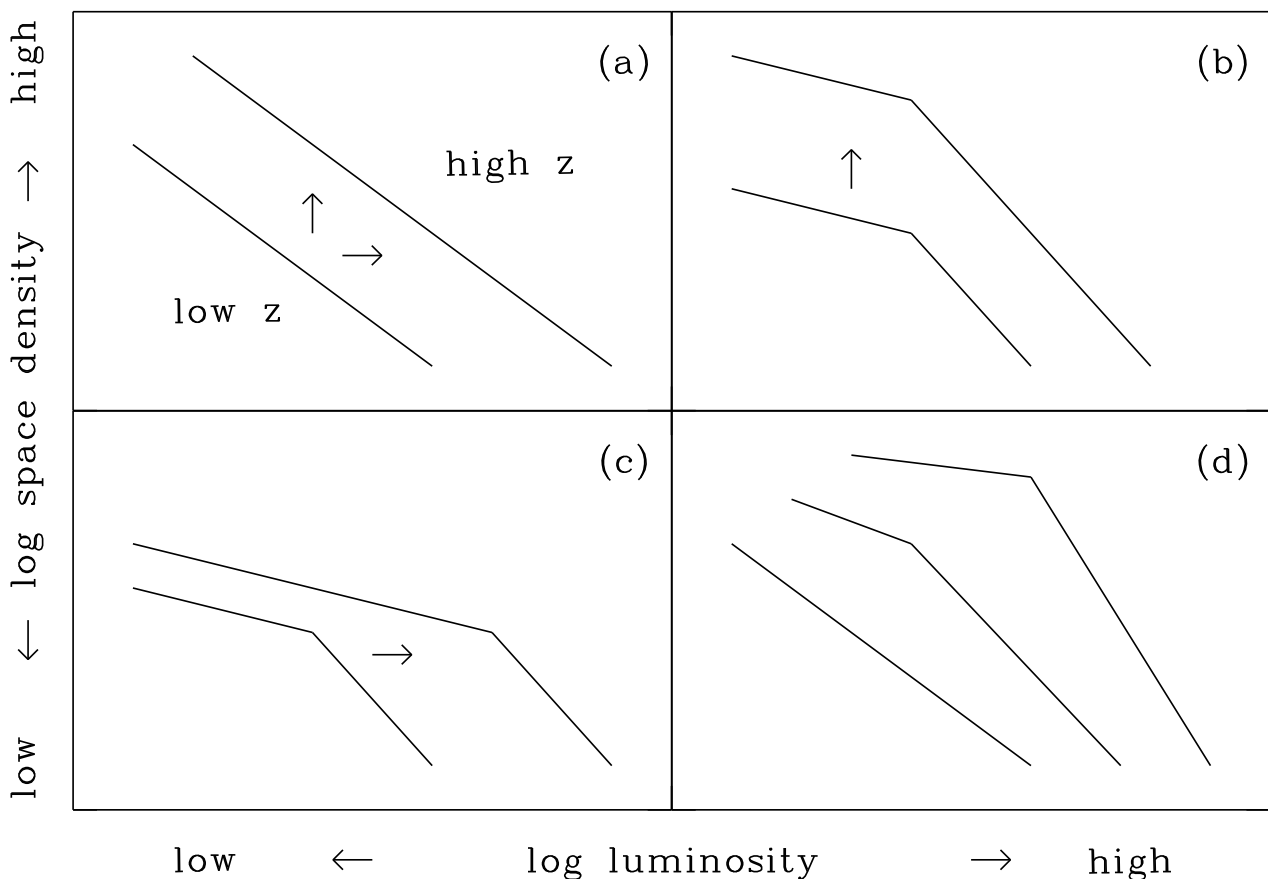
Reine Anzahldichte-Entwicklung (*Pure Density Evolution, PDE*):

$$\phi(L, z) = g(z) \cdot \phi(L, z=0) .$$

Reine Leuchtkraft-Entwicklung (*Pure Luminosity Evolution, PLE*):

$$\phi(L, z) = \phi\left(\frac{L}{L^*(z)}\right) \quad \text{mit } L^*(z) = L_{z=0}^* \cdot f(z) .$$

In beiden Fällen bleibt die LF logarithmisch forminvariant (Form der „lokalen LF“ bei $z = 0$) und wird nur vertikal (PDE) bzw. horizontal (PLE) verschoben.



(a) LF ist einfaches Potenzgesetz

(b) Reine Anzahldichte-Entwicklung

(c) Reine Leuchtkraft-Entwicklung

(d) Leuchtkraftabhängige Anzahl-Entwicklung

Vergleich parametrisch–nichtparametrische LF

Vorteile der nichtparametrischen Erfassung:

- Direkte Repräsentation der Daten, ohne zusätzliche Annahmen;
- Einfache Abschätzung der statistischen Fehler.

Vorteile der parametrischen Darstellung:

- Kontinuierliche Verteilungsfunktion
- Formale Extrapolation ist möglich
- Bessere Berücksichtigung von Evolutionseffekten
- Kein „Binnen“ der Daten nötig zur Berechnung

Methodischer Einschub:

Parameterschätzung durch Maximum-Likelihood-Anpassung

Ansatz: Für bekannte LF-Parameter und einen Survey mit Raumwinkel und Selektionsfunktion $\Omega(m, z)$ ist die *erwartete* Anzahldichte bei z und M :

$$\langle n \rangle = \phi(M, z) \Omega(m, z) \frac{dV}{dz} dz .$$

p sei die Wahrscheinlichkeit für *genau einen* Quasar zwischen (M, z) und $(M + \Delta M, z + \Delta z)$; q die Komplementärwahrscheinlichkeit für *keinen* Quasar. Für *kleine* $\Delta M, \Delta z$:

$$p = \langle n \rangle e^{-\langle n \rangle} \Delta M \Delta z \quad , \quad q = e^{-\langle n \rangle} \Delta M \Delta z .$$

Definition: Likelihood \mathcal{L} ist Gesamtwahrscheinlichkeit für gegebenes Ensemble,

$$\mathcal{L} \equiv \prod pq \quad \text{bzw.} \quad S = -\ln \mathcal{L} .$$

Einsetzen und Weglassen aller konstanten Terme ergibt

$$S = \sum -\ln \phi(M_i, z_i) + \int_{z_1}^{z_2} \int_{M_1}^{M_2} \phi(M, z) \Omega(m(M, z), z) \frac{dV}{dz} dz dM .$$

\Rightarrow Finde die LF-Parameterkombination, die \mathcal{L} maximal werden lässt!

Die AGN-Leuchtkraftfunktion: Resultate

Frühe Resultate (bis Ende 80er Jahre) begrenzt in Aussagefähigkeit durch extrem kleine Stichprobenumfänge ($\lesssim 100$ Objekte). In der Regel akzeptable Repräsentation durch einfaches Potenzgesetz

→ keine Möglichkeit der Unterscheidung zwischen PLE und PDE!

Seit frühen 90er Jahren: Meistens Darstellung durch Doppel-Potenzgesetz (s.o.), starke Favorisierung von PLE als dominierendem Modus.

⇒ AGN langlebiges Phänomen in wenigen Galaxien?

Neuerdings: Hinweise auf signifikante Veränderung der Form der AGN-LF mit z , weder PLE noch PDE reichen aus. Da heutzutage i.d.R. angenommen wird, dass AGN „kurzlebig“ sind, ist LF am ehesten mit dem Stichwort *luminosity-dependent density evolution* (LDDE) zu beschreiben.

Wichtige Resultate im Überblick:

- Resultate qualitativ sehr ähnlich für Surveys bei verschiedenen Wellenlängen (insbesondere optisch/Röntgen/Radio). Verbleibende Unterschiede vielleicht durch systematische Auswahleffekte, vielleicht durch reale physikalische Mechanismen hervorgerufen.

- Zwischen $z \simeq 0$ und $z \simeq 2$ ändert sich AGN-Raumdichte (bei gegebener Leuchtkraft) um Faktor ~ 1000 .

Alternativ formuliert: ändern sich die typischen AGN-Leuchtkräfte um Faktor ~ 30 (bei gegebener Raumdichte).

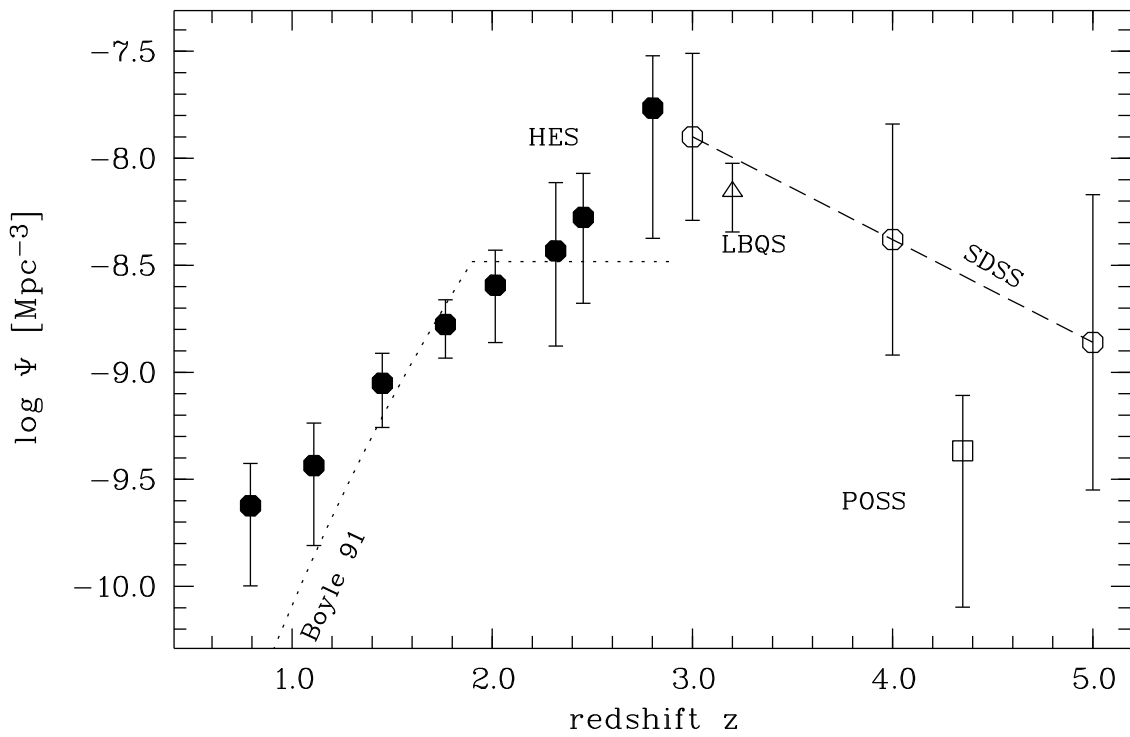
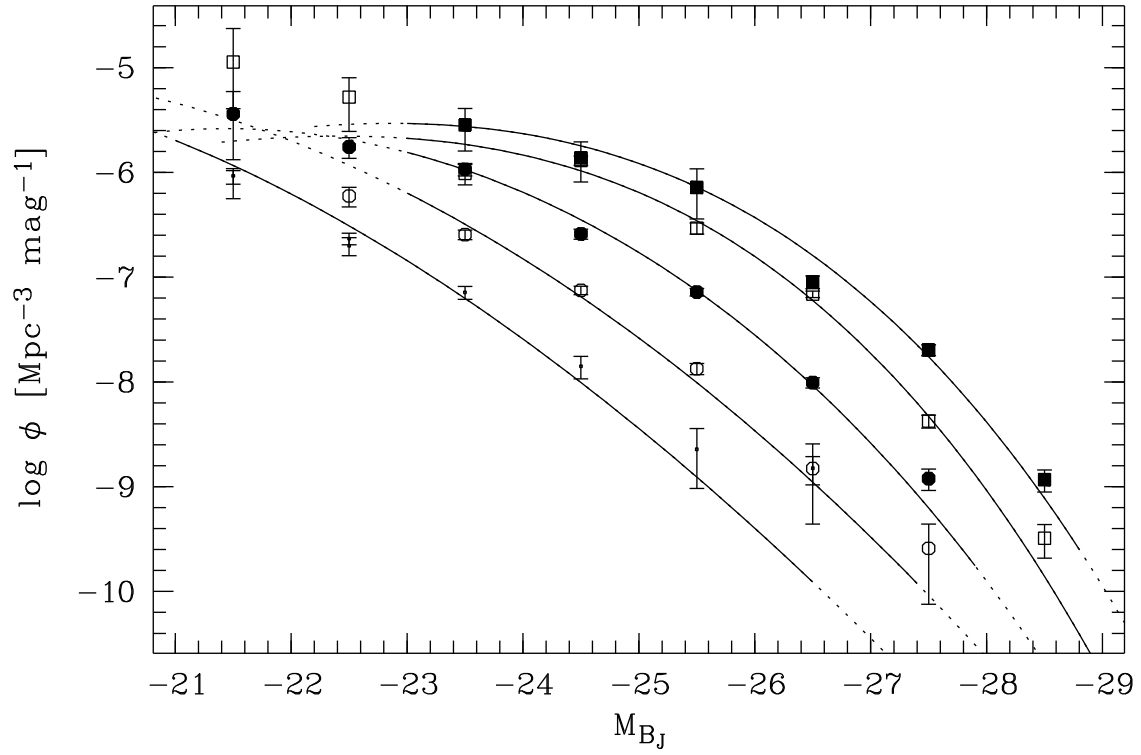
- Für $z > 3$ sinken die Raumdichten wiederum signifikant, um Faktor $\gtrsim 10$ bis $z \simeq 5$. Stichproben bei extrem hohen z aber noch sehr klein (verursacht vor allem durch die starke negative Entwicklung!).

⇒ Eng begrenztes Maximum der Kernaktivität im Universum!

- Neuester Trend (2003): Lage des Maximums scheint von der Leuchtkraft abzuhängen: AGN niedriger Leuchtkraft entwickeln sich „später“ (Maximum bei kleinerem z) als leuchtkräftige AGN.

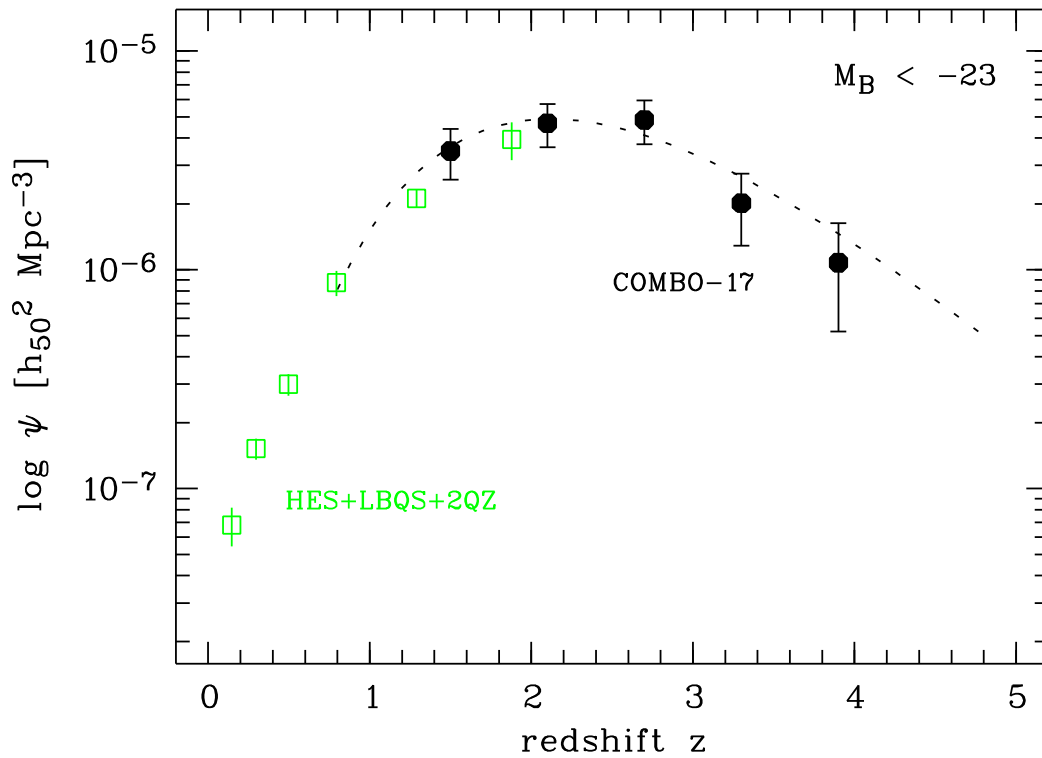
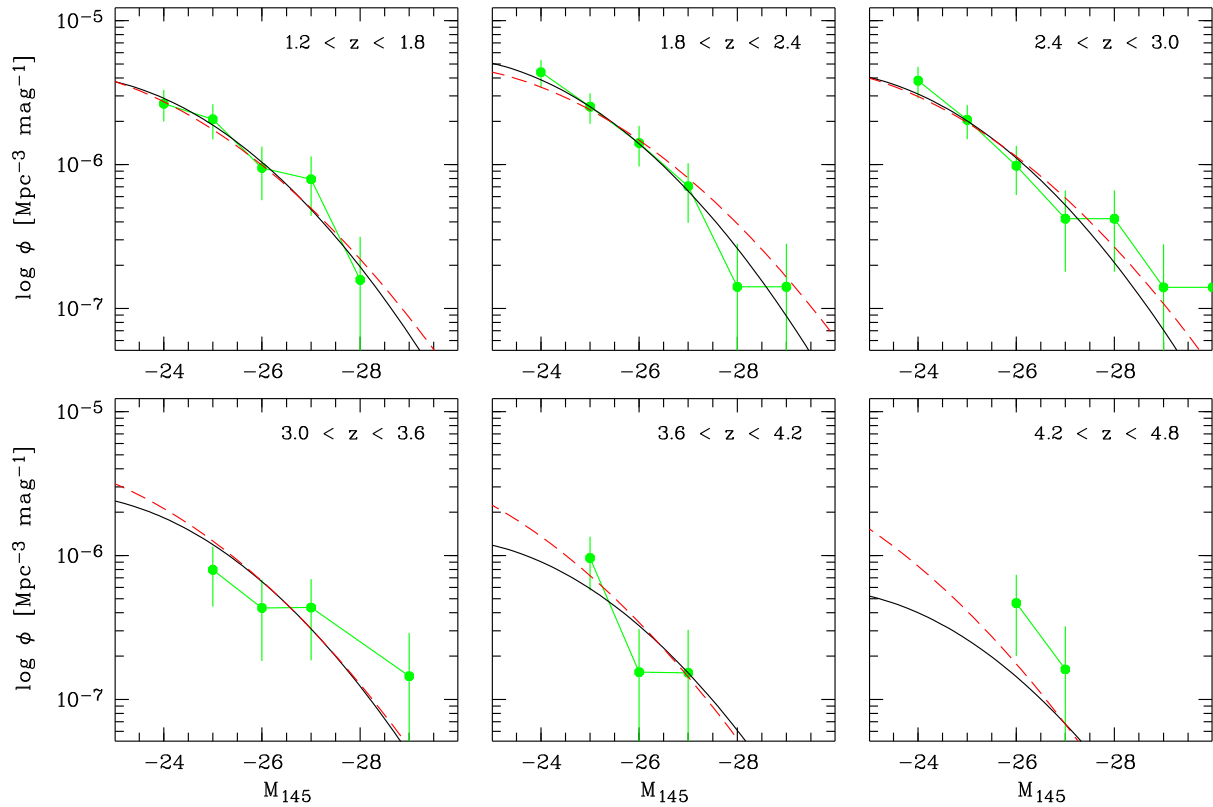
⇒ Überraschendes Resultat, physikalisch noch nicht schlüssig erklärt. Problem wird weiter unten noch einmal angesprochen.

LF und Entwicklung von leuchtkräftigen AGN



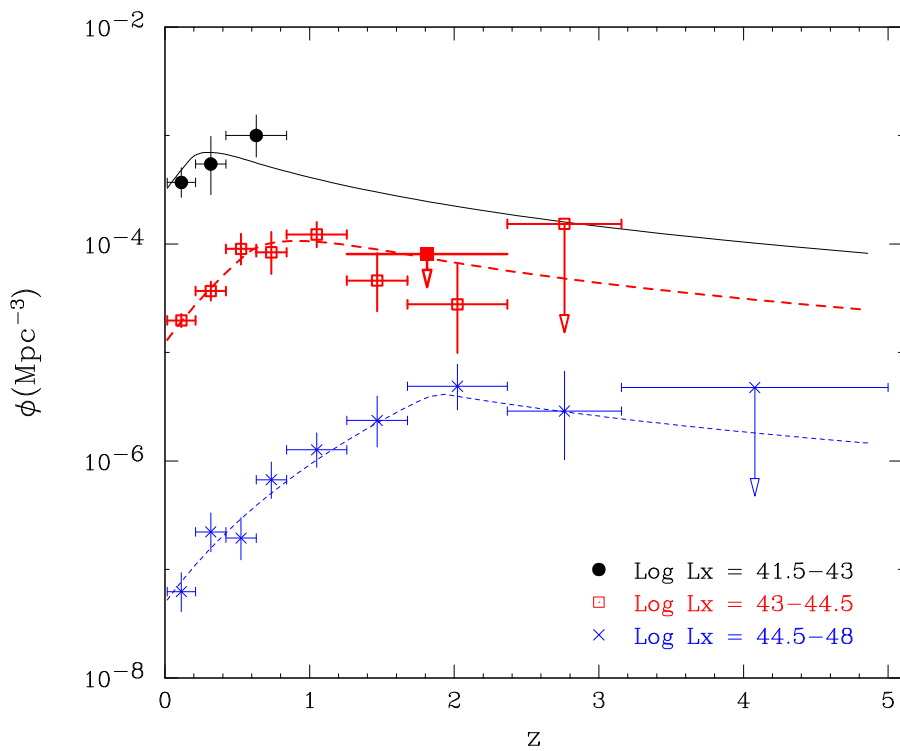
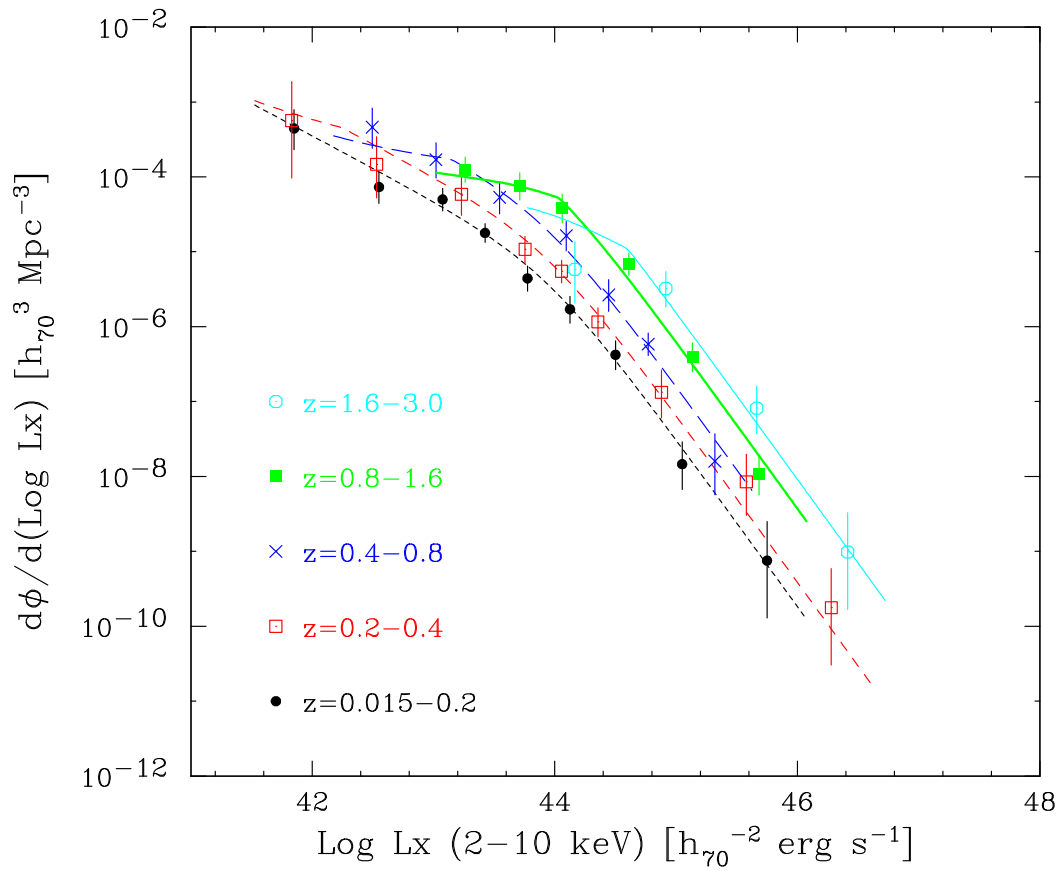
(Wisotzki & Reimers 2001)

Leuchtkraftfunktion von optisch schwachen AGN



(Wolf, Wisotzki, et al. 2003)

Die Röntgen-Leuchtkraftfunktion von AGN



(Ueda et al. 2003)

AGN und die kosmische Hintergrundstrahlung

Olbers' Paradox: „Warum ist der Nachthimmel dunkel?“

aufzulösen durch endliche Lebensdauer des Universums.

Trotzdem hat der Nachthimmel bei allen Wellenlängen eine Helligkeit $\neq 0$; ein Teil dieser Photonen stammt von Quasaren bei allen z .

Relevante Komponenten der extragalaktischen Hintergrundstrahlung:

- *Cosmic Microwave Background* (CMB): Nachhall der Epoche der Rekombination bei $z \sim 1000$; diskrete Quellen tragen kaum bei.
- *Röntgen-Hintergrund* (XRB): Entdeckt 1958 als nicht in Einzelquellen auflösbare quasi-diffuse Emission. Inzwischen weitgehend als Überlagerung diverser diskreter Quellen identifiziert, dominiert durch AGN.
- *UV-Hintergrund* (UVB): Bislang nur indirekt nachgewiesen durch Ionisation und Aufheizung des intergalaktischen Mediums. Setzt sich zusammen aus Beiträgen heißer Sterne und AGN, in noch zu bestimmenden Anteilen.
- *Fern-Infrarot-Hintergrund* (FIB): Vor einigen Jahren mit COBE/FIRAS entdeckt. Hauptsächlich rotverschobene staubreiche Starburst-Galaxien, aber AGN-Beitrag möglich (vermutlich gering).

Intensität der von AGN emittierten Strahlung bei Rotverschiebung z :

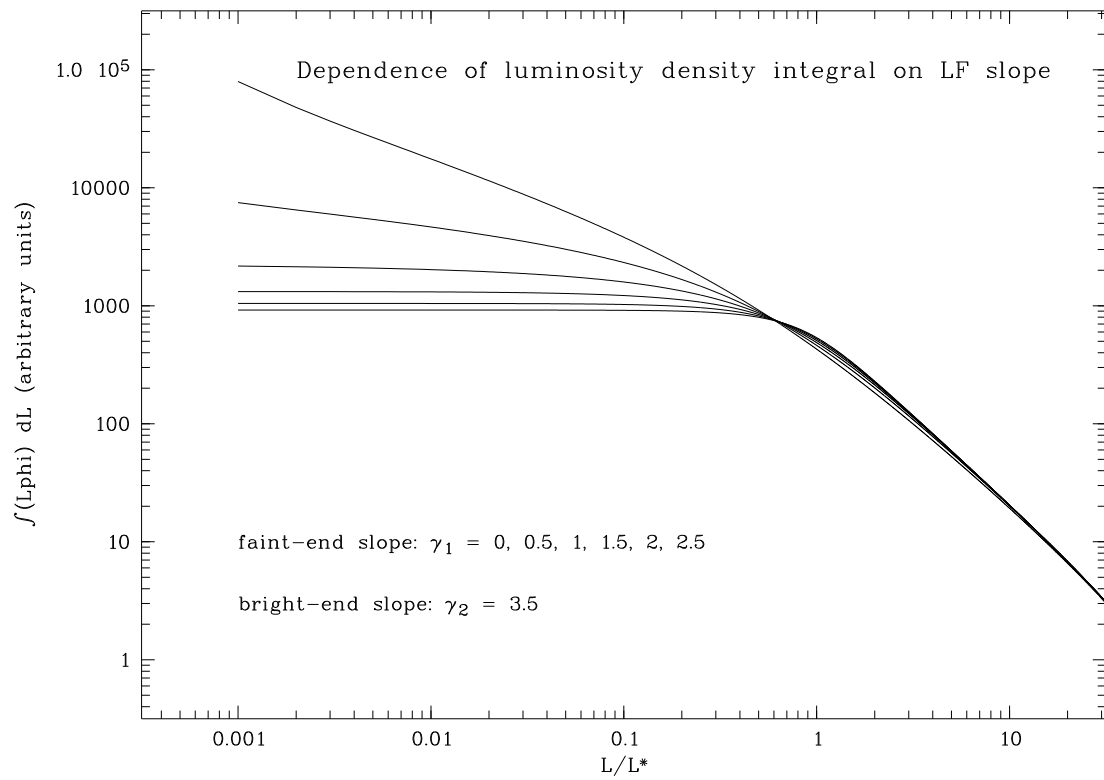
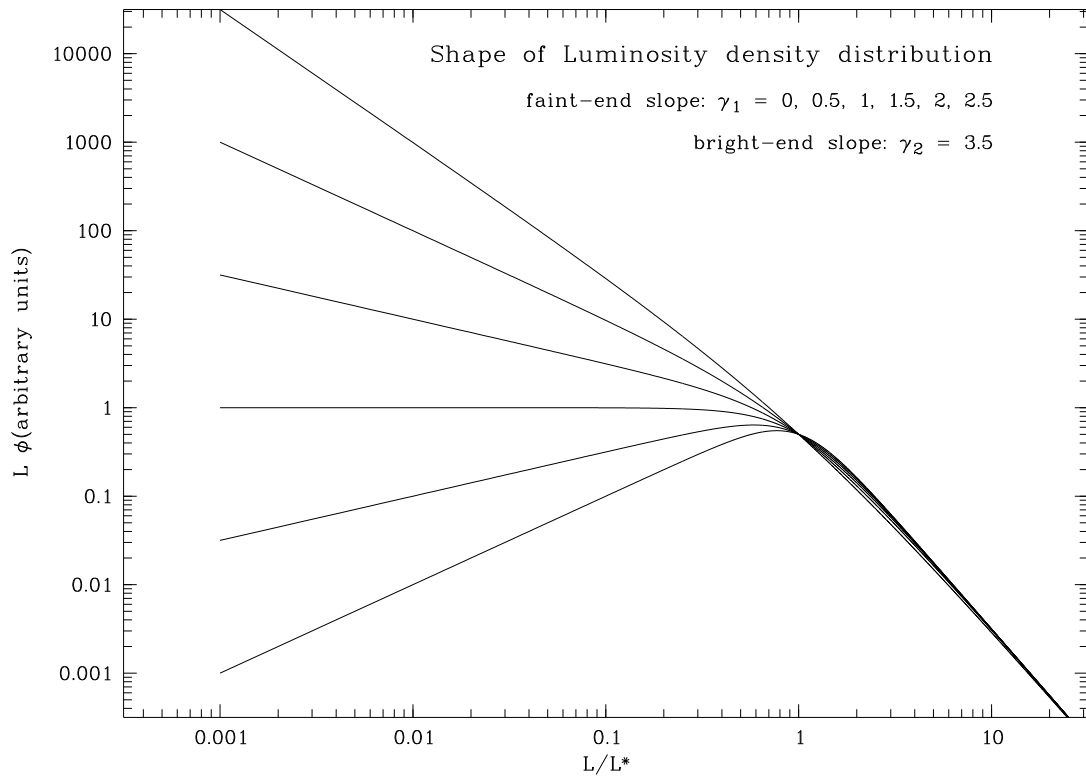
$$J_\nu = \frac{c}{4\pi} \int_z^\infty \mathcal{E}[(1+z)\nu] dz ,$$

wobei $\mathcal{E}(\nu)$ die Volumenemissivität der jeweils lokalen AGN-Population ist, gegeben durch die monochromatische Leuchtkraftfunktion

$$\mathcal{E}(\nu) = \int_0^\infty L_\nu \cdot \phi(L_\nu, z) dL_\nu .$$

D.h. schwaches Ende der LF kann entscheidend sein für Beitrag.

Leuchtkraftdichten-Verteilungsfunktion



Röntgenhintergrund

Spektrale Energieverteilung des XRB gemessen mit Satelliten- und Ballontele-skopen zwischen $\lesssim 1$ keV und $\gtrsim 1$ MeV. Mehrere Komponenten sichtbar, Ziel: Synthese aus beobachteten AGN-Populationen.

- Weiche Röntgenstrahlung ($h\nu \lesssim 1$ keV): Tiefe Röntgendurchmusterungen zeigen: Mindestens 80 % des XRB in diskrete AGN aufzulösen. spektrale Energieverteilung sehr gut mit AGN-Spektren übereinstimmend.

Allerdings: Absorption durch H^0 relevant \Rightarrow nur Sy 1!

Umgekehrt: Gemessener XRB stellt Randbedingung für Evolutionsmodelle dar: kein Modell darf XRB überproduzieren! (d.h. darf nicht zu viele schwache AGN bei hohen z vorhersagen)

- Moderat harte Röntgenstrahlung ($1 \text{ keV} \lesssim h\nu \lesssim 10 \text{ keV}$): Klassische Sy 1-artige AGN nicht mehr ausreichend und falsche Spektralform. Hinzunahme der absorbierten AGN (Sy 2 etc.): Spektren kompatibel.

Allerdings erfordert Synthese des XRB eine sehr reiche Population von stark absorbierten AGN bei $z > 1$! – bisher nicht gefunden!

- Harte Röntgenstrahlung ($h\nu \gtrsim 10 \text{ keV}$): Bislang nicht durch abbildende Röntgenteleskope untersucht. Nur synthetisierbar, wenn erheblicher Anteil der AGN-Population „Compton-thick“ ist, d.h. $N_H \gg 10^{24} \text{ cm}^{-2}$. Bislang wenig Evidenz für solche Population, Existenz aber nicht ausgeschlossen.

UV-Hintergrund

Synthese durch optische LF plus Annahme über spektrale Energieverteilung im EUV-Bereich. (Beachte: Resultat ist unabhängig von der Raumdichte „absorbierter“ AGN!)

Große Bedeutung für Re-Ionisation des intergalaktischen Mediums im jungen Universum. Erfolgte vermutlich in 2 Stufen:

1. $H^0 \rightarrow H^+$ und $He^0 \rightarrow He^+$: AGN und heiße Sterne, bei $z \sim 7 \dots 20$.
2. $He^+ \rightarrow He^{++}$: nur durch AGN machbar; verzögert bei $z \simeq 3$.

Synthese des XRB

6

A. Comas-Forgas et al.: The contribution of AGNs to the XRB

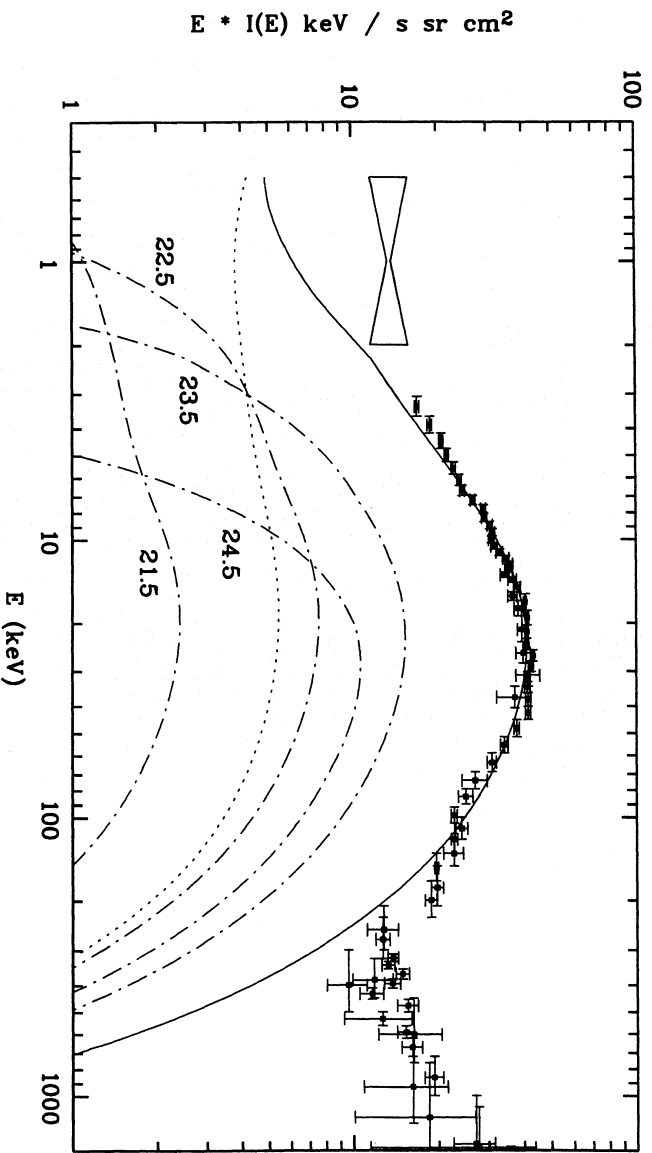


Fig. 1a. The XRB spectrum compared with our baseline model. The 0.5-2.0 keV data are from ROSAT (solid line: Hasinger 1992), while the high energy data are a compilation of best results from various experiments (Gruber 1992). The solid line represents our best fit, the dotted line represents the contribution of unabsorbed sources, while the absorbed sources are indicated by dot-dashed lines. The labels are the logarithms of the corresponding hydrogen column densities

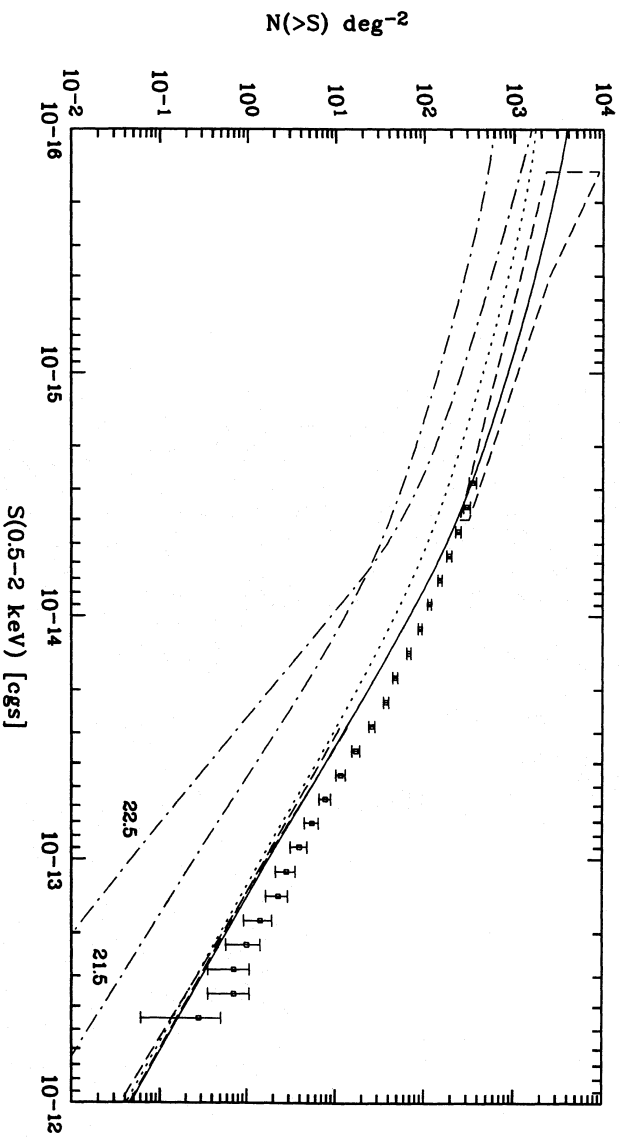


Fig. 2. The computed predicted counts (solid line) in the soft (0.5-2.0 keV) band compared with the EMSS AGN counts (dashed lines, Della Ceca et al. 1992) the ROSAT counts (H93) and ROSAT fluctuation analysis (dashed area, H93). The predicted contribution of the unabsorbed sources is shown with a dotted line, while the absorbed sources are represented by dot-dashed lines (the labels are the logarithms of the corresponding hydrogen column densities)

Physische Populationsentwicklung

Dichte- und Leuchtkraftentwicklung

Leitfrage: Wie hängt beobachtbare Populationsstatistik $\phi(L, z)$ mit intrinsischen Eigenschaften zusammen?

Insbesondere: Wie sind Leuchtkraft- und Dichteentwicklung zu interpretieren?

Formaler Ansatz: Zeitliche Entwicklung einer *Einzelquelle* wird beschrieben durch Lichtkurve $L(t; z, M, \dots)$; vereinfacht kann universelle Lichtkurve $L(t)$ angesetzt werden. Population wird noch durch kosmische Entstehungsrate $S(L, z)$ bestimmt. Dann besteht Zusammenhang mit Leuchtkraftfunktion über eine Art Kontinuitätsgleichung (mit Transformation $z \rightarrow t$):

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi(L, t) + \frac{\partial}{\partial L} [\dot{L} \phi(L, t)] = S(L, t).$$

Formale Lösung für $\phi(L, t)$ kann angegeben werden (Caditz & Petrosian 1990), aber Umkehrung: $S(L, t)$ und $L(t)$ aus beobachteter $\phi(L, t)$ ist unterbestimmt.

Wichtige Spezialfälle und die zugrunde liegenden Annahmen:

Pure Density Evolution (PDE): AGN haben Lebendauer $\ll H_0^{-1}$; dann ist $\dot{L} \approx 0$, und ϕ folgt direkt aus S . Mit zusätzlichem Separationsansatz $S(L, t) = h(t) \cdot \phi_0(L)$ gilt:

$$\phi(L, t) = \phi_0(L) \cdot g(t), \quad \text{mit } g(t) = \int_0^t h(t - t') dt,$$

d.h. LF ist form-invariant, Evolution durch Entstehungsrate $h(t)$ gegeben.

Pure Luminosity Evolution (PLE) I: Entstehung nur bei kosmischer Epoche $z_i \leftrightarrow t_i$; Lichtkurve $L \propto f(z - z_i)$. Dann ist $S(z) \approx \delta(z - z_i)$ und

$$\phi(L, t) = f^{-1}(z - z_i) \cdot \phi[f^{-1}(z - z_i) L],$$

d.h. Populationsentwicklung gegeben durch Entwicklung der Einzelquellen.

Pure Luminosity Evolution (PLE) II: Da Inversion $\phi \rightarrow S, L$ nicht eindeutig, muss es auch PLE-Lösung für kurzlebige AGN geben. Es gilt wieder $\dot{L} \approx 0$, dazu eine gezielt konstruierte Quellfunktion $S(L, t)$, die die Gesamtanzahl der Quasare pro Volumen erhält.

Akkretionsbilanz und Zentralmassen

Ein schwarzes Loch, das seine Leuchtkraft $L = \eta \dot{M} c^2$ aus Akkretion bezieht mit radiativer Effizienz η , hat maximale Wachstumsrate dann, wenn die Akkretionsrate nahe dem Eddington-Limit liegt:

$$M_{\text{Edd}} = \frac{L_{\text{Edd}}}{\eta c^2},$$

wobei L_{Edd} nur von der Zentralmasse M abhängt.

Ein solches Objekt steigert seine Masse um das e -Fache innerhalb einer Zeitskala von $t_{\text{Edd}} = M/\dot{M}_{\text{Edd}}$:

$$t_{\text{Edd}} = \frac{\eta c \sigma_e}{4\pi G m_p} \simeq 4\eta \cdot 10^8 \text{Jahre}$$

(„Eddington-Zeitskala“).

Allgemeiner: AGN akkretiert mit ϵ -facher der Eddington-Rate, dann wächst die Masse des schwarzen Lochs um das e -Fache innerhalb von

$$t_e = t_{\text{Edd}} \cdot \frac{\eta}{\epsilon}.$$

Dabei sind η und ϵ nur durch Beobachtung zu ermitteln:

η Nicht gut bekannt, hängt vom Akkretionsprozeß ab; für Standard-Akkretionsscheibe ist $\eta \sim 0.06$ (s.o.).

ϵ Kann aus L und M bestimmt werden. Lichtechno-Messungen von R_{BLR} und v_{BLR} : typisch ist $\epsilon \gtrsim 0.1$.

Naives Modell: Quasar leuchtet mit $L = \epsilon L_{\text{Edd}}$ über gesamten kosmischen Zeitraum von $z \gtrsim 2$ bis $z \simeq 0$. Das würde bedeuten, dass über $\gtrsim 10 \cdot 10^{10}$ Jahre kontinuierlich Masse akkretiert würde.

\Rightarrow Für Standardwerte von η und ϵ : M würde sich mindestens verhundertfachen.

Folge: Mit $\epsilon = \text{const.}$ müssten heutige Quasare $\sim 100\times$ massereiche *und leuchtkräftiger* sein als bei $z \simeq 2$. – Genau das Gegenteil ist der Fall!

Massendichte schwarzer Löcher

Verfeinerter Ansatz: Betrachte gesamte durch AGN-Population emittierte (bolometrische) Leuchtkraft, ausgedrückt als Leuchtkraftdichte ϱ_L . Mit Annahme: *Alle Leuchtkraft stammt aus Akkretion* folgt Mindestmassendichte der schwarzen Löcher in allen Quasaren und möglichen Ex-Quasaren:

$$\varrho_{\text{QSL}} \simeq \frac{\varrho_L}{\eta c^2}$$

(Soltan 1982). Wie kann man ϱ_L bestimmen?

Methode I: Direkte Integration des beobachteten Quasarlichts:

$$\varrho_L = \int_0^\infty f \cdot \mathcal{A}(f) df .$$

Methode II: Integration der Leuchtkraftfunktion:

$$\varrho_L = \int_0^\infty \int_0^\infty L \cdot \phi(L, z) dL \frac{dt}{dz} dz .$$

Für optische QLF, $L_{\text{bol}} \sim 10L_B$ und $\eta \simeq 0.1$ folgt:

$$\varrho_L \approx 3 \cdot 10^{58} \text{ erg Mpc}^{-3} \Rightarrow \varrho_{\text{QSL}} \gtrsim 2 \cdot 10^5 M_\odot \text{ Mpc}^{-3} ,$$

ist noch eine untere Grenze, die erhöht werden müsste um folgende Beiträge:

- Akkretion „im Verborgenen“, d.h. durch absorbierte AGN-Population
- Akkretion mit niedriger Effizienz (ADAF etc.)

Vergleiche mit direkter Bestimmung der dunklen Zentralobjekte in Zentren großer Galaxien! Benutze revidierte Magorrian-Beziehung

$$M_{\text{SL}} \simeq 2 \cdot 10^{-3} M_{\text{sph}}$$

und berechne Massendichte aus beobachteter LF von Galaxien. Es ergibt sich

$$\varrho_{\text{GSL}} \simeq 2 \cdot 10^5 M_\odot \text{ Mpc}^{-3} .$$

\Rightarrow Hauptmechanismus für Entstehung Schwarze Löcher in heutigen Galaxien ist Kernaktivität! Alle Galaxien mit SL waren einmal AGN.