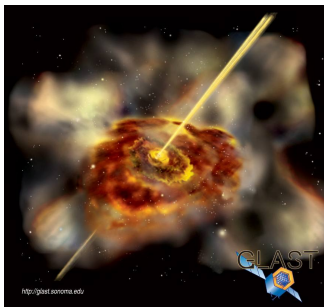


Verzögerung in Multifrequenz-Lichtkurven von TeV Blazaren

– Jens Ruppel –
Ruhr-Universität Bochum

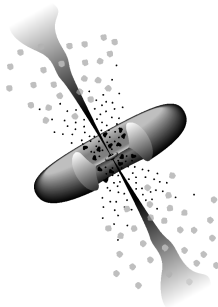
Astroteilchenschule 2005



Leitfragen

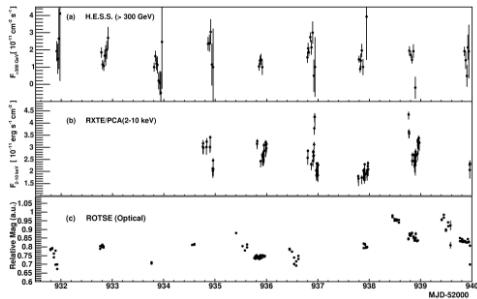
Leitfragen

- ▶ Was ist ein Blazar?



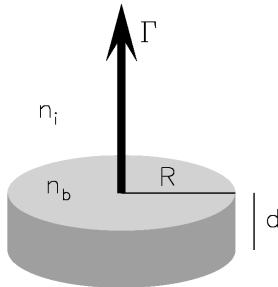
Leitfragen

- ▶ Was ist ein Blazar?
- ▶ Was ist das für eine Verzögerung?



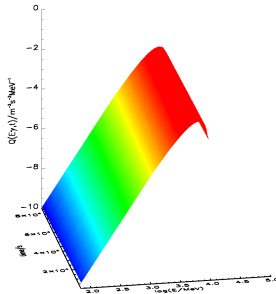
Leitfragen

- ▶ Was ist ein Blazar?
- ▶ Was ist das für eine Verzögerung?
- ▶ Was ist das Blast-Wave Modell?



Leitfragen

- ▶ Was ist ein Blazar?
- ▶ Was ist das für eine Verzögerung?
- ▶ Was ist das Blast-Wave Modell?
- ▶ Was habe ich bisher erreicht?



Entdeckung

Radioquelle 3C273

Entdeckung

Radioquelle 3C273

- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht

Entdeckung

Radioquelle 3C273

- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$

Entdeckung

Radioquelle 3C273

- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$
 \Rightarrow Leuchtkraft $L = 4\pi D^2 \nu S_{\nu} \approx 10^{11} L_{\odot}$

Entdeckung

Radioquelle 3C273

- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$
 \Rightarrow Leuchtkraft $L = 4\pi D^2 \nu S_{\nu} \approx 10^{11} L_{\odot}$
 - ▶ Variabilitätszeitskala τ

Entdeckung

Radioquelle 3C273

- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$
 \Rightarrow Leuchtkraft $L = 4\pi D^2 \nu S_{\nu} \approx 10^{11} L_{\odot}$
 - ▶ Variabilitätszeitskala τ
 \Rightarrow Emissionsgebiet $c \cdot \tau \approx 10^{-12} R_{MW}$

Entdeckung

Radioquelle 3C273

- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$
 \Rightarrow Leuchtkraft $L = 4\pi D^2 \nu S_{\nu} \approx 10^{11} L_{\odot}$
 - ▶ Variabilitätszeitskala τ
 \Rightarrow Emissionsgebiet $c \cdot \tau \approx 10^{-12} R_{MW}$
- ▶ '1. aktiver galaktischer Kern' (hier: Quasar)

Entdeckung

Radioquelle 3C273

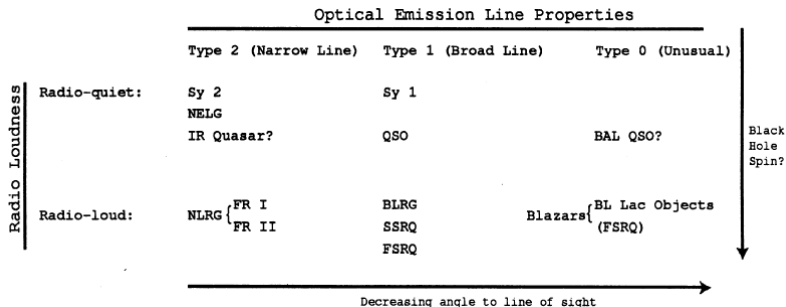
- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$
 \Rightarrow Leuchtkraft $L = 4\pi D^2 \nu S_{\nu} \approx 10^{11} L_{\odot}$
 - ▶ Variabilitätszeitskala τ
 \Rightarrow Emissionsgebiet $c \cdot \tau \approx 10^{-12} R_{MW}$
- ▶ '1. aktiver galaktischer Kern' (hier: Quasar)
 - ▶ Strahlung nichtthermischer Natur und polarisiert

Entdeckung

Radioquelle 3C273

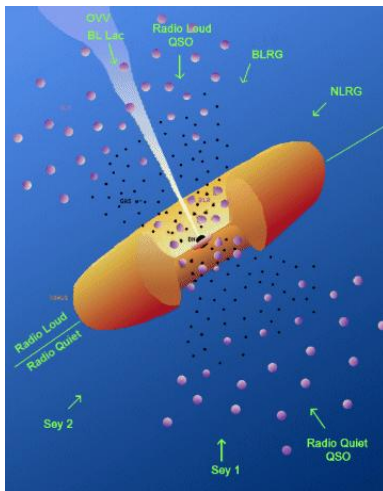
- ▶ 1963 von Maarten Schmidt untersucht
 - ▶ optisches Pendant: $z = 0.15 \Rightarrow D = 500\text{Mpc}$
mit $S_{\nu=10\text{GHz}} = 100\text{Jy}$
 \Rightarrow Leuchtkraft $L = 4\pi D^2 \nu S_{\nu} \approx 10^{11} L_{\odot}$
 - ▶ Variabilitätszeitskala τ
 \Rightarrow Emissionsgebiet $c \cdot \tau \approx 10^{-12} R_{MW}$
- ▶ '1. aktiver galaktischer Kern' (hier: Quasar)
 - ▶ Strahlung nichtthermischer Natur und polarisiert
 \Rightarrow Synchrotronstrahlung

AGN – Tabellarisches Schema

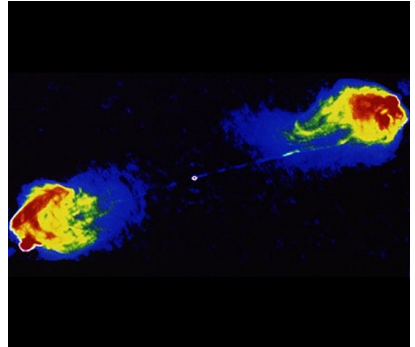
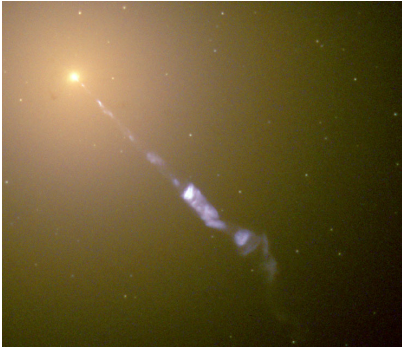


Urry & Padovani 1995

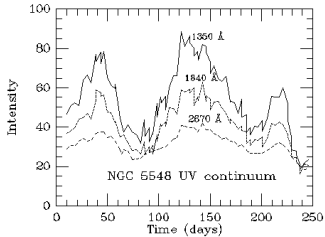
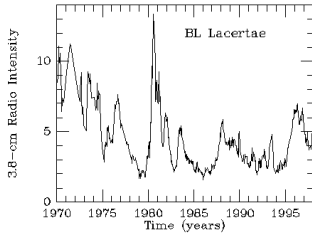
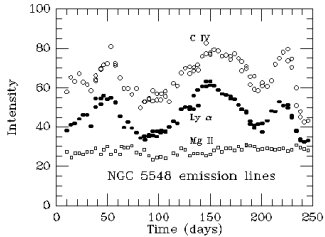
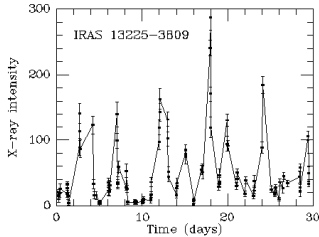
AGN – Vereinheitlichtes Modell



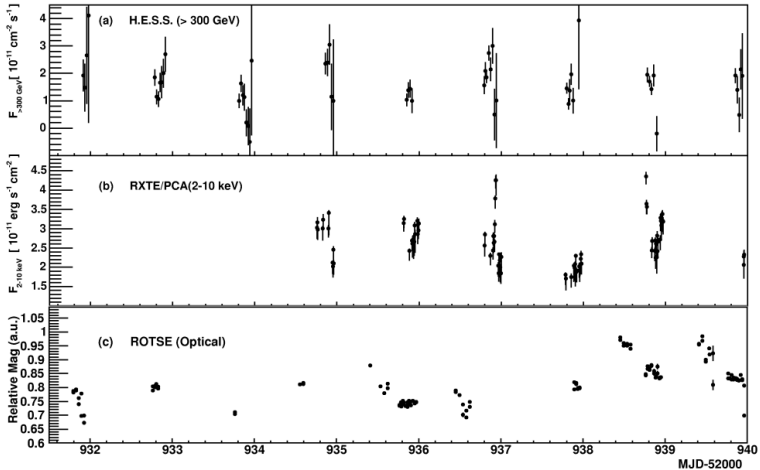
M 87 & Cygnus A



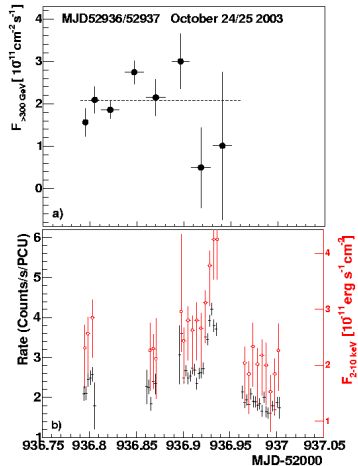
AGN – Variabilitäten



PKS 2155-304



PKS 2155-304 – Zoom



Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

- ▶ (Zusätzlich) Protonen als primäre Teilchen

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

- ▶ (Zusätzlich) Protonen als primäre Teilchen
- ▶ γ -Strahlung und sekundäre e^{\pm} durch inelastische Stöße

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

- ▶ (Zusätzlich) Protonen als primäre Teilchen
- ▶ γ -Strahlung und sekundäre e^\pm durch inelastische Stöße

Probleme:

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

- ▶ (Zusätzlich) Protonen als primäre Teilchen
- ▶ γ -Strahlung und sekundäre e^{\pm} durch inelastische Stöße

Probleme:

- ▶ beobachtete zeitliche Variabilität

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

- ▶ (Zusätzlich) Protonen als primäre Teilchen
- ▶ γ -Strahlung und sekundäre e^\pm durch inelastische Stöße

Probleme:

- ▶ beobachtete zeitliche Variabilität \leftarrow kontinuierlicher Jet

Leptonische Modelle vs. Hadronische Modelle

Leptonische Modelle

- ▶ Elektron/Positron-Jet
- ▶ Inverse Comptonstreuung von niederenergetischen Target-Photonen an hochrelativistischen Jetelektronen

Hadronische Modelle

- ▶ (Zusätzlich) Protonen als primäre Teilchen
- ▶ γ -Strahlung und sekundäre e^\pm durch inelastische Stöße

Probleme:

- ▶ beobachtete zeitliche Variabilität \leftarrow kontinuierlicher Jet
- ▶ kinetische Jetenergie \rightarrow Teilchenenergie

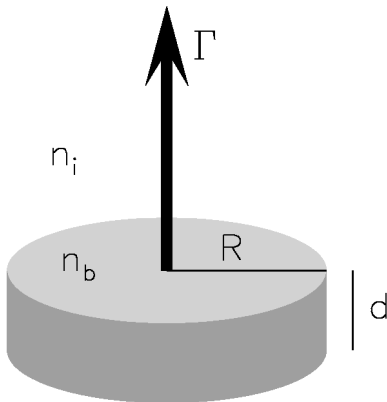
Blast-Wave Modell

Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$

Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$



Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$
- ▶ Blobs laufen in umgebendes Medium
→ Aufnahme von Plasma

Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$
- ▶ Blobs laufen in umgebendes Medium
→ Aufnahme von Plasma
- ▶ Zwei-Strom-Instabilität isotropisiert 'einlaufendes' Material

Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$
- ▶ Blobs laufen in umgebendes Medium
→ Aufnahme von Plasma
- ▶ Zwei-Strom-Instabilität isotropisiert 'einlaufendes' Material
- ▶ Strahlungsprozeß:

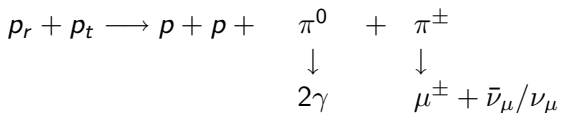
Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$
- ▶ Blobs laufen in umgebendes Medium
→ Aufnahme von Plasma
- ▶ Zwei-Strom-Instabilität isotropisiert 'einlaufendes' Material
- ▶ Strahlungsprozeß:

$$p_r + p_t \longrightarrow p + p + \pi^0 + \pi^\pm$$

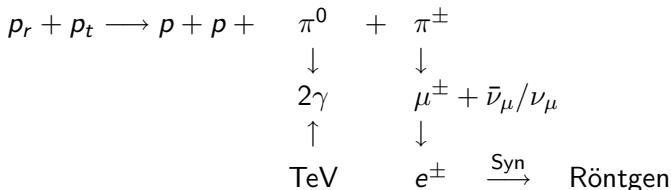
Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$
- ▶ Blobs laufen in umgebendes Medium
→ Aufnahme von Plasma
- ▶ Zwei-Strom-Instabilität isotropisiert 'einlaufendes' Material
- ▶ Strahlungsprozeß:



Blast-Wave Modell

- ▶ Plasmablob entlang magnetischer Flußröhren mit $\Gamma \approx 300$
- ▶ Blobs laufen in umgebendes Medium
→ Aufnahme von Plasma
- ▶ Zwei-Strom-Instabilität isotropisiert 'einlaufendes' Material
- ▶ Strahlungsprozeß:



Kontinuitätsgleichung \rightarrow Protonenverteilungsfunktion

Kontinuitätsgleichung

Kontinuitätsgleichung \rightarrow Protonenverteilungsfunktion

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_p(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} (\dot{\gamma} N_p(\gamma, t)) + \frac{N_p(\gamma, t)}{T} = Q_p(\gamma, t)$$

Kontinuitätsgleichung → Protonenverteilungsfunktion

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_p(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} (\dot{\gamma} N_p(\gamma, t)) + \frac{N_p(\gamma, t)}{T} = Q_p(\gamma, t)$$

Protonenverteilungsfunktion

Kontinuitätsgleichung \rightarrow Protonenverteilungsfunktion

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_p(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} (\dot{\gamma} N_p(\gamma, t)) + \frac{N_p(\gamma, t)}{T} = Q_p(\gamma, t)$$

Protonenverteilungsfunktion

$$N_p(\gamma_p, t) \approx \frac{n_i^* c}{d} \sqrt{\Gamma^2 - 1} H(\Gamma - \gamma_p z(t))$$

$$z(t)^{1 - \frac{T_\pi}{T_N} - \frac{T_\pi}{T_{E_0}}} \exp \left[\frac{T_\pi}{T_{E_0}} \frac{1 - z(t)}{\gamma_p z(t)} \right]$$

Kontinuitätsgleichung \rightarrow Protonenverteilungsfunktion

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_p(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} (\dot{\gamma} N_p(\gamma, t)) + \frac{N_p(\gamma, t)}{T} = Q_p(\gamma, t)$$

Protonenverteilungsfunktion

$$N_p(\gamma_p, t) \approx \frac{n_i^* c}{d} \sqrt{\Gamma^2 - 1} H(\Gamma - \gamma_p z(t))$$

$$z(t) = 1 - \frac{T_\pi}{T_N} - \frac{T_\pi}{T_{E_0}} \exp \left[\frac{T_\pi}{T_{E_0}} \frac{1 - z(t)}{\gamma_p z(t)} \right]$$

mit: $z(t) = \exp \left[\frac{t - t_1}{T_\pi} \right]$

Gammaquellfunktion

Gammaquellfunktion aus $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$

Gammaquellfunktion

Gammaquellfunktion aus $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$

$$Q_\gamma(E_\gamma, t) \approx 8 \frac{n_i^* n_b}{m_\pi d} \sigma_{pp}^\pi \sqrt{\Gamma^2 - 1} z(t)^{1 - \frac{T_\pi}{T_N} - \frac{T_\pi}{T_{E_0}}} \left[\left(\sqrt{\frac{\Gamma}{z(t)}} - E_{min}^{2/3} \right) - \left(\frac{T_\pi}{T_{E_0}} \frac{1 - z(t)}{z(t)} \sqrt{\frac{z(t)}{\Gamma}} - E_{min}^{-2/3} \right) \right]$$

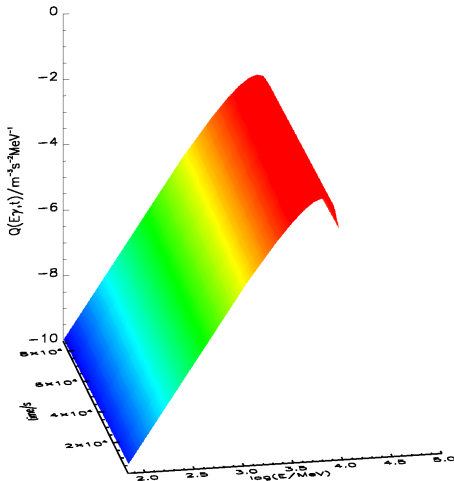
Gammaquellfunktion

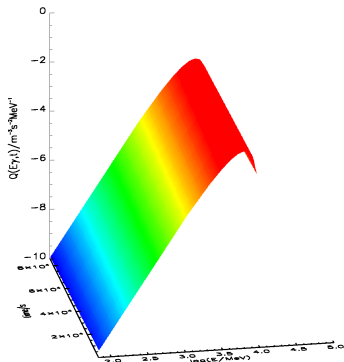
Gammaquellfunktion aus $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$

$$Q_\gamma(E_\gamma, t) \approx 8 \frac{n_i^* n_b}{m_\pi d} \sigma_{pp}^\pi \sqrt{\Gamma^2 - 1} z(t)^{1 - \frac{T_\pi}{T_N} - \frac{T_\pi}{T_{E_0}}}$$

$$\left[\left(\sqrt{\frac{\Gamma}{z(t)}} - E_{min}^{2/3} \right) - \left(\frac{T_\pi}{T_{E_0}} \frac{1 - z(t)}{z(t)} \sqrt{\frac{z(t)}{\Gamma}} - E_{min}^{-2/3} \right) \right]$$

mit: $E_{min} = \frac{E_\gamma}{m_\pi c^2} + \frac{m_\pi c^2}{4E_\gamma}$

Surface Plot von $Q_\gamma(E_\gamma, t)$ im Jet-Frame

Surface Plot von $Q_\gamma(E_\gamma, t)$ im Jet-Frame

Parameter

- ▶ $n_i^* = 0.2 \text{ cm}^{-3}$
- ▶ $n_b = 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$
- ▶ $d = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}$
- ▶ $\sigma_{pp}^\pi = 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$
- ▶ $\Gamma = 300$
- ▶ $T_\pi = 3.42 \cdot 10^6 \text{ s}$
- ▶ $T_N = 6.0 \cdot 10^6 \text{ s}$
- ▶ $T_{E_0} = 4.03 \cdot 10^5 \text{ s}$

Synchrotronstrahlung der sekundären e^\pm

Kontinuitätsgleichung

Synchrotronstrahlung der sekundären e^\pm

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_{e^\pm}(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\dot{\gamma} N_{e^\pm}(\gamma, t) \right) + \frac{N_{e^\pm}(\gamma, t)}{T_E} + \frac{N_{e^\pm}(\gamma, t)}{T_{ann}} = Q_{e^\pm}(\gamma, t)$$

Synchrotronstrahlung der sekundären e^\pm

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_{e^\pm}(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\dot{\gamma} N_{e^\pm}(\gamma, t) \right) + \frac{N_{e^\pm}(\gamma, t)}{T_E} + \frac{N_{e^\pm}(\gamma, t)}{T_{ann}} = Q_{e^\pm}(\gamma, t)$$

$$\Rightarrow N_{e^\pm}(\gamma, t)$$

Synchrotronstrahlung der sekundären e^\pm

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial N_{e^\pm}(\gamma, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\dot{\gamma} N_{e^\pm}(\gamma, t) \right) + \frac{N_{e^\pm}(\gamma, t)}{T_E} + \frac{N_{e^\pm}(\gamma, t)}{T_{ann}} = Q_{e^\pm}(\gamma, t)$$

$$\Rightarrow N_{e^\pm}(\gamma, t)$$

$$\Rightarrow \text{Röntgenstrahlung}$$

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut
- ▶ Was ist das Blast-Wave-Modell?

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut
- ▶ Was ist das Blast-Wave-Modell?
⇒ hadronisches Modell, inelastische p-p-Stöße, Plasmablob

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut
- ▶ Was ist das Blast-Wave-Modell?
⇒ hadronisches Modell, inelastische p-p-Stöße, Plasmablob
- ▶ Ist die Verzögerung erklärbar?

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut
- ▶ Was ist das Blast-Wave-Modell?
⇒ hadronisches Modell, inelastische p-p-Stöße, Plasmablob
- ▶ Ist die Verzögerung erklärbar?
⇒ TeV-Strahlung → berechnet

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut
- ▶ Was ist das Blast-Wave-Modell?
⇒ hadronisches Modell, inelastische p-p-Stöße, Plasmablob
- ▶ Ist die Verzögerung erklärbar?
⇒ TeV-Strahlung → berechnet
⇒ Röntgenstrahlung → ...

Zusammenfassung

- ▶ Was sind Blazare?
⇒ AGN → Variabilität, radiolaut
- ▶ Was ist das Blast-Wave-Modell?
⇒ hadronisches Modell, inelastische p-p-Stöße, Plasmablob
- ▶ Ist die Verzögerung erklärbar?
⇒ TeV-Strahlung → berechnet
⇒ Röntgenstrahlung → ...

ENDE