

# Relativistischer Pick-up von interstellaren Neutralgasatomen

Dirk Gerbig

Ruhr Universität Bochum - Lehrstuhl für Theoretische Weltraum- und Astrophysik

6. Oktober 2006



## Einleitung

## Einleitung

- Entdeckung von AGN

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Rechnung

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Rechnung

- Szenario



## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Rechnung

- Szenario
- Annahmen

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Rechnung

- Szenario
- Annahmen
- Ladungsaustausch-Ionisation

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Rechnung

- Szenario
- Annahmen
- Ladungsaustausch-Ionisation
- Elektronenstoß-Ionisation

## Einleitung

- Entdeckung von AGN
- Klassifizierung
- Standardmodell
- Stoßfrontmodell

## Rechnung

- Szenario
- Annahmen
- Ladungsaustausch-Ionisation
- Elektronenstoß-Ionisation
- Diskussion der Ergebnisse

## Historischer Überblick

- Anfang 20. Jh.: Entdeckung  $\gamma$ -aktiver galaktischer Kerne

## Historischer Überblick

- Anfang 20. Jh.: Entdeckung  $\gamma$ -aktiver galaktischer Kerne
- Frage

## Historischer Überblick

- Anfang 20. Jh.: Entdeckung  $\gamma$ -aktiver galaktischer Kerne
- Frage → Warum erst so spät?

## Historischer Überblick

- Anfang 20. Jh.: Entdeckung  $\gamma$ -aktiver galaktischer Kerne
- Frage → Warum erst so spät?
- Erdatmosphäre absorbiert  $\gamma$ -Strahlung  
→ Meßinstrumente außerhalb absorbierender Hülle



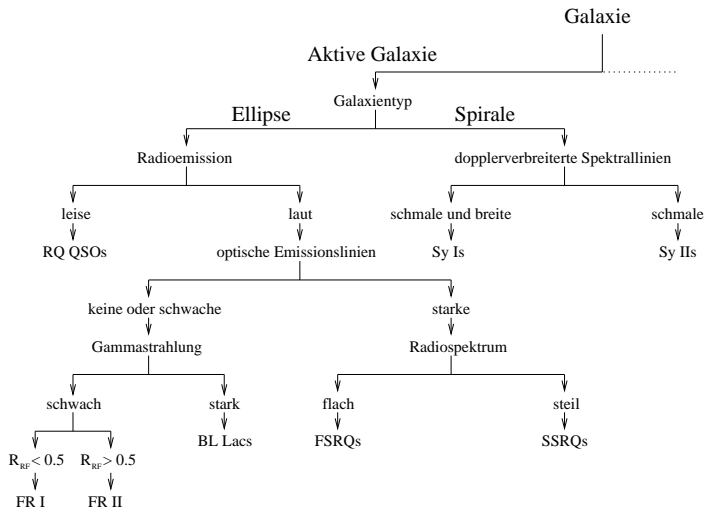
## Historischer Überblick

- Anfang 20. Jh.: Entdeckung  $\gamma$ -aktiver galaktischer Kerne
- Frage → Warum erst so spät?
- Erdatmosphäre absorbiert  $\gamma$ -Strahlung  
→ Meßinstrumente außerhalb absorbierender Hülle
- Ende 20. Jh.: Weltraumteleskop für Gammaastronomie:  
*Compton Gamma Ray Observatory*

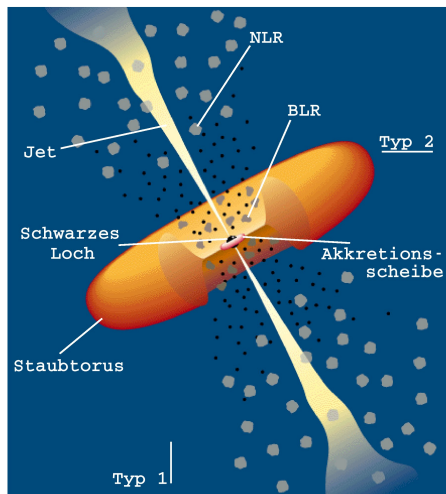
## Historischer Überblick

- Anfang 20. Jh.: Entdeckung  $\gamma$ -aktiver galaktischer Kerne
- Frage → Warum erst so spät?
- Erdatmosphäre absorbiert  $\gamma$ -Strahlung  
→ Meßinstrumente außerhalb absorbierender Hülle
- Ende 20. Jh.: Weltraumteleskop für Gammaastronomie:  
*Compton Gamma Ray Observatory*
- Sommer 2007: GLAST – *Gamma Ray Large Area Space Telescope*

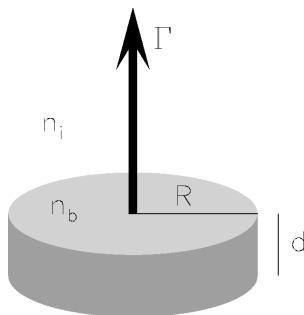
# Klassifizierung der AGN



# Vereinheitlichtes Modell

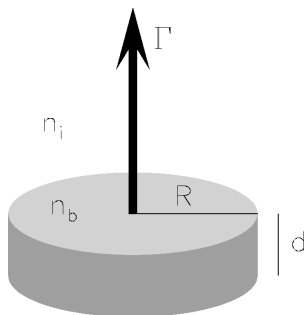


- Zylinderförmiges Volumenelement
  - Radius  $R$
  - Dicke  $d$
  - Dichte  $n_b$



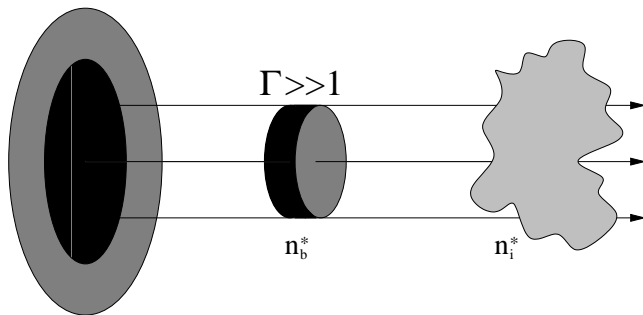
# Relativistisches Stoßfrontmodell

- Zylinderförmiges Volumenelement
  - Radius  $R$
  - Dicke  $d$
  - Dichte  $n_b$
- Stoßfront läuft parallel zur Jetachse mit Lorentzfaktor  $\Gamma$  ins interstellare Medium mit Dichte  $n_i$



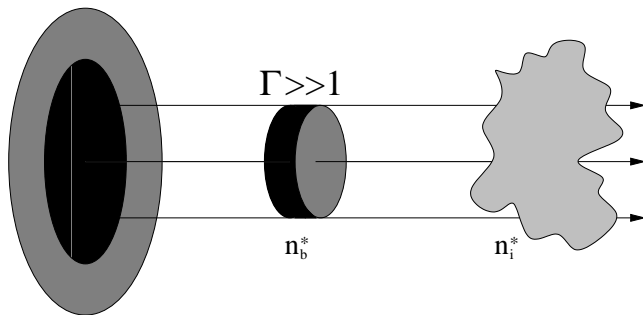
# Relativistischer Pick-Up Prozess

- Aus Zentralbereich entspringt homogenes Magnetfeld



# Relativistischer Pick-Up Prozess

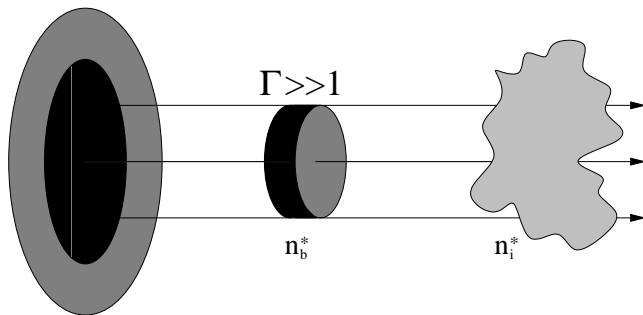
- Aus Zentralbereich entspringt homogenes Magnetfeld
- Plasmablob bewegt sich entlang der Jetachse





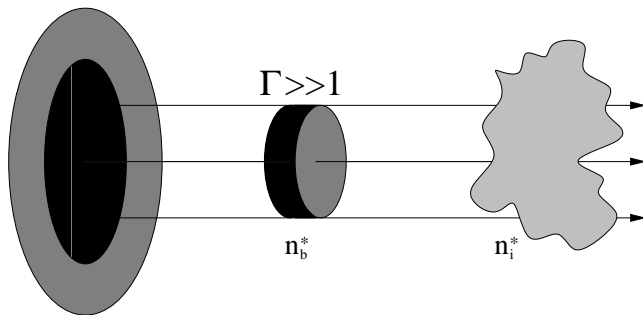
# Relativistischer Pick-Up Prozess

- Aus Zentralbereich entspringt homogenes Magnetfeld
- Plasmablob bewegt sich entlang der Jetachse
- Blob läuft ins ruhende interstellare Medium und nimmt entgegenkommende Materie auf  $\rightarrow$  Pick-up



# Relativistischer Pick-Up Prozess

- Aus Zentralbereich entspringt homogenes Magnetfeld
- Plasmablob bewegt sich entlang der Jetachse
- Blob läuft ins ruhende interstellare Medium und nimmt entgegenkommende Materie auf  $\rightarrow$  Pick-up
- Zwei-Strom-Instabilität isotropisiert 'einlaufendes' Material



Szenario

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$
  - Ladungsaustausch  $H^+ + H \rightarrow H + H^+$



## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$
  - Ladungsaustausch  $H^+ + H \rightarrow H + H^+$

## Idee → Ziel

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$
  - Ladungsaustausch  $H^+ + H \rightarrow H + H^+$

## Idee → Ziel

- Reaktionsrate des Ionisationsprozesses

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$
  - Ladungsaustausch  $H^+ + H \rightarrow H + H^+$

## Idee → Ziel

- Reaktionsrate des Ionisationsprozesses
- Ionisationslänge  $l_H$  hieraus ermitteln

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$
  - Ladungsaustausch  $H^+ + H \rightarrow H + H^+$

## Idee → Ziel

- Reaktionsrate des Ionisationsprozesses
- Ionisationslänge  $l_H$  hieraus ermitteln
- Vergleich zwischen Blobdicke  $d$  und Ionisationslänge  $l_H$

## Szenario

- Blob besteht aus Elektron-Proton-Plasma  
→ hadronisches Modell
- interstellares Medium besteht zu großem Teil aus Neutralgasatomen
- Blobteilchen stoßen mit Wasserstoff-Atomen und ionisieren diese
  - Elektronenstoß  $H + e \rightarrow H^+ + 2e$
  - Ladungsaustausch  $H^+ + H \rightarrow H + H^+$

## Idee → Ziel

- Reaktionsrate des Ionisationsprozesses
- Ionisationslänge  $l_H$  hieraus ermitteln
- Vergleich zwischen Blobdicke  $d$  und Ionisationslänge  $l_H$
- Ionisationsgrad  $f_{ion}$  bestimmen

- Isotrope Protonen-Verteilungsfunktion

$$f_p(\mathbf{p}) = \frac{n_p}{4\pi(m_p c)^3 \Theta_p K_2(\Theta_p^{-1})} \exp \left[ -\frac{\sqrt{1 + (\mathbf{p}/m_p c)^2}}{\Theta_p} \right]$$

- Isotrope Protonen-Verteilungsfunktion

$$f_p(\mathbf{p}) = \frac{n_p}{4\pi(m_p c)^3 \Theta_p K_2(\Theta_p^{-1})} \exp \left[ -\frac{\sqrt{1 + (p/m_p c)^2}}{\Theta_p} \right]$$

- Dimensionslose Teilchentemperatur

$$\Theta_p = k_B T / (m_p c^2)$$

- Isotrope Protonen-Verteilungsfunktion

$$f_p(\mathbf{p}) = \frac{n_p}{4\pi(m_p c)^3 \Theta_p K_2(\Theta_p^{-1})} \exp \left[ -\frac{\sqrt{1 + (p/m_p c)^2}}{\Theta_p} \right]$$

- Dimensionslose Teilchentemperatur

$$\Theta_p = k_B T / (m_p c^2)$$

- Wasserstoff-Verteilungsfunktion

$$f_H(\mathbf{p}) = \frac{n_H}{2\pi p^2} \delta(\mu + 1) \delta(p - P)$$



- Isotrope Protonen-Verteilungsfunktion

$$f_p(\mathbf{p}) = \frac{n_p}{4\pi(m_p c)^3 \Theta_p K_2(\Theta_p^{-1})} \exp \left[ -\frac{\sqrt{1 + (p/m_p c)^2}}{\Theta_p} \right]$$

- Dimensionslose Teilchentemperatur

$$\Theta_p = k_B T / (m_p c^2)$$

- Wasserstoff-Verteilungsfunktion

$$f_H(\mathbf{p}) = \frac{n_H}{2\pi p^2} \delta(\mu + 1) \delta(p - P)$$

- mit

$$\mu = \cos \theta = \frac{p_{\parallel}}{p} \quad P = \Gamma m V$$

# Reaktionsratenformalismus nach Weaver

# Reaktionsratenformalismus nach Weaver

Reaktionsrate zwischen Teilchen vom Typ 1 und 2

$$R_{12} = c \int d^3 p_1 \int d^3 p_2 f_1(\mathbf{p}_1) f_2(\mathbf{p}_2) \sigma(\beta_R) \frac{\gamma_R \beta_R}{\gamma \Gamma}$$

# Reaktionsratenformalismus nach Weaver

Reaktionsrate zwischen Teilchen vom Typ 1 und 2

$$R_{12} = c \int d^3 p_1 \int d^3 p_2 f_1(\mathbf{p}_1) f_2(\mathbf{p}_2) \sigma(\beta_R) \frac{\gamma_R \beta_R}{\gamma \Gamma}$$

## Wichtige Größen

Im Ruhesystem von Teilchen der Sorte 1 bestimmte Größen:

$$\gamma_R = \gamma \Gamma (1 - \boldsymbol{\beta}_1 \cdot \boldsymbol{\beta}_2)$$

$$\beta_R = \sqrt{1 - \gamma_R^{-2}}$$

# Reaktionsratenformalismus nach Weaver

Reaktionsrate zwischen Teilchen vom Typ 1 und 2

$$R_{12} = c \int d^3 p_1 \int d^3 p_2 f_1(\mathbf{p}_1) f_2(\mathbf{p}_2) \sigma(\beta_R) \frac{\gamma_R \beta_R}{\gamma \Gamma}$$

## Wichtige Größen

Im Ruhesystem von Teilchen der Sorte 1 bestimmte Größen:

$$\gamma_R = \gamma \Gamma (1 - \boldsymbol{\beta}_1 \cdot \boldsymbol{\beta}_2)$$

$$\beta_R = \sqrt{1 - \gamma_R^{-2}}$$

Unter Berücksichtigung der Verteilungsfunktionen folgt:

$$\boldsymbol{\beta}_1 = \beta (\sin \theta_1, 0, \cos \theta_1)$$

$$\boldsymbol{\beta}_2 = B(0, 0, -1)$$

# Reaktionsratenformalismus nach Weaver

Reaktionsrate zwischen Teilchen vom Typ 1 und 2

$$R_{12} = c \int d^3 p_1 \int d^3 p_2 f_1(\mathbf{p}_1) f_2(\mathbf{p}_2) \sigma(\beta_R) \frac{\gamma_R \beta_R}{\gamma \Gamma}$$

## Wichtige Größen

Im Ruhesystem von Teilchen der Sorte 1 bestimmte Größen:

$$\gamma_R = \gamma \Gamma (1 - \boldsymbol{\beta}_1 \cdot \boldsymbol{\beta}_2)$$

$$\beta_R = \sqrt{1 - \gamma_R^{-2}}$$

Unter Berücksichtigung der Verteilungsfunktionen folgt:

$$\boldsymbol{\beta}_1 = \beta (\sin \theta_1, 0, \cos \theta_1)$$

$$\boldsymbol{\beta}_2 = B(0, 0, -1)$$

Einsetzen liefert:

$$\Rightarrow \gamma_R = \gamma \Gamma (1 + \beta B \mu_1), \quad \text{mit} \quad \mu_1 = \cos \theta_1$$

Ionisationslänge

$$l_H(\Theta_p, \Gamma) = \frac{V n_H}{R_{12}} \stackrel{v \equiv Bc}{=} \frac{\sqrt{(\Gamma^2 - 1)} c n_H}{\Gamma R_{12}}$$

# Ergebnisse der Ionisationsprozesse

Ionisationslänge

$$l_H(\Theta_p, \Gamma) = \frac{V n_H}{R_{12}} \stackrel{v \approx Bc}{=} \frac{\sqrt{(\Gamma^2 - 1)} c n_H}{\Gamma R_{12}}$$

Analytische Approximation für  $\Theta_p \ll 1$

## Ergebnis der Ladungsaustausch Ionisation

- Wirkungsquerschnitt von Lindsay & Stebbings (2005)

$$l_H(\Theta_p \ll 1, \Gamma) = 1.25 \cdot 10^{18} \frac{\Gamma^2 \Theta_p^{1/2}}{n_{p,8}} \text{ cm}$$



# Ergebnisse der Ionisationsprozesse

Ionisationslänge

$$l_H(\Theta_p, \Gamma) = \frac{V n_H}{R_{12}} \stackrel{v \equiv Bc}{=} \frac{\sqrt{(\Gamma^2 - 1)} c n_H}{\Gamma R_{12}}$$

Analytische Approximation für  $\Theta_p \ll 1$

## Ergebnis der Ladungsaustausch Ionisation

- Wirkungsquerschnitt von Lindsay & Stebbings (2005)

$$l_H(\Theta_p \ll 1, \Gamma) = 1.25 \cdot 10^{18} \frac{\Gamma^2 \Theta_p^{1/2}}{n_{p,8}} \text{ cm}$$

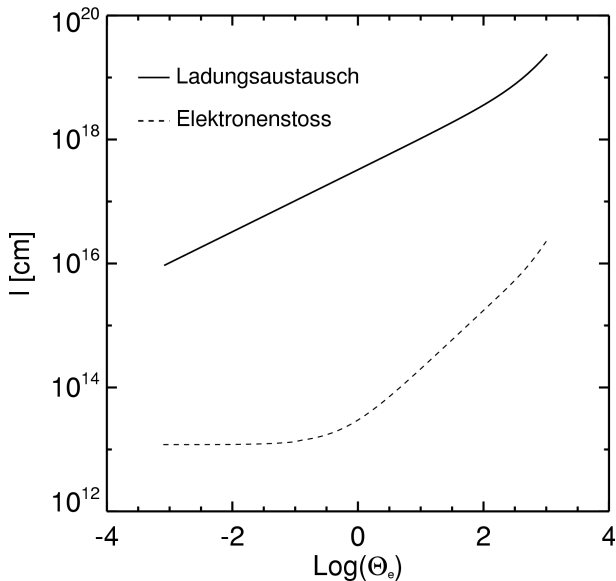
## Ergebnis der Elektronenstoss Ionisation

- Wirkungsquerschnitt von Lotz (1967)

$$l_H(\Theta_e \ll 1, \Gamma) \simeq 1.15 \cdot 10^{13} \frac{\Gamma^2}{n_{p,8}} \text{ cm}$$

# Elektronenstoss vs. Ladungsaustausch I

- Numerische Lösung der Ionisationslänge



Ionisationslänge  $l_H \rightarrow$  Ionisationsgrad  $f_{ion}$

Ionisationslänge  $l_H \rightarrow$  Ionisationsgrad  $f_{ion}$

- Vergleiche Blobdicke  $d$  mit  $l_H$

Ionisationslänge  $l_H \rightarrow$  Ionisationsgrad  $f_{ion}$

- Vergleiche Blobdicke  $d$  mit  $l_H$
- $N_0$  Anzahl der ankommenden Teilchen

## Ionisationslänge $l_H \rightarrow$ Ionisationsgrad $f_{ion}$

- Vergleiche Blobdicke  $d$  mit  $l_H$
- $N_0$  Anzahl der ankommenden Teilchen
- $S$  Menge der ionisierten Neutralteilchen nach Durchlaufen von  $d$

$$S = N_0 - N_0 \exp\left(-\frac{d}{l}\right) = N_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{l}\right)\right]$$

## Ionisationslänge $l_H \rightarrow$ Ionisationsgrad $f_{ion}$

- Vergleiche Blobdicke  $d$  mit  $l_H$
- $N_0$  Anzahl der ankommenden Teilchen
- $S$  Menge der ionisierten Neutralteilchen nach Durchlaufen von  $d$

$$S = N_0 - N_0 \exp\left(-\frac{d}{l}\right) = N_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{l}\right)\right]$$

- Ionisationsgrad von Wasserstoff

$$f_{ion} = \frac{S}{N_0} = 1 - \exp\left(-\frac{d}{l}\right)$$

Mit vorher verwendeter Näherung



## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Ionisation von Wasserstoff

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Ionisation von Wasserstoff

- Vollständige Ionisation durch den Elektronenstoss

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Ionisation von Wasserstoff

- Vollständige Ionisation durch den Elektronenstoss
- Ladungsaustausch für kleine Temperaturen effektiverer Prozess

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Ionisation von Wasserstoff

- Vollständige Ionisation durch den Elektronenstoss
- Ladungsaustausch für kleine Temperaturen effektiverer Prozess
- $\Rightarrow$  Elektronenstoss dominanter Ionisationsprozess

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Ionisation von Wasserstoff

- Vollständige Ionisation durch den Elektronenstoss
- Ladungsaustausch für kleine Temperaturen effektiverer Prozess
- $\Rightarrow$  Elektronenstoss dominanter Ionisationsprozess
- $\Rightarrow$  Je kleiner Temperatur, desto effektiver Ladungsaustausch

## Mit vorher verwendeter Näherung

- Ladungsaustausch - Lindsay & Stebbings (2005)

$$f_H \simeq \frac{d}{l_H} = 8.03 \cdot 10^{-4} \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2^2 \Theta_p^{1/2}}$$

- Elektronenstoss - Lotz (1967)

$$f_H \simeq 1 \frac{d_{15} n_{p,8}}{\Gamma_2}$$

## Ionisation von Wasserstoff

- Vollständige Ionisation durch den Elektronenstoss
- Ladungsaustausch für kleine Temperaturen effektiverer Prozess
- $\Rightarrow$  Elektronenstoss dominanter Ionisationsprozess
- $\Rightarrow$  Je kleiner Temperatur, desto effektiver Ladungsaustausch
- Pick-up Ionen können Zweistrominstabilitäten anregen



# Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN  
⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN
  - ⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell
- Szenario eines Stossfrontmodells

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN  
⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell
- Szenario eines Stossfrontmodells  
⇒ hadronisches Modell, kaltes ISM

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN  
⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell
- Szenario eines Stossfrontmodells  
⇒ hadronisches Modell, kaltes ISM
- Wird Zweistominstabilität angeregt?

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN  
⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell
- Szenario eines Stossfrontmodells  
⇒ hadronisches Modell, kaltes ISM
- Wird Zweistominstabilität angeregt?  
Elektronenstoss → analytisch und numerisch berechnet

# Zusammenfassung

- Überblick über AGN
  - ⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell
- Szenario eines Stossfrontmodells
  - ⇒ hadronisches Modell, kaltes ISM
- Wird Zweistominstabilität angeregt?
  - Elektronenstoss → analytisch und numerisch berechnet
  - Ladungsaustausch → analytisch und numerisch berechnet



# Zusammenfassung

- Überblick über AGN  
⇒ AGN → Klassen, Vereinheitlichtes Modell
- Szenario eines Stossfrontmodells  
⇒ hadronisches Modell, kaltes ISM
- Wird Zweistominstabilität angeregt?  
Elektronenstoss → analytisch und numerisch berechnet  
Ladungsaustausch → analytisch und numerisch berechnet

*ENDE*