

Astroteilchenphysik II: Gamma-Strahlung

Ralph Engel und Markus Roth
Institut für Kernphysik
Markus.Roth@kit.edu

Beschleunigung geladener Teilchen

- Astrophysikalische Schockfronten
- Beschleunigung an ebenen Schockfronten
- Energiegewinn durch Kreuzen der Schockfront
- Fermi-Beschleunigung erster Ordnung
- Potenzgesetz der beschleunigten Teilchen
- Betrachtungen zur Maximalenergie

**Nächste Woche im Detail:
Erzeugungsprozesse von Photonen**

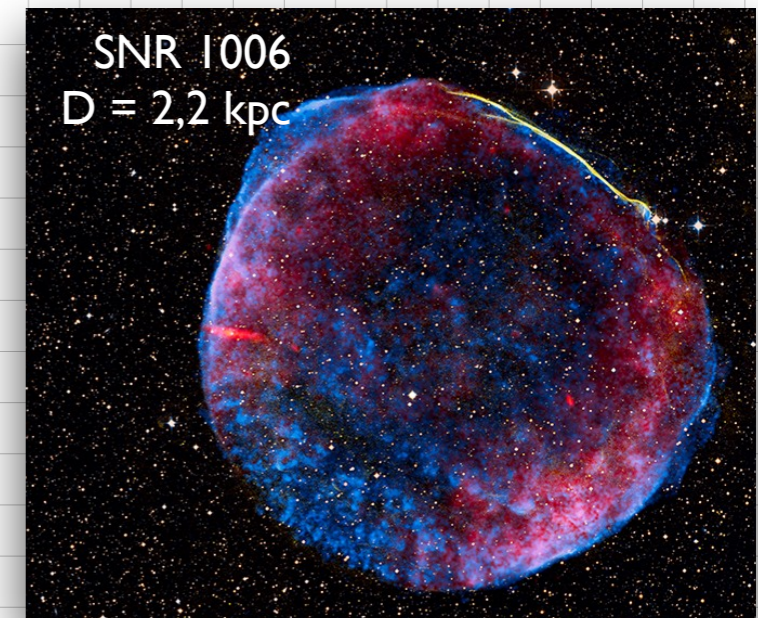
Dienstag		Donnersta	
		23.04.2020	Vorlesung
		30.04.2020	Vorlesung
		07.05.2020	Vorlesung
12.05.2020	Übung	14.05.2020	Vorlesung
		-	Feiertag
		28.05.2020	Vorlesung
		04.06.2020	Vorlesung
09.06.2020	Übung	-	Feiertag
		18.06.2020	Vorlesung
23.06.2020	Übung	25.06.2020	Vorlesung
		02.07.2020	Vorlesung
07.07.2020	Übung	09.07.2020	Vorlesung
		16.07.2020	Vorlesung
21.07.2020	Übung	23.07.2020	Vorlesung

Bedingungen in astrophysikalischen Objekten

Schockfronten: Beschleunigung von Elektronen, Positronen, Protonen, ... Kernen (Potenzgesetz in der Energieverteilung?)

Umgebung: Restgas- und Molekülwolken
Photonen verschiedener Strahlungsfelder (CMB, Sternenlicht, lokal erzeugte Strahlung)

Beispiele:
SN-Überreste,
Aktive Galaxiekern



AGN: M87

- Many observations
- *Event Horizon Telescope* maps shadow of the BH

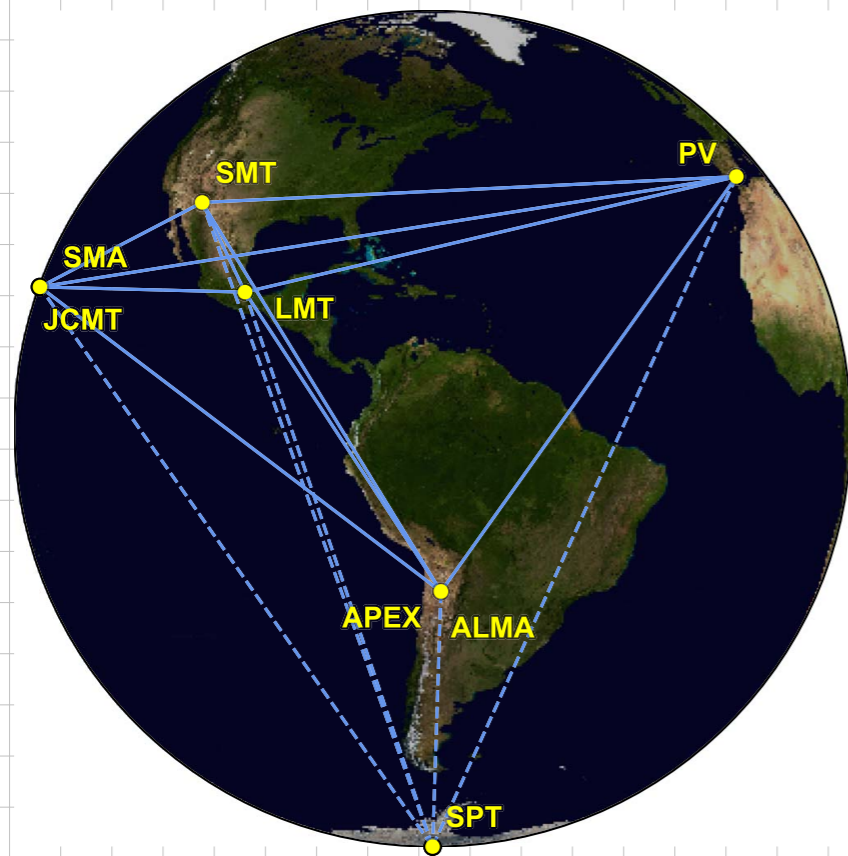
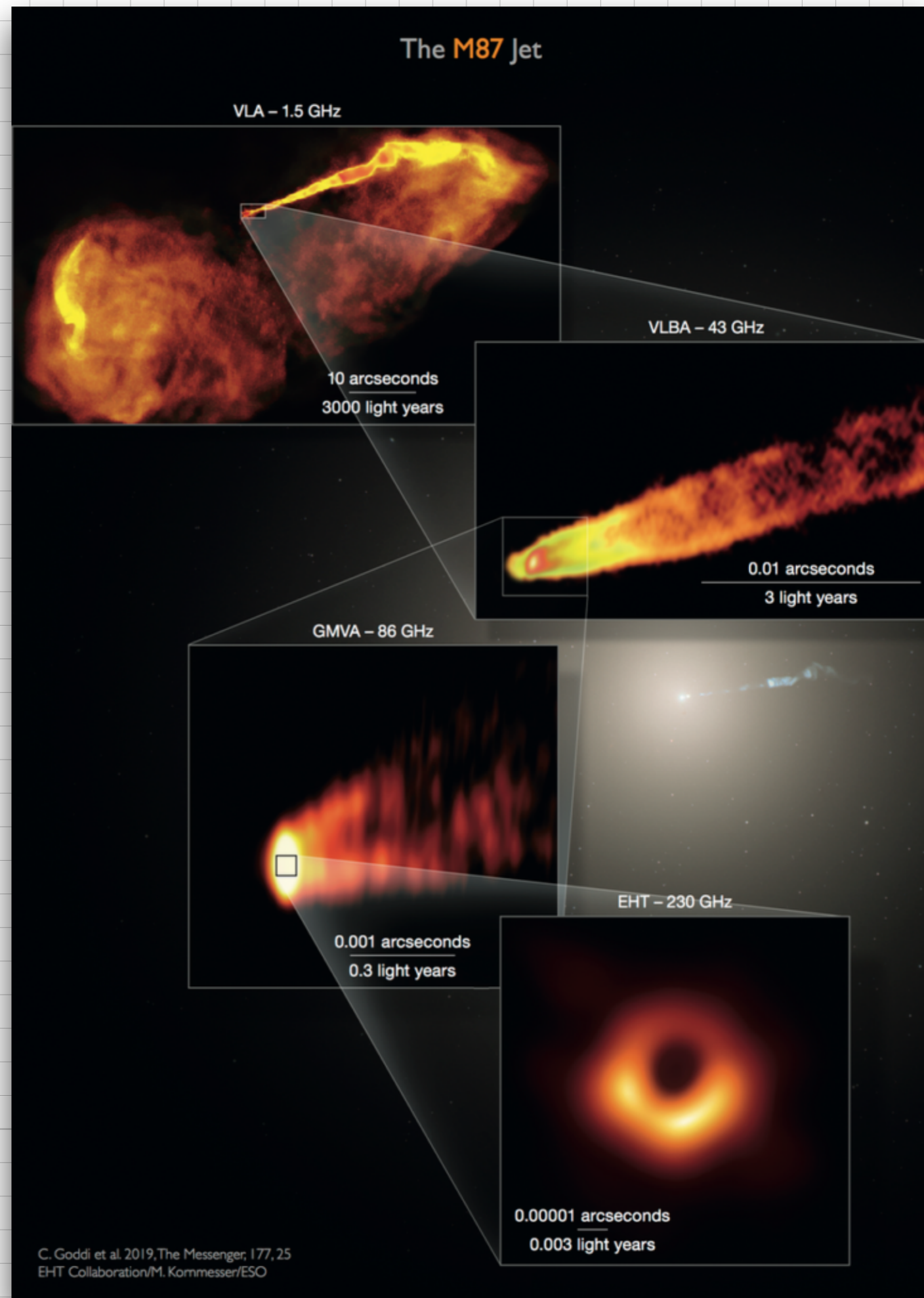
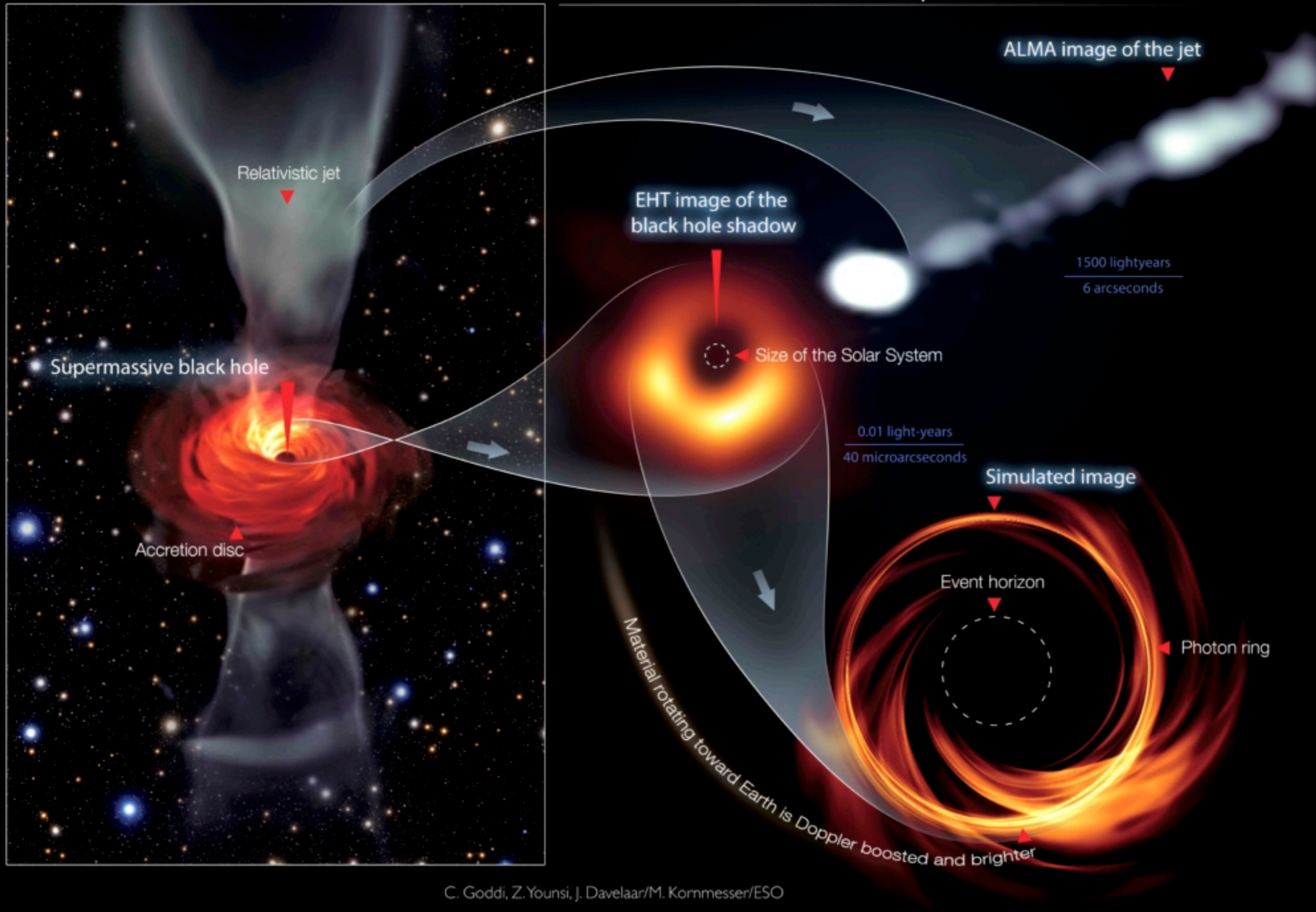


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual visibility on M87* (+12° declination). The dashed baselines were used for the calibration source 3C279 (see Papers III and IV).



M87 Black Hole – Event Horizon Telescope



Stoßfront einer Flüssigkeit (neudeutsch: Schockfront)

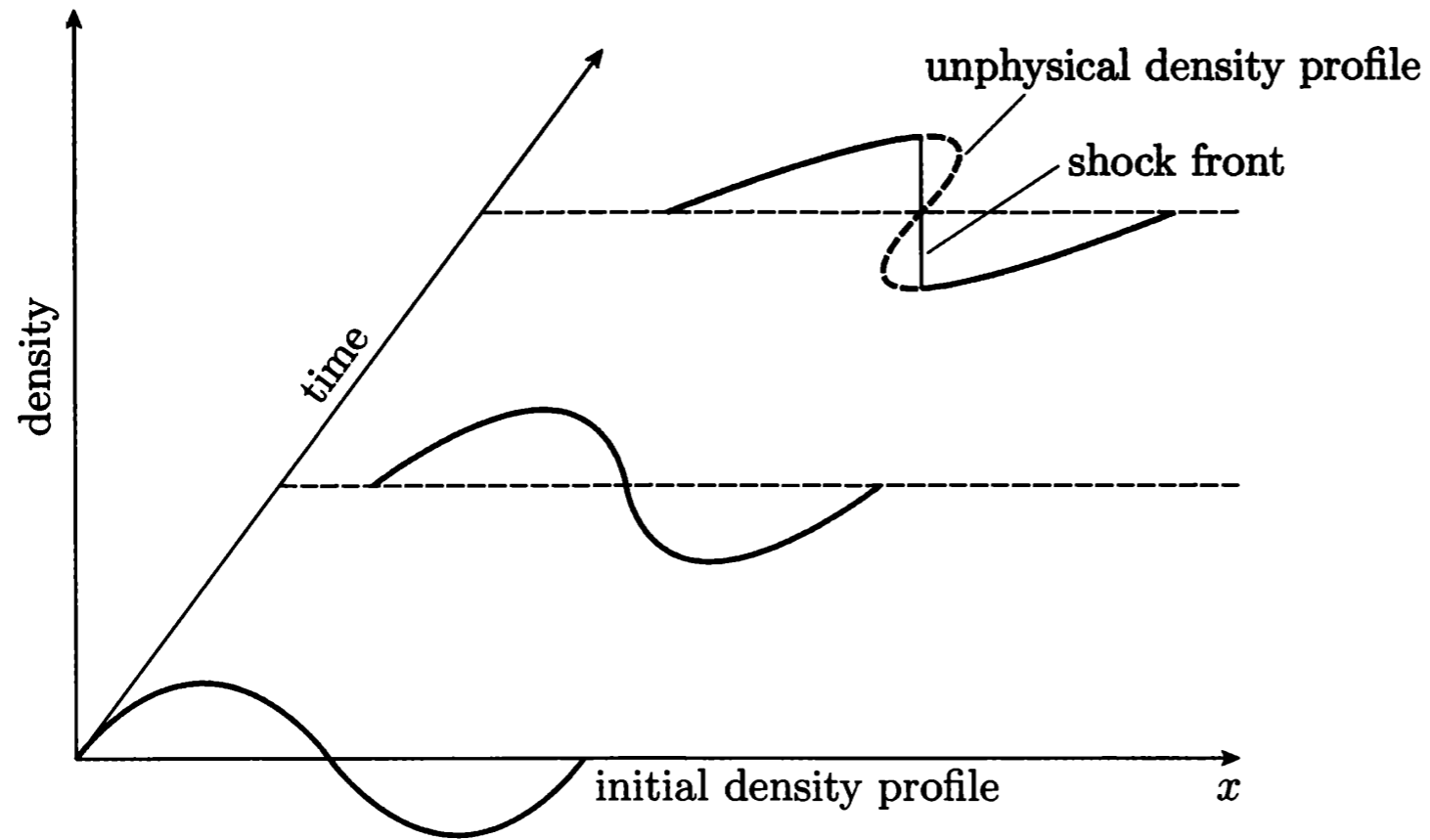
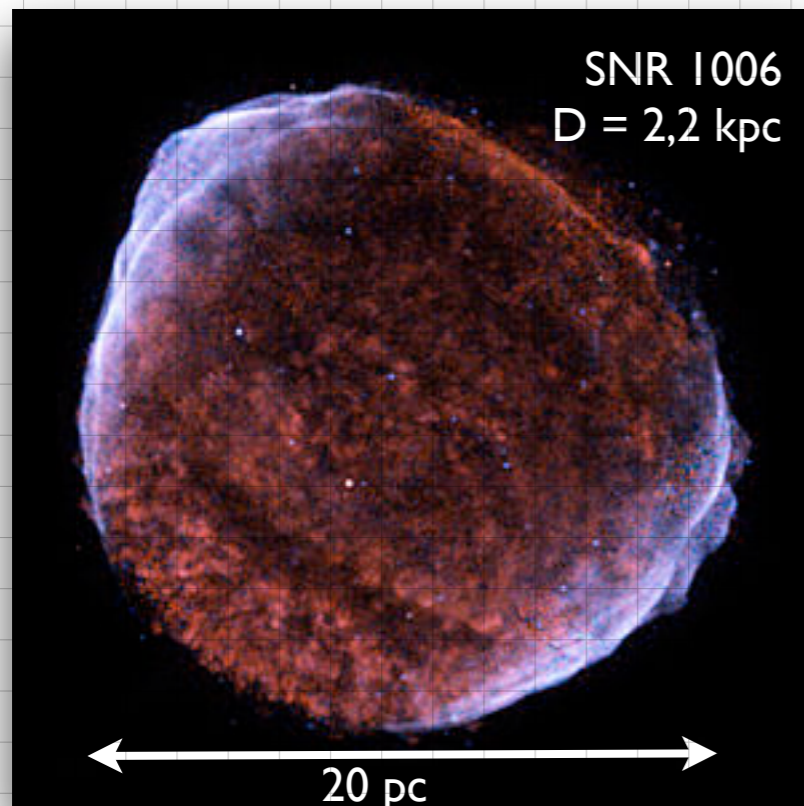


Figure 7.9 A sketch of how a wave propagating in a fluid develops to a shock.

Supernovae-Überreste (SNR; SN remnants)



Röntgensatellit: Chandra

Beobachtete galaktische SN Explosionen:

1604 (Kepler)
1572 (Tycho)
1181 (Chinese astronomers)
1054 (Crab nebula)
1006 (Chinese and Arabian records)

Abschätzung der Gesamtrate:

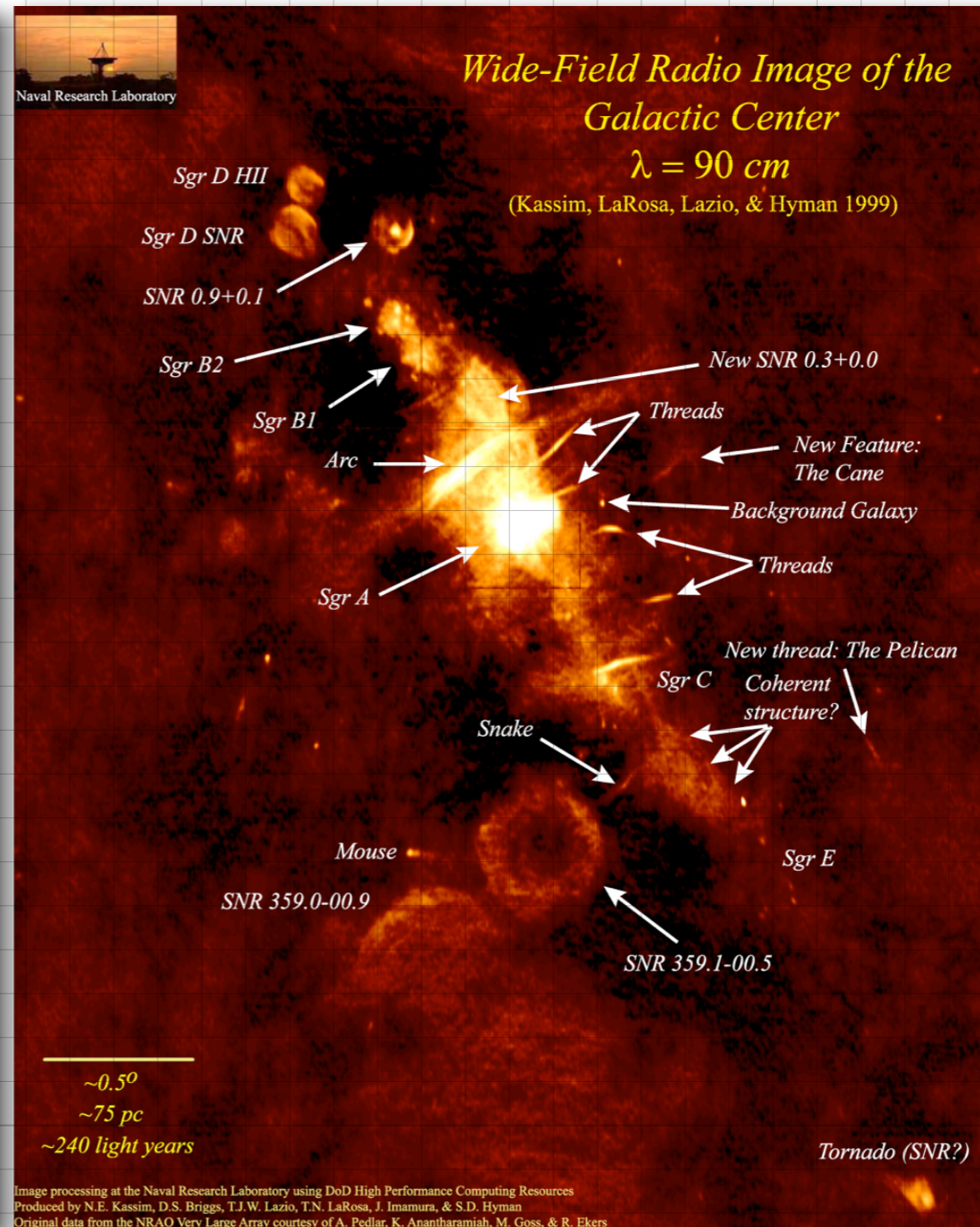
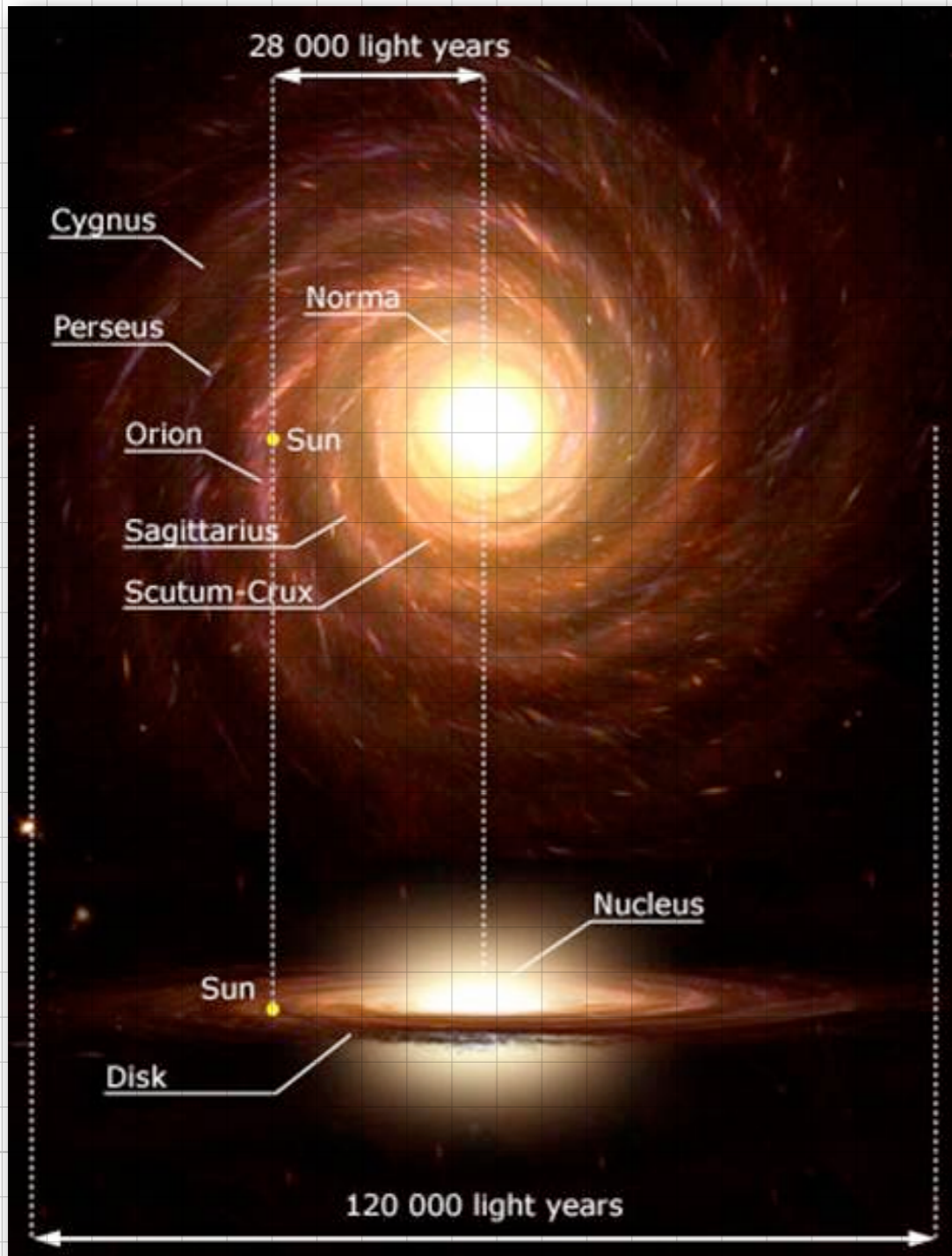
~3 SN-Explosionen / 100 yrs
Kinetische Energie der Ejekta: $\sim 10^{51}$ erg

(1 erg = 0.1 μ J)

Allgemeine Energiebetrachtung:

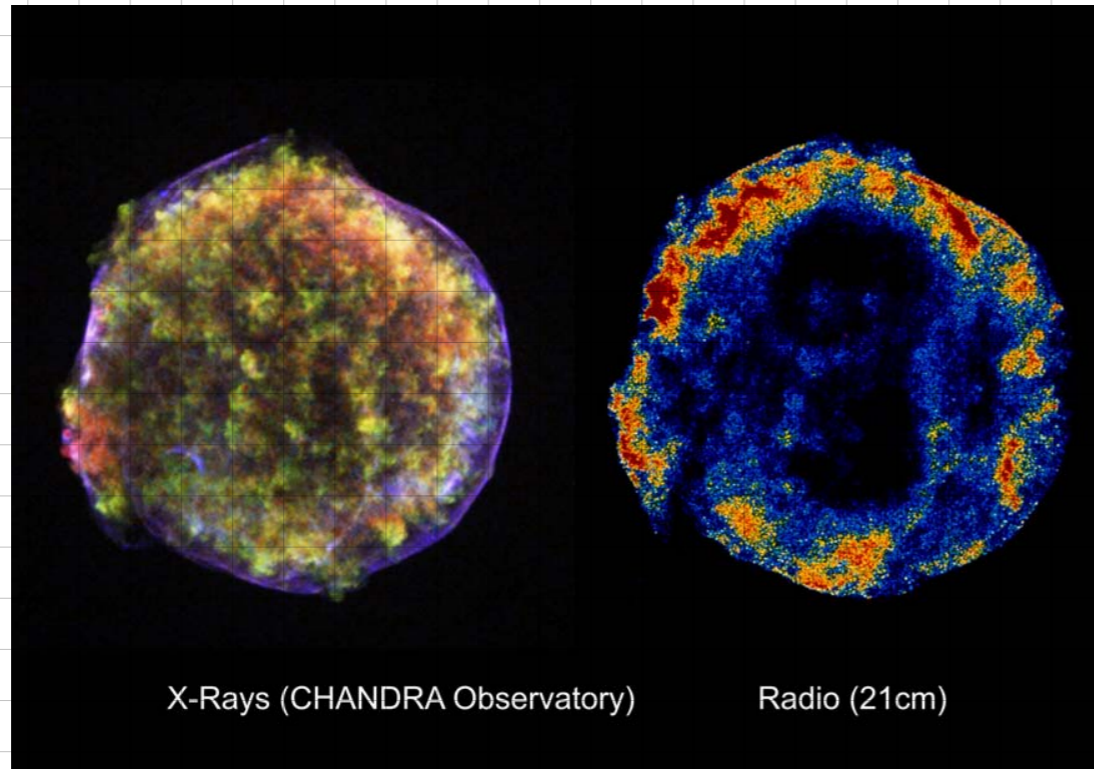
<10% der kin. Energie in kosm. Strahlung
Schockfronten für Beschleunigung
Elementzusammensetzung

Das galaktische Zentrum



Messung der Radioemission vom galaktischen Zentrum

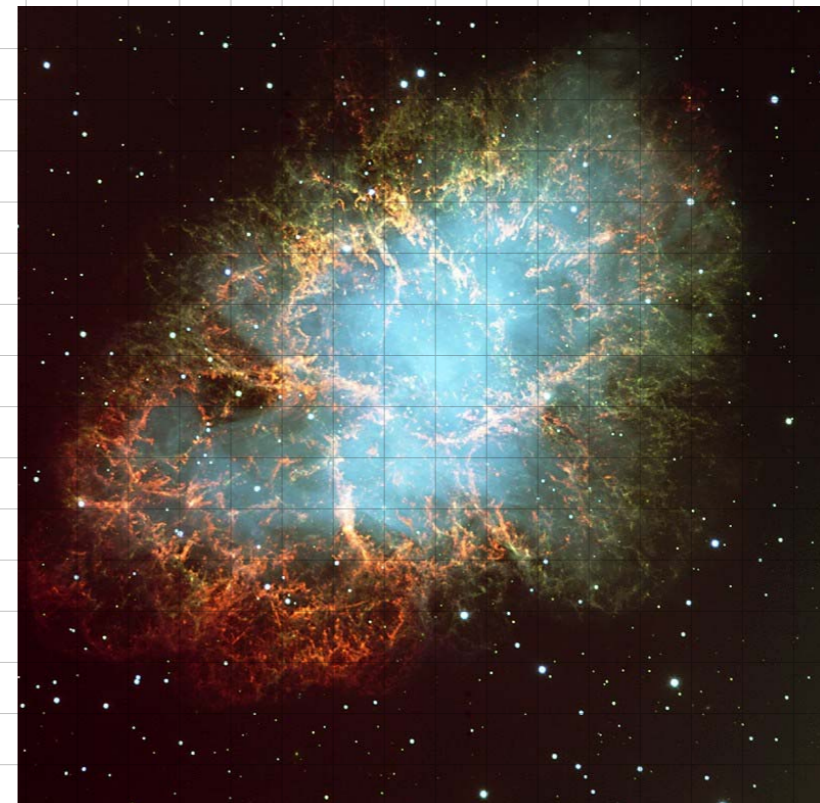
Astrophysikalische Schockfronten



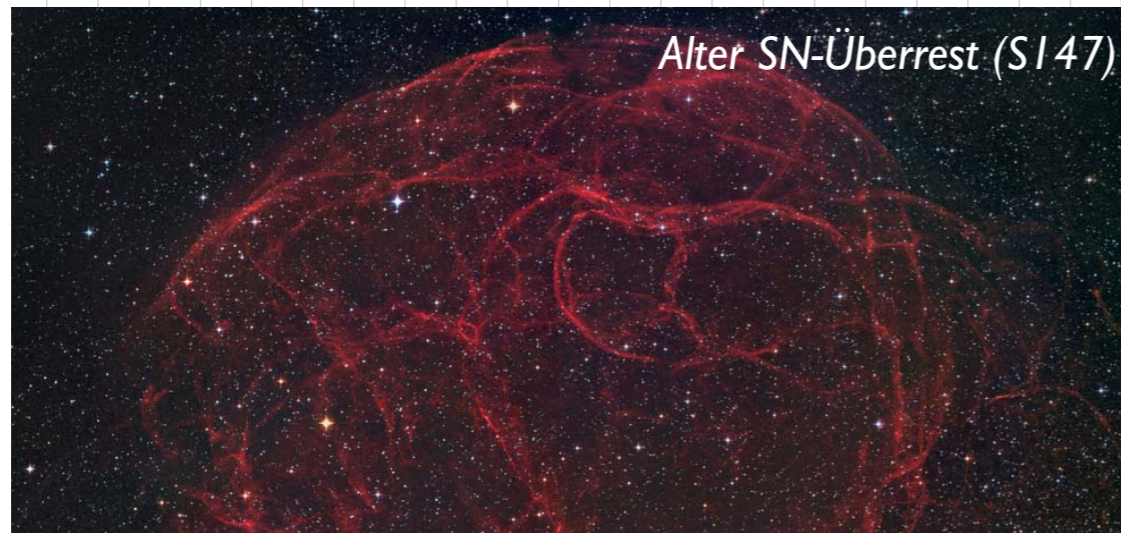
X-Rays (CHANDRA Observatory)

Radio (21cm)

Tychos SNR (AD 1572)



Krebs-SNR (AD 1054. Pulsar-Wind)



Alter SN-Überrest (SI 47)

Stoßwellen

Materie des Mediums nahe der Störungsquelle kann nicht schnell genug reagieren, um der Störung auszugleichen.

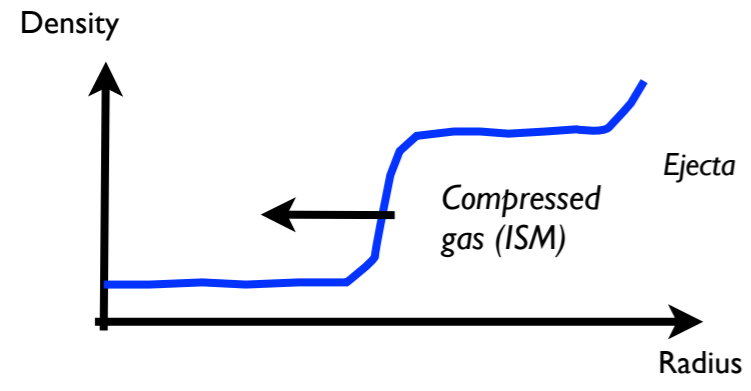
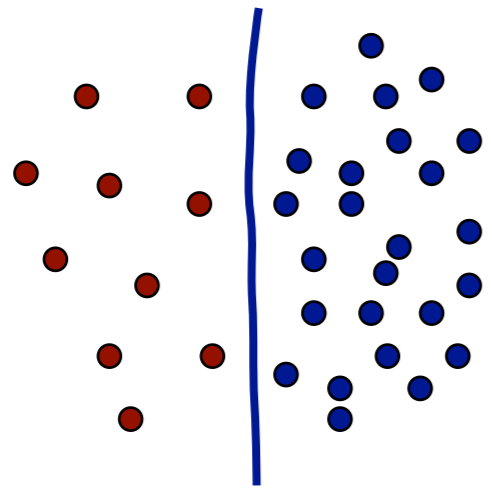
Die Zustandsgrößen des Mediums

- Dichte,
- Druck,
- Temperatur,
- Geschwindigkeit usw.

verändern sich daher nahezu momentan, um sich der Störung anzupassen.



N.B.: Cherenkov-Effekt beruht auf Stoßwelleneffekt



Betrachtung in verschiedenen Referenzsystemen

Nicht-relativistischer Grenzfall: elastische Reflexion

Energiegewinn pro Reflexion

Energiespektrum der beschleunigten Teilchen

Bemerkungen

- Schockfronten in fast allen astrophysikalischen Prozessen beobachtet
- Index des Potenzgesetzes stimmt numerisch ungefähr mit Erwartungen überein
- Index des Potenzgesetzes unabhängig von Parametern/Details der Schockfront
- Beschleunigung nur von magnetischen Rigidität abhängig (Impuls/Ladung)
- Näherung für Schockfront ohne Rückkopplung der Kosmischen Strahlung

Beschleunigungszeit

Typische Zahlen für Supernova-Überrest

$$\mathbf{B} \sim 10 \mu\text{G} \quad , \quad \kappa \sim r_g \quad , \quad \mathbf{u} = 1000 \text{ km/s} \quad (=10^8 \text{ cm/s})$$

For a particle energy $E = 1 \text{ MeV}$

$$\text{electron } (r_g \sim 10^8 \text{ cm}, v \sim 10^{10} \text{ cm/s}) \quad t_{\text{acc}} \sim 10^2 \text{ s}$$

$$\text{proton } (r_g \sim 10^{11} \text{ cm}, v \sim 10^9 \text{ cm/s}) \quad t_{\text{acc}} \sim 10^4 \text{ s} \quad \sim 0.1 \text{ day}$$

$E = 1 \text{ GeV}$

$$r_g \sim 10^{12} \text{ cm}, v \sim 10^{10} \text{ cm/s} \quad t_{\text{acc}} \sim 10^6 \text{ s}$$

$\sim 0.1 \text{ AU} \qquad \qquad \qquad \sim 1 \text{ month}$

$E = 1 \text{ PeV} (= 10^{15} \text{ eV})$

$$r_g \sim 10^{18} \text{ cm}, v \sim 10^{10} \text{ cm/s} \quad t_{\text{acc}} \sim 10^{12} \text{ s}$$

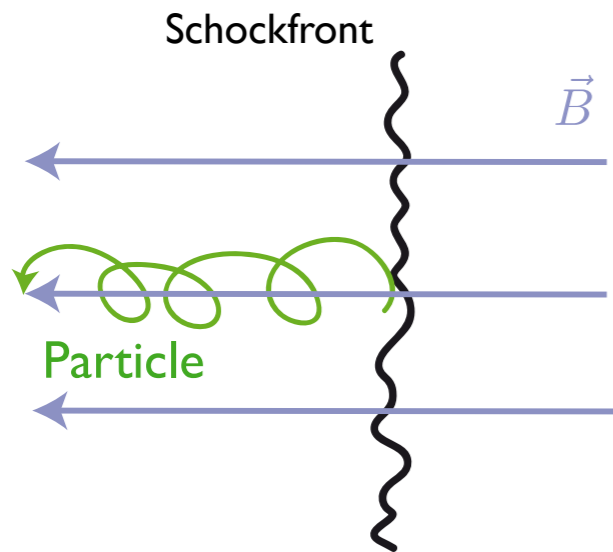
$\sim 1 \text{ pc} \qquad \qquad \qquad \sim 10^5 \text{ yr}$

$E = 1 \text{ EeV} (=10^{18} \text{ eV})$

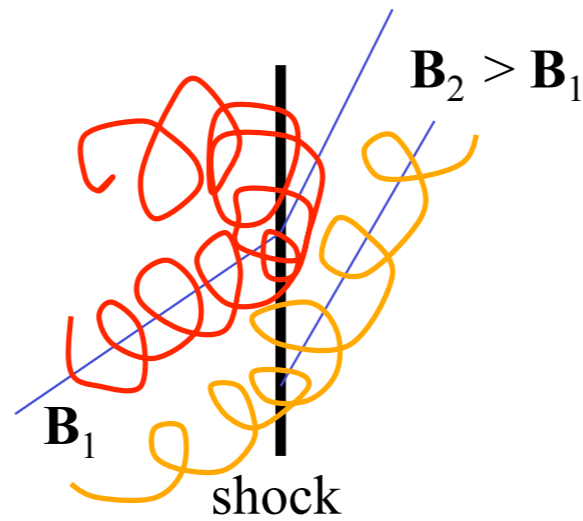
$$r_g \sim 10^{21} \text{ cm}, v \sim 10^{10} \text{ cm/s} \quad t_{\text{acc}} \sim 10^{15} \text{ s}$$

$\sim 1 \text{ kpc} \qquad \qquad \qquad \sim 10^8 \text{ yr}$

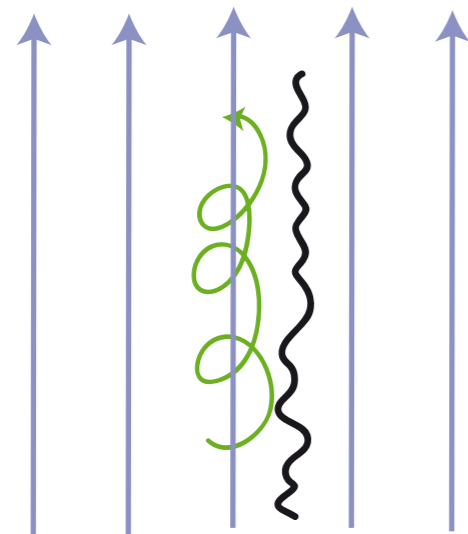
Verschiedene Konfigurationen des Magnetfeldes



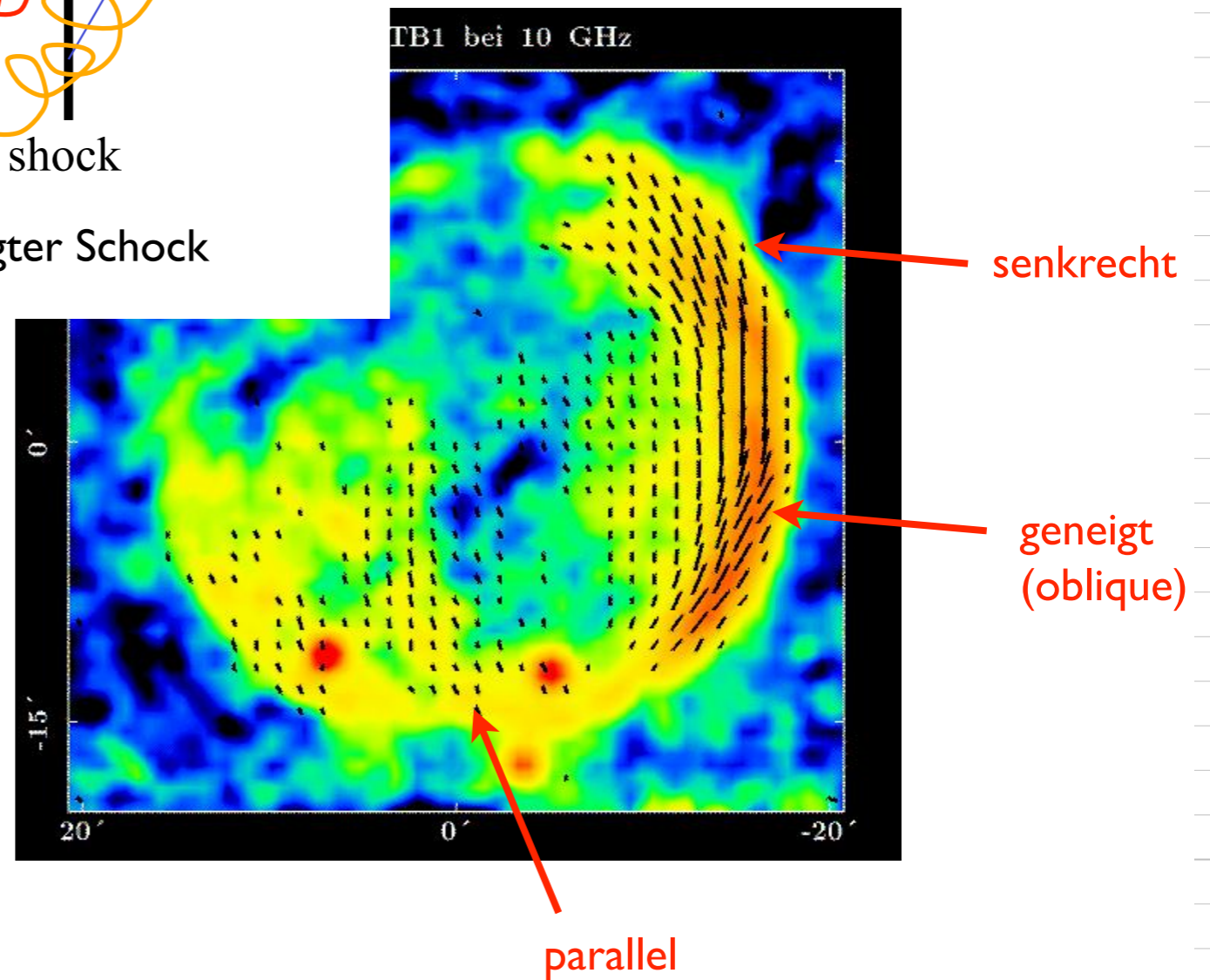
Paralleler Schock



Geneigter Schock

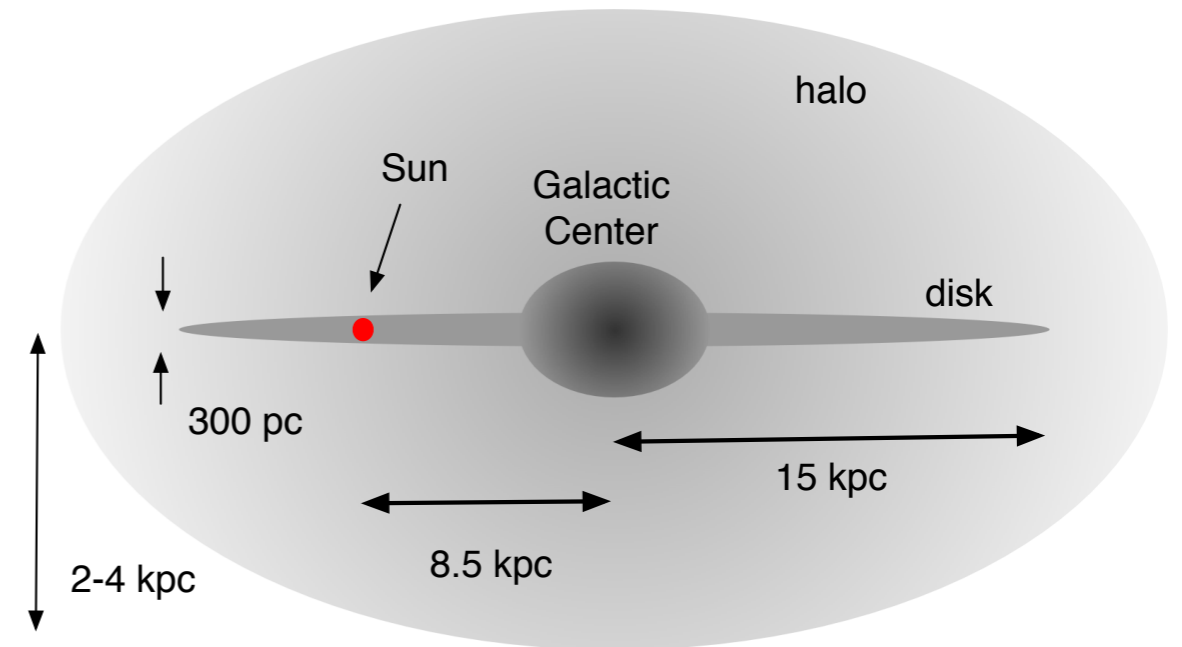


Senkrechter Schock



Galaktische kosmische Strahlung

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly} = 3.08 \cdot 10^{16} \text{ m}$$



Magnetfeld nicht gut bekannt,
 $B = 3 \mu\text{G} = 30 \text{ nT}$ in der Nähe der Sonne

$$R_L \simeq 1 \text{ pc} \left(\frac{E}{10^{15} \text{ eV}} \right) \left(\frac{1 \mu\text{G}}{ZB} \right)$$

Ablenkung im galaktischen Magnetfeld

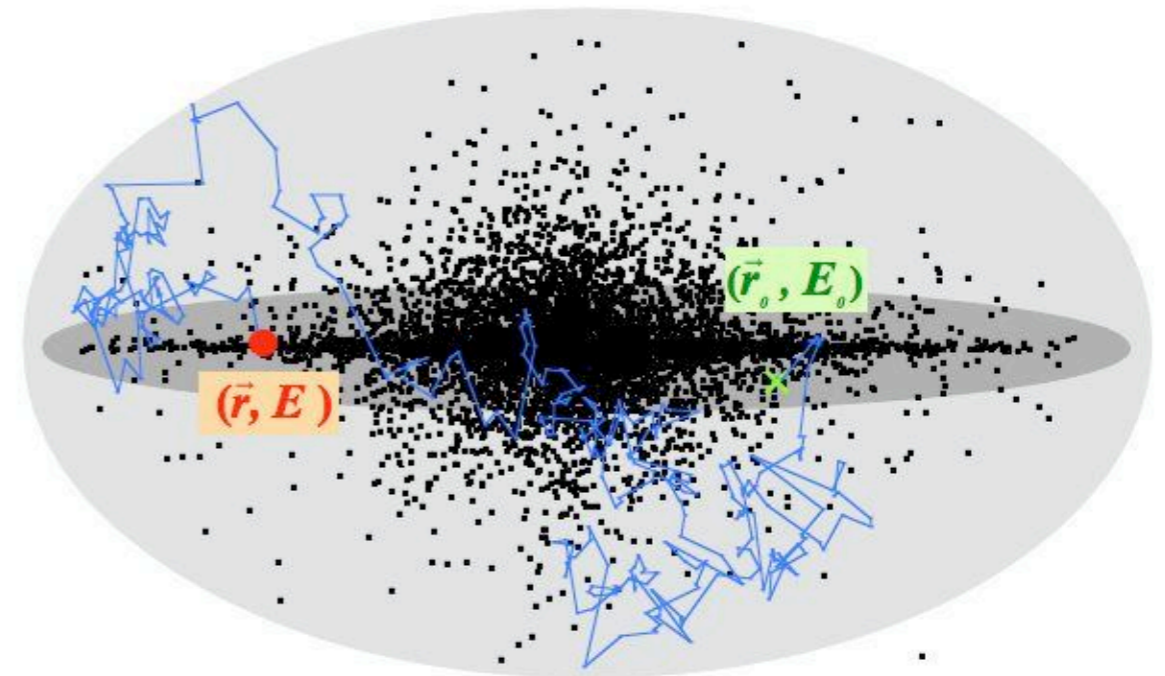


Isotrope Ankunftsrichtungsverteilung

Diffusion geladener Teilchen im Magnetfeld

$$R_L \simeq 1 \text{ pc} \left(\frac{E}{10^{15} \text{ eV}} \right) \left(\frac{1 \mu\text{G}}{ZB} \right)$$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly} = 3.08 \cdot 10^{16} \text{ m}$$



Magnetfeld nicht gut bekannt,
 $B = 3 \mu\text{G} = 30 \text{ nT}$ in der Nähe der Sonne

Diffusion: zurückgelegte Entfernung $\sim (\text{Zeit})^{1/2}$ → Quellen sind in unserer Galaxie

UHECR-Propagation in magnetischen Feldern

Deflection of protons by a regular field at 50 EeV:

$$\approx 1^\circ (L/\text{kpc}) (B_\perp/\mu\text{G})$$

Deflection of protons (random walk) by a turbulent field at 50 EeV:

$$\approx 1^\circ (L/\text{kpc})^{0.5} (D/\text{kpc})^{0.5} (B_\perp/\mu\text{G})$$

Region of deflection	Field structure	Field strength B	Scale height H	Path-length D	Correlation length L	Deflection angle at 50 EeV
Milky Way disk	Regular toroidal: symmetric ASS	2 μG	2 kpc	10 kpc	3 kpc ?	6° (near plane)
	Turbulent	5 μG	2 kpc	10 kpc	50 pc	4° (near plane)
Milky Way halo	Regular toroidal: antisymmetric ?	1...3 μG	8 kpc	8 kpc	<3 kpc ?	<3...9° (near plane)
	Regular poloidal: X-shaped ?	1 μG ?	8 kpc ?	8 kpc	<3 kpc ?	<3°
	Turbulent	1...5 μG	8 kpc ?	8 kpc	100 pc ?	1...4°
IGM filaments	Turbulent	0.001...0.03 μG	-	1 Mpc ?	1 Mpc ?	1...30°