

Untersuchung der Eigenschaften von Filamenten junger Supernovaresten

Robert Rettig

Universität Potsdam/DESY Zeuthen

Astroteilchenschule, 5.-13. Oktober 2011



① Einführung

Motivation

Synchrotronstrahlung von SNR

Filamente von SNR

② Nichtthermische Filamente

Gründe für die räumliche Begrenzung

Modelle

Berechnung

Ergebnisse

Zusammenfassung

Supernovareste (SNR)

- Quellen hochenergetischer Strahlung
- Emissionen von Röntgenstrahlung bis hin zu Gammastrahlung im TeV-Bereich
 - ⇒ Hinweis auf ultrahochrelativistische Elektronen und Ionen
 - ⇒ SNR = kosmische Beschleuniger

Strahlungsprozesse

- thermische Strahlung ($T > 10^6 \text{K}$)
- nichtthermische Strahlung
 - Synchrotronstrahlung
 - Bremsstrahlung
 - Inverse Compton-Streuung
 - γ -Quanten aufgrund des π^0 -Zerfalls

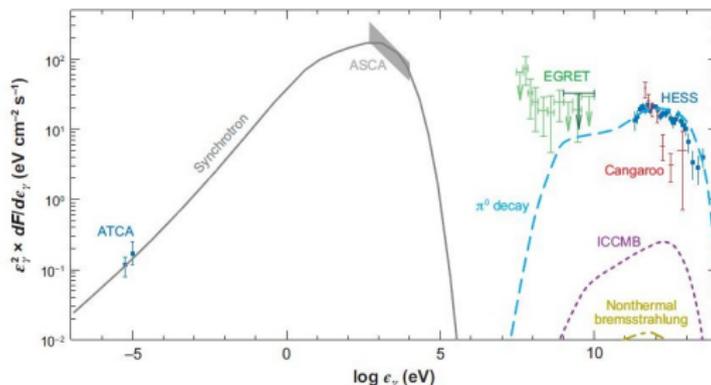
Supernovareste (SNR)

- Quellen hochenergetischer Strahlung
- Emissionen von Röntgenstrahlung bis hin zu Gammastrahlung im TeV-Bereich
 - ⇒ Hinweis auf ultrahochrelativistische Elektronen und Ionen
 - ⇒ SNR = kosmische Beschleuniger

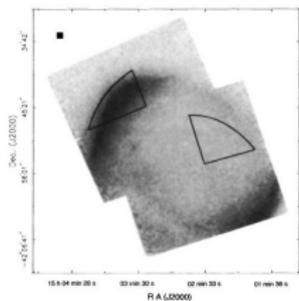
Strahlungsprozesse

- thermische Strahlung ($T > 10^6 \text{K}$)
- nichtthermische Strahlung
 - Synchrotronstrahlung
 - Bremsstrahlung
 - Inverse Compton-Streuung
 - γ -Quanten aufgrund des π^0 -Zerfalls

z.B. Spektrum von G347.3-0.5 (Berezhko & Völk 2006)



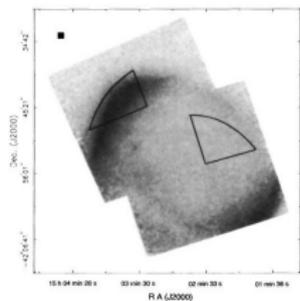
Synchrotronstrahlung von SNR



**SN1006 im 0,4-8 keV-Energiebereich aus Sicht des
ASCA-Satelliten**

Koyama et al. (1995)

Synchrotronstrahlung von SNR



**SN1006 im 0,4-8 keV-Energiebereich aus Sicht des
ASCA-Satelliten**

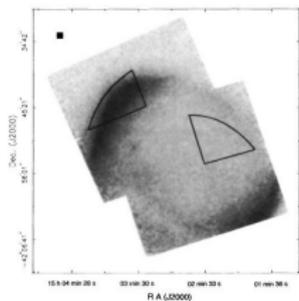
Koyama et al. (1995)



Chandra - Röntgensatellit der NASA

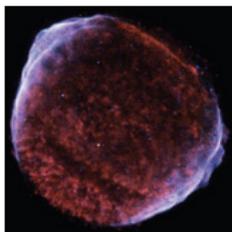
<http://www.nasa.gov>

Synchrotronstrahlung von SNR



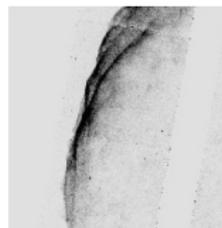
SN1006 im 0,4-8 keV-Energiebereich aus Sicht des ASCA-Satelliten

Koyama et al. (1995)



Chandra - Röntgenaufnahme des gesamten Rests von SN1006

<http://chandra.harvard.edu>



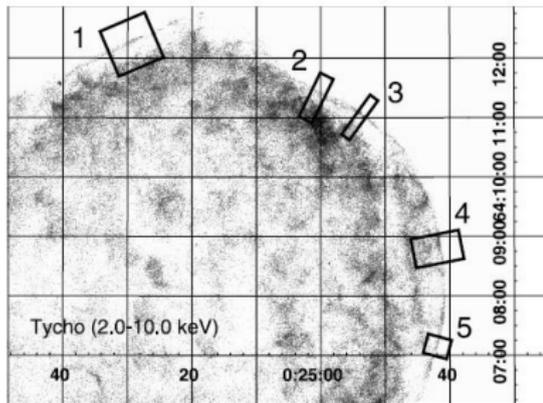
Nordöstliche Rand von SN1006 im 1,2-2 keV-Energiebereich aus Sicht von Chandra

Long et al. (2003)



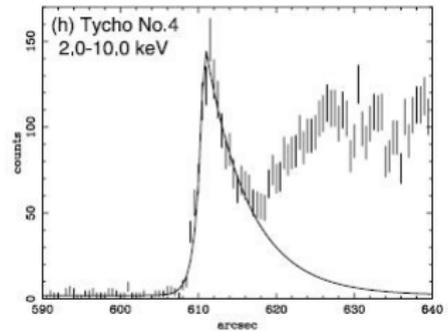
Chandra - Röntgensatellit der NASA

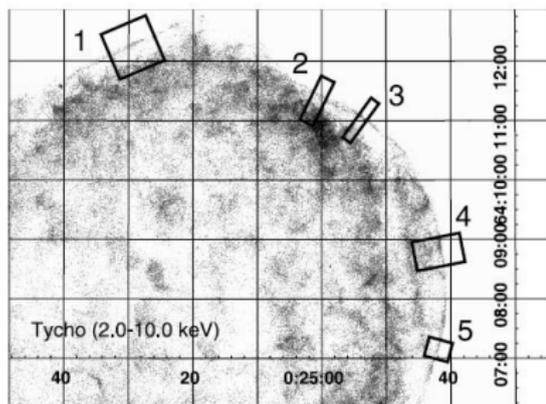
<http://www.nasa.gov>

nichtthermische Filamente in *Tycho*

Bamba et al. (2005)

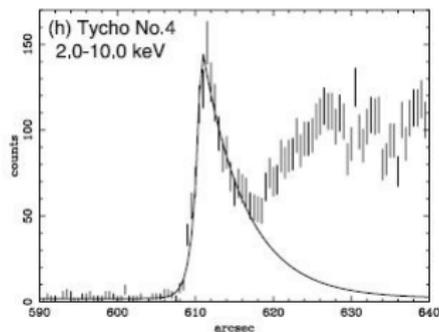
Profil des Filaments Nr.4



nichtthermische Filamente in *Tycho*

Bamba et al. (2005)

Profil des Filaments Nr.4



Beschreibung der Profile durch

$$f(x) = A \exp \left(- \left| \frac{x_0 - x}{w_u/d} \right| \right)$$

nichtthermische Filamente

Regionen in den äußeren Bereichen von SNR mit erhöhter Synchrotronemissivität im Bereich harter Röntgenstrahlung

⇒ Hinweis auf die Beschleunigung hochenergetischer Elektronen nahe der Schockfront

⇒ charakteristische Breiten $w_d \sim (0,01 - 0,4)\text{pc}$

nichtthermische Filamente

Regionen in den äußeren Bereichen von SNR mit erhöhter Synchrotronemissivität im Bereich harter Röntgenstrahlung

⇒ Hinweis auf die Beschleunigung hochenergetischer Elektronen nahe der Schockfront

⇒ charakteristische Breiten $w_d \sim (0,01 - 0,4)\text{pc}$

Frage

Was sind die Eigenschaften? Welcher Prozess ist verantwortlich für die räumliche Begrenzung?

Die Untersuchung dieser Fragestellung ist hilfreich für ein besseres Verständnis der Schockbeschleunigung in SNR und die Interpretation der zu erfolgenden Messungen.

mögliche Prozesse zur Begrenzung der Filamentbreiten bzw. Abfall der Synchrotronemissivität

- Energieverluste aufgrund von Synchrotronstrahlung in einem verstärkten Magnetfeld

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{4e^4 v^2 B^2}{9m^4 c^9} E^2 \stackrel{v \approx c}{\cong} \frac{4e^4 B^2}{9m^4 c^7} E^2$$

mögliche Prozesse zur Begrenzung der Filamentbreiten bzw. Abfall der Synchrotronemissivität

- Energieverluste aufgrund von Synchrotronstrahlung in einem verstärkten Magnetfeld

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{4e^4 v^2 B^2}{9m^4 c^9} E^2 \stackrel{v \approx c}{\cong} \frac{4e^4 B^2}{9m^4 c^7} E^2$$

- exponentielle Dämpfung des turbulenten Magnetfeldes hinter dem Schock mit einer Dämpfungslänge von $l_d \sim (0,003 - 0,03)\text{pc}$ (Pohl et al. 2005)

Idee

Berechnung der Filamentprofile und deren Spektren sowie Vergleich mit dem Plateauspektrum mit zwei unterschiedlichen Modellen

- 1 Modell des Strahlungsverlustes mit einem konstanten Magnetfeld

$$B(r) = B = \text{const.}$$

- 2 Modell der Magnetfelddämpfung mit einem ortsabhängigen Magnetfeld

$$B(r) = B_0 + \delta B \exp\left(\frac{r - r_s}{l_d}\right) \quad \text{mit} \quad r \leq r_s$$

Synchrotronemissionskoeffizient

$$j_\nu(r) = \frac{1,8\sqrt{3}e^3 B(r)}{4\pi mc^2} \left(\frac{\nu}{\nu_0(r)} \right)^{1/3} \int_1^\infty d\gamma N(\gamma, r) \gamma^{-2/3} \exp\left(-\frac{\nu}{\nu_0(r)\gamma^2}\right)$$

$$\text{mit } \nu_0(r) = \frac{3eB(r)}{4\pi mc} \quad \text{und} \quad N(\gamma, r) = \frac{dN}{d\gamma dV}$$

Synchrotronemissionskoeffizient

$$j_\nu(r) = \frac{1,8\sqrt{3}e^3 B(r)}{4\pi mc^2} \left(\frac{\nu}{\nu_0(r)}\right)^{1/3} \int_1^\infty d\gamma N(\gamma, r) \gamma^{-2/3} \exp\left(-\frac{\nu}{\nu_0(r)\gamma^2}\right)$$

$$\text{mit } \nu_0(r) = \frac{3eB(r)}{4\pi mc} \quad \text{und} \quad N(\gamma, r) = \frac{dN}{d\gamma dV}$$

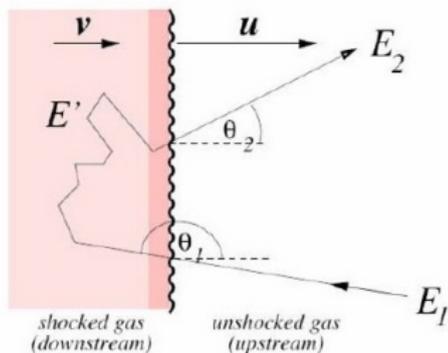
Diffusion-Konvektion-Gleichung

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left[D(\gamma, z) \frac{\partial N(\gamma, z)}{\partial z} \right]}_{\text{Diffusionsterm}} - \underbrace{v \frac{\partial N(\gamma, z)}{\partial z}}_{\text{Konvektionsterm}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial \gamma} [A(\gamma, z) N(\gamma, z)]}_{\text{Energieverlustterm}} + \underbrace{Q(\gamma, z)}_{\text{Quellterm}} = 0$$

$$\text{mit } z = r_s - r \quad \text{und} \quad A(\gamma, r) = \frac{d\gamma}{dt}$$

Quellterm

$$Q(\gamma, z) = q_0 \gamma^{-2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{cut}}\right) \delta(z)$$



nichtthermische
Teilchenverteilung:

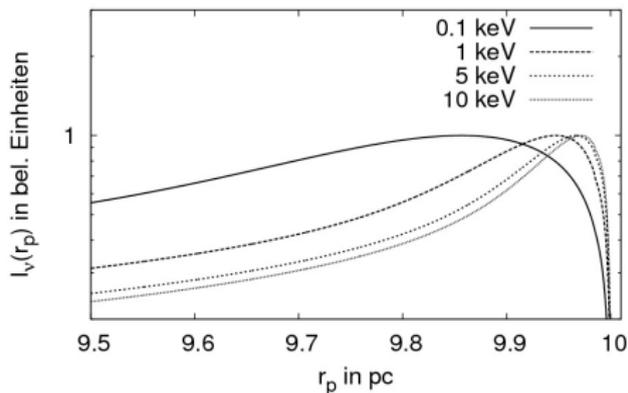
$$N(E) \propto E^{-2} \exp\left(-\frac{E}{E_{cut}}\right)$$

Elektronenverteilung

$$N(\gamma, x(z)) = \frac{q_0}{2\sqrt{\pi\alpha D_0}} \gamma^{-3} \int_1^\infty ds \frac{s^{-2}}{\sqrt{\ln(s)}} \exp\left\{-\frac{s\gamma}{\gamma_{cut}} - \frac{\left[\frac{v}{\alpha\gamma} \left(1 - \frac{1}{s}\right) - x(z)\right]^2}{\frac{4D_0}{\alpha} \ln(s)}\right\}$$

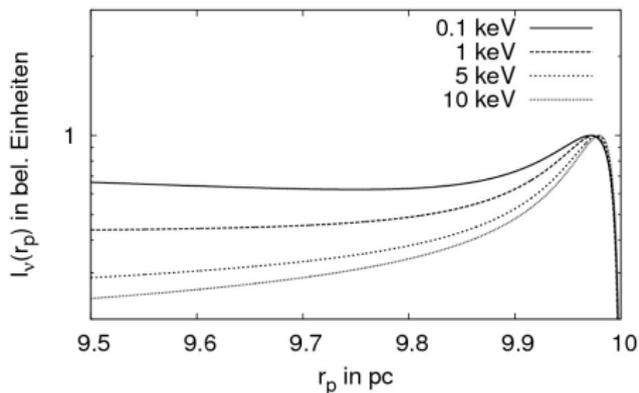
z.B. *SN1006*: $r_s \simeq 10\text{pc}$, $w_d \simeq 0,2\text{pc}$, $v \simeq 750\text{km/s}$, $E_{cut} \simeq 30\text{TeV}$

Strahlungsverluste



$$B = 100\mu\text{G}$$

Magnetfelddämpfung

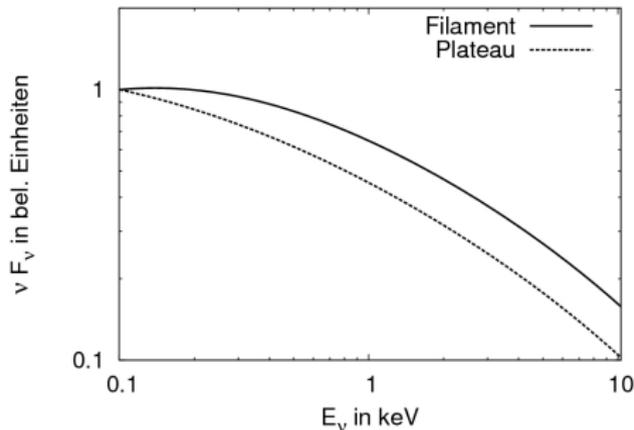


$$B_0 = 10\mu\text{G}$$

$$\delta B = 45\mu\text{G}; \quad l_d = 0,03\text{pc}$$

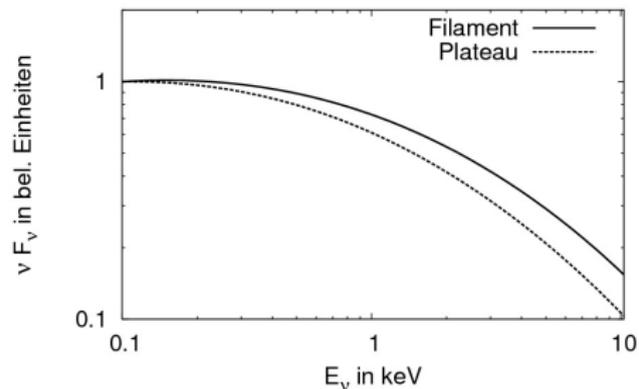
z.B. *SN1006*: $r_s \simeq 10\text{pc}$, $w_d \simeq 0,2\text{pc}$, $v \simeq 750\text{km/s}$, $E_{cut} \simeq 30\text{TeV}$

Strahlungsverluste



$$B = 100\mu\text{G}$$

Magnetfelddämpfung

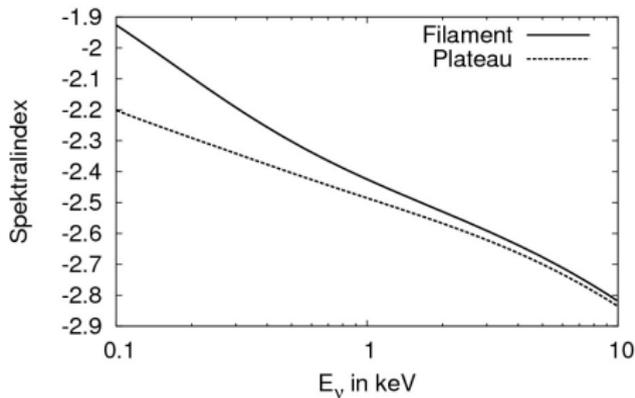


$$B_0 = 10\mu\text{G}$$

$$\delta B = 45\mu\text{G}; l_d = 0,03\text{pc}$$

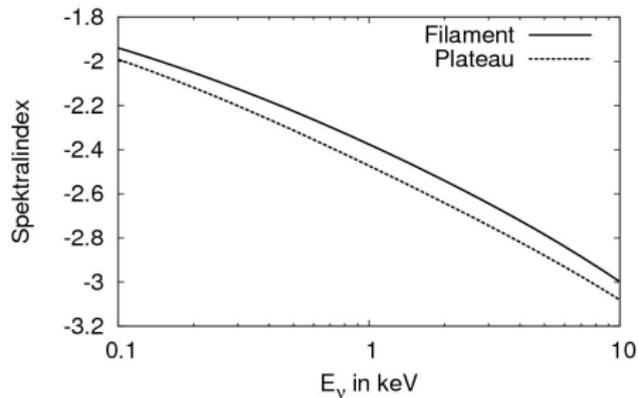
z.B. SN1006: $r_s \simeq 10\text{pc}$, $w_d \simeq 0,2\text{pc}$, $v \simeq 750\text{km/s}$, $E_{cut} \simeq 30\text{TeV}$

Strahlungsverluste



$$B = 100\mu\text{G}$$

Magnetfelddämpfung



$$B_0 = 10\mu\text{G}$$

$$\delta B = 45\mu\text{G}; l_d = 0,03\text{pc}$$

Zusammenfassung

- SNR weisen an den Rändern als Filamente bezeichnete Regionen erhöhter Synchrotronemissivität auf.
- Begrenzung der Filamente auf ihre beobachtbaren Breiten kann durch Strahlungsverluste bei den Elektronen oder durch eine Magnetfelddämpfung erklärt werden.
- Eine Unterscheidung der Modelle anhand der aus ihnen folgenden Resultate für die Spektren ist im Prinzip theoretisch möglich, wird jedoch aufgrund von störenden Begleitprozessen nicht realisierbar sein.
- Die Anwendung eines fortschrittlicheren Modells ist für die weitere Untersuchung empfehlenswert.

Supernova Remnant
SN1006

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

A large, irregularly shaped supernova remnant (SNR) is the central focus of the image. It exhibits a complex, multi-colored structure with prominent blue and red regions, indicating different chemical compositions and temperatures. The remnant is set against a dark background filled with numerous stars of varying brightness and colors. A small, light blue rectangular box highlights a specific area on the upper right edge of the remnant, and a thin yellow line traces a path along its boundary.