

Radiolaute Aktive Galaxien



Blasare

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen
Thomas Mittelstaedt

20.01.10

Astrophysikalisches Seminar WS 09/10

1



Inhalt

1. AGN (Wiederholung)
2. Charakterisierung von Blasaren
3. Physik der Jets
4. Forschung an Blasaren





Aktive Galaxien

- Radio bis Gamma Strahlung
- Sehr starke und breite Emissionslinien
- Leuchtkräftigste Objekte im Universum (bis $10^{14} L_{\odot}$)
- Leuchtkraft größer als Summe der Sterne
- Emission aus sehr kleinem Gebiet im Zentrum
(**Active Galactic Nucleus**)
- Rotverschiebung bis zu $z \sim 6$





Die AGN Klassifikation

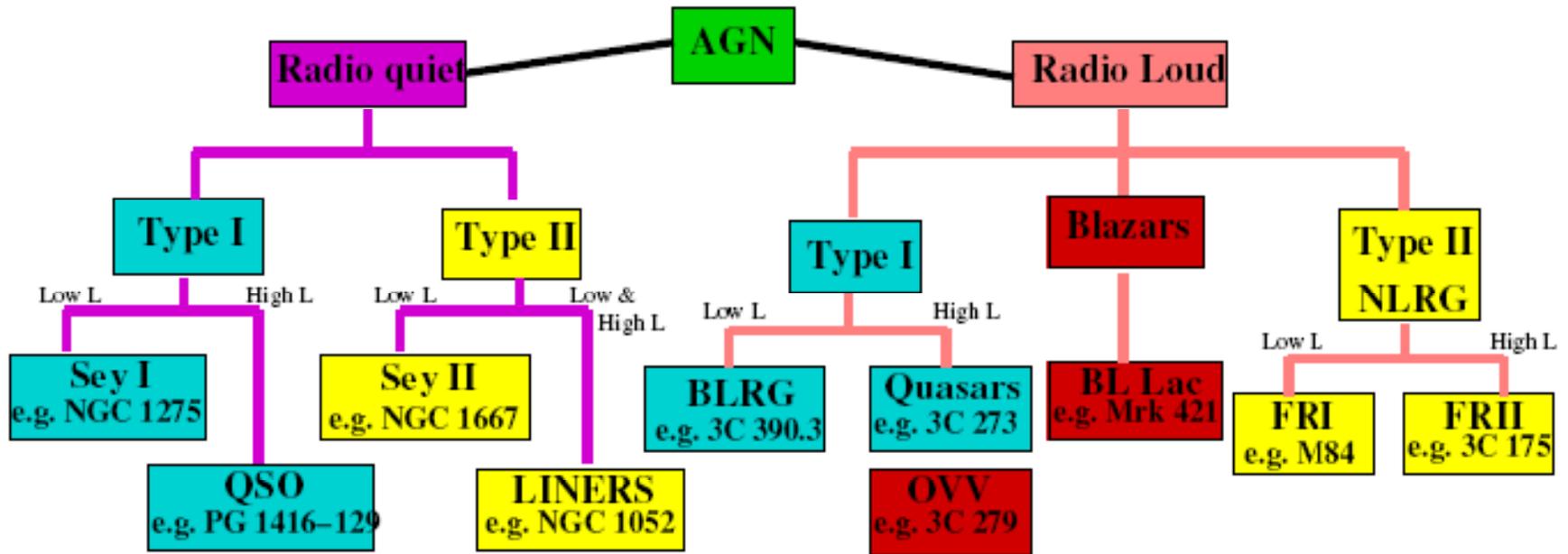
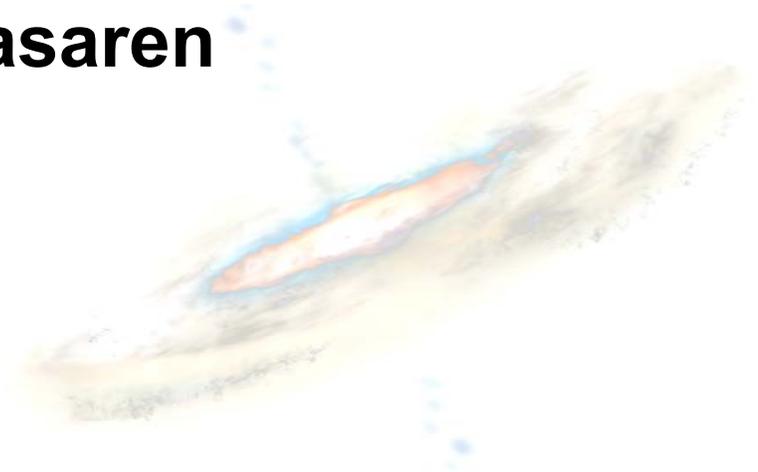


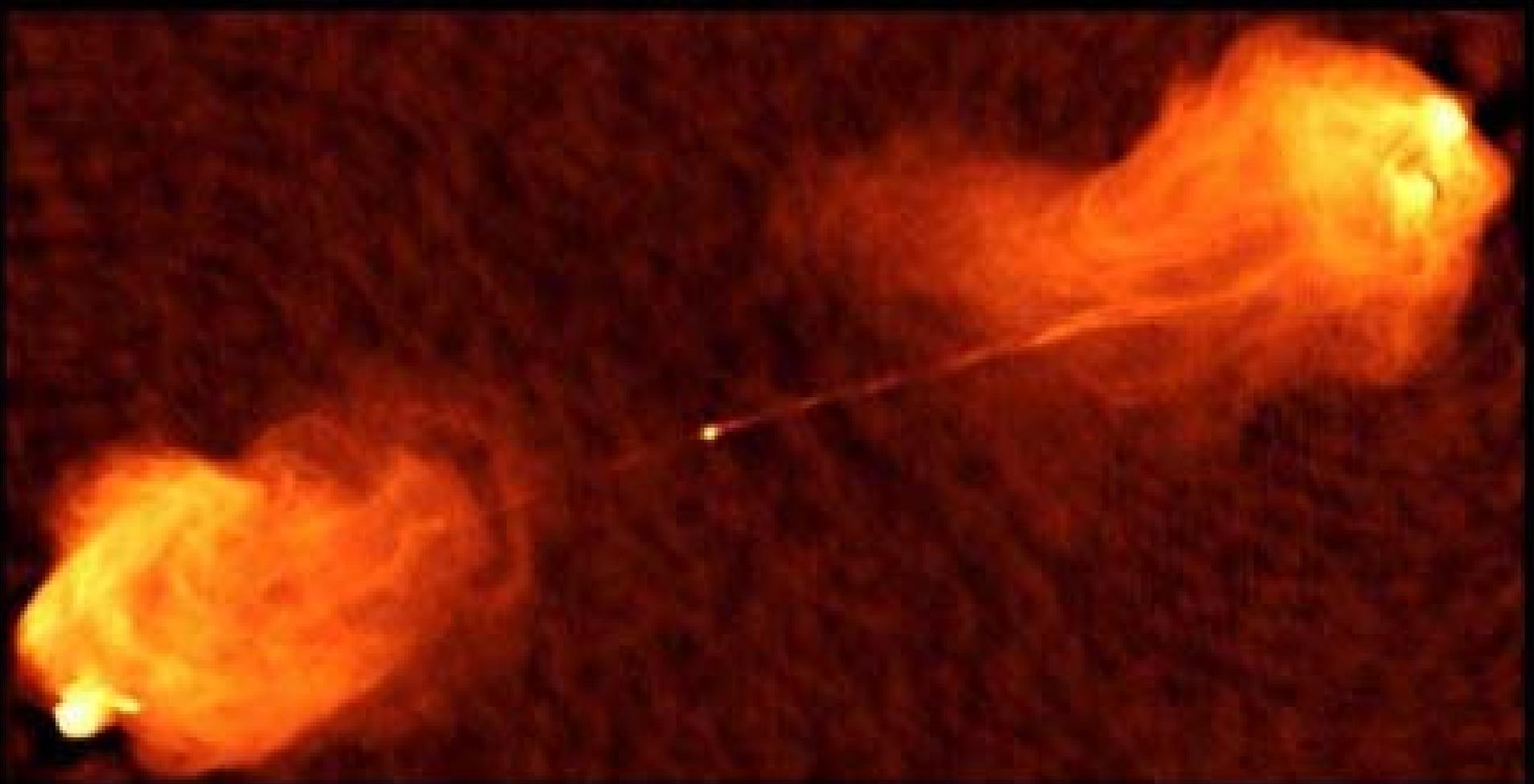
Abbildung 2.1: AGN Klassifikation (aus: Benlloch-Garcia 2004)



Charakterisierung von radiolauten Galaxien/Blasaren



Radiolaut → Jet

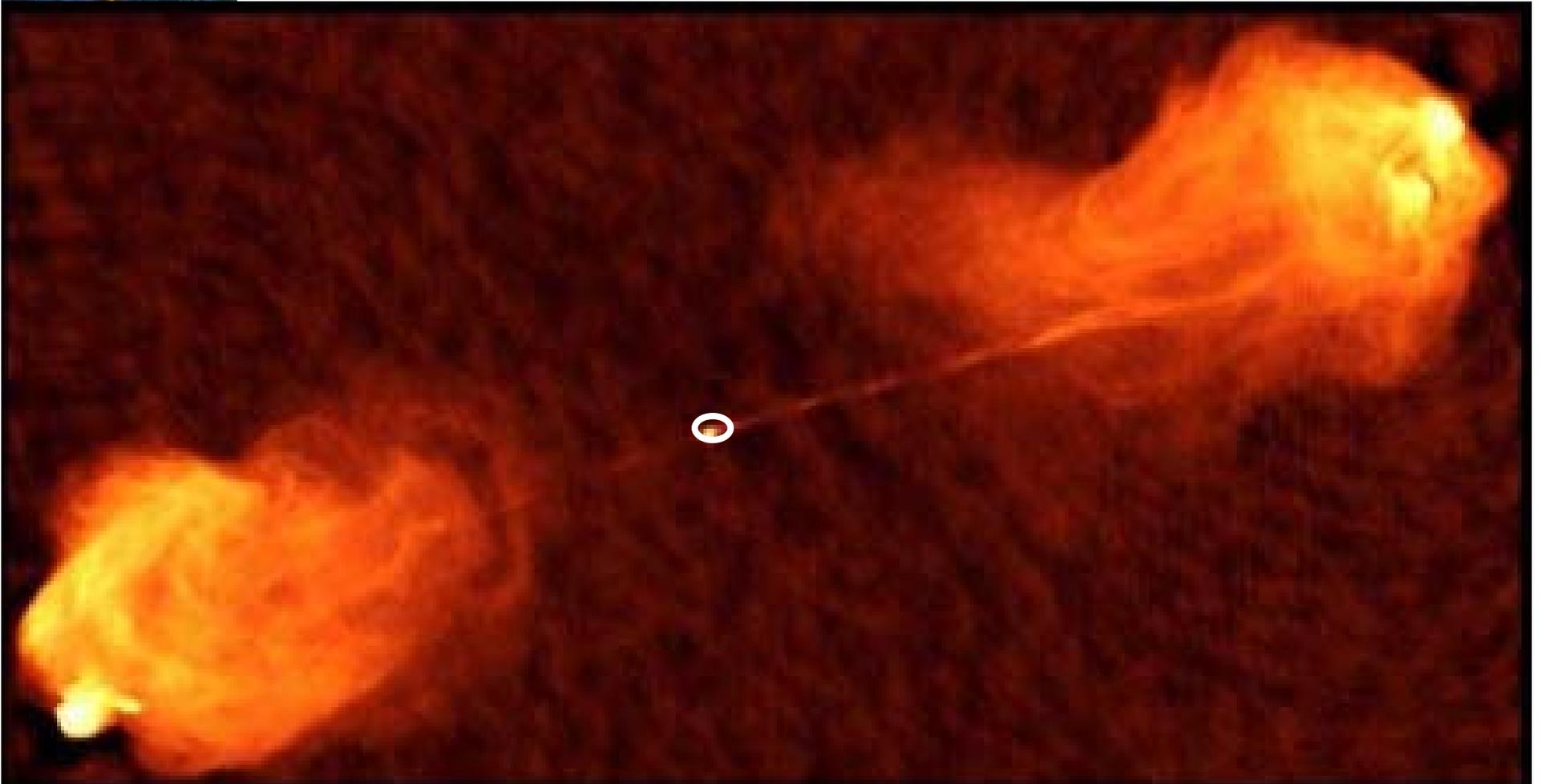


Radio Galaxie Cygnus A

Z= 0,057

Radio (VLA: 6 cm); Credit: NRAO/AUI

Radiolaut → Jet

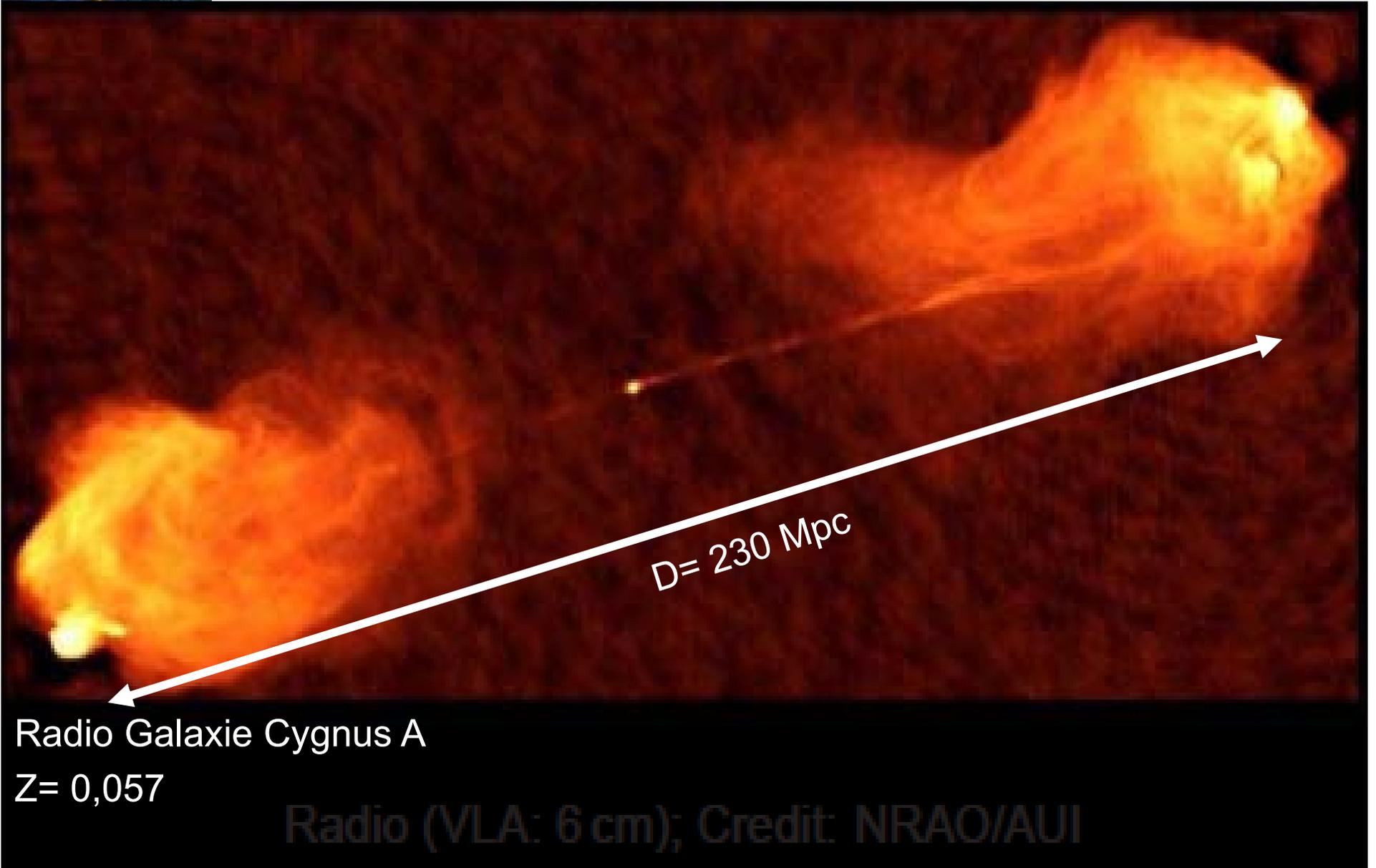


Radio Galaxie Cygnus A

Z= 0,057

Radio (VLA: 6 cm); Credit: NRAO/AUI

Radiolaut → Jet



Radio Galaxie Cygnus A
Z= 0,057

Radio (VLA: 6 cm); Credit: NRAO/AUI

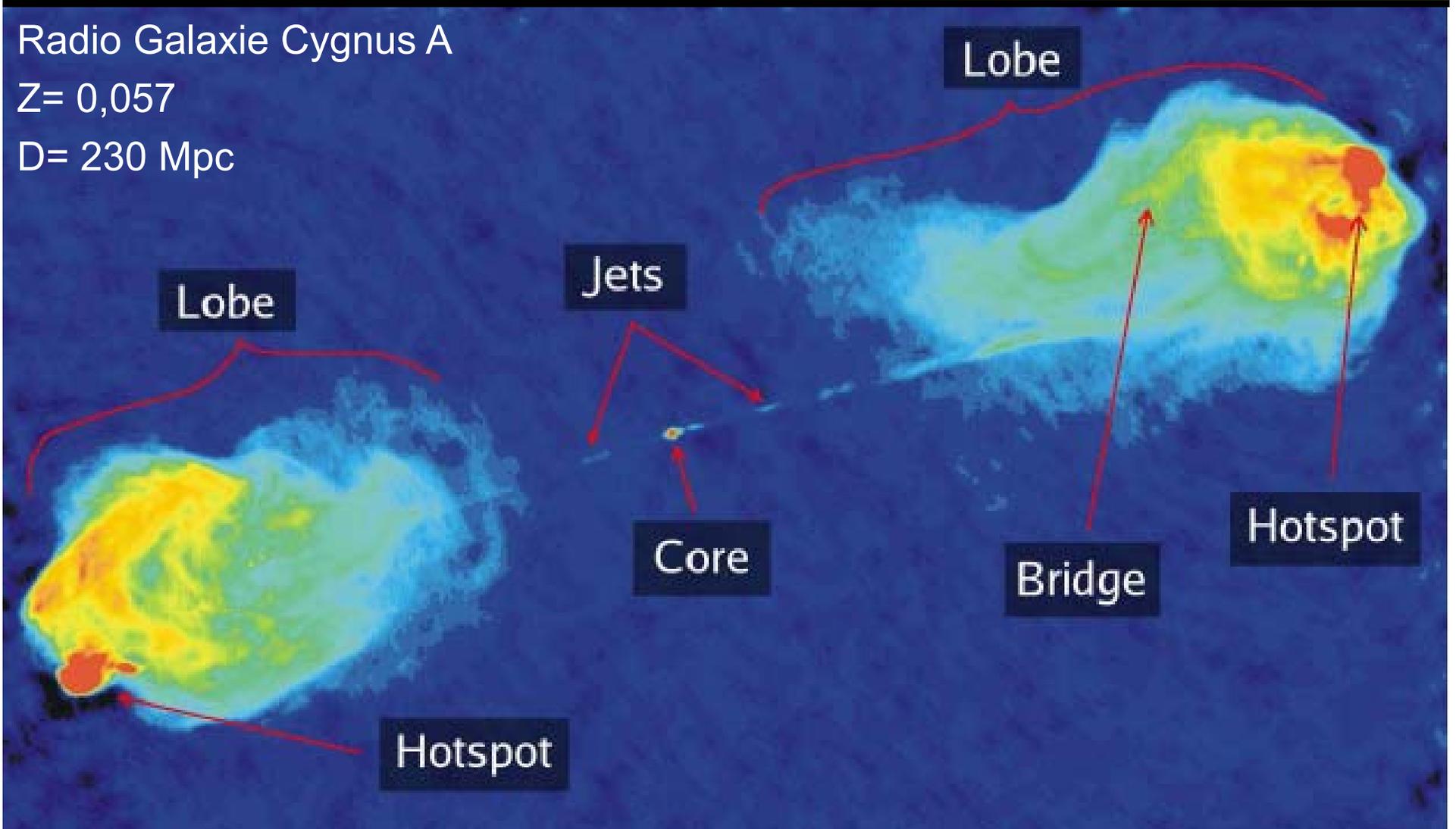
Radiolaut



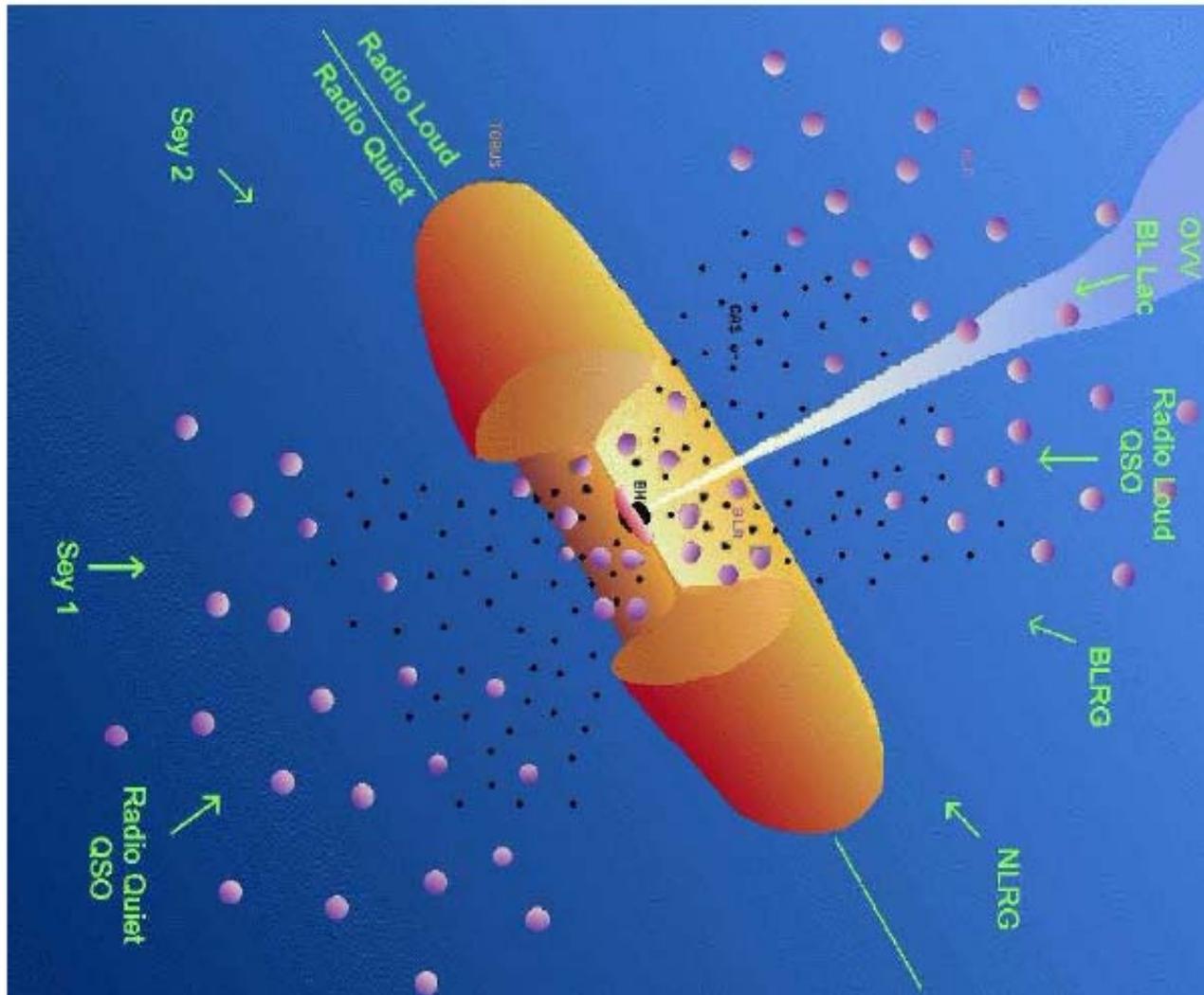
Radio Galaxie Cygnus A

$Z = 0,057$

$D = 230 \text{ Mpc}$



Standard Modell



Distances:

Accretion disc:
 $r \sim 10^{-3}$ pc,

Broad Line Region (BLR):
 $r \sim 0.01\text{--}0.1$ pc
 (=light days or less),

Torus:
 $r \sim 1\text{--} \text{few } 10$ pc,

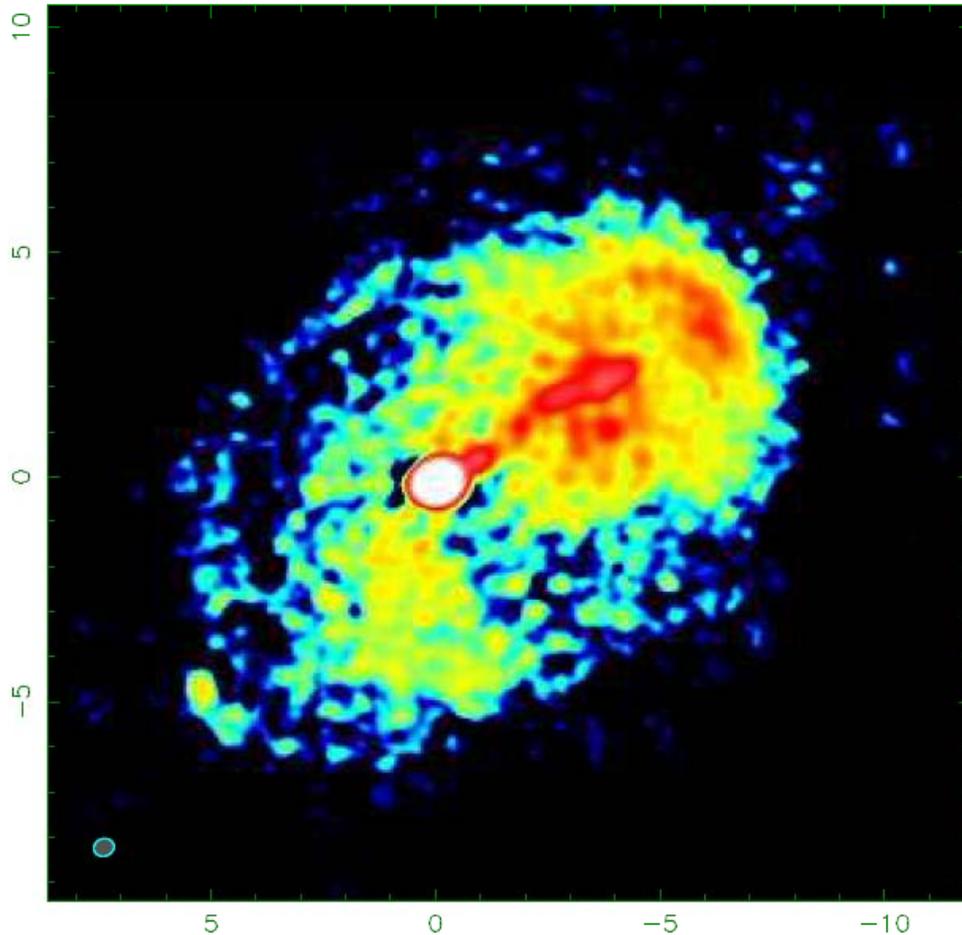
Narrow Line Region (NLR):
 $r \sim 100\text{--}1000$ pc,

Jet:
 Einige hundert Mpc

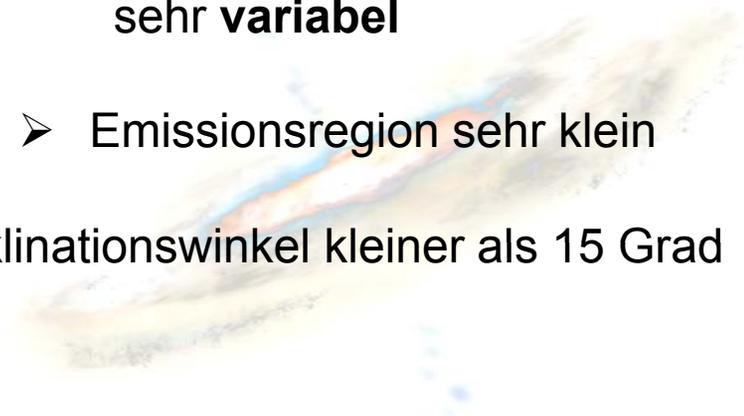


Typischer Blasar

Clean I map. Array: VLA
0716+71 at 8.415 GHz 1990 Jun 19



- **Elliptische** Wirtsgalaxie
- kompakten Radiokern
- **Gammaleuchtkraft übertrifft** sie sogar die leuchtkräftigen **Quasare**
- über den gesamten Spektralbereich sehr **variabel**
 - Emissionsregion sehr klein
- Inklinationswinkel kleiner als 15 Grad





Physik der Jets





M87

The M87 Jet



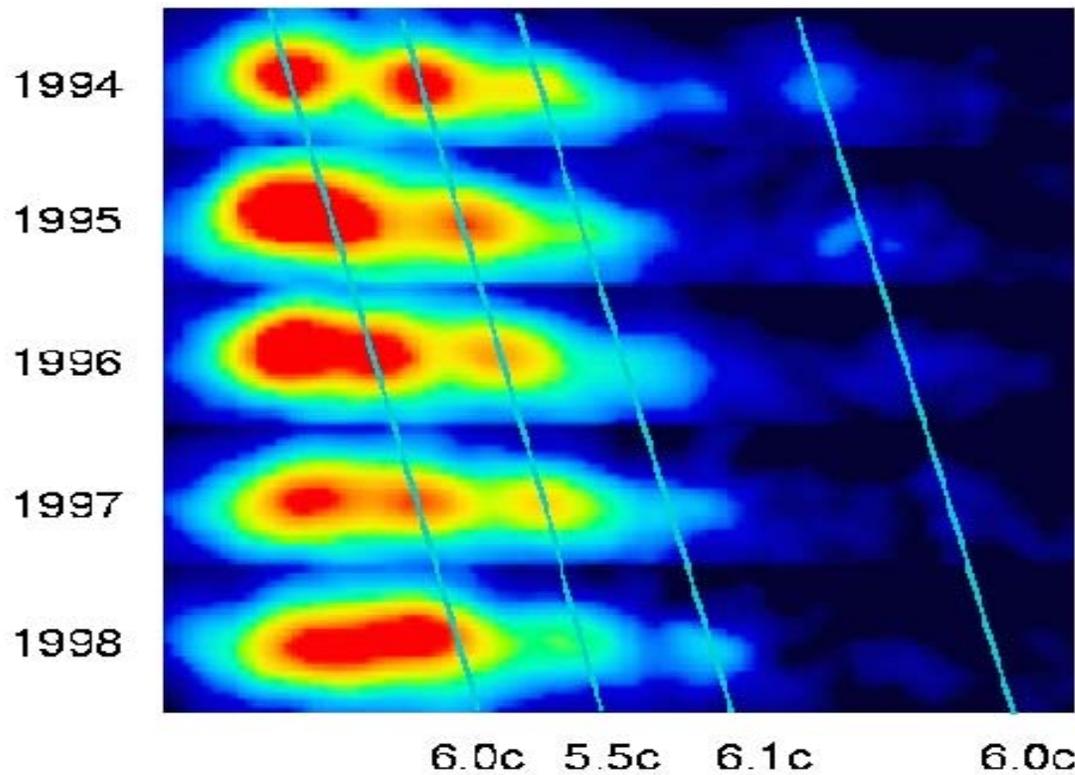
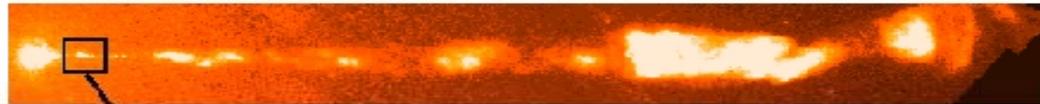
Hubble
Heritage





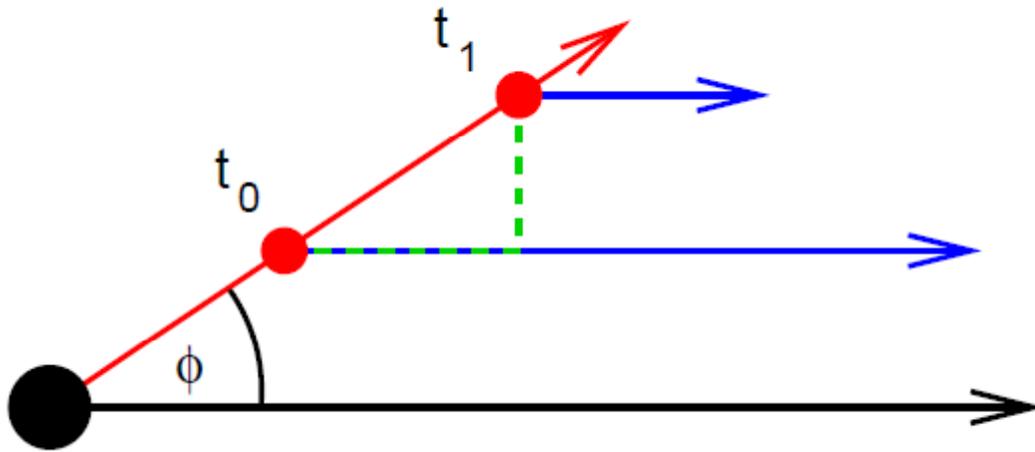
Superluminal motion

Superluminal Motion in the M87 Jet





Superluminal motion



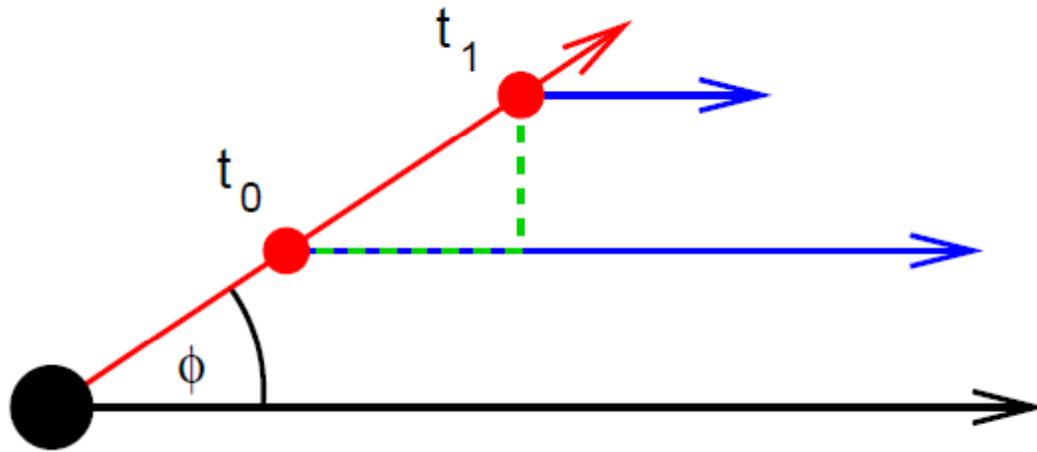
$$t_1 = t_0 + \Delta t_e$$

$$v_{\text{app}} = \frac{\Delta l_{\perp}}{\Delta t_o}$$





Superluminal motion



$$t_1 = t_0 + \Delta t_e$$

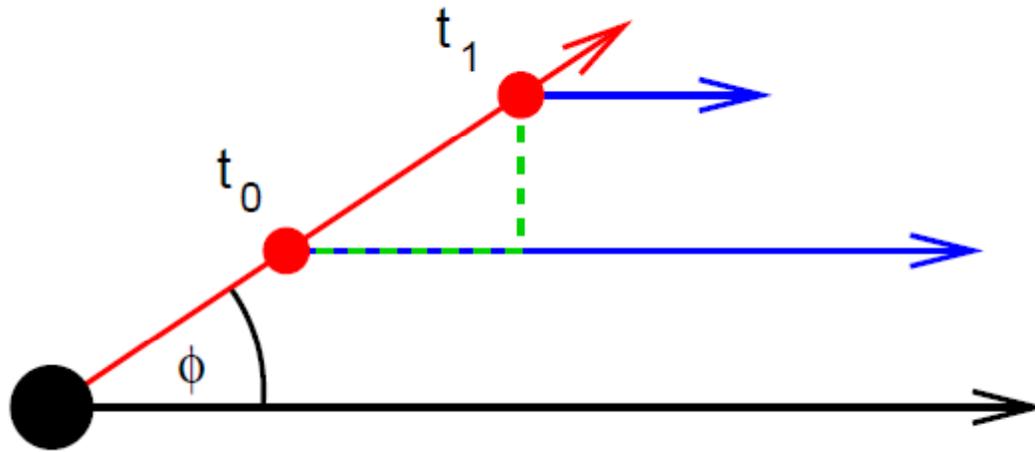
$$v_{\text{app}} = \frac{\Delta l_{\perp}}{\Delta t_o}$$

$$\Delta l_{\perp} = v \Delta t_e \sin \phi$$





Superluminal motion



$$t_1 = t_0 + \Delta t_e$$

$$v_{\text{app}} = \frac{\Delta l_{\perp}}{\Delta t_o}$$

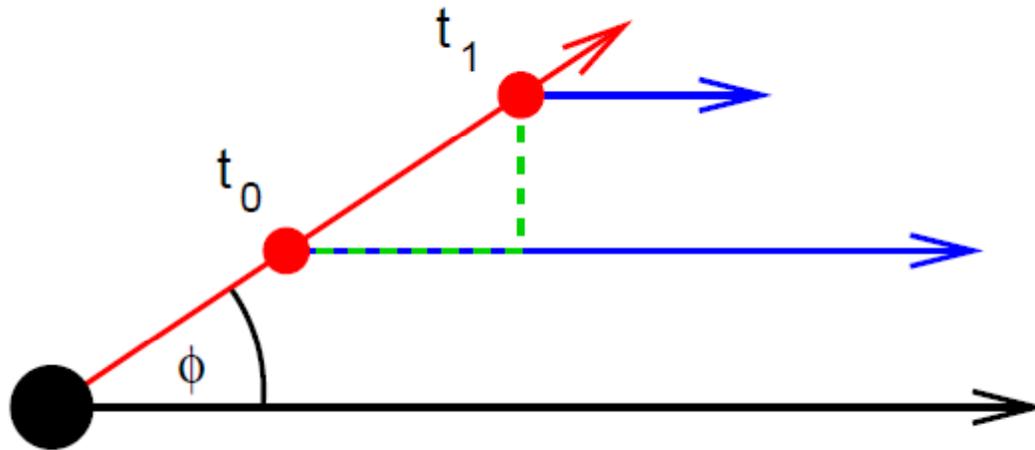
$$\Delta l_{\perp} = v \Delta t_e \sin \phi$$

$$\Delta t_o = \Delta t_e - \Delta t_e \frac{v}{c} \cos \phi$$





Superluminal motion

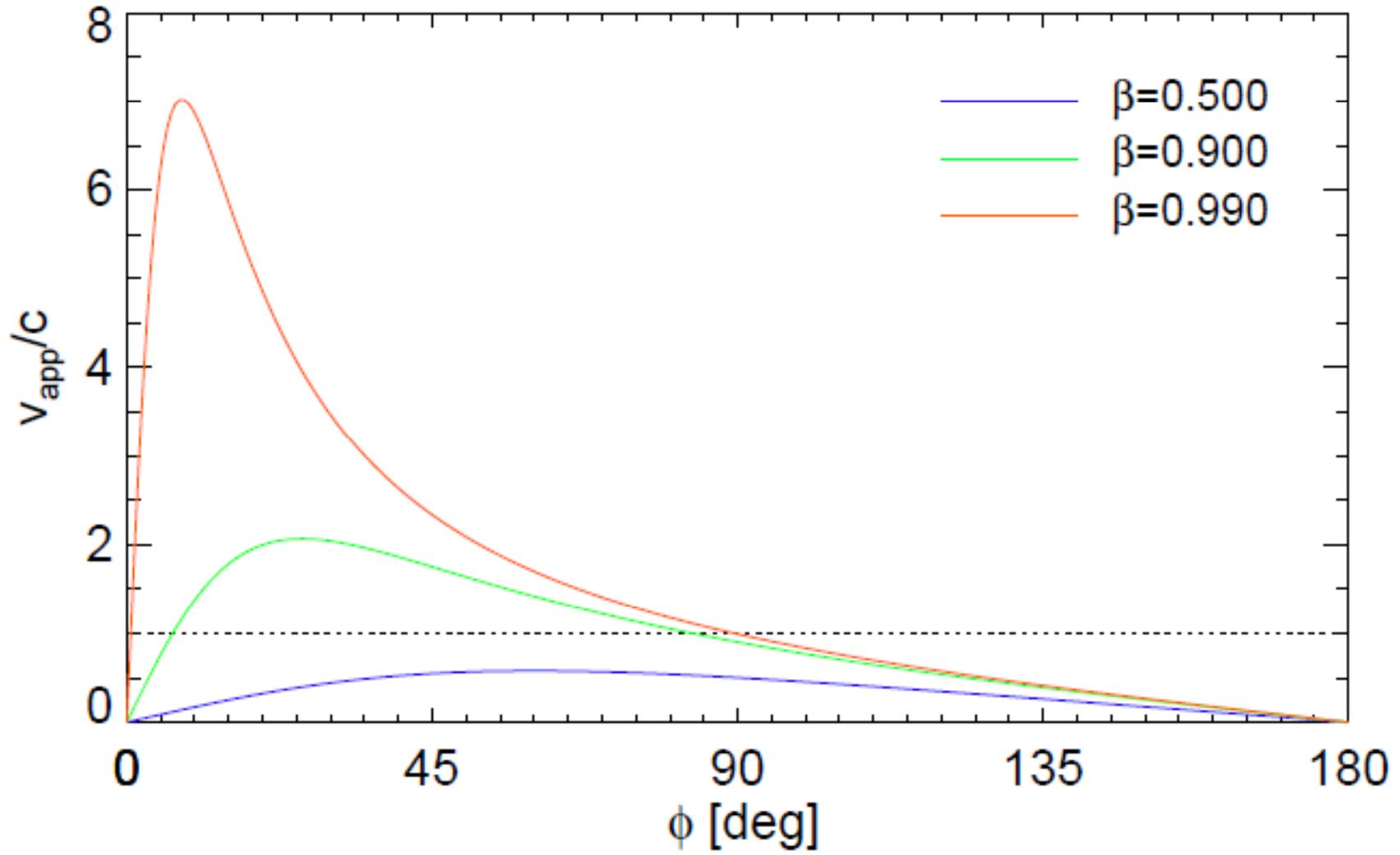


$$t_1 = t_0 + \Delta t_e$$

$$v_{\text{app}} = \frac{\Delta l_{\perp}}{\Delta t_o} = \frac{v \Delta t_e \sin \phi}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi\right) \Delta t_e} = \frac{v \sin \phi}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi\right)}$$



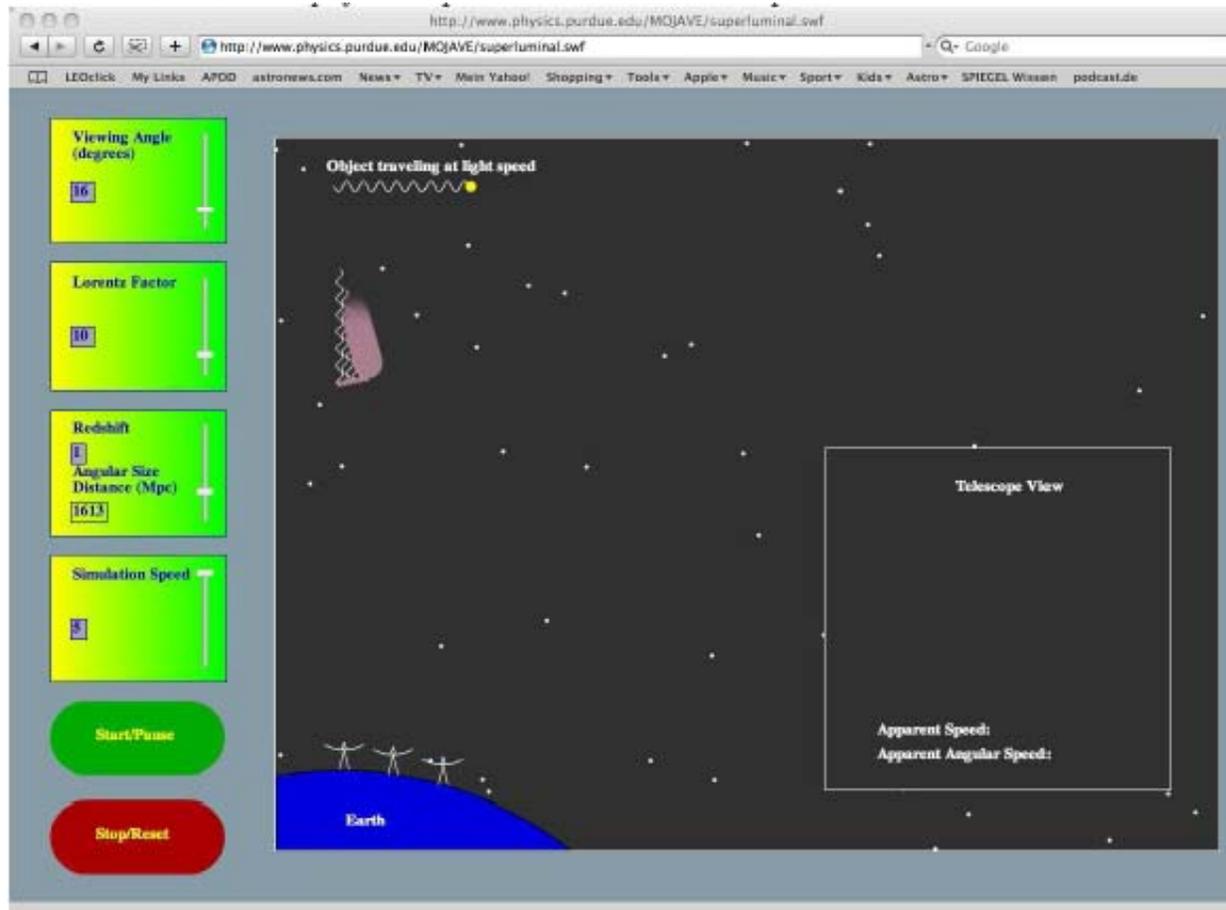
Superluminal motion





Superluminal motion

- <http://www.physics.purdue.edu/MOJAVE/superluminal.swf>
- superluminal.swf





Superluminal motion

- **Überlichtgeschwindigkeit** (engl. *superluminal motion*) natürlich nur scheinbar
- Dies kommt durch die **spezielle Orientierung** des Jets relativ zum Beobachter zustande.
- Geschwindigkeiten von Emissionsknoten (helle Gebilde im Jetstrahl) von **10c** oder mehr gemessen!



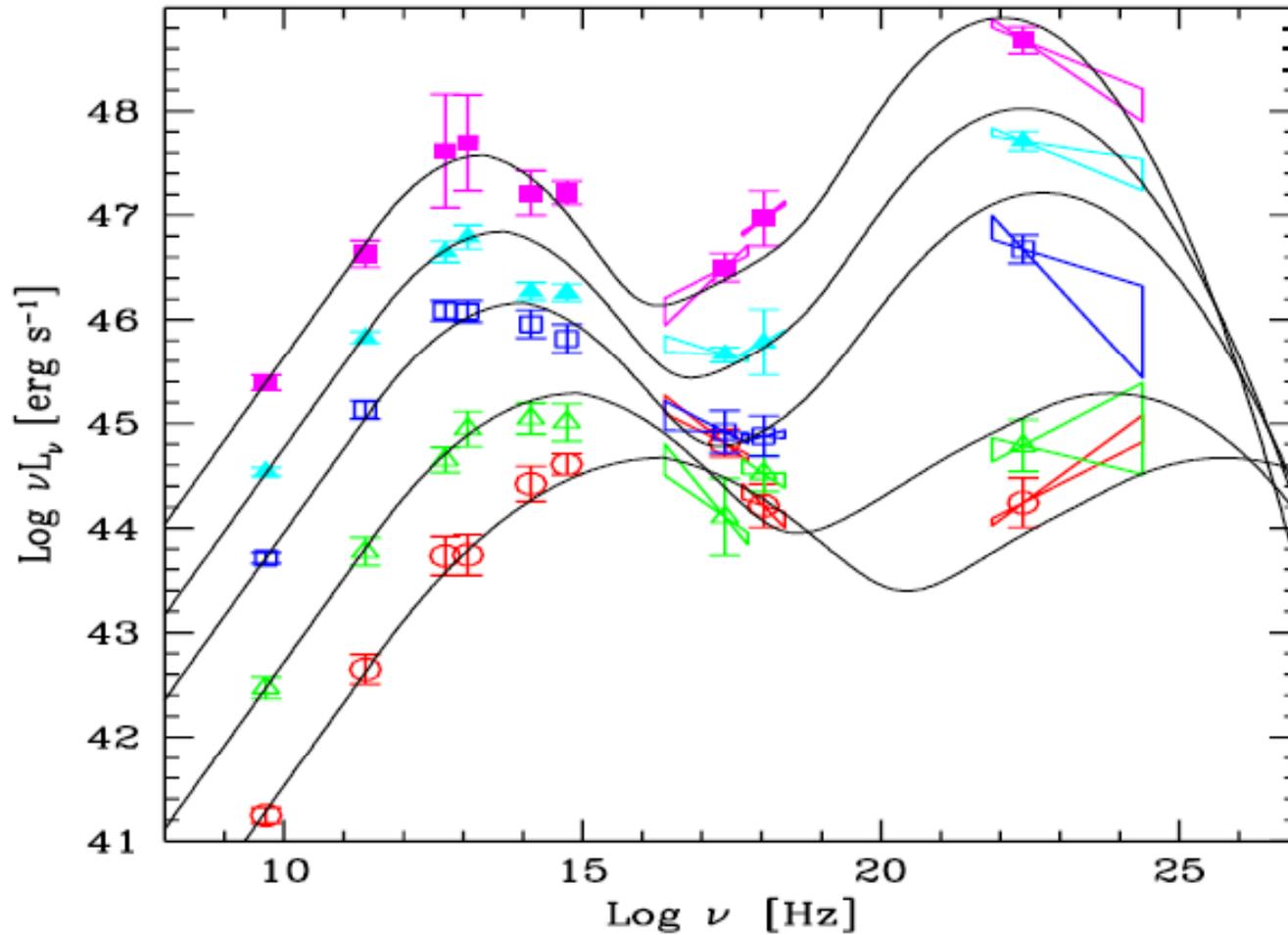


Strahlungsprozesse in den Jets



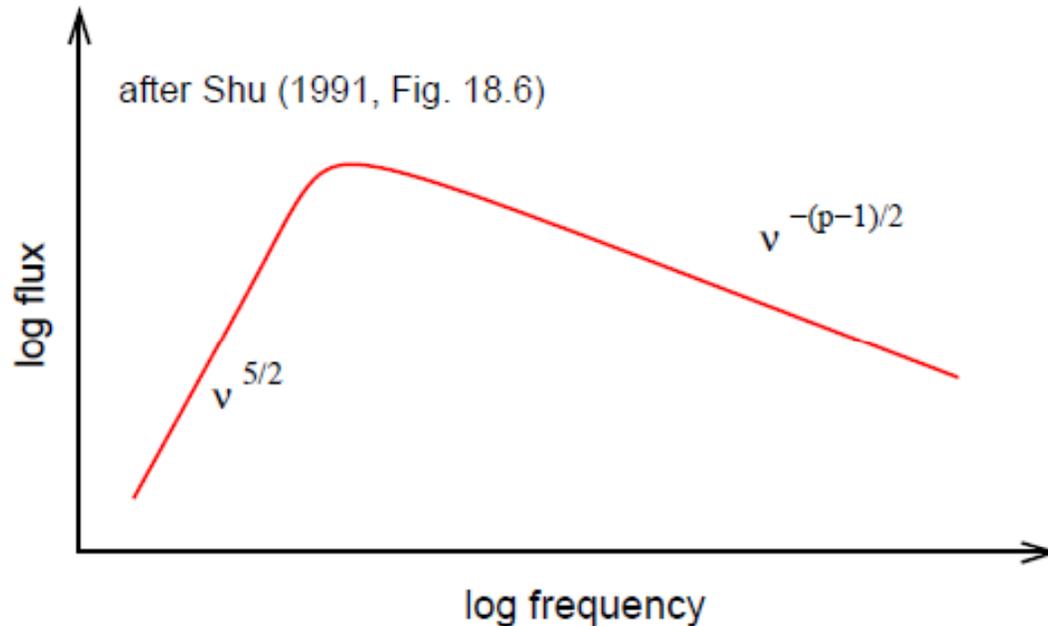


Blasar Spektren





Erster Höcker / Synchrotron Höcker



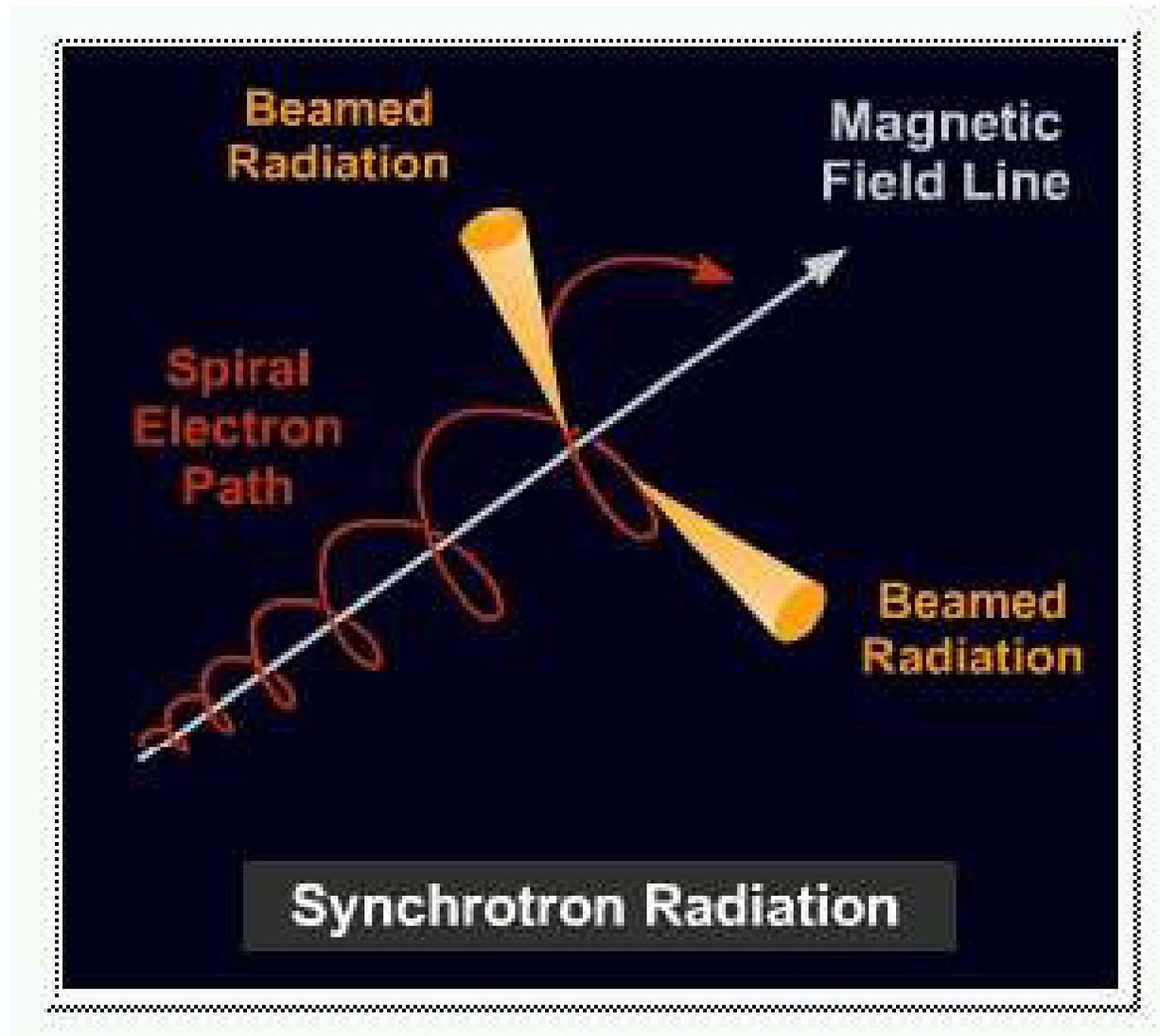
- Das Radiospektrum folgt (stückweise) einem Potenzgesetz

- Die Radiostrahlung ist polarisiert

-> Synchrotron-Emission relativistischer Elektronen



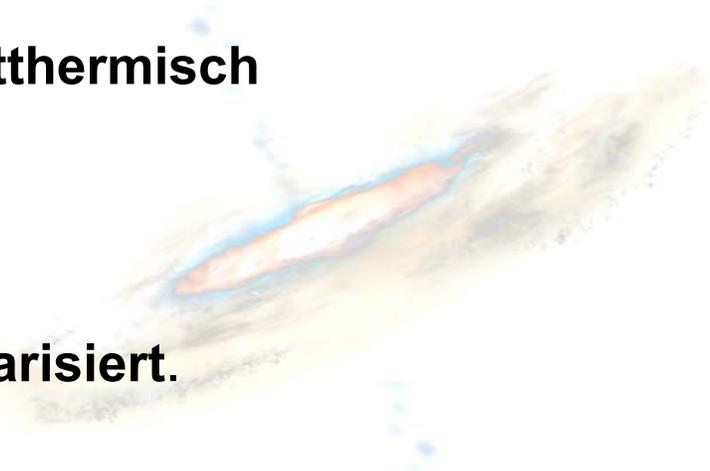
Synchrotron Strahlung





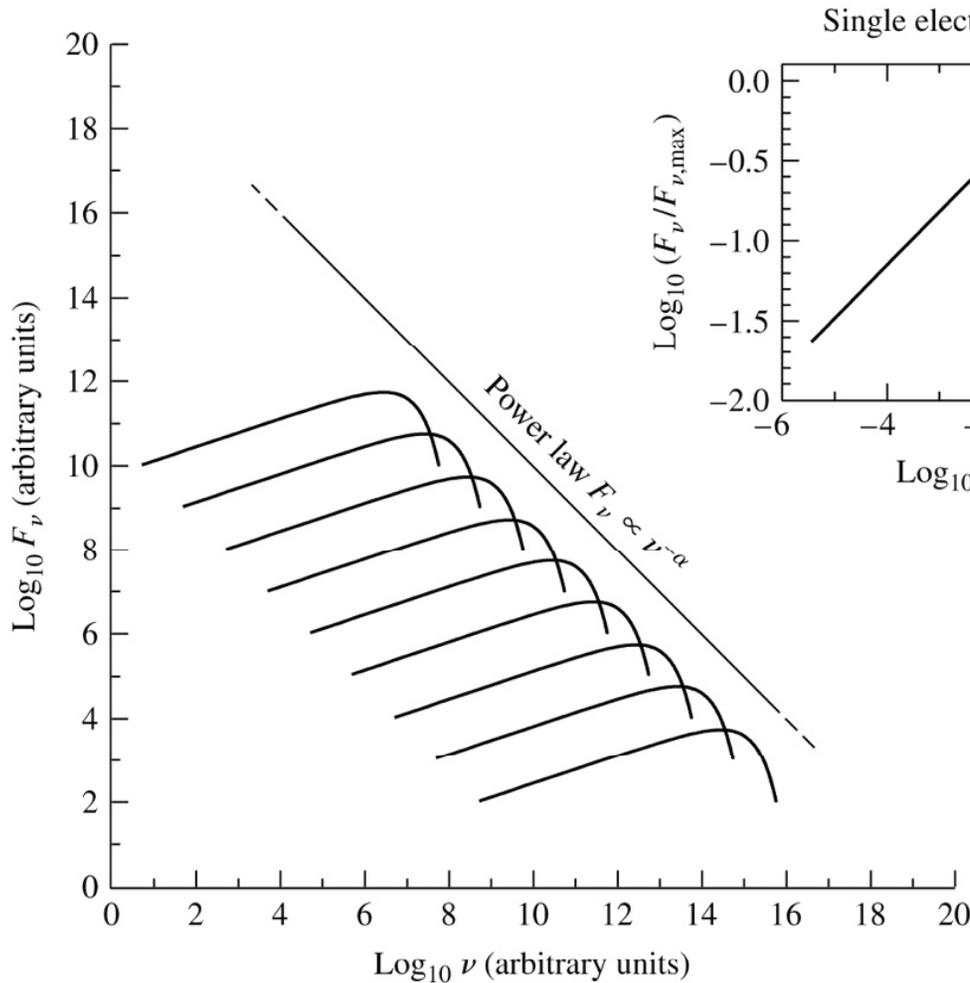
Synchrotron Strahlung

- Sie entsteht, wenn **elektrisch geladene Teilchen in einem Magnetfeld beschleunigt** werden.
- Nur bei **relativistischen v**
- Im **Ruhsystem** beobachtet man **keine** Synchrotronemission.
- Synchrotronstrahlung ist demzufolge **nichtthermisch**
- hohe Strahlungsintensität
- Synchrotronstrahlung ist immer **linear polarisiert**.
- Die relevante Teilchenspezies sind **Elektronen** (Gewicht)

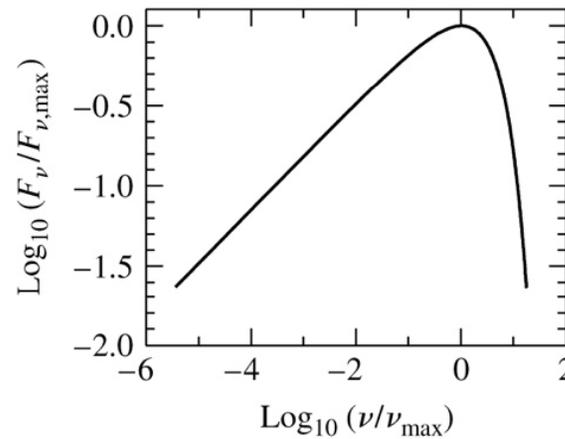




Synchrotron Strahlung



Single electron spectrum



Spektrum der Synchrotron-Emission eines einzelnen relativistischen Elektrons
Maximum der Strahlung liegt bei $\sim \nu_c$

Die Überlagerung vieler solcher Spektren, entsprechend einer Energieverteilung der Elektronen wird zu einem Potenzspektrum, wenn die Verteilung der Elektronen in der Energie ein Potenzspektrum ist



Synchrotron Strahlung

- Synchrotronstrahlung nur bei **relativistischen Geschwindigkeiten**
- Strahlungskegel scharf in Bewegungsrichtung gebündelt (***relativistische Kollimation***). Diesen Effekt kennt man auch als **Beaming**.

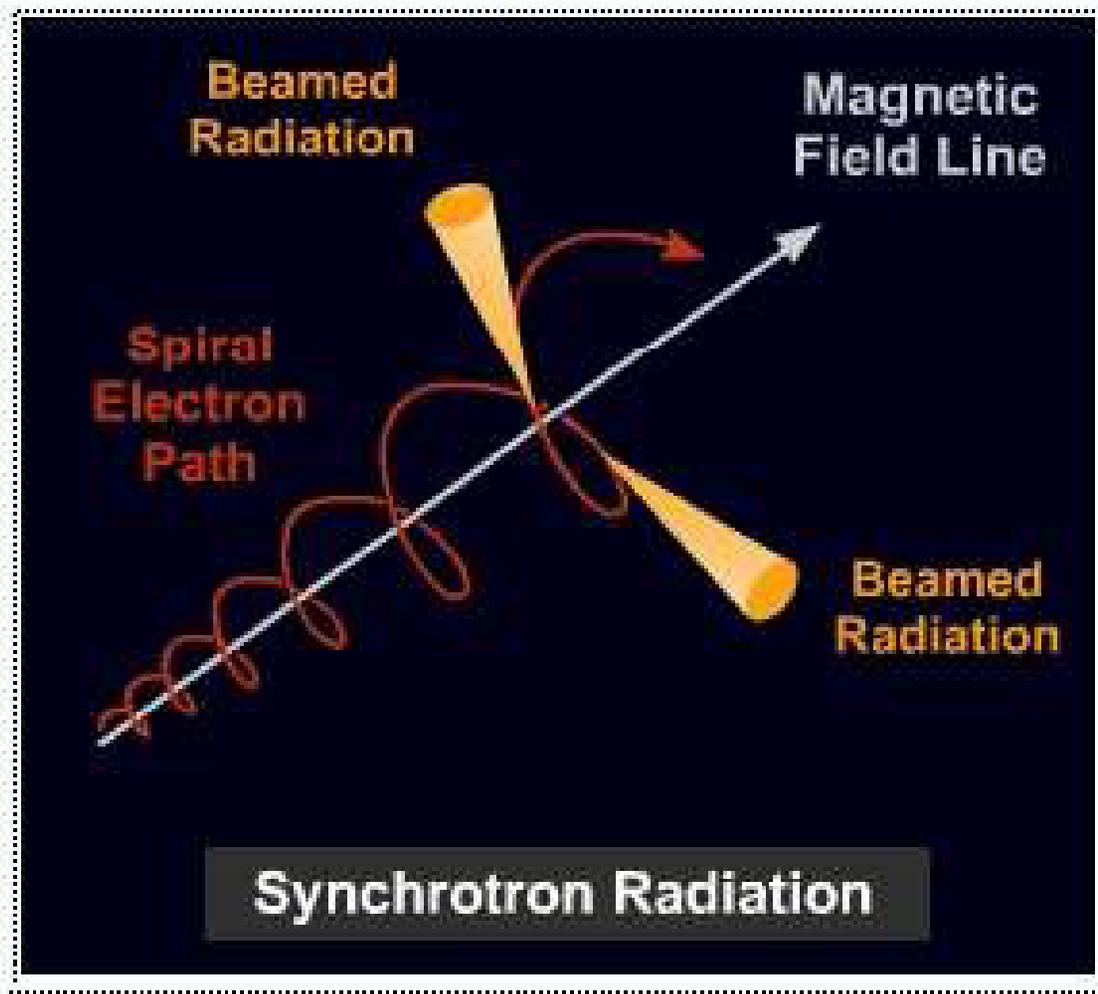




Beaming

Strahlung in
Bewegungsrichtung
kollimiert.

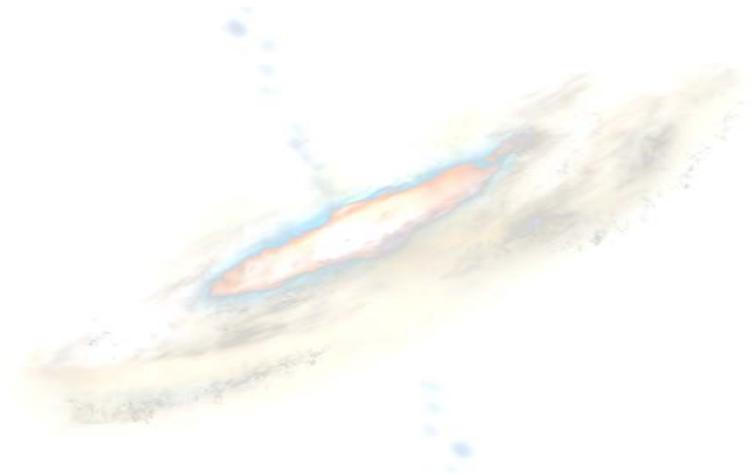
Dies bezeichnet man als
Vorwärts-**Beaming**





Beaming

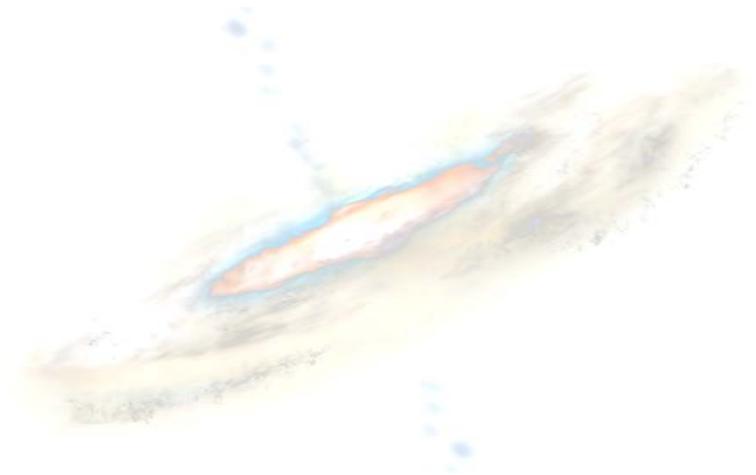
$$\nu = \frac{1}{\Delta t_A}$$





Beaming

$$\nu = \frac{1}{\Delta t_A} = \frac{1}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi\right) \Delta t_e} =$$





Beaming

$$\nu = \frac{1}{\Delta t_A} = \frac{1}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi\right) \Delta t_e} = \frac{\nu'}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)}$$





Beaming

$$\nu = \frac{1}{\Delta t_A} = \frac{1}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi\right) \Delta t_e} = \frac{\nu'}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)}$$

$$D = \frac{1}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)} = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta}$$



Beaming

$$\frac{I(\nu_{\text{obs}})}{\nu_{\text{obs}}^3} = \frac{I(\nu_{\text{em}})}{\nu_{\text{em}}^3}$$

S_ν/ν^3 Lorentz invariant





Beaming

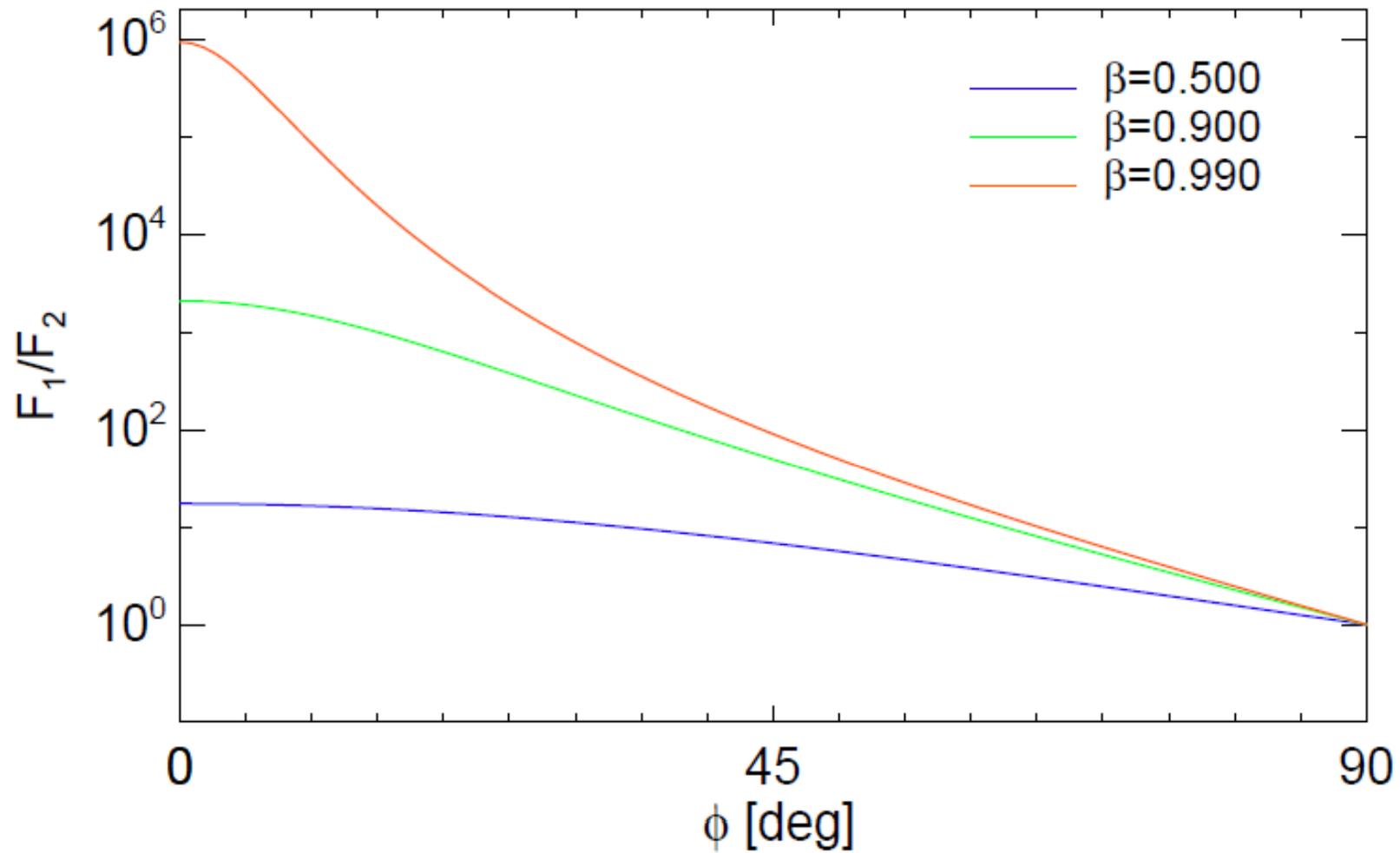
$$\frac{I(\nu_{\text{obs}})}{\nu_{\text{obs}}^3} = \frac{I(\nu_{\text{em}})}{\nu_{\text{em}}^3}$$

$$I(\nu_{\text{obs}}) = \nu_{\text{obs}}^3 \frac{I(\nu_{\text{em}})}{\nu_{\text{em}}^3} = \mathcal{D}^3 I(\nu_{\text{em}})$$





Beaming





Beaming

•Beaming bei Blasaren

Viele Besonderheiten von Blasaren sind mit Beaming erklärbar:

- Die gebeamte Synchrotronstrahlung des Jets kann sich bis ins Optische/UV erstrecken und sämtliche andere Strahlung, insbesondere **Linienemission überstrahlen**

- Die optische **Polarisation** ist durch gebeamte Synchrotronstrahlung erklärbar

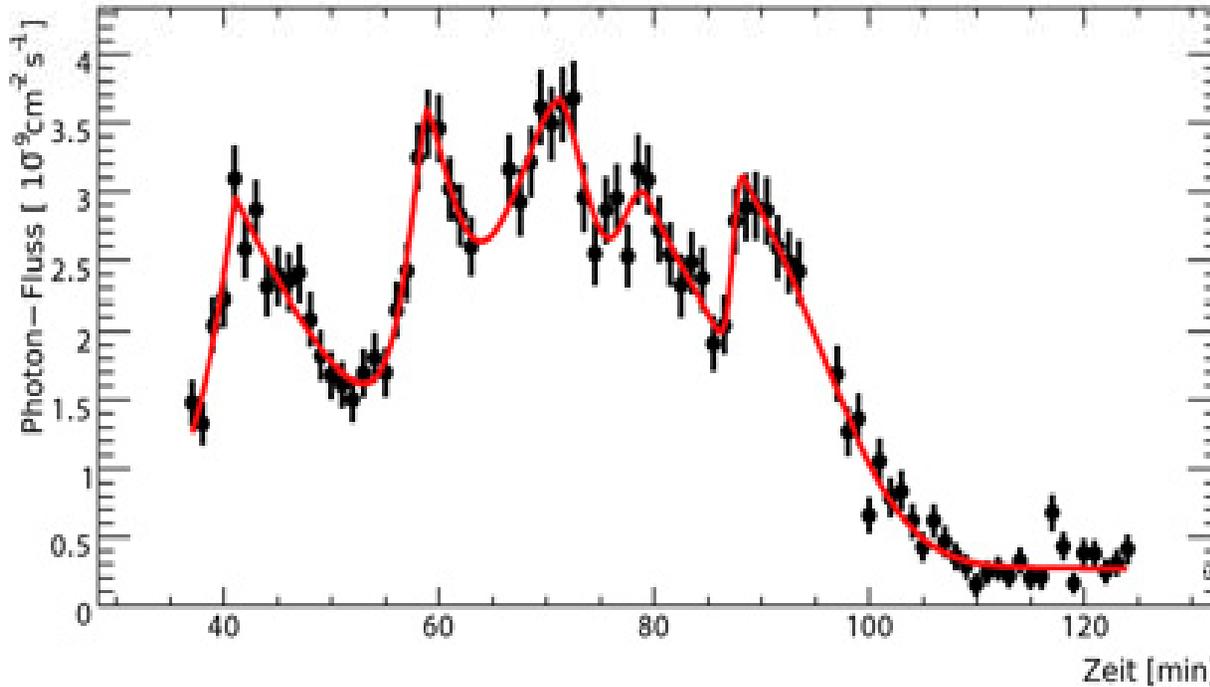
- Kleine Änderungen der Jet Geschwindigkeit oder Richtung führen durch Beaming zu großen Flussänderungen im beobachteten Spektrum → **Variabilität**

- Natürlich ist das **komplette Spektrum gebeamt** (nicht nur der Synchrotronbereich)



Ein gigantischer Strahlungsausbruch

TeV Gammastrahlung



- **Kurzzeitvariabilität**
Flares (Ausbrüche) auf Zeitskalen von Minuten bis Tagen

Blobs, die vom Jet ausgestoßen werden, SSC-Modell

- **Langzeitvariabilität**
hohe Flussänderungen auf Zeitskalen von Jahren - Schwankungen in der Massenakkretion des SMBH

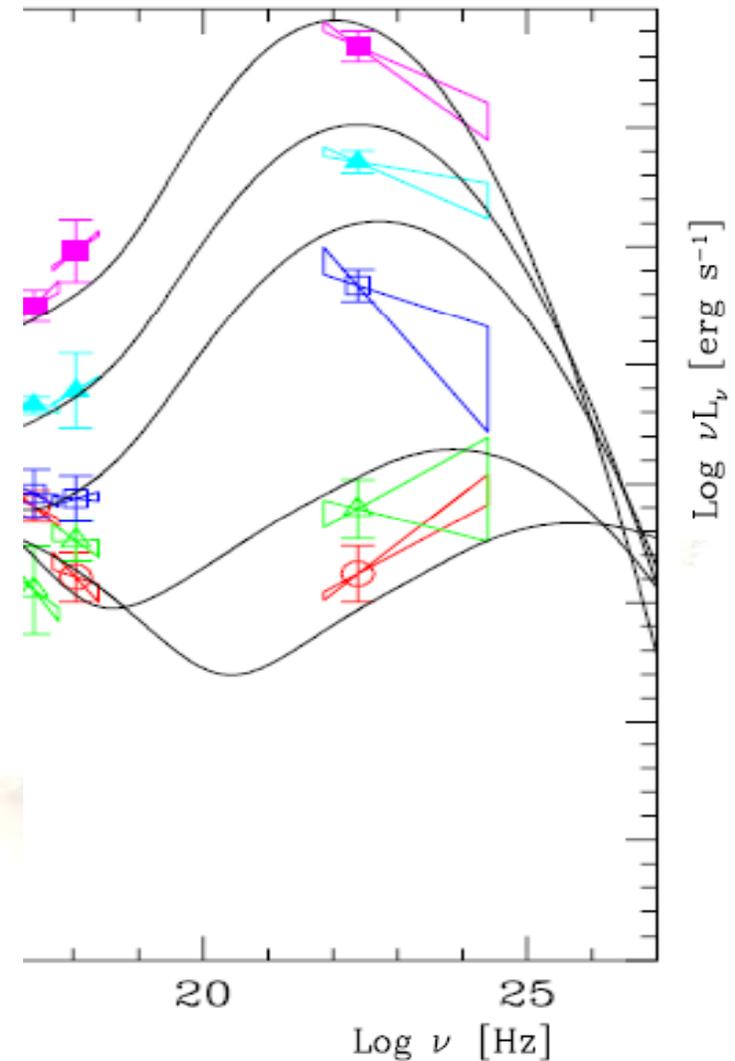
Abb. 4: Gamma-Lichtkurve des Blazars PKS 2155-304 am 28. Juli 2006. Die Intensität der Gamma-Strahlung variiert auf Zeitskalen von wenigen Minuten.



Hochenergiebereich

Der zweite Höcker

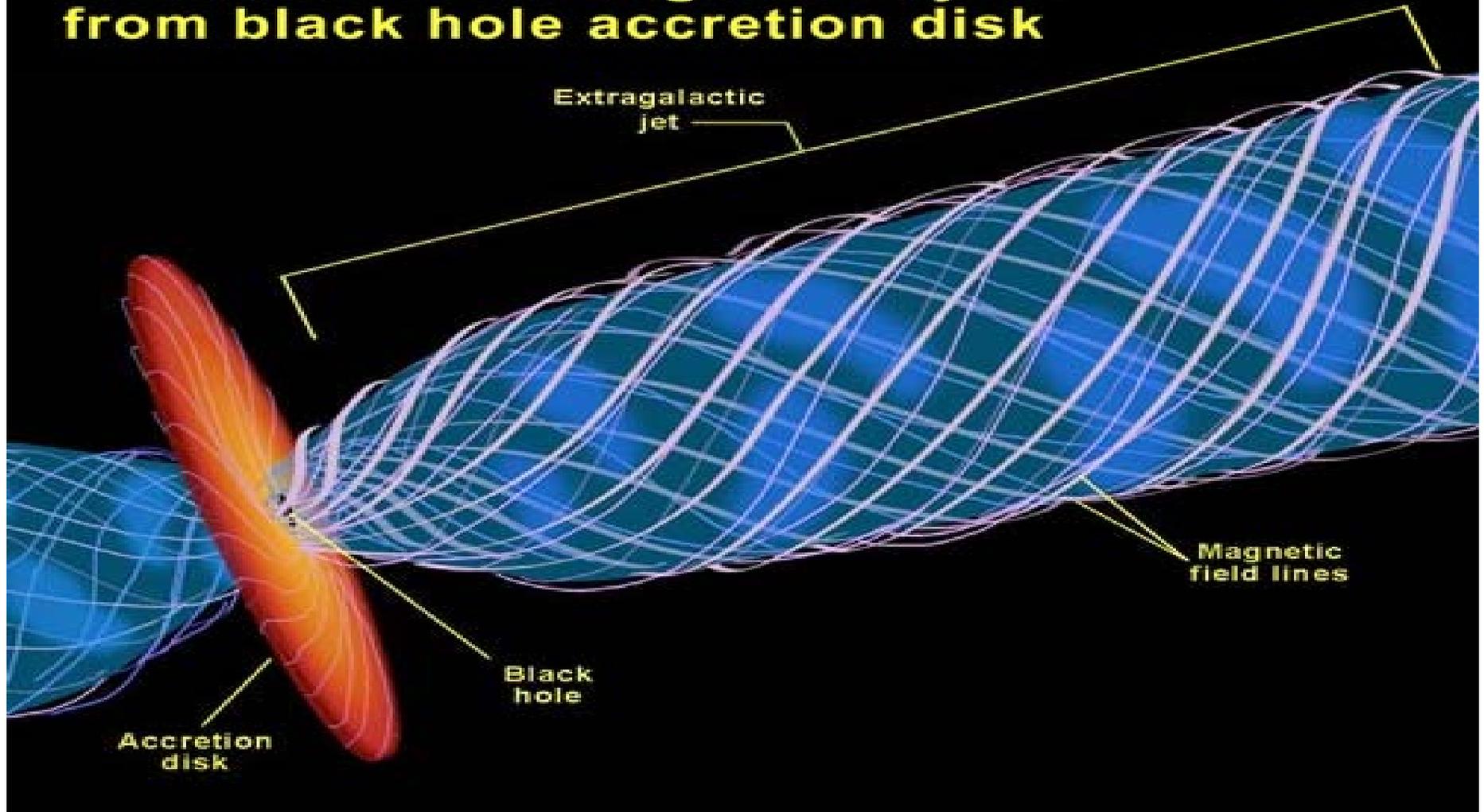
- Schlecht verstanden
- Grundlegend verschiedene Modelle





Der Jet

Formation of extragalactic jets from black hole accretion disk





Leptonisches Blasar-Emissionsmodell

- Jetplasma größtenteils aus relativistischen Elektronen und Positronen

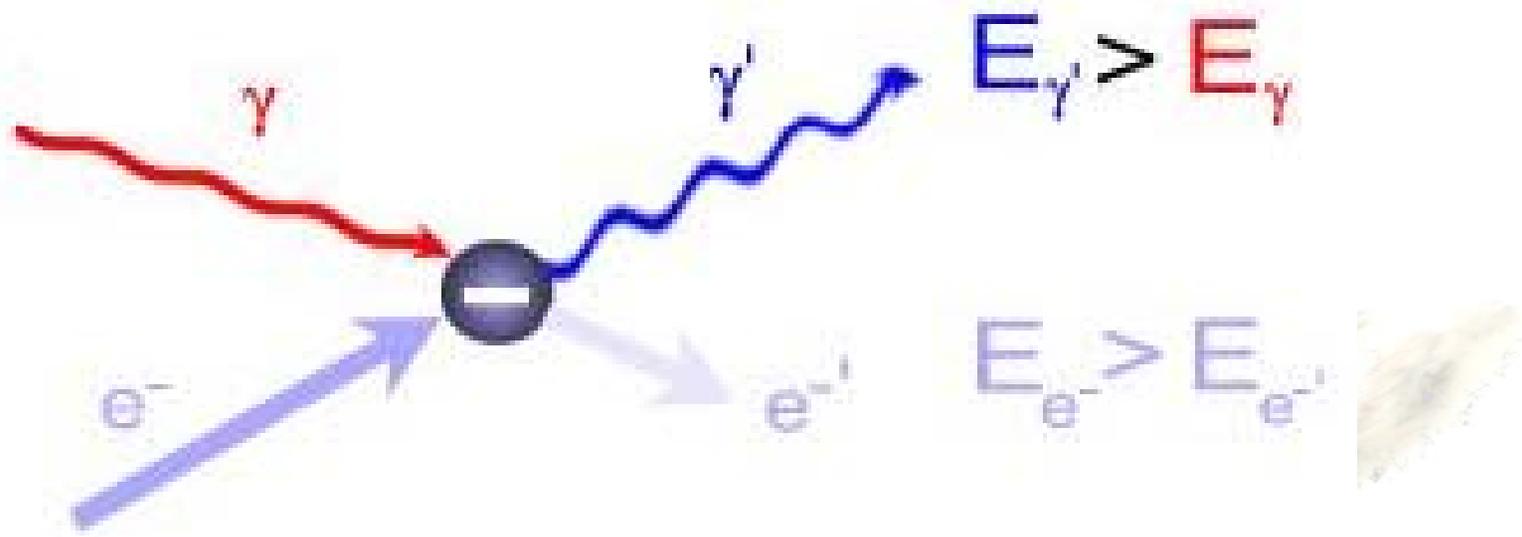
↳ Hochenergiebereich durch **inverse Compton Streuung**





Inverse Comptonstreuung

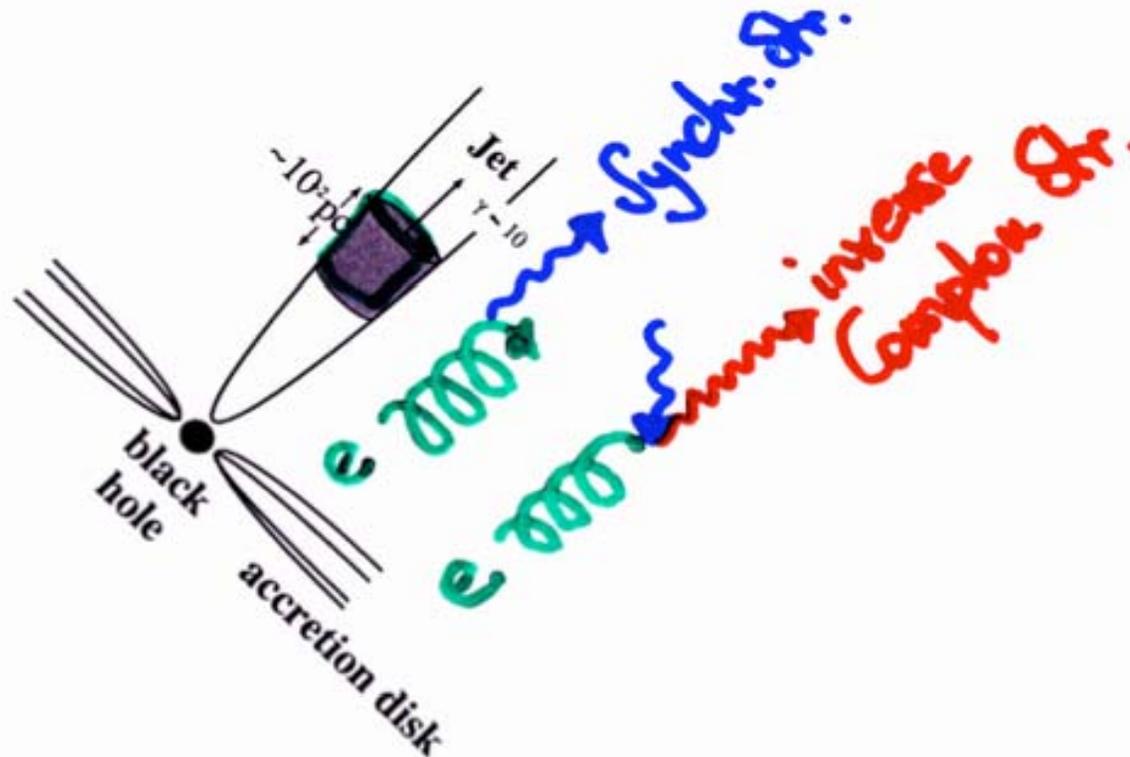
Comptonization



Photonen mit niedriger Energie wechselwirken mit freien relativistischen Elektronen und nehmen dabei einen Großteil der Elektronenenergie auf



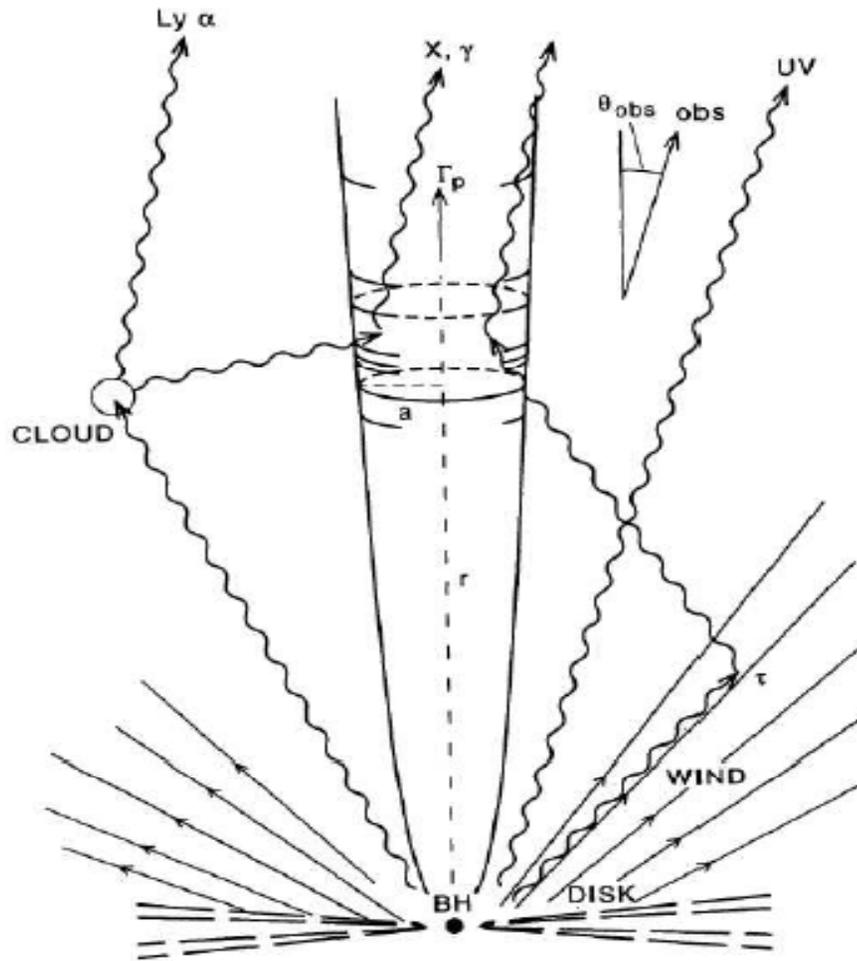
Synchrotron Selbst-Comptonisierung



- Wenn an dem Plasma, das die Synchrotronstrahlung emittiert selbst die Comptonisierung stattfindet, spricht man von **Synchrotron Selbst-Comptonisierung** (engl. *synchrotron self-compton*, **SSC**).



Interne und externe Comptonisierung



Intern:

Seedphotonen für Comptonisierung entstehen **im Jet (=SSC)**

Extern:

Seedphotonen für Comptonisierung kommen **von außen**

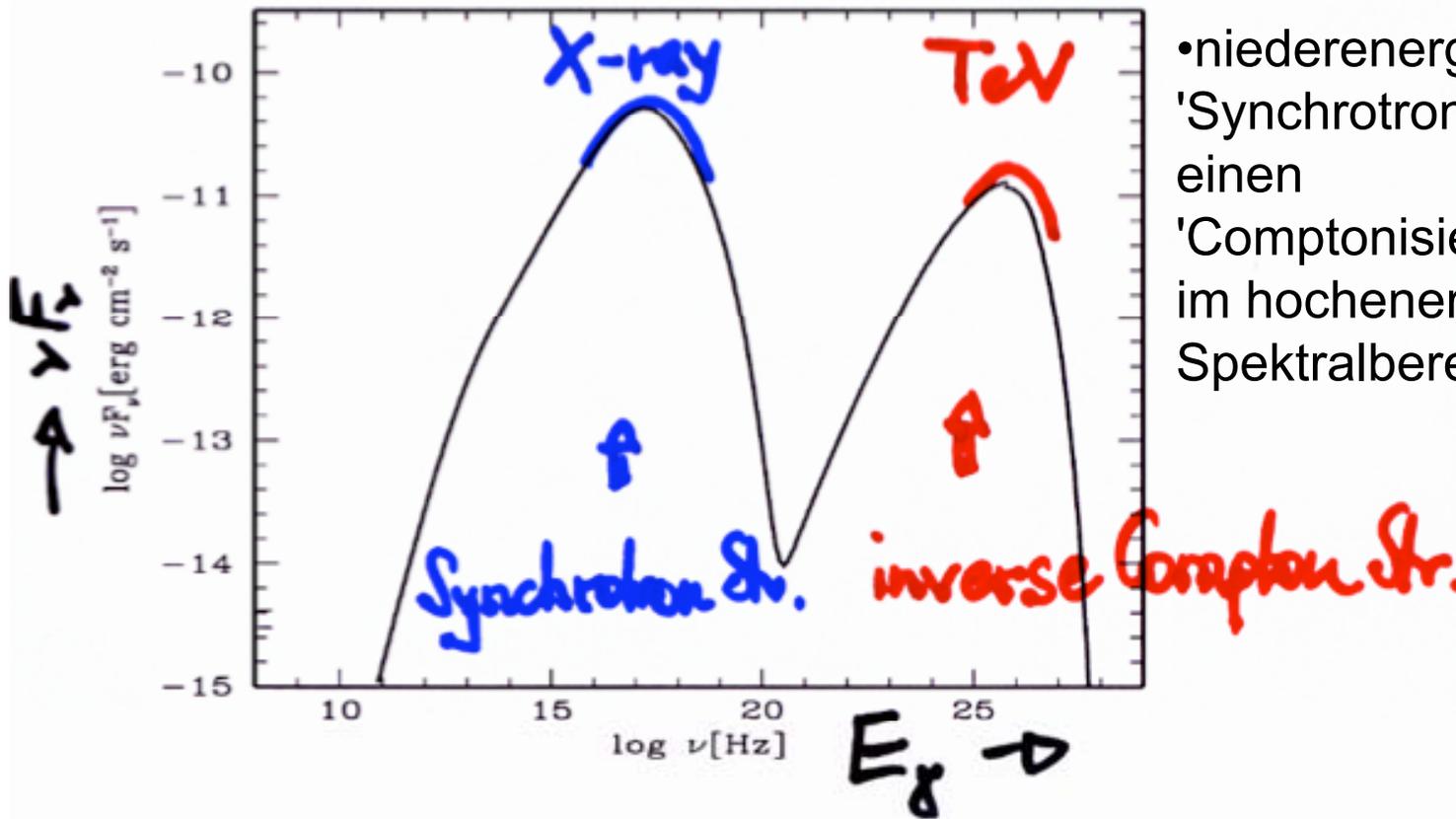
Geometry in leptonic models (Sikora et al., 1994)

20.01.10

Astrophysikalisches Seminar WS 09/10



Leptonisches Blasar-Emissionsmodell



- niederenergetischer 'Synchrotronbuckel' erzeugt einen 'Comptonisierungsbuckel' im hochenergetischen Spektralbereich



Leptonisches Blasar-Emissionsmodell

Fazit:

- **Elektronen** sind leichter zu beschleunigen
- **Synchrotronhöcker gut erklärt**
- **Genauere Messungen** werden Aufschluss geben (GeV Bereich)





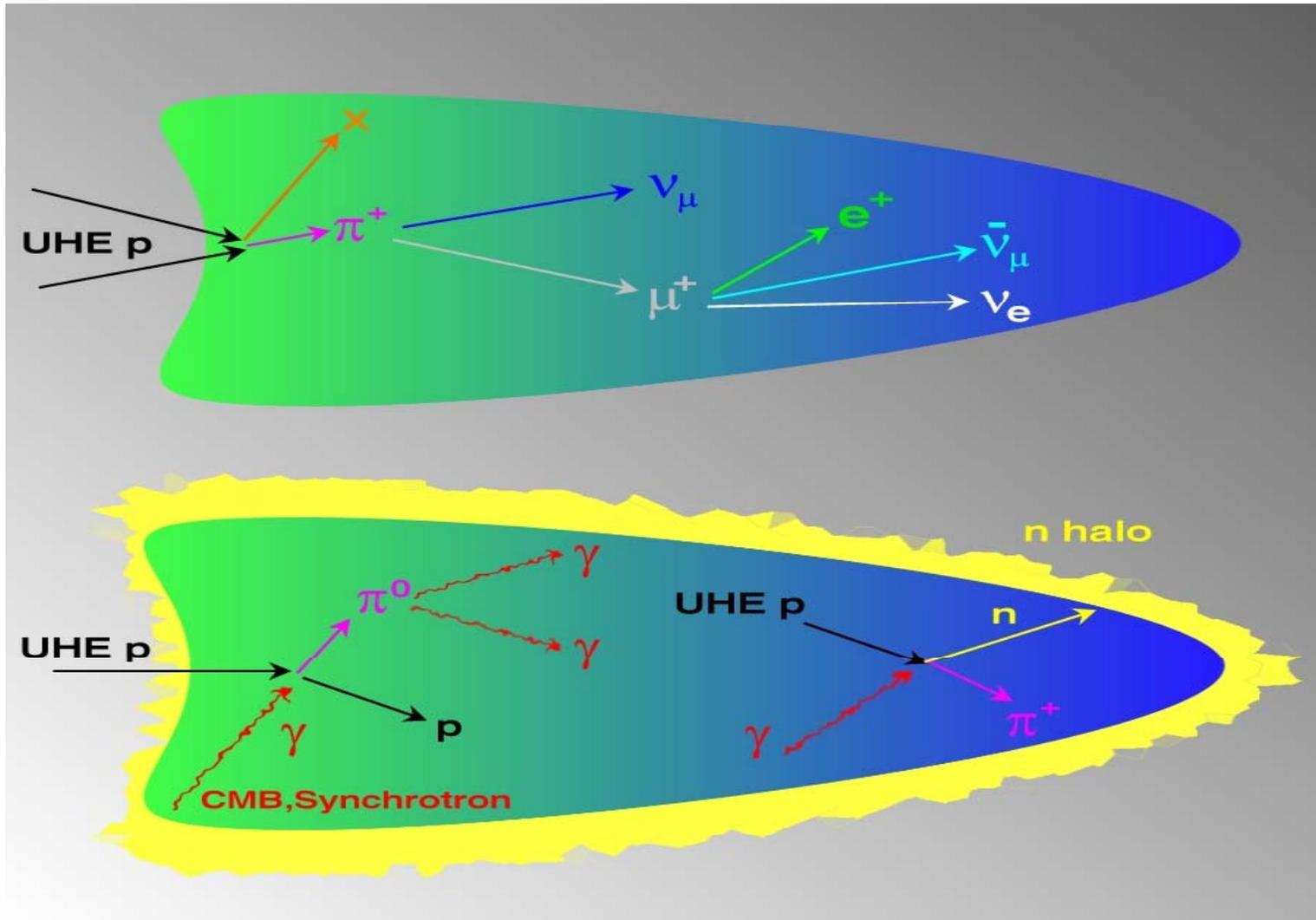
Hadronisches Blasar-Emissionsmodell

- Hoch-relativistische **Protonen** im Jetplasma
- **Beschleunigung über Schocks** im Jetplasma
- **Erster Höcker** trotzdem durch **Elektronen** -> Synchrotronstrahlung
- **p-p-Kollisionen** und **p- γ -Reaktionen**





Hadronisches Blasar-Emissionsmodell





Hadronisches Blasar-Emissionsmodell

Fazit:

- Bewiesen wenn **Neutrinos** detektiert werden (1 bis 100 TeV)
- Modell **erklärt Ultrahochenergiebereich gut** hat aber **Schwierigkeiten den ersten Höcker zu erklären**

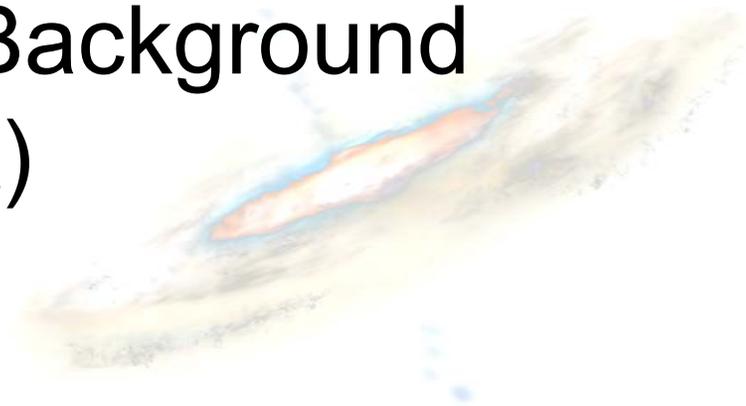




Forschung an Blasaren

Beispiel - EBL

(Extragalactic Background Light)



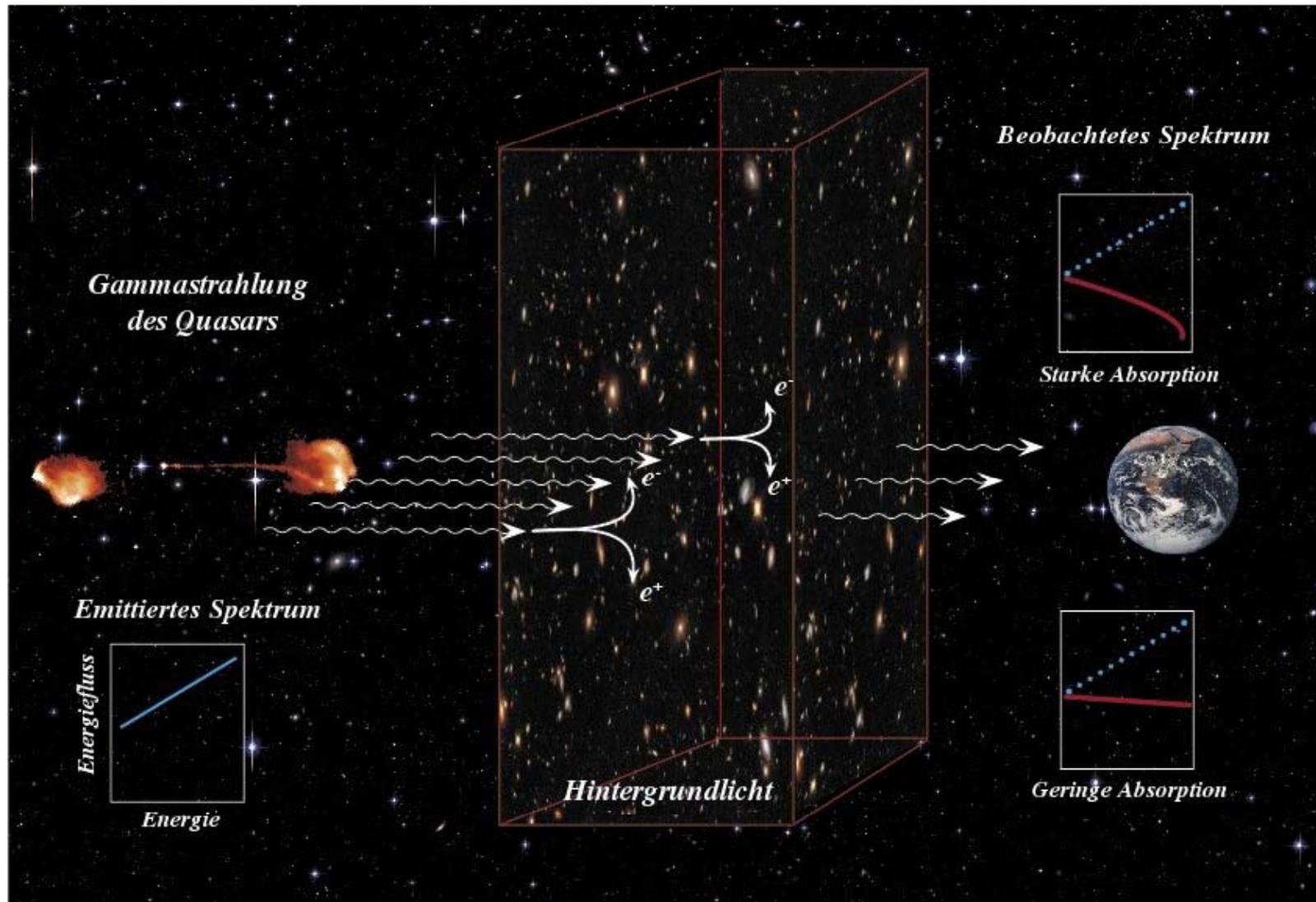


EBL - Extragalactic Background Light

- **Überrest all des Lichts, das im Universum während dessen gesamten Alters jemals ausgestrahlt wurde.**
- Durchdringt **gleichmäßig** den intergalaktischen Raum.
- Bestimmung unglaublich schwierig und äußerst ungenau, da **Atmosphäre, Sonnensystem und Milchstraße viel heller leuchten**
- Die sehr **hochenergetische Gammastrahlung bietet** eine **alternative** Möglichkeit, das Hintergrund-Licht zu ermitteln

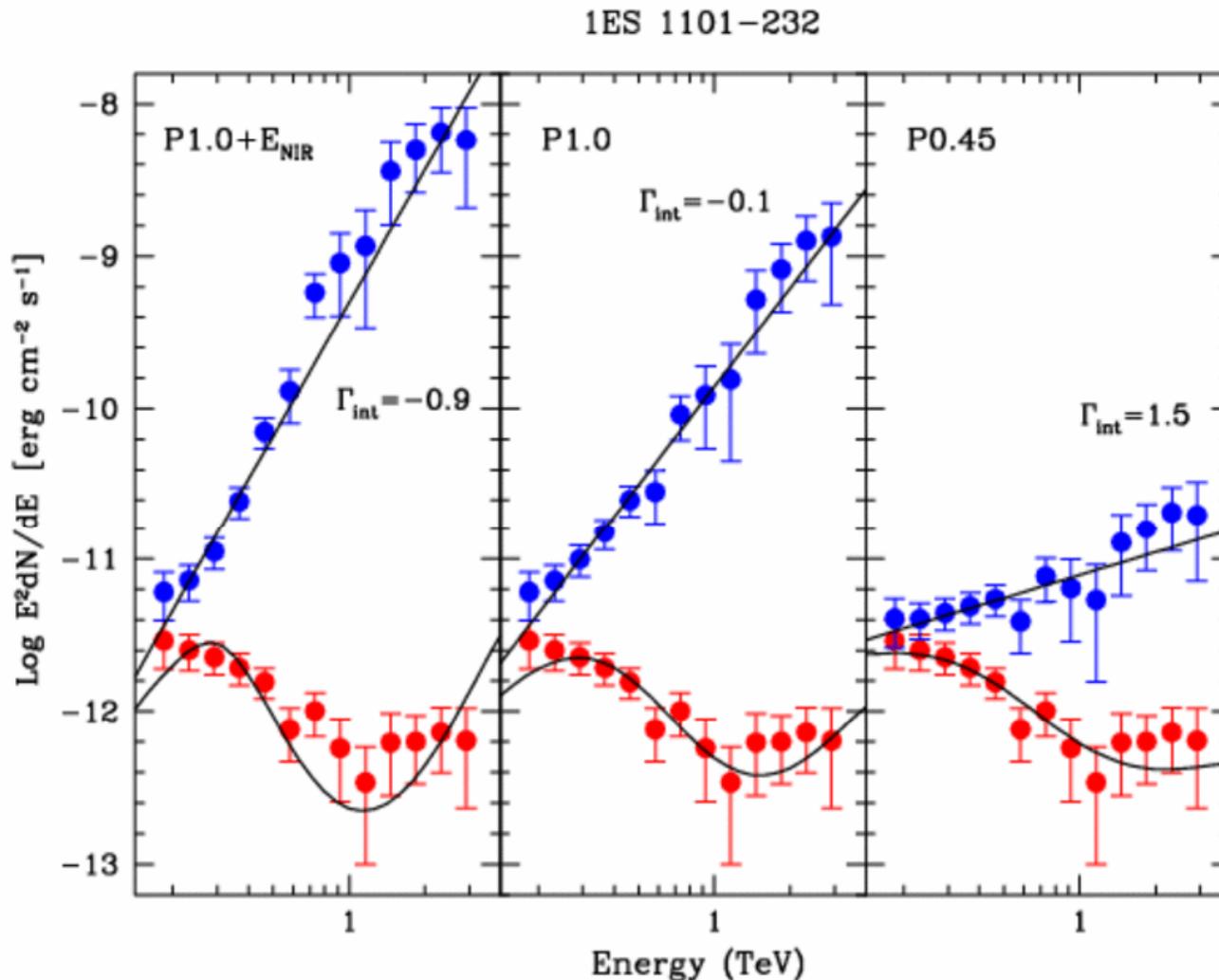


EBL - Extragalactic Background Light





EBL - Extragalactic Background Light



Das Spektrum des Blazars 1ES 1101-232. Die beobachtete Verteilung der Energien (das Spektrum) der ankommenden Gammastrahlung ist jeweils rot dargestellt. Blau dargestellt ist die ursprüngliche Verteilung an der Quelle, die man durch Korrektur der am Hintergrund-Licht erlittenen Absorption errechnet. Bei Annahme hoher Intensität des Hintergrund-Lichts (linker und mittlerer Teil des Bilds) ergibt sich ein Quell-Spektrum, das dramatisch von dem abweicht, was man als typische Verteilung von solchen Objekten annehmen kann. Für niedrige Intensität des Hintergrund-Lichts (rechts im Bild) wird das resultierende Quell-Spektrum kompatibel mit den normalen Eigenschaften dieser Art von Quasaren



Zusammenfassung

- AGNs werden noch lange interessante Forschungsobjekte bleiben
 - Akkretionsphysik
 - Jet Beschaffenheit
 - Beschleunigungsmechanismen
 - Hochenergetische Strahlung
- Zeitgleiche Messungen aller Spektralbereiche nötig (**Variabilität**) –
Astronomen werden sich **abstimmen** müssen

