Heller als tausend Sonnen: Quasare und ihre Verwandten

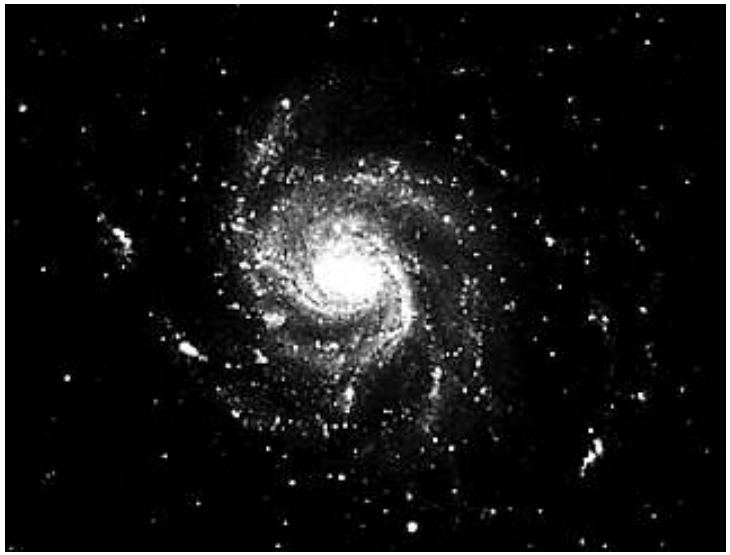
Andrei Saveliev - La Villa

August/September 2006

Gliederung

Einleitung: Allgemeines zu den AGN.....3
Die Geschichte der Entdeckung.....6
Die Rotverschiebung und ihre Folgen.....9
AGN als Schwarze Löcher.....21
Aufbau.....26
Energie- und Strahlungsmechanismen.....28
Aktuellere Entwicklungen.....36
Quellenangaben.....40

Galaxieformen



M 101 – eine Spiralgalaxie
im Sternbild Großer Wagen

Die elliptische Galaxie NGC
1316 im Sternbild Ofen

Einteilung nach
der äußeren Form

Eine andere Klassifikation

Viele Galaxien haben sog. „aktive Kerne“ (Active Galactic Nuclei/AGN), Unterkategorien:

- BL Lacertae-Objekte
- Seyfert-Galaxien
- Radiogalaxien
- Quasare
- ...

Aktive Galaxien: Eigenschaften

Die allgemeinsten Eigenschaften der aktiven Galaxien:

1. Von der Erde aus erscheinen sie sternförmig
2. Sie sind sehr hell
3. Die Kerne sind sehr kompakt

Die Geschichte: BL Lacertae

Cuno Hoffmeister
(1892-1968)

1929 entdeckt Hoffmeister ein veränderliches Objekt im Sternbild Eidechse

Fälschlicherweise betrachtet er dieses als einen veränderlichen Stern.

Die Geschichte: Seyfert-Galaxien

1943 entdeckt Carl Seyfert Galaxien mit sehr hellen punktförmigen Kernen

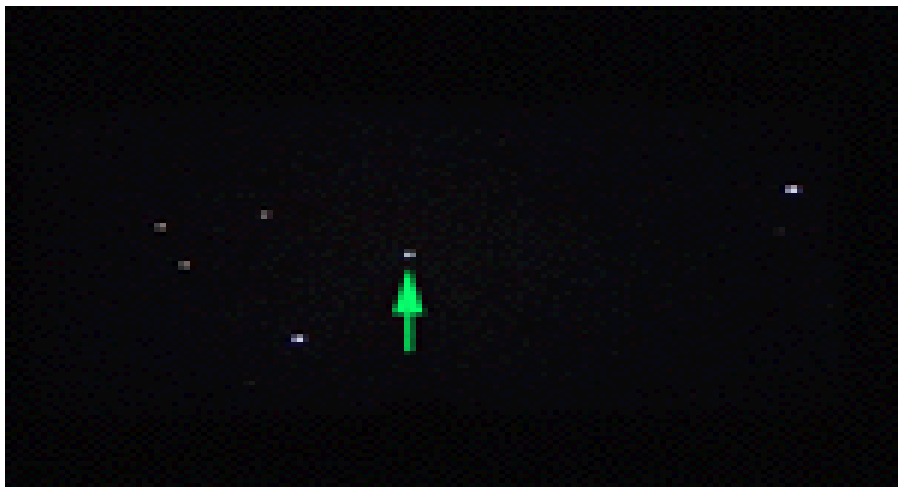
Er fand, dass hier sehr heißes ionisiertes Gas ausströmen musste

Carl Seyfert
(1911-1960)

Die Geschichte: Radioastronomie

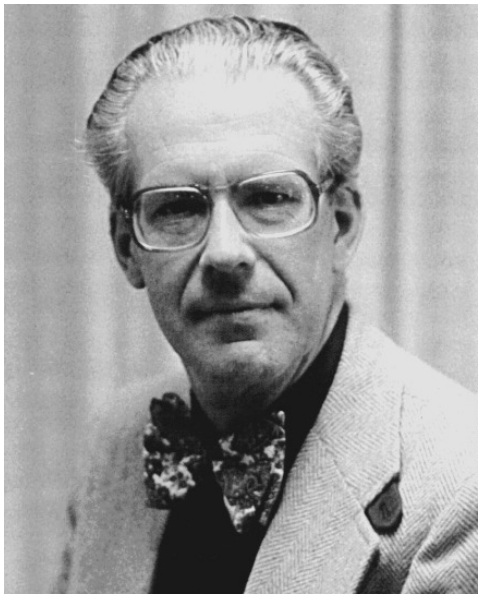
In den 50er Jahren entdeckte man zahlreiche Radioquellen am Himmel. Das Problem war, sie den sichtbaren Objekten zuzuordnen.

Dies gelang u. a. bei 3C48 und 3C273, die man einem hellen Stern zuordnete.



Das Radioobjekt 3C48

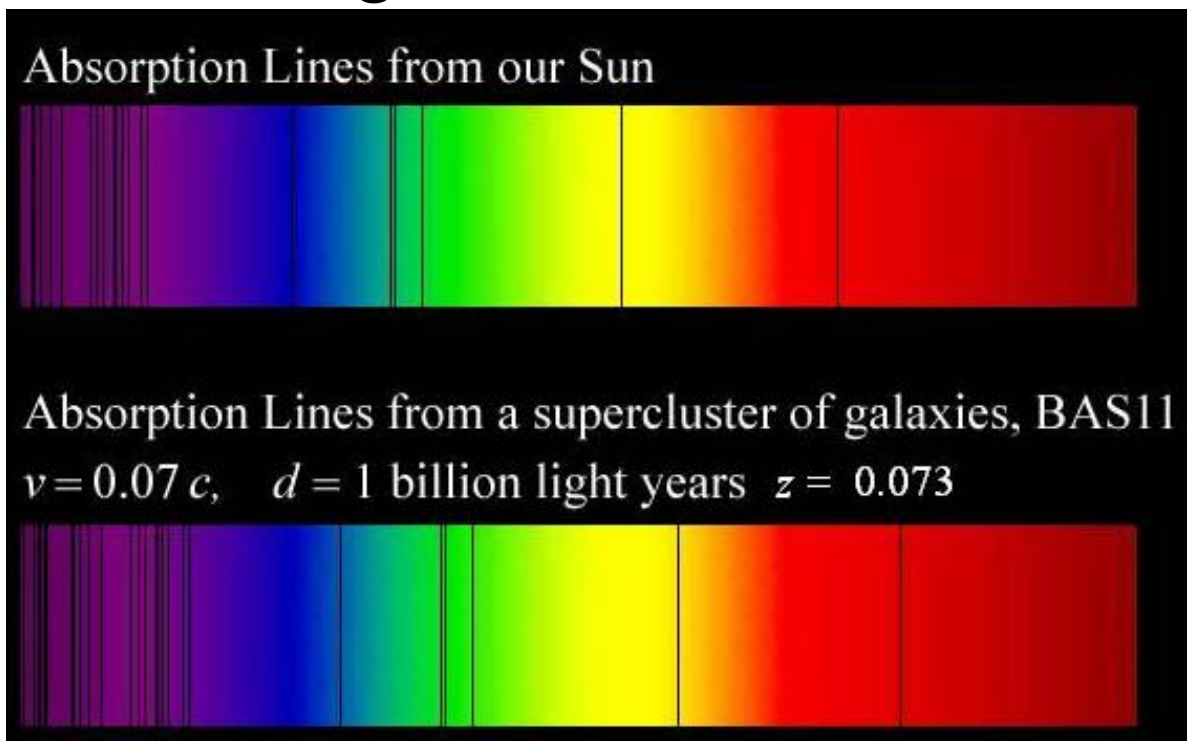
Der Durchbruch: 3C273



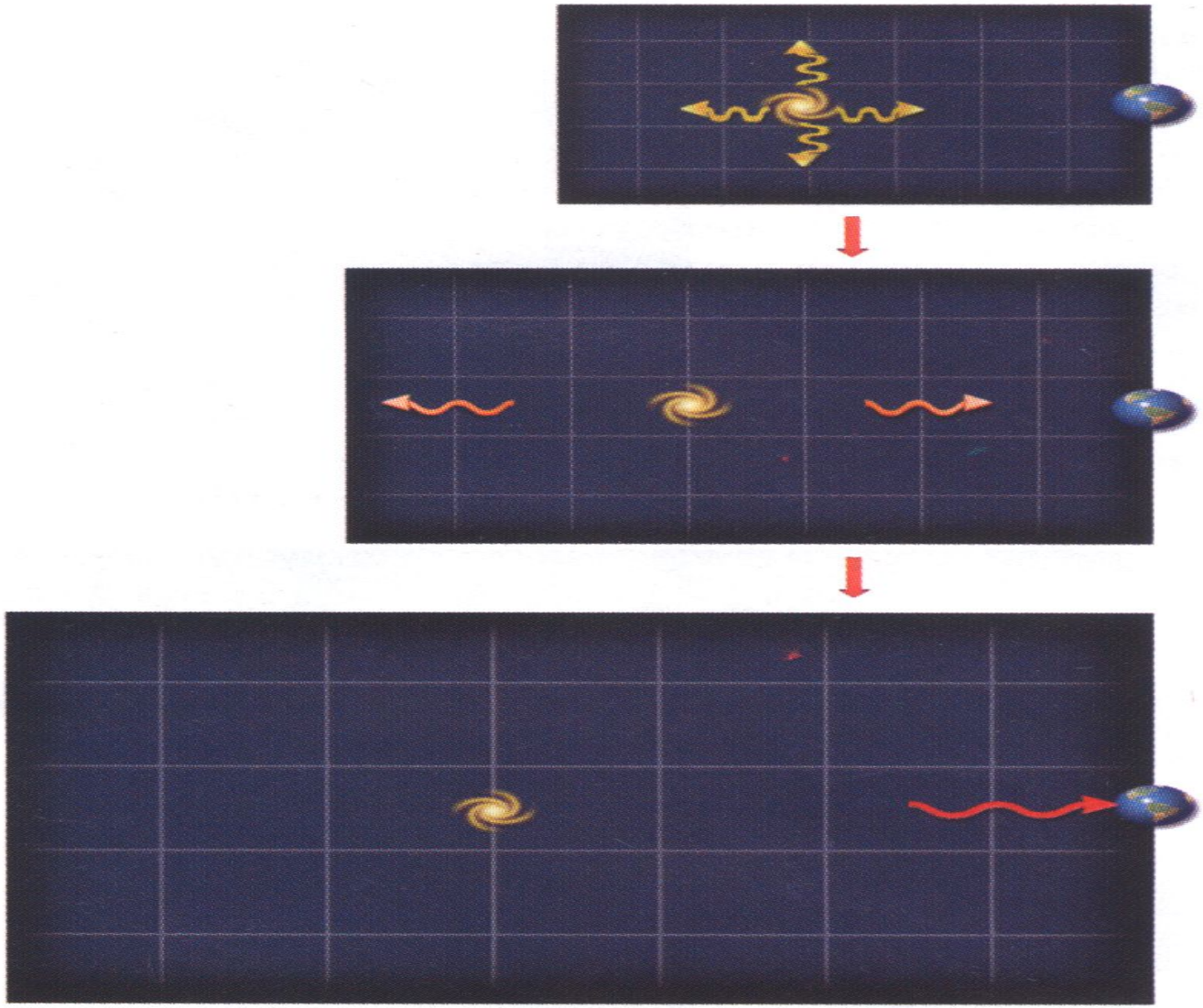
Maarten Schmidt (*1929)

Schmidt entdeckte u. a. das Wasserstoffspektrum, es hatte jedoch eine Rotverschiebung von z = 0,158

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$



Das Problem des Spektrums



Die kosmo-logische Rotver-schiebung

Das Problem des Spektrums

3C273: z=0,158 3C48: z=0,37

Annahme: kosmologische Rotverschiebung, die Wellenlänge expandiert mit dem Universum

Ein Photon wird von der Quelle aus der Entfernung s_0 zur Zeit t_0 ausgesandt und kommt bei uns zur Zeit $t_0+\Delta t$ an: $s_0=c\,\Delta t$.

Das Problem des Spektrums

Expandiert das Universum beim Objekt mit v, so ist $s_1=s(t_0+\Delta t)=(v+c)\,\Delta t$.

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{s_1 - s_0}{s_0} = \frac{(v+c)\Delta \mathrm{t} - c\Delta t}{c\Delta t} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = zc$$

Hubblesche Beziehung : $v = Hs \Leftrightarrow s = \frac{v}{H} = \frac{zc}{H}$

Hier ist $\mathrm{H} = 71 \pm 6 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s\,Mpc}}$ die Hubble-Konstante und man erhält :

Das Problem des Spektrums

3C273: s = 2,06 10^{25} m = 2,2 Mrd. Lichtjahre

3C48: s = 4,82 10^{25} m = 5,1 Mrd. Lichtjahre

Außerdem: Keine thermische Strahlung!

Kann das sein?

Das Problem

Es sah aus wie ein Stern, konnte aber keiner sein!

Die „Lösung“

Die „Geburt“ einer neuen Klasse:
Quasistell***ar***e Radioquellen bzw.
Quasistell***ar***e Objekte (QSO)

Quasare: Benennung

Erste Möglichkeit: Katalog und Nummer des Objekts im Katalog, z. B. 3C48, 3C273

Zweite Möglichkeit:

Q oder QSO, dann Rektaszension und Deklination, z. B. QSO 1059+730

ODER

Katalog, dann Rektaszension und Deklination, z. B. PKS 0000-330

Quasare: Die Kontroverse

Zweite Deutung: Hohe Geschwindigkeit, Quasare als „Geschosse“ (rel. Dopplereffekt)

Verkürzung von λ_0 durch Relativbewegung: $\lambda = \lambda_0 - \mathrm{v} T_0$

$\Rightarrow$ Verk. von T_0: $T = \frac{\lambda}{c} = \frac{\lambda_0 - \mathrm{v} T_0}{c} = \frac{c T_0 - \mathrm{v} T_0}{c} = (1 - \frac{\mathrm{v}}{c}) T_0$

Unter Beachtung der Zeitdilatation $T' = T / \sqrt{1 - (\frac{\mathrm{v}}{c})^2}$:

$$T' = \frac{(1 - \frac{\mathrm{v}}{c}) T_0}{\sqrt{1 - (\frac{\mathrm{v}}{c})^2}} = (1 - \beta)\gamma T_0 \Leftrightarrow \nu' = \frac{\nu}{(1 - \beta)\gamma}$$

Doch wo ist dann die Blauverschiebung?

Quasare: Die Kontroverse

Dritte Deutung: Eine ganz andere, neue Ursache, z. B. ein überstarkes Gravitationsfeld

Wollen die Photonen ein Gravitationspotential verlassen, so müssen sie die gekrümmte Raumzeit überwinden und verlieren dadurch Energie

Meist nur spekulative Vermutungen

Quasare: Die Kontroverse

Heute: Allgemeine Akzeptanz der ersten Deutung

Argumente dafür sind:

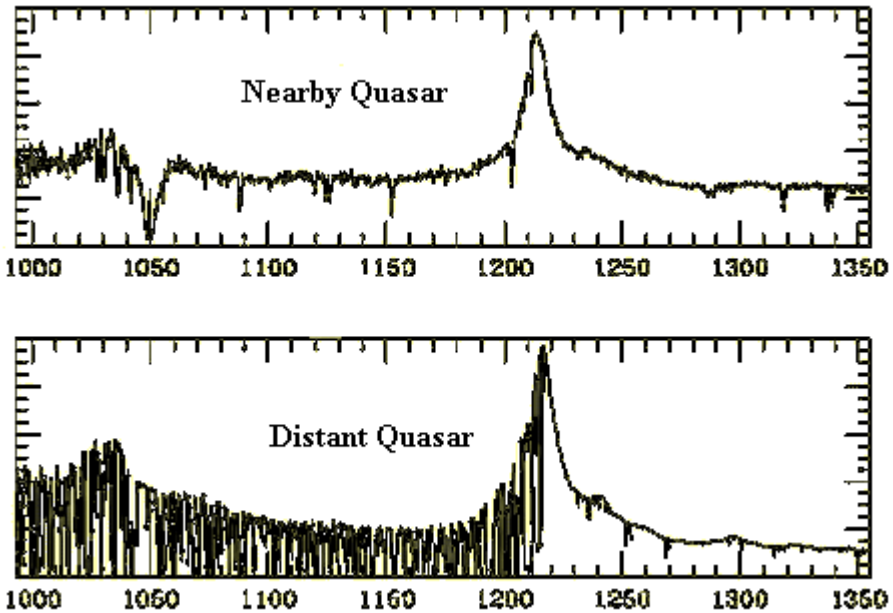
- Quasare haben ähnliche Rotverschiebungen wie Galaxien, mit denen sie Gruppen bilden

- Gravitationslinsen

Aber: Ganz sicher ist es nicht!

Nochmals: Das Spektrum

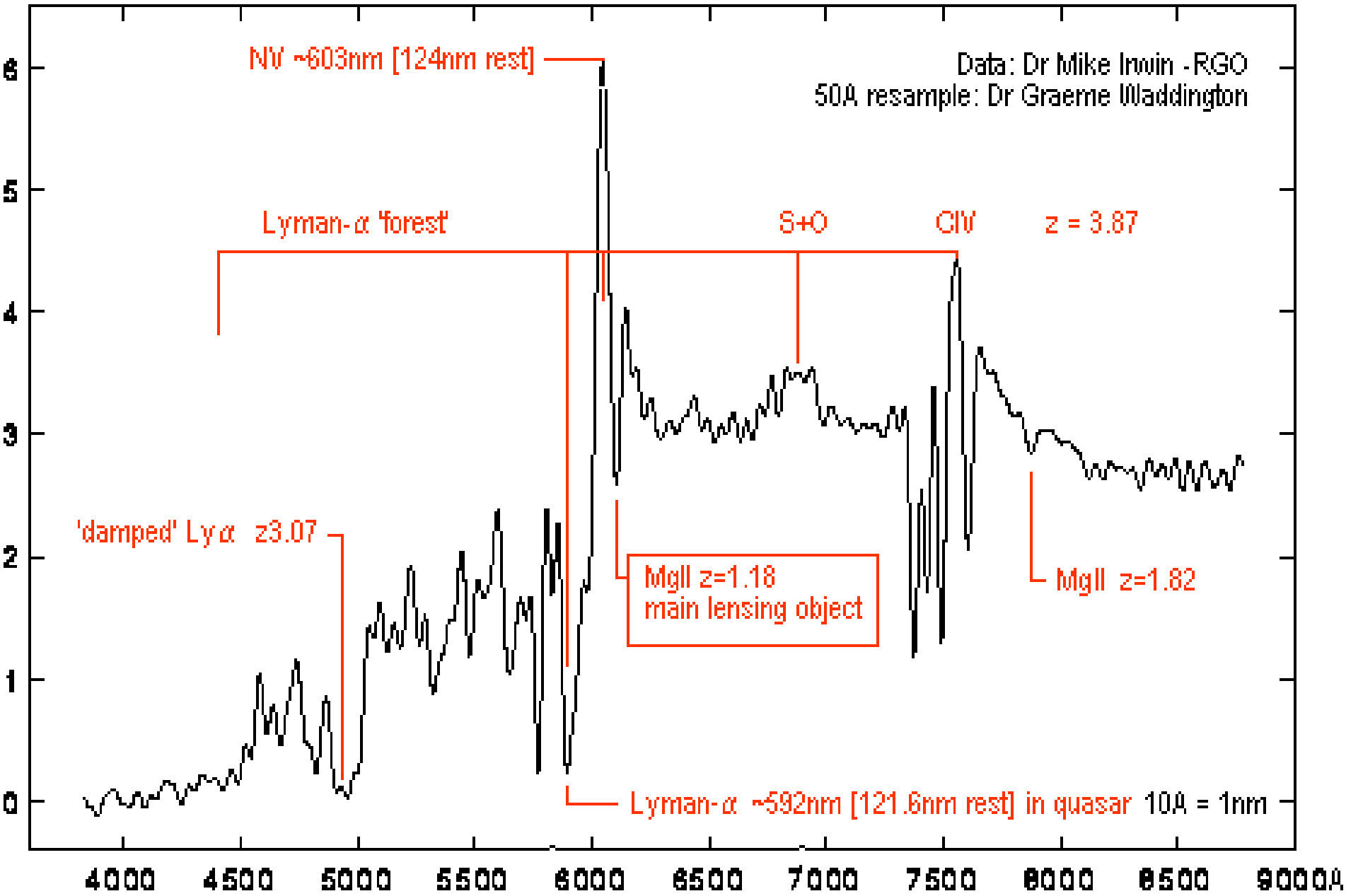
Emissionslinien v. a. von: H_2, O_2, C, Ne, Mg, He



Verbreiterung der Emissionslinien durch den Dopplereffekt der schnell austretenden Materie

Lyman-α-Wald

Quasar APM 08279+5255 in Lynx mag15.2; range ~12BLY; vel 92%c; gravitationally lensed



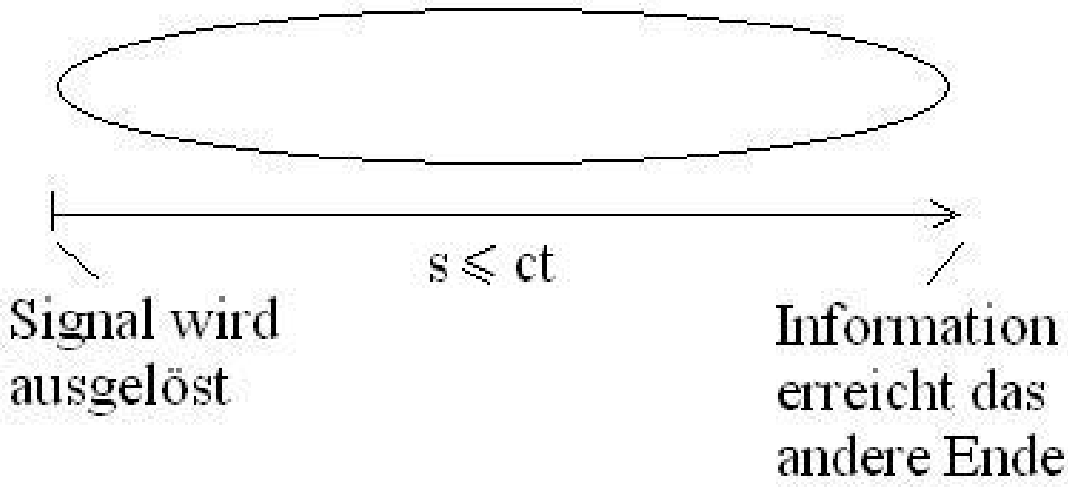
Was sind Quasare?

Was kann solche Eigenschaften besitzen?

Ein Schwarzes Loch?

Quasare als Schwarze Löcher

Unterschiedliche Helligkeits-
schwankungen: Tage bis Jahrzehnte



Abschätzung aus Hellig-
keitsvariationen

Durchmesser: Im Größenbereich unseres
Sonnensystems

Quasare als Schwarze Löcher

Leuchtkraft: 10^{12} bis 10^{15} Mal so groß wie die der Sonne, bis zu 10.000 Mal stärker als die Wirtsgalaxie, entspricht 10^{38} bis 10^{42} W

Massenabschätzung über die Leuchtkraft

Annahmen: - „gleichbleibende“ Leuchtkraft
- Alter des AGN: Ca. 100 Mill. Jahre
- Wirkungsgrad: 5%, Hälfte der akkretierten Masse bleibt im Loch

$$M \approx \frac{10\ L\ T}{c^2}$$

Quasare als Schwarze Löcher

Massenabschätzung über den Strahlungsdruck

Damit Materie (Elektronen) einfallen kann, muss $F_{str} < F_{grav}$ sein.

$$F_{str} = \sigma_T \frac{L}{4\pi r^2 c} \left(\sigma_T = \frac{e^4}{6\pi\varepsilon_0^2 m_e^2 c^4}\right); \; F_{grav} = G\frac{Mm}{r^2}$$

$$\sigma_T \frac{L}{4\pi r^2 c} < G\frac{Mm}{r^2} \Leftrightarrow L < \frac{4\pi GMmc}{\sigma_T} \Leftrightarrow M > \frac{\sigma_T}{4\pi Gmc} L$$

Mit beiden Methoden ergeben sich Massen, die das 10^6-(Seyfert-Galaxien) bis 10^{10}-fache der Sonnenmasse betragen, also ca. 10^{36} kg bis 10^{40} kg

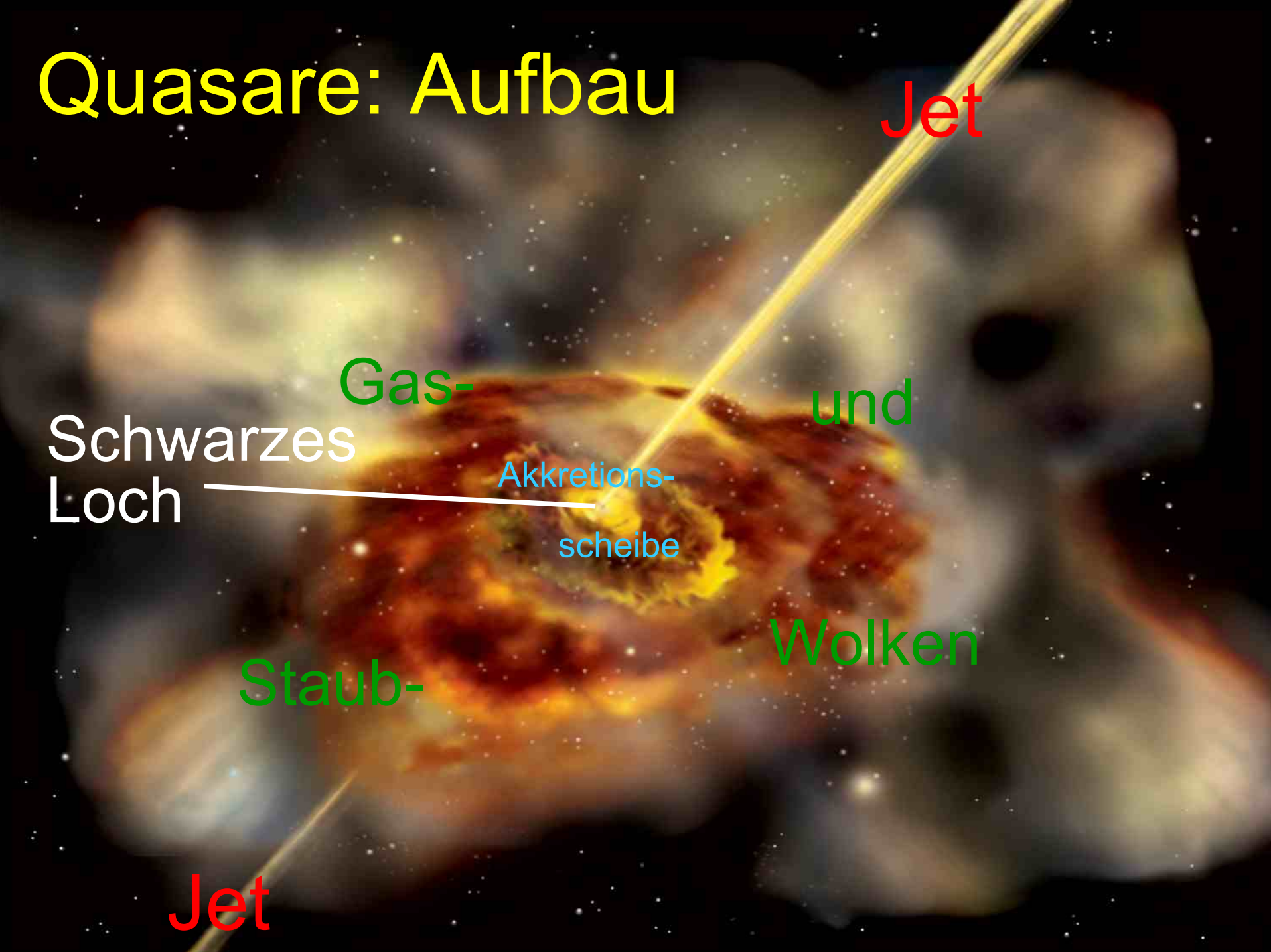
Quasare als Schwarze Löcher

Kompaktheit eines Objekts: $\frac{M}{R} < \frac{c^2}{G}$

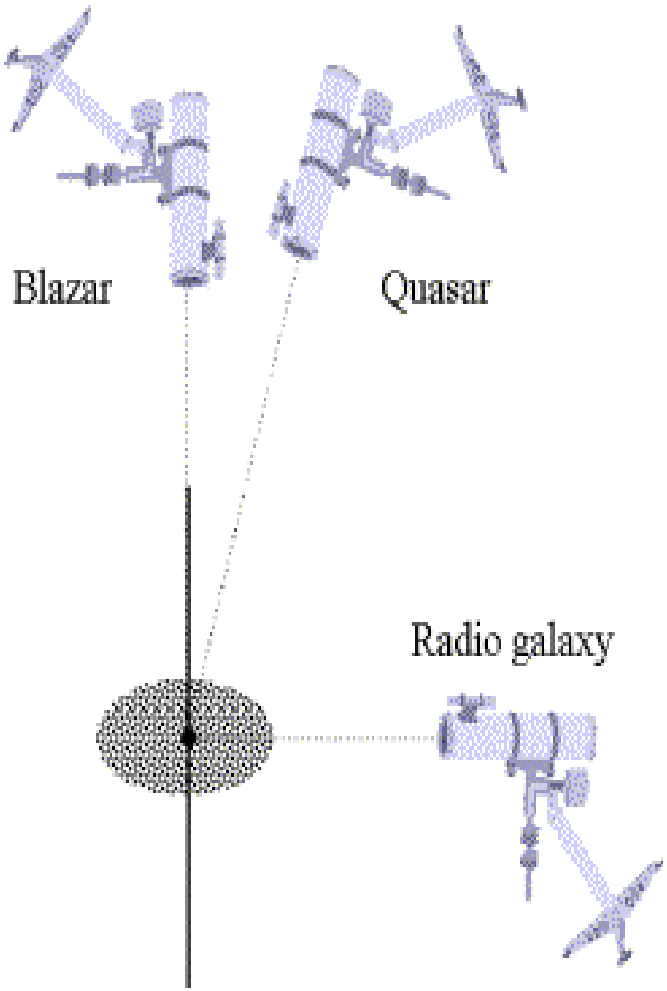
Bei den AGN ergibt sich: $\frac{M}{R} > 0{,}001 \frac{c^2}{G}$

Dient als ***Hin***weis, aber nicht als ***Be***weis für ein Schwarzes Loch!

Quasare: Aufbau



Viele Namen – ein Phänomen



Blazar: Blickrichtung fast parallel zum Jet – hochenergetische Strahlung

Quasar: Blickrichtung zw. ca. 10° und 90° zum Jet – „gemäßigt“

Radiogalaxie: Blickrichtung fast senkrecht zum Jet - Radiostrahlung

Quasare: Energiegewinnung

Zwei Energiequellen:

Akkretion von Materie

Je kompakter das Objekt, desto höher der „Wirkungsgrad“

Abführen der Rotationsenergie: „Aufheizung“

Quasare: Energieabstrahlung

Praktisch alle Wellenlängen durchgehend vertreten

Exzesse der Intensität in bestimmten Wellenbereichen

Aufheizung; Verwirbelung der Magnetfelder

Quasare: Energieabstrahlung

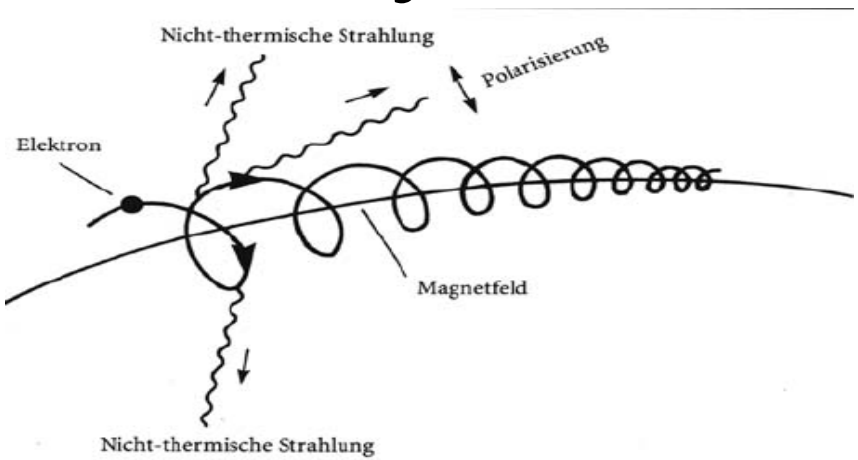
- Schwarzes Loch durch Akkretion

-Radiobereich: Synchrotronstrahlung

- Infrarotbereich: „Wiederaufbereitung“ durch Staubwolken (thermische Strahlung durch Aufheizung auf >50 K)

- Blauer Exzess im UV-Bereich: thermische Strahlung des Scheibenzentrums (10^4-10^5 K)

Synchrotronstrahlung



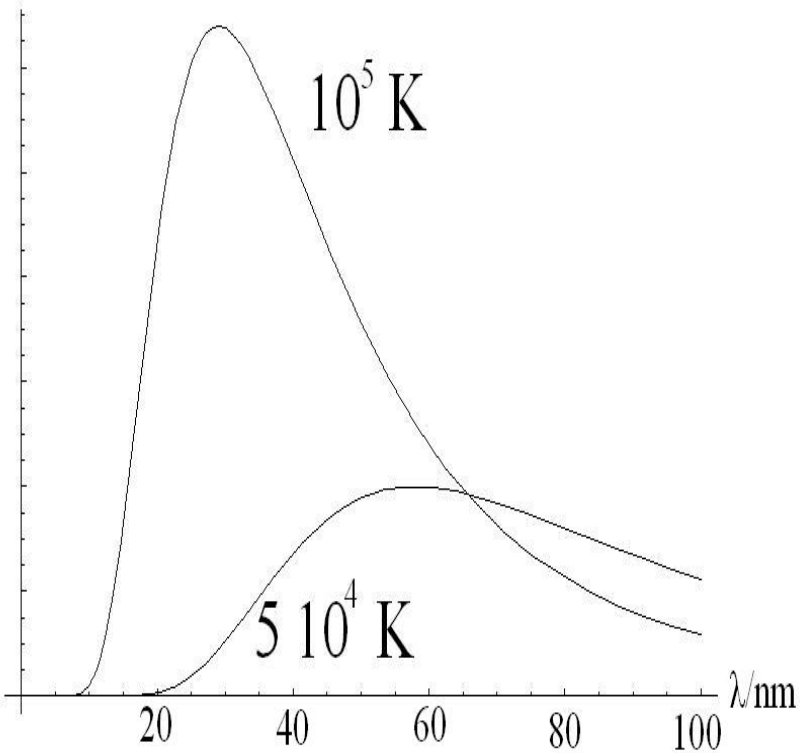
Grundlage: Bewegte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab.

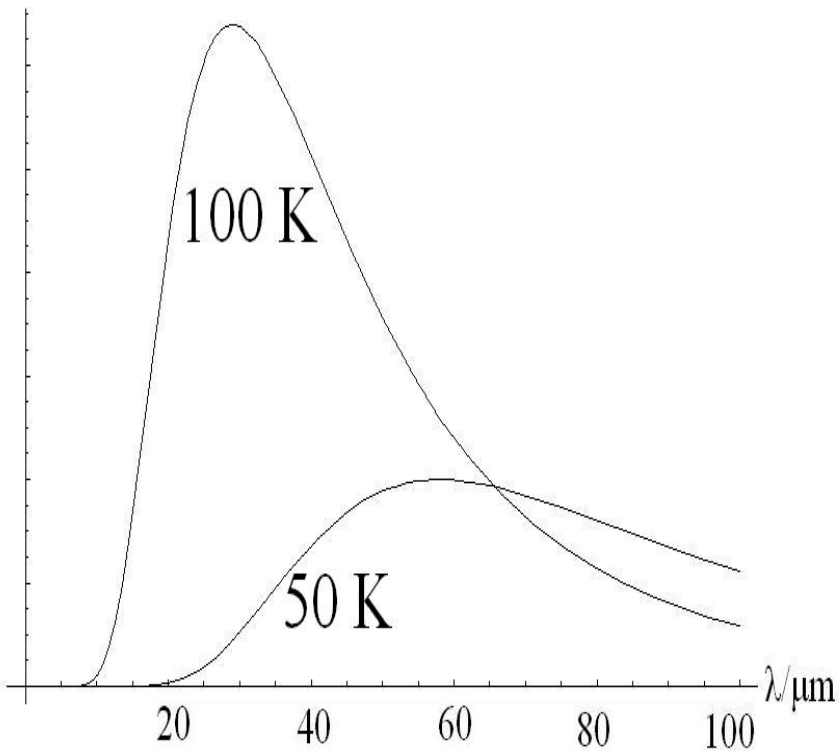
Synchrotron:

- kontin. und pol. Strahlung mit $\varphi = \frac{m_e c^2}{E}$
- Maximum bei $\lambda_m = \frac{1}{0,29} \frac{4\pi}{3} \frac{m_e c}{eB_\perp} \left(\frac{m_e c^2}{E}\right)^2$
- Beispiel : $E = 1,5\ GeV,\ B_\perp = 10^{-10}\ T : \lambda_m \approx 30\ m$

Thermische Strahlung

Plancksche Strahlungsformel $I = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{k\lambda}) - 1}$





Inverser Comptoneffekt

Röntgen-/Gammabereich: Inverser Comptoneffekt in Jets

Im Schwerpunktsystem des Elektrons hat das sich auf es zu bewegende Photon der Energie E (im Laborsystem) die Energie

$$E^* = \frac{E}{\gamma(1-\beta)} = E\gamma(1+\beta)$$ (rel. Dopplereff.).

Hier ist $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$, $\beta = \frac{|v|}{c}$ und $E_{Ph} = h\nu$

Inverser Comptoneffekt

Näherungen (für große v):

- $E^{*\prime} \approx E^*$ (Energie bleibt nach Stoß ca. gleich)

- Sonderfall: Streuungswinkel gleich 180°

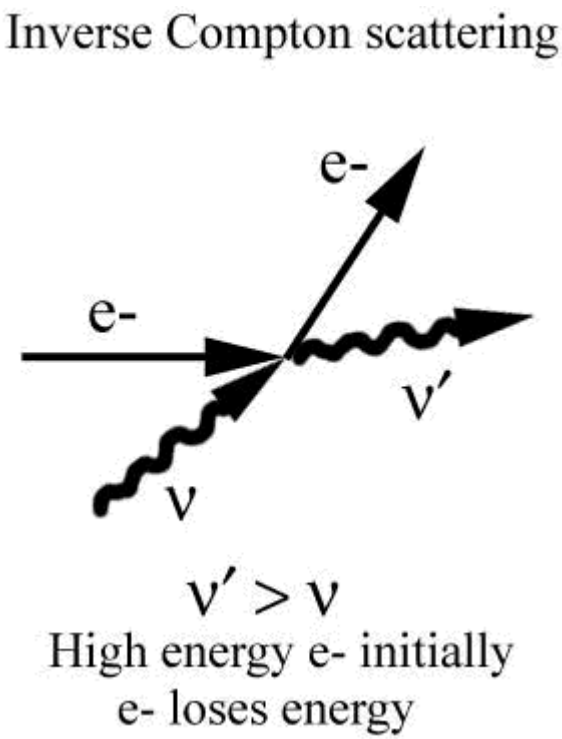
Rücktransformation nach Stoß :

$$E' = \frac{E^{*\prime}}{\gamma(1-\beta)} \Leftrightarrow E' = E^{*\prime}\,\gamma(1+\beta),$$ also $E' = E^{*\prime}\,\gamma(1+\beta) \approx$

$$\approx E^*\,\gamma(1+\beta) = E\gamma^2(1+\beta)^2 \approx 4\gamma^2 E = E'_{\max}.$$ Es ist $\overline{E}' \approx \frac{1}{3} E'_{\max}$,

also $\overline{E}' \approx \frac{4}{3}\gamma^2 E = \frac{4}{3}\left(\frac{E_e}{m_e c^2}\right)^2 E$

Inverser Comptoneffekt

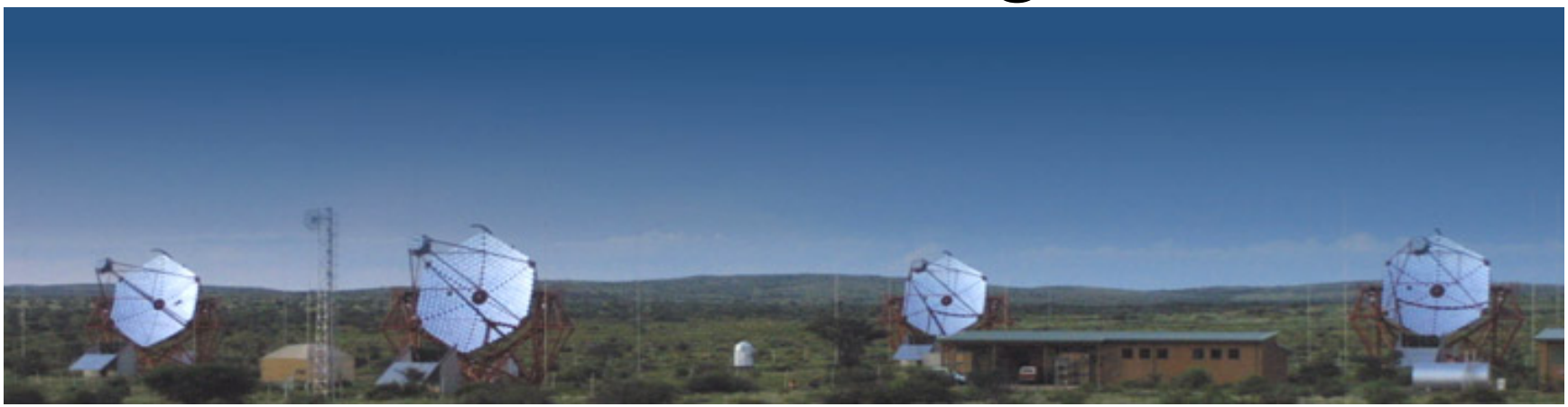


Beispiel:

Elektron mit 100 GeV trifft auf ein Photon mit 2 10^{-5} eV (λ = = 6 cm: Mikro-/ Radiowellen).

Mit der Formel ergibt sich nach dem Stoß ein Photon mit einer Energie von 1 MeV (λ=1,2 pm: Gammastrahlung)

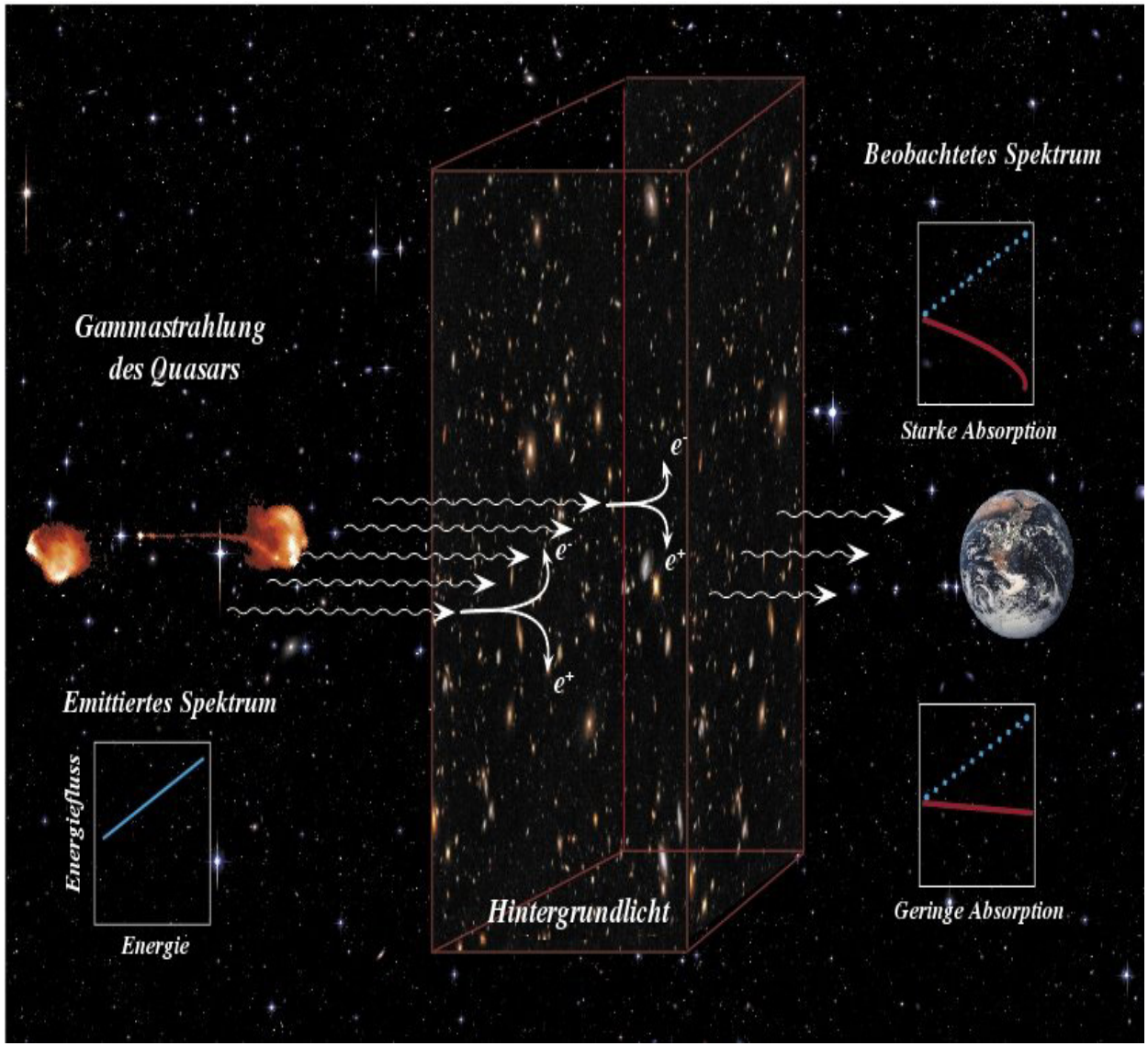
Aktuelle Entwicklungen: HESS



H.E.S.S.=**H**igh **E**nergy **S**tereoscopic **S**ystem, seit 2004 (2002) bei Gamsberg, Namibia

Untersuchung der hochenergetischen Strahlung von Quasaren – daraus lassen sich Schlüsse über die „Durchsichtigkeit“ des Universums ziehen (3 K-Hintergrundstrahlung)

Aktuelle Entwicklungen: HESS

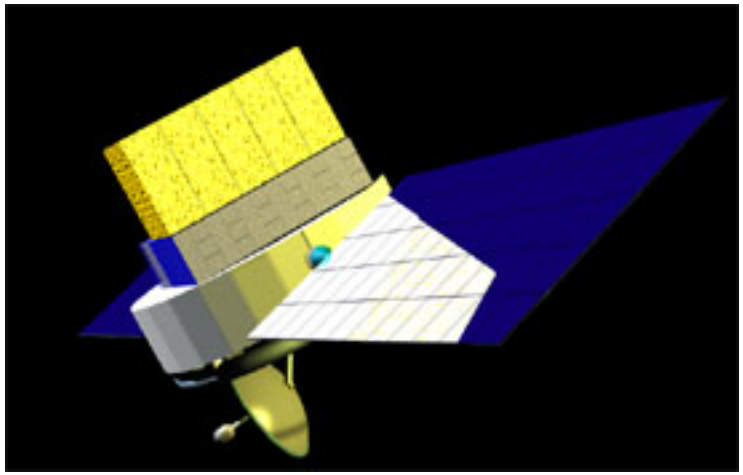


Abschätzung der Obergrenze

„Durchsichtigkeit“ abh. von Energie

Schluß auf Dichte

Aktuelle Entwicklungen: GLAST

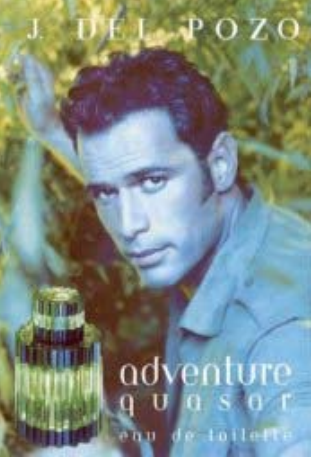


GLAST=**G**amma Ray **L**arge **A**rea **S**pace **T**elescope

Start voraussichtlich 2006

Aufgabe: Untersuchungen von hochenergetischer Strahlung, auch der von AGN

Und auch das sind Quasare:



QUASAR SWING

comp: LARTILLEUX christophe

Swing
♩ = 120

intro

A | C | D | F

Bb 7 13

x1 | x2

Cm | E7sus4 | E7 9b

Bbm / G#/Bb | Cm / G/Bb

A

(S.)

E7 9# | retour sur Thème 1 Reprise

F#m | F#/B | (F#/B) (grille impro.)

(S.S.) | Am | C#m | G#m | Em7/g | E7 : | : D7sus4 | C7sus4 | x3

x4 | x4 | x4 | x2 | x2

x4 | D7 sus4 | % | C7sus4 | Bb7 13 | (S.S.)

lartilleux christophe.
Février 2006

Literatur (1)

- Weigert, Zimmermann: Das ABC-Lexikon Astronomie (Spektrum, 1995, ISBN 3-86025-688-2)
- Schindler: Astrophysik II - Extragalaktische Astrophysik & Kosmologie (Univ. Innsbruck, WS 2005/2006, astro.uibk.ac.at/astrophysik2/AstroII_4.pdf)
- Kolanoski: Einführung in die Astroteilchenphysik (Humboldt-Universität Berlin, WS 2005/2006, www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0506/skripte/cosmics06.pdf)
- Jersák: Expansion des Universums und dunkle Energie (02.02.2006, tpe.physik.rwth-aachen.de/jersak/Expansion+Dunkle-Energie-kurz.ppt)
- GLAST Burst Monitor (GBM) - Auf der Suche nach Gamma-Strahlungsausbrüchen (http://www.dlr.de/rd/fachprog/extraterrestrik/Glast)
- The H.E.S.S. project - an Array of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/)
- MPG: Das kosmische Glimmen - schwächer als gedacht (24.04.2006, http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2006/pressemitteilung20060424/index.html)
- Reuther: Kosmologische Rotverschiebung - Hauptseminar Kosmologie 2004 (Univ. Stuttgart, 25.05.2004, itp1.uni-stuttgart.de/lehre/hauptseminar/ss2004/6.pdf)
- Baschek, Unsöld: Der neue Kosmos - Einführung in die Astronomie und Astrophysik (Springer, 1999, ISBN 3-540-64165-3)

Literatur (2)

- Begelman, Rees: Schwarze Löcher im Kosmos - Die magische Anziehungskraft der Gravitation (Spektrum, 1997, ISBN 3-8274-0105-4)
- North: Viewegs Geschichte der Astronomie und Kosmologie (Vieweg, 1997, ISBN 3-528-06644-X)

Bildquellen (1)

- S. 1: www.hia-iha.nrc-cnrc.gc.ca/media/mediaImages/quasar_simonnet.jpg
- S. 2 (links): http://astrofreunde.com/Kl_Himmelskunde/Nebel_Galaxien/Spiralgalaxie/spiralgalaxie.html
- S. 2 (rechts): www.br-online.de/wissen-bildung/spacenight/sterngucker/deepsky/elliptische-galaxie-gr.html
- S. 6: http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/images/hoffmeister_cuno.jpg
- S. 7: http://www.dyer.vanderbilt.edu/dyer_history.htm
- S. 8: http://www.jplnet.com/trip/subaru/1st/1st150gif/3C48.gif
- S. 9 (links): www.phys-astro.sonoma.edu/BruceMedalists/Schmidt/schmidt.jpg
- S. 9 (rechts): http://stokes.byu.edu/redshift.jpg
- S. 10: tpe.physik.rwth-aachen.de/jersak/Expansion+Dunkle-Energie-kurz.ppt
- S. 19: www.earth.uni.edu/~morgan/astro/course/Notes/section3/forest.gif
- S. 20: www.astroman.fsnet.co.uk/apm_mg.gif
- S. 22: [eigene Zeichnung]
- S. 26: [s. S. 1]
- S. 27: teacher.pas.rochester.edu/Ast102/Exams/Exam2/Exam2Solutions_files/image002.gif
- S. 31: [Quelle unbekannt]

Bildquellen (2)

- S. 32 (links und rechts): [Eigene Zeichnung]
- S. 35: http://venables.asu.edu/quant/proj/Inverse.gif
- S. 36: http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/images/HessT.jpg
- S. 37: http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/PressRelease/EBLPress/EffetEBL-MP_D.jpg
- S. 38: http://www-glast.stanford.edu/images/solar.jpg
- S. 39 (links oben): http://perso.orange.fr/imagesdeparfums/J_Del_Pozo/TN_Adventure_Quasar.jpg
- S. 39 (links mittig): http://www.bodyworkemporium.com/Merchant2/graphics/00000001/Quasar.gif
- S. 39 (links unten): [Quelle unbekannt]
- S. 39 (Mitte): http://c.lartilleux.free.fr/quasar%201.jpg
- S. 39 (rechts oben): http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Quasar-32.jpg
- S. 39 (Mitte-rechts unten): http://www.lemon64.com/index.php?mainurl=http%3A//www.lemon64.com/games/details.php%3FID%3D2040%26coverID%3D2797
- S. 39 (rechts unten): http://www.angib.pwp.blueyonder.co.uk/ff/quasar3.jpg