

# Galaxienhaufen – kosmologische Prüfsteine für Hochenergie-Astrophysik

Christoph Pfrommer<sup>1</sup>

in Zusammenarbeit mit

Anders Pinzke<sup>2</sup>, Nick Battaglia<sup>1</sup>, Jon Sievers<sup>1</sup>,  
Dick Bond<sup>1</sup>, Torsten Enßlin<sup>3</sup>, Volker Springel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, Kanada

<sup>2</sup>Stockholm University, Schweden

<sup>3</sup>Max-Planck-Institut für Astrophysik, Deutschland

22. Januar 2010 / Kolloquium Universität Würzburg



# Inhaltsübersicht

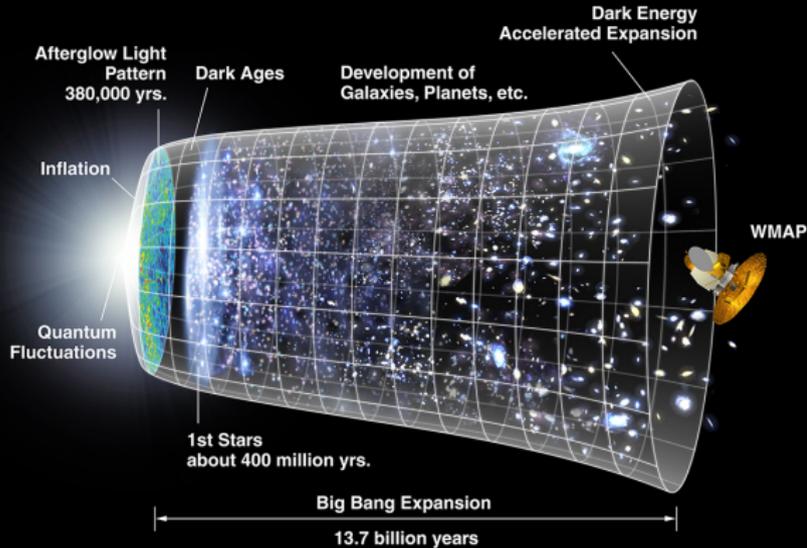
- 1 **Physikalische Kosmologie**
  - Strukturentstehung im Universum
  - Konzept einer Stoßwelle
  - Teilchenbeschleunigung
- 2 **Kosmologische Simulationen**
  - Beobachtungen von Galaxienhaufen
  - Physikalische Prozesse in Galaxienhaufen
  - Kosmische Strahlung in Galaxienhaufen
- 3 **Nicht-thermische Emission**
  - Radioemission von Stoßwellen
  - Hadronische Radioemission
  - Hochenergetische Gammastrahlung



# Inhaltsübersicht

- 1 **Physikalische Kosmologie**
  - Strukturentstehung im Universum
  - Konzept einer Stoßwelle
  - Teilchenbeschleunigung
- 2 Kosmologische Simulationen
  - Beobachtungen von Galaxienhaufen
  - Physikalische Prozesse in Galaxienhaufen
  - Kosmische Strahlung in Galaxienhaufen
- 3 Nicht-thermische Emission
  - Radioemission von Stoßwellen
  - Hadronische Radioemission
  - Hochenergetische Gammastrahlung

# Die Entwicklung unseres Universums



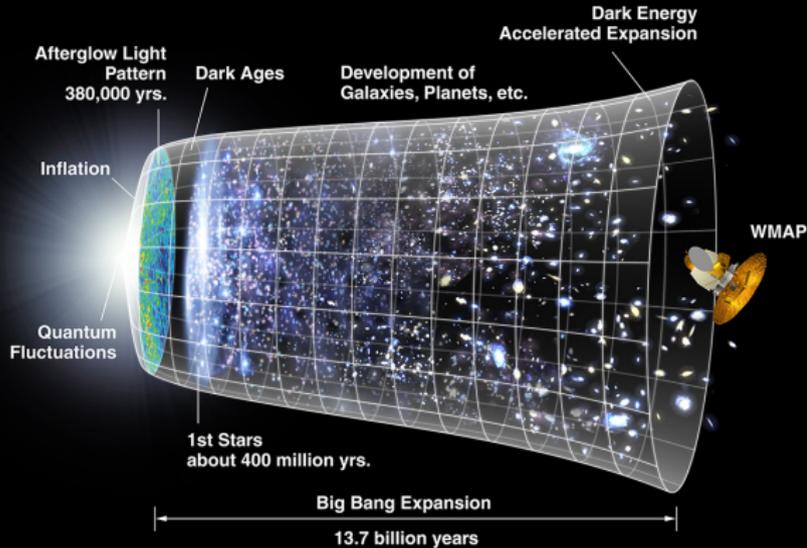
# Entstehung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes

- Im frühen Universum wurden die Quantenfluktuationen durch eine inflationäre Phase zu makroskopischer Größe aufgeblasen.
- Diese Fluktuationen manifestierten sich im Dichtefeld der dunklen Materie, des ionisierten Gases und des Photonenfeldes.
- Sobald Fluktuationen in den Schallhorizont eintraten, wurde die gravitative Anziehungskraft in Überdichten durch Strahlungsdruck der Photonen ausgeglichen → akustische Oszillationen
- Das Universum breitete sich weiter aus und kühlte ab; bei der charakteristischen Temperatur von  $T \simeq 3 \times 10^3$  K rekombinierte Wasserstoff → Universum wurde für Photonen transparent
- Oszillationen endeten da Strahlungsdruck als rücktreibenden Kraft fehlte; die Geschwindigkeit der Photonen entlang der Sichtlinie verursachte eine Dopplerverschiebung → Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund mit der charakteristischen Stärke von  $\delta T/T \sim 10^{-5}$  → WMAP

# Entstehung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes

- Im frühen Universum wurden die Quantenfluktuationen durch eine inflationäre Phase zu makroskopischer Größe aufgeblasen.
- Diese Fluktuationen manifestierten sich im Dichtefeld der dunklen Materie, des ionisierten Gases und des Photonenfeldes.
- Sobald Fluktuationen in den Schallhorizont eintraten, wurde die gravitative Anziehungskraft in Überdichten durch Strahlungsdruck der Photonen ausgeglichen → akustische Oszillationen
- Das Universum breitete sich weiter aus und kühlte ab; bei der charakteristischen Temperatur von  $T \simeq 3 \times 10^3$  K rekombinierte Wasserstoff → Universum wurde für Photonen transparent
- Oszillationen endeten da Strahlungsdruck als rücktreibenden Kraft fehlte; die Geschwindigkeit der Photonen entlang der Sichtlinie verursachte eine Dopplerverschiebung → Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund mit der charakteristischen Stärke von  $\delta T/T \sim 10^{-5}$  → WMAP

# Die Entwicklung unseres Universums



# Hierarchisches Strukturwachstum

- Da dunkle Materie (DM) nicht mit Photonen, dafür aber gravitativ wechselwirkt, konnten sich gravitative Instabilitäten zu kleinen Potentialtöpfen entwickeln, in die nun das neutrale Wasserstoffgas hineinströmte.
- Die Fluktuationen wuchsen weiter und akkumulierten mehr Masse bis sie nichtlinear wurden.
- Die dabei entstehenden, sehr kleinen Halos aus DM entkoppelten von der allgemeinen Hubbleexpansion des Universums.
- Als das weiter einströmende Gas auf das dichte Gas im Halo traf, bildeten sich Stoßwellen; diese heizten das Gas auf die Virialtemperatur.
- Diese Halos stießen mit anderen Halos zusammen um immer größere kollabierte Objekte zu formen, die ins Virialgleichgewicht kamen,  $E_{\text{pot}} + 2E_{\text{kin}} = 0$ .

# Hierarchisches Strukturwachstum

- Da dunkle Materie (DM) nicht mit Photonen, dafür aber gravitativ wechselwirkt, konnten sich gravitative Instabilitäten zu kleinen Potentialtöpfen entwickeln, in die nun das neutrale Wasserstoffgas hineinströmte.
- Die Fluktuationen wuchsen weiter und akkumulierten mehr Masse bis sie nichtlinear wurden.
- Die dabei entstehenden, sehr kleinen Halos aus DM entkoppelten von der allgemeinen Hubbleexpansion des Universums.
- Als das weiter einströmende Gas auf das dichte Gas im Halo traf, bildeten sich Stoßwellen; diese heizten das Gas auf die Virialtemperatur.
- Diese Halos stießen mit anderen Halos zusammen um immer größere kollabierte Objekte zu formen, die ins Virialgleichgewicht kamen,  $E_{\text{pot}} + 2E_{\text{kin}} = 0$ .



# Die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen

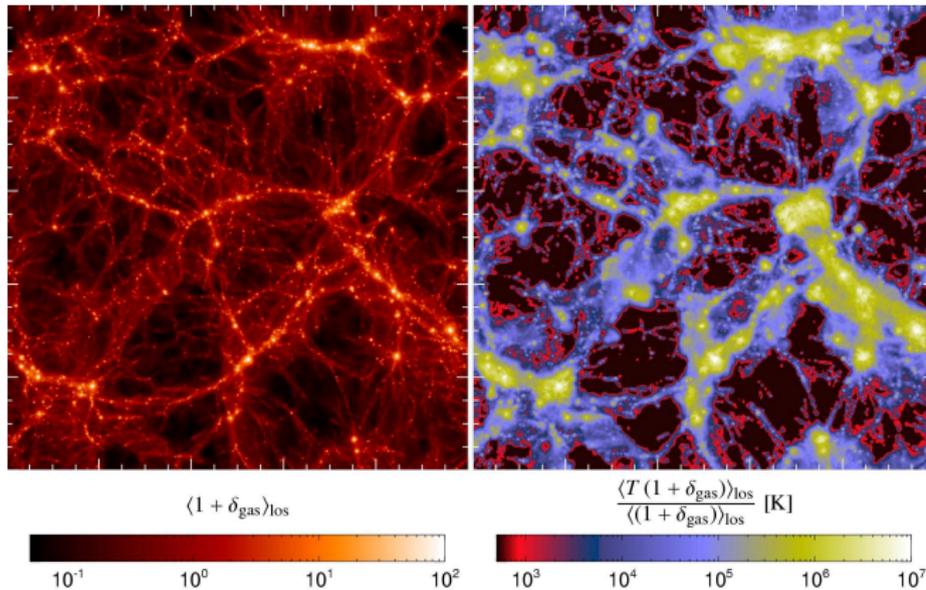
- In Halos von mindestens der Größe von Zwerggalaxien ist die Gravitation stärker als der Gasdruck → das Gas kollabierte, wurde dichter und kühlte durch Strahlungsprozesse ab um schließlich eine rotierende Gasscheibe im Halozentrum zu bilden in der Sterne entstanden: die Geburt einer Spiralgalaxie.
- Im Verlauf der Strukturformation verschmolzen so auch die Halos von Galaxien um die größten virialisierten Objekte im Universum zu formen: Galaxienhaufen.
- Die sich dabei bildenden Stoßwellen haben ihre Quelle in der gravitativen Energie der Haufen: Haufenkollisionen sind die energetischsten Ereignisse im Universum (nach dem Urknall) und heizen das Gas auf Temperaturen von  $T \sim 10^8 \text{K}$ :  
 $GM^2/R \sim 10^{64} \text{ erg} \sim 10^8 \text{ K} \times 10^{15} M_{\odot}/m_p$
- Die von der dunklen Energie verursachte beschleunigte Expansion hemmt das Strukturwachstum → Galaxienhaufen werden für immer die größten Objekte im Universum bleiben!



# Die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen

- In Halos von mindestens der Größe von Zwerggalaxien ist die Gravitation stärker als der Gasdruck → das Gas kollabierte, wurde dichter und kühlte durch Strahlungsprozesse ab um schließlich eine rotierende Gasscheibe im Halozentrum zu bilden in der Sterne entstanden: die Geburt einer Spiralgalaxie.
- Im Verlauf der Strukturformation verschmolzen so auch die Halos von Galaxien um die größten virialisierten Objekte im Universum zu formen: Galaxienhaufen.
- Die sich dabei bildenden Stoßwellen haben ihre Quelle in der gravitativen Energie der Haufen: Haufenkollisionen sind die energetischsten Ereignisse im Universum (nach dem Urknall) und heizen das Gas auf Temperaturen von  $T \sim 10^8 \text{K}$ :  
$$GM^2/R \sim 10^{64} \text{ erg} \sim 10^8 \text{ K} \times 10^{15} M_{\odot}/m_p$$
- Die von der dunklen Energie verursachte beschleunigte Expansion hemmt das Strukturwachstum → Galaxienhaufen werden für immer die größten Objekte im Universum bleiben!

# Die Struktur in unserem Universum



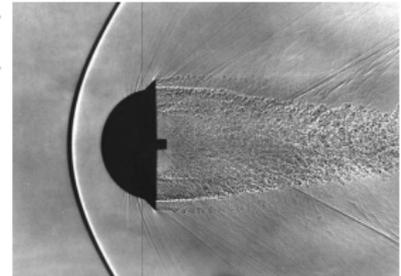
Das “kosmische Netz” der Galaxien. *Links*: die projizierte Gasdichte in einer kosmologischen Simulation. *Rechts*: Temperaturverteilung des von Stoßwellen geheizten intergalaktischen Mediums (CP et al. 2006).

# Stoßwellen

**Stoßwelle:** plötzliche Änderung der Dichte, Temperatur, und Druck die eine Überschallströmung verlangsamt.

**Ausdehnung der Front:** mittlere freie Weglänge  $\lambda_{\text{MFW}}$   
in Luft:  $\lambda_{\text{MFW}} \sim \mu\text{m}$

**Erde:** meisten Stoßwellen durch Stöße kommuniziert



MFW durch Coulombkollisionen sehr groß:  
 $\lambda_{\text{MFW}} \sim 100 \text{ pc}$  (SNR),  $\lambda_{\text{MFW}} \sim 100 \text{ kpc}$  (Haufen)

**Stoßwellen können nicht durch direkte Teilchenkollisionen kommuniziert werden!**

- kollektive Interaktionen durch EM-Felder
- kollisionsfreie Stoßwellen

(Folienkonzept Spitkovsky)



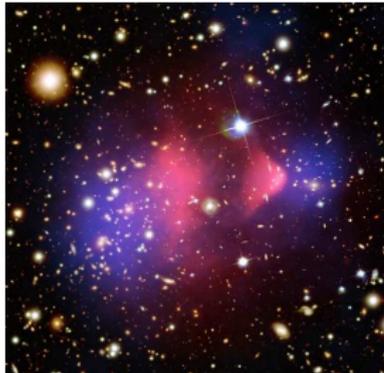
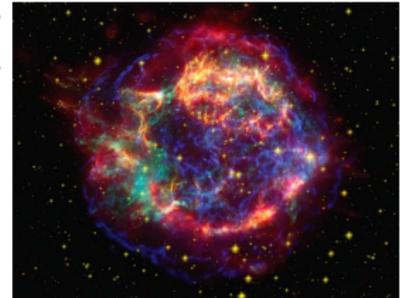
CITA-ICAT

# Stoßwellen

**Stoßwelle:** plötzliche Änderung der Dichte, Temperatur, und Druck die eine Überschallströmung verlangsamt.

**Ausdehnung der Front:** mittlere freie Weglänge  $\lambda_{\text{MFW}}$   
in Luft:  $\lambda_{\text{MFW}} \sim \mu\text{m}$

**Erde:** meisten Stoßwellen durch Stöße kommuniziert



MFW durch Coulombkollisionen sehr groß:  
 $\lambda_{\text{MFW}} \sim 100 \text{ pc}$  (SNR),  $\lambda_{\text{MFW}} \sim 100 \text{ kpc}$  (Haufen)

**Stoßwellen können nicht durch direkte Teilchenkollisionen kommuniziert werden!**

- kollektive Interaktionen durch EM-Felder
- kollisionsfreie Stoßwellen

(Folienkonzept Spitkovsky)



CITA-ICAT

# Physikalisches Prinzip einer Stoßwelle

- Die kinetische Energie der propagierende Stoßwelle wird dabei an der Stoßfront in ungeordnete Bewegungen der Elementarteilchen umgewandelt: das Gas wird erhitzt.
- In einem kollisionsfreien Plasma wird der Heizprozess dabei durch Strömungsinstabilitäten im Plasma vermittelt. Dadurch filamentiert sich das Plasma, induziert Magnetfelder, durch die wiederum die Teilchen mittels der Lorentzkraft abgelenkt werden und zufällige Bewegungskomponenten erfahren.
- An einer Stoßwelle gelten Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls, insbesondere  
 $\epsilon_{\text{kin}} \sim \rho v^2 \sim nkT \sim$  innere Energiedichte.



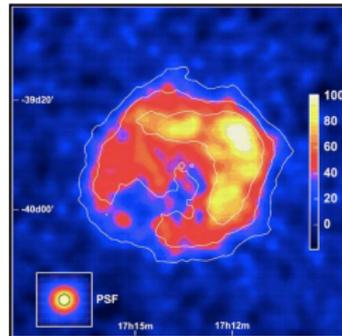
# Kollisionsfreie Stoßwellen in Supernova-Überresten

Astrophysikalische kollisionsfreie Stoßwellen können:

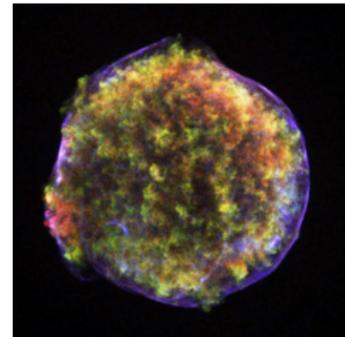
- Elementarteilchen beschleunigen (Elektronen und Ionen)
- Magnetfelder verstärken (oder sogar von Grund auf generieren)
- Energie zwischen Elektronen und Ionen austauschen



SN 1006 X-rays (CXC/Hughes)



G347.3 HESS TeV  
(Aharonian et al. 2006)



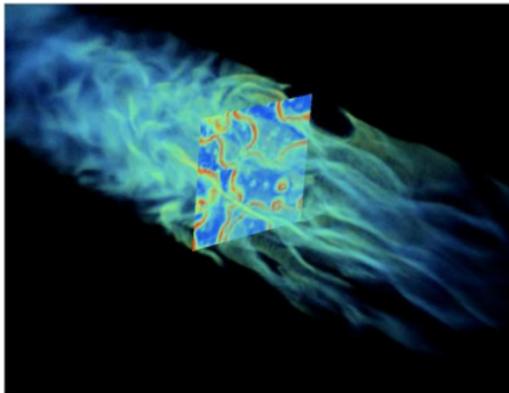
Tycho X-rays (CXC)

# Kollisionsfreie Stoßwellen

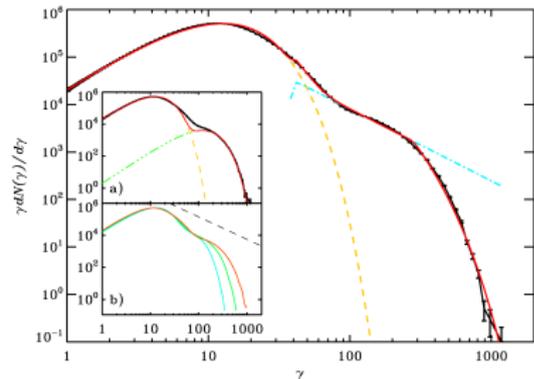
Astrophysikalische kollisionsfreie Stoßwellen können:

- Elementarteilchen beschleunigen (Elektronen und Ionen)
- Magnetfelder verstärken (oder sogar von Grund auf generieren)
- Energie zwischen Elektronen und Ionen austauschen

*Particle-in-cell* Simulationen unmagnetisierter, relativistischer Stoßwellen in Paarplasmen werden durch die Weibelinstabilität vermittelt (Spitkovsky 2008)



magnetic energy density (Spitkovsky 2008)



post-shock Maxwellian and accelerated CR power-law

# Diffusive Beschleunigung – Fermi 1 Mechanismus (1)

## Bedingungen:

- eine kollisionsfreie Stoßwelle
- Magnetfelder, um die Teilchen in der Nähe der Stoßwelle zu halten
- Plasmawellen, um energetische Teilchen zu streuen → Teilchendiffusion
- supra-thermale Teilchen

## Mechanismus:

- supra-thermale Teilchen diffundieren zurück in den Bereich vor der Stoßfront
- jedesmal, wenn sie die Stoßwelle passieren, vergrößert sich ihr Impuls (Analogie: Tischtennisball zwischen 2 herannahenden Wänden)
- Impuls vergrößert sich exponentiell mit der Anzahl der Passagen
- Teilchenzahl verkleinert sich exponentiell

→ Potenzgesetz-Verteilung der kosmischen Strahlung

# Diffusive Beschleunigung – Fermi 1 Mechanismus (1)

## Bedingungen:

- eine kollisionsfreie Stoßwelle
- Magnetfelder, um die Teilchen in der Nähe der Stoßwelle zu halten
- Plasmawellen, um energetische Teilchen zu streuen → Teilchendiffusion
- supra-thermale Teilchen

## Mechanismus:

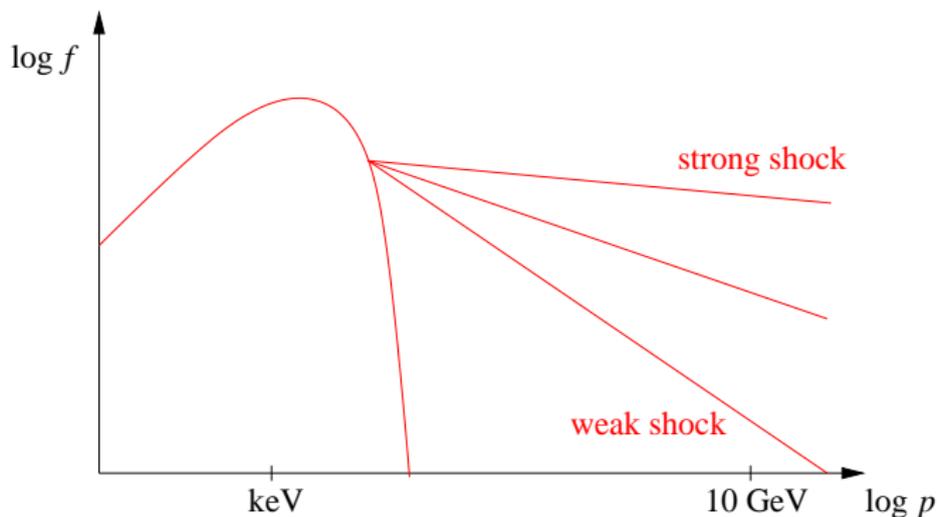
- supra-thermale Teilchen diffundieren zurück in den Bereich vor der Stoßfront
- jedesmal, wenn sie die Stoßwelle passieren, vergrößert sich ihr Impuls (Analogie: Tischtennisball zwischen 2 herannahenden Wänden)
- Impuls vergrößert sich exponentiell mit der Anzahl der Passagen
- Teilchenzahl verkleinert sich exponentiell

→ **Potenzgesetz-Verteilung der kosmischen Strahlung**

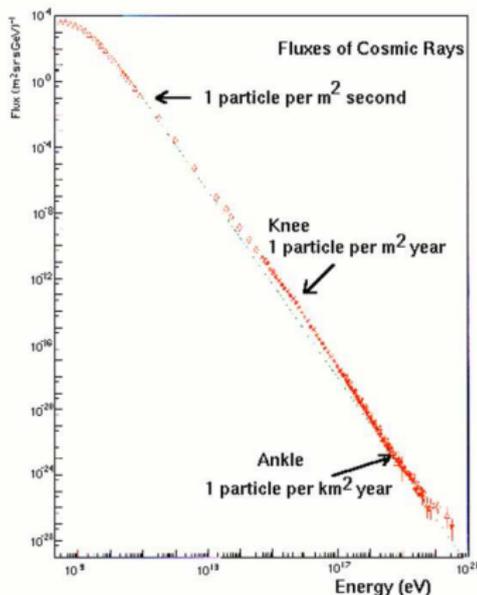
# Diffusive Beschleunigung – Fermi 1 Mechanismus (2)

Spektraler Index hängt von der Machzahl der Stoßwelle ab,

$$\mathcal{M} = v_{\text{shock}}/c_s:$$



# Galaktisches Spektrum der kosmischen Strahlung



data compiled by Swordy

## Spektrum aller Teilchensorten:

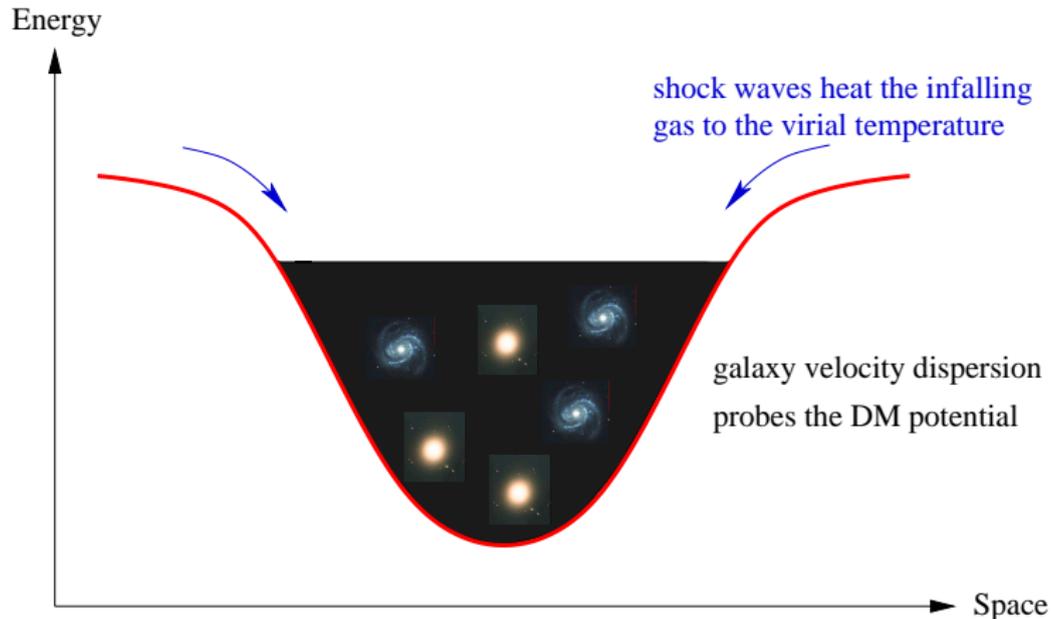
- umfaßt  $\sim 40$  Dekaden im Fluß (wenn wir die Sonnenmodulation berücksichtigen, die energiearme Strahlung blockiert)
- umfaßt 12 Dekaden in Energie
- das "Knie" zeigt eine charakteristische maximale Energie der galaktischen Beschleuniger auf
- kosmische Strahlung über dem "Knöchel" haben extragalaktischen Ursprung

# Inhaltsübersicht

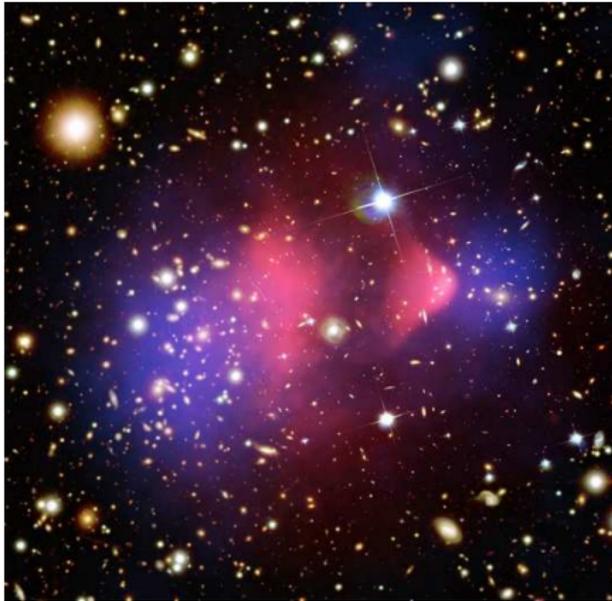
- 1 Physikalische Kosmologie
  - Strukturentstehung im Universum
  - Konzept einer Stoßwelle
  - Teilchenbeschleunigung
- 2 **Kosmologische Simulationen**
  - Beobachtungen von Galaxienhaufen
  - Physikalische Prozesse in Galaxienhaufen
  - Kosmische Strahlung in Galaxienhaufen
- 3 Nicht-thermische Emission
  - Radioemission von Stoßwellen
  - Hadronische Radioemission
  - Hochenergetische Gammastrahlung

# Galaxienhaufen aus der Theoretiker-Perspektive ...

Galaxienhaufen sind sich dynamisch entwickelnde Potentialtöpfe aus dunkler Materie:

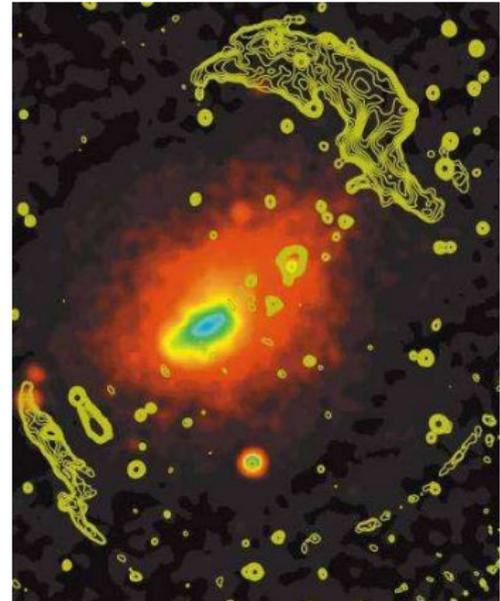


# ... und wie sie im richtigen Universum aussehen



1E 0657-56 ("Bullet cluster")

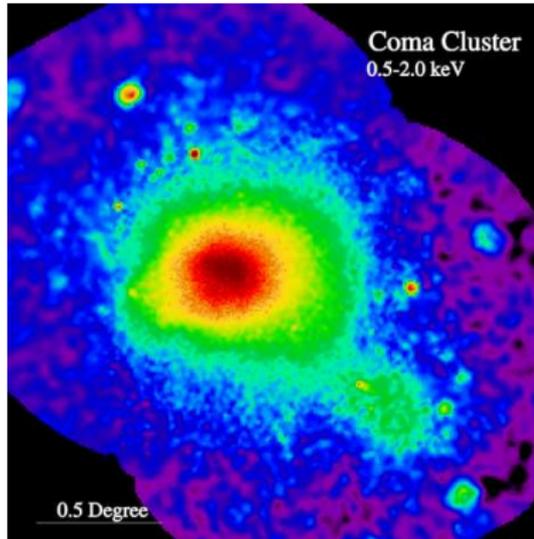
(X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.)



Abell 3667

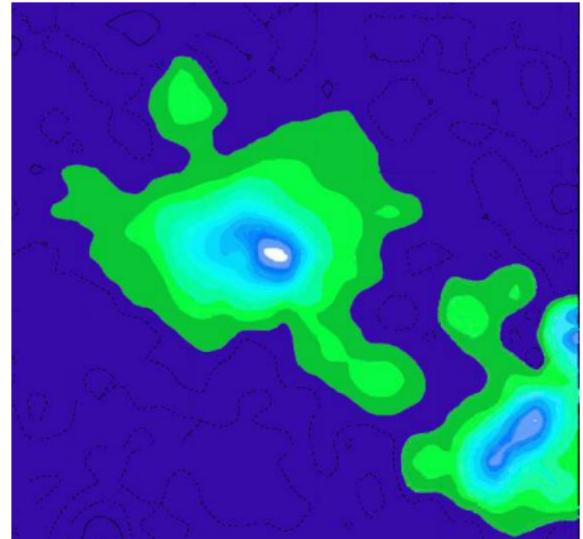
(radio: Johnston-Hollitt. X-ray: ROSAT/PSPC.)

# Gigantischer Radiohalo im Coma-Haufen



thermische Röntgenemission

(Snowden/MPE/ROSAT)



Radiosynchrotron Emission

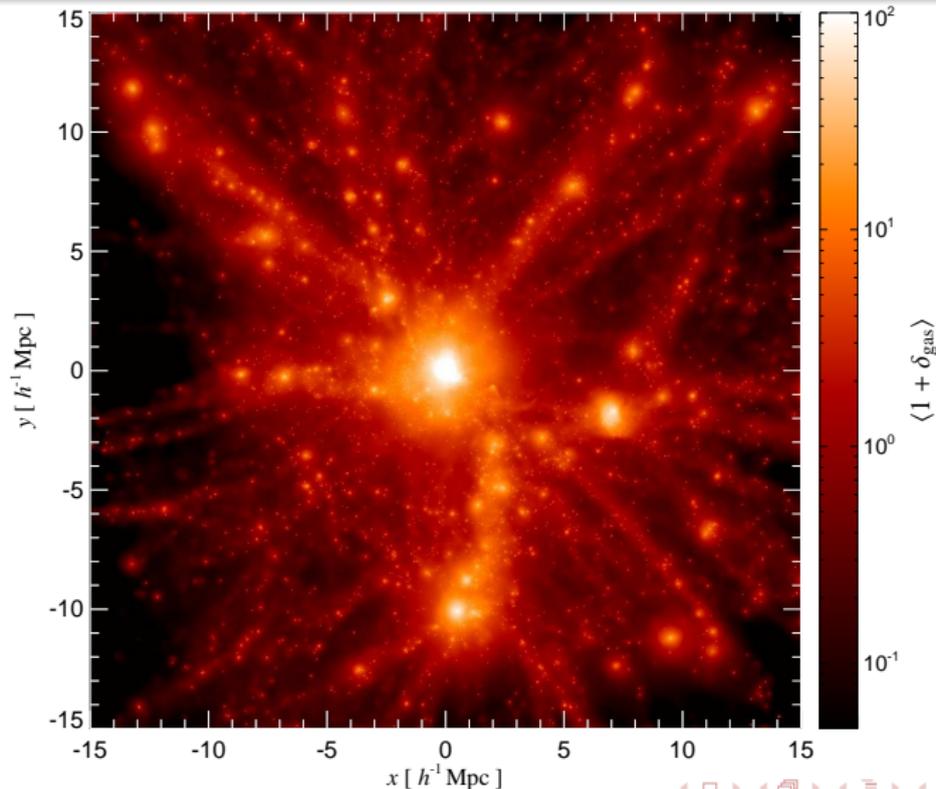
(Deiss/Effelsberg)

# Hochenergie-Astrophysik in Galaxienhaufen

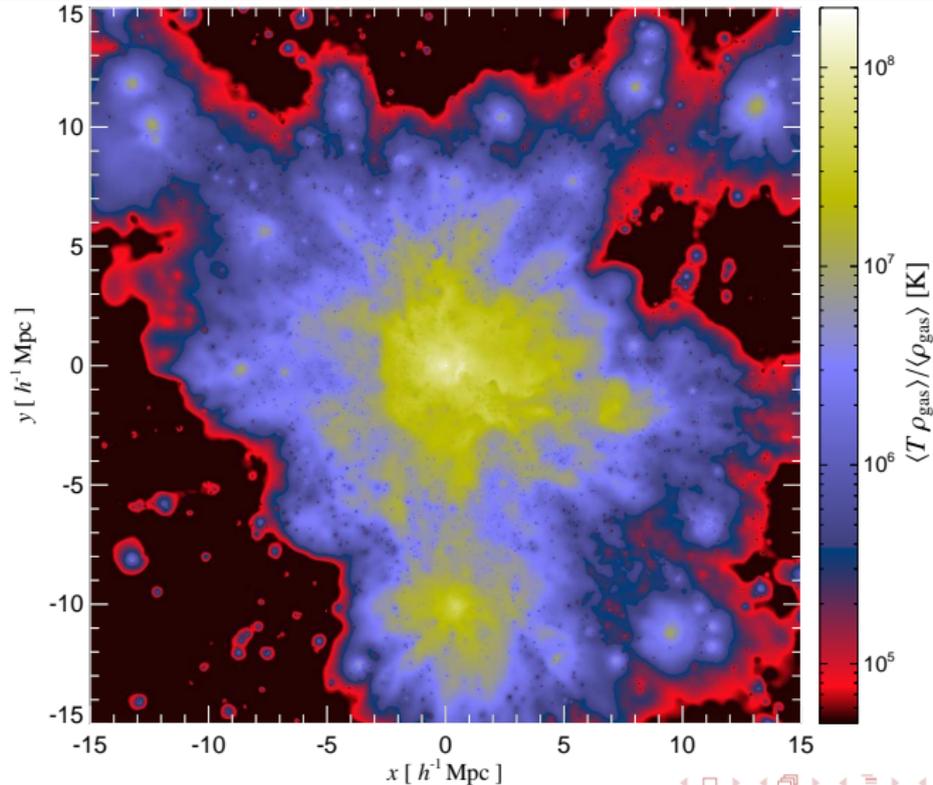
- konsistente Theorie der nicht-thermischen Prozesse in Galaxienhaufen (Radio-, Röntgen-, Gammastrahlung)
  - beleuchtet den **Prozess der Strukturformation**
  - Geschichte einzelner Haufen: **“Galaxienhaufen-Archäologie”**
- Verständnis der **nicht-thermischen Druckverteilung**
  - systematische Fehler bei der Haufenmassenbestimmung
- **goldene Stichprobe** von Galaxienhaufen für die Präzisionskosmologie: nicht-thermische Beobachtungsgrößen
- **Beschaffenheit der dunklen Materie**: Annihilationssignal vs. Gammastrahlung kosmischer Strahlung
- **Grundlagenforschung in der Plasma-Astrophysik**:
  - diffusive Beschleunigung an Stoßwellen
  - Ursprung und Entwicklung der Magnetfelder im Universum
  - Eigenschaften der Turbulenz in Galaxienhaufen



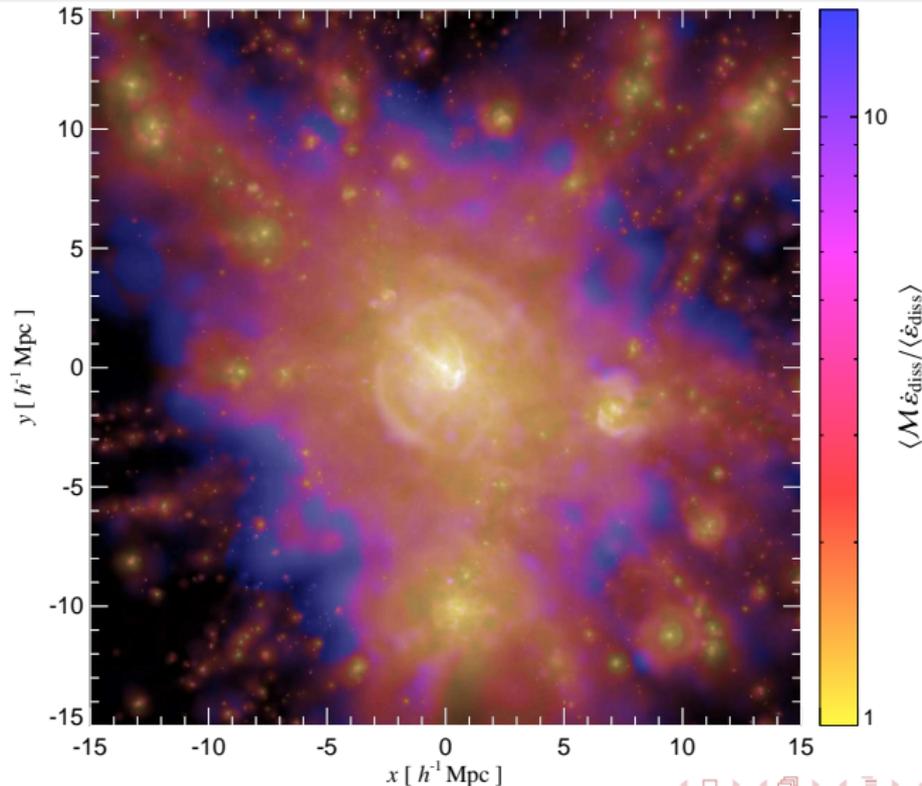
# Galaxienhaufensimulation: Gasdichte



# Massengewichtete Temperatur



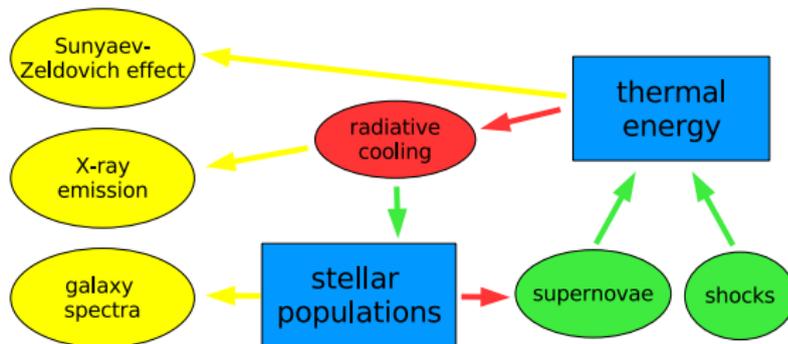
# Machzahlverteilung gewichtet mit $\epsilon_{\text{diss}}$



# Simulationen – Flußdiagramm

Cluster observables:

Physical processes in clusters:



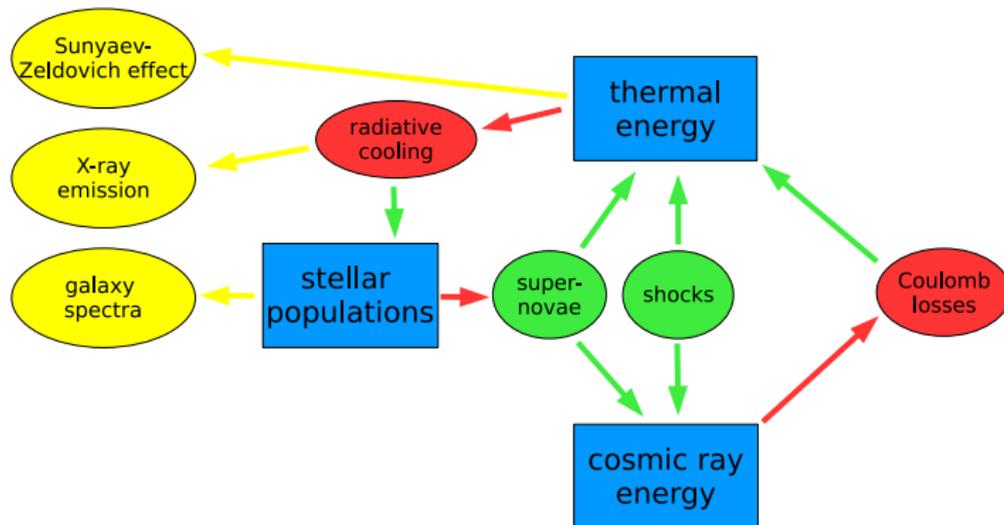
CP, EnBlin, Springel (2008)

— loss processes  
— gain processes  
— observables  
— populations

# Simulationen mit der Physik kosmischer Strahlung

Cluster observables:

Physical processes in clusters:



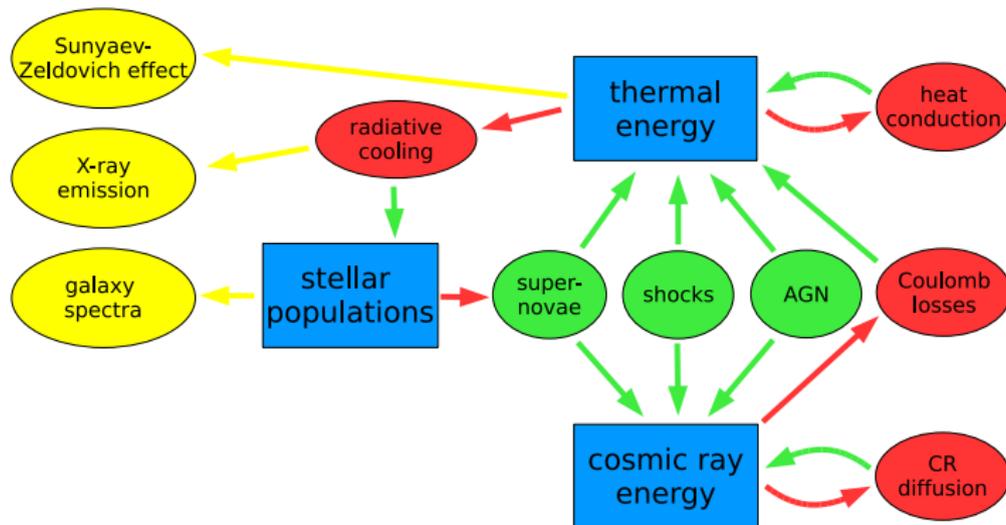
CP, EnBlin, Springel (2008)

— loss processes  
— gain processes  
— observables  
— populations

# Simulationen mit der Physik kosmischer Strahlung

Cluster observables:

Physical processes in clusters:



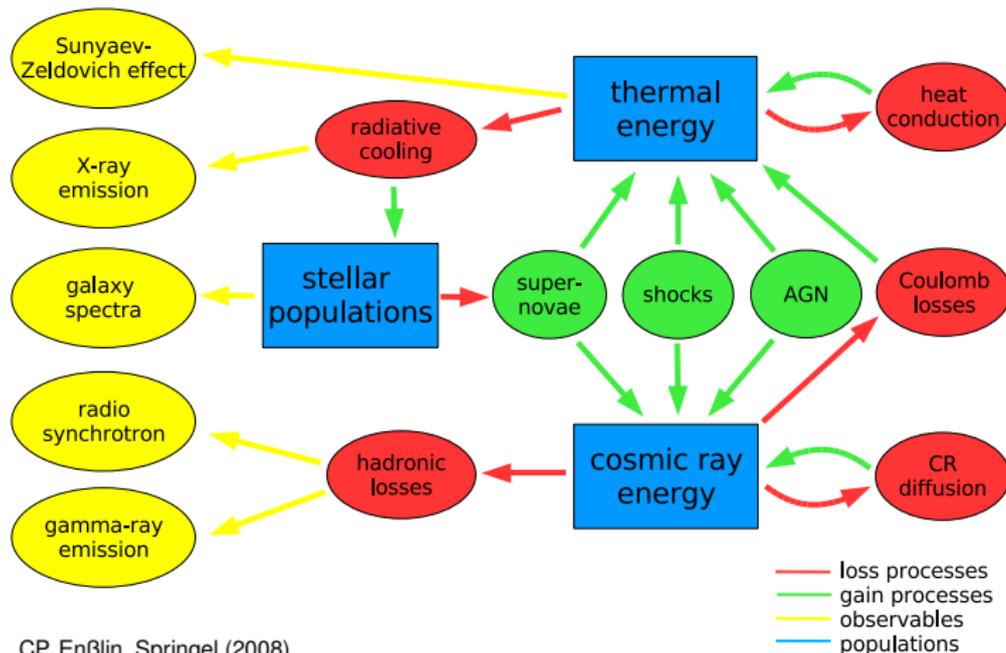
— loss processes  
— gain processes  
— observables  
— populations

CP, EnBlin, Springel (2008)

# Simulationen mit der Physik kosmischer Strahlung

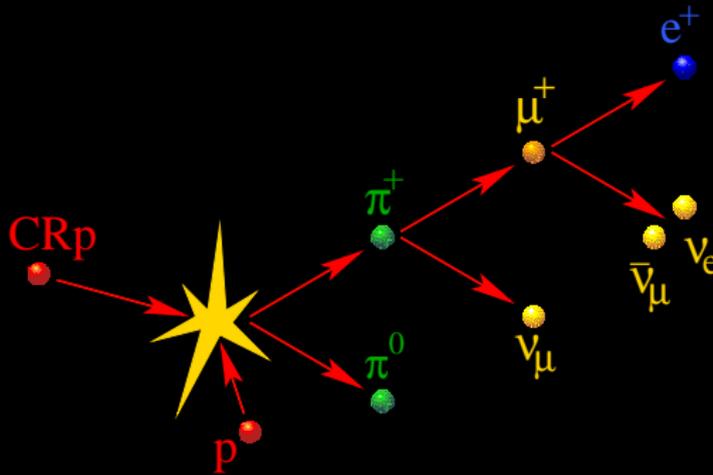
Cluster observables:

Physical processes in clusters:

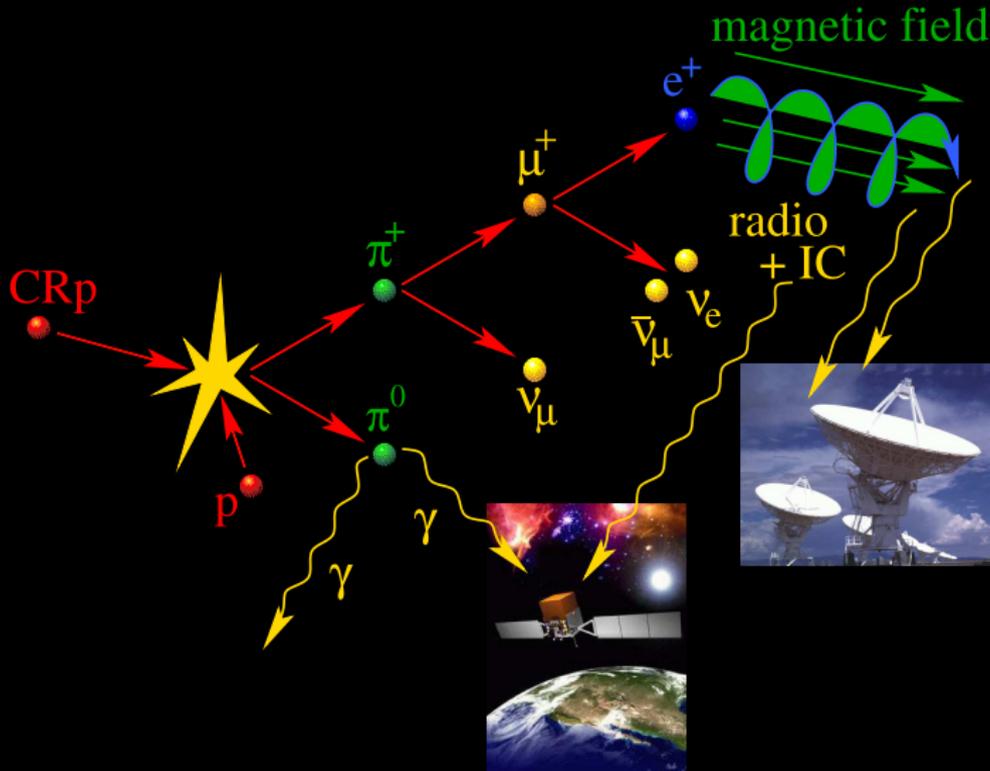


CP, EnBlin, Springel (2008)

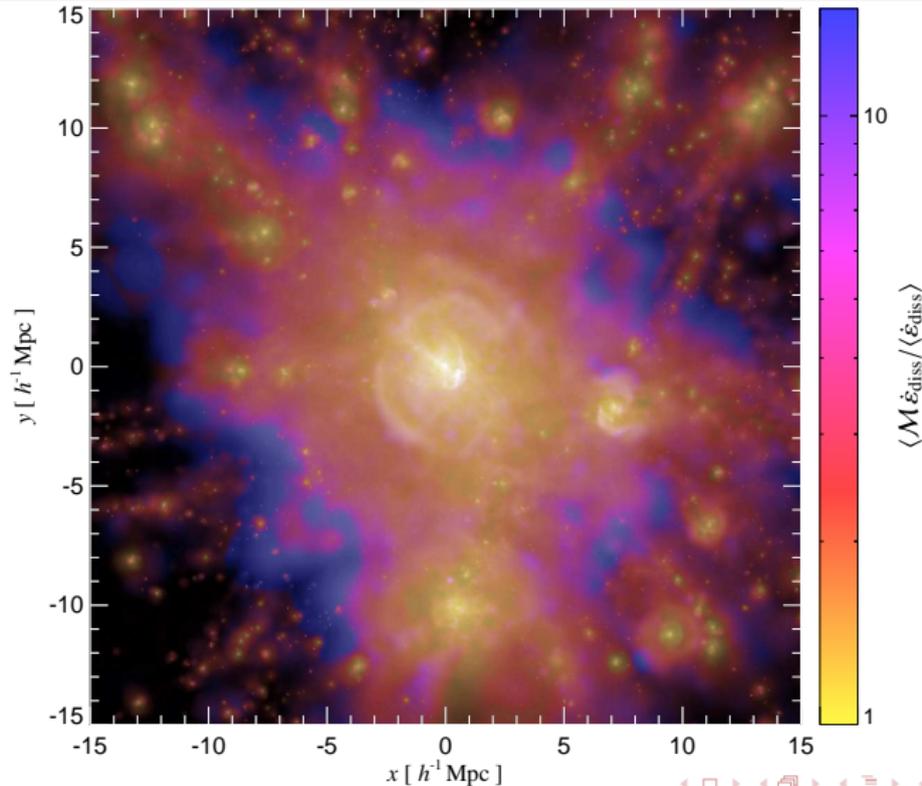
# Hadronische Wechselwirkung kosmischer Strahlung



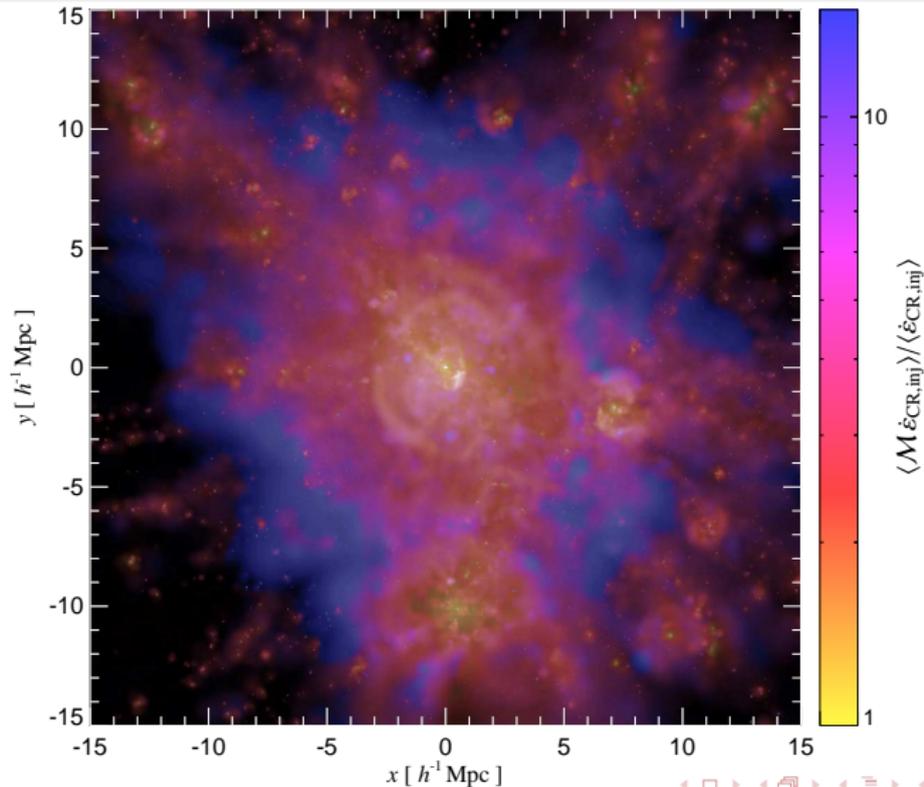
# Hadronische Wechselwirkung kosmischer Strahlung



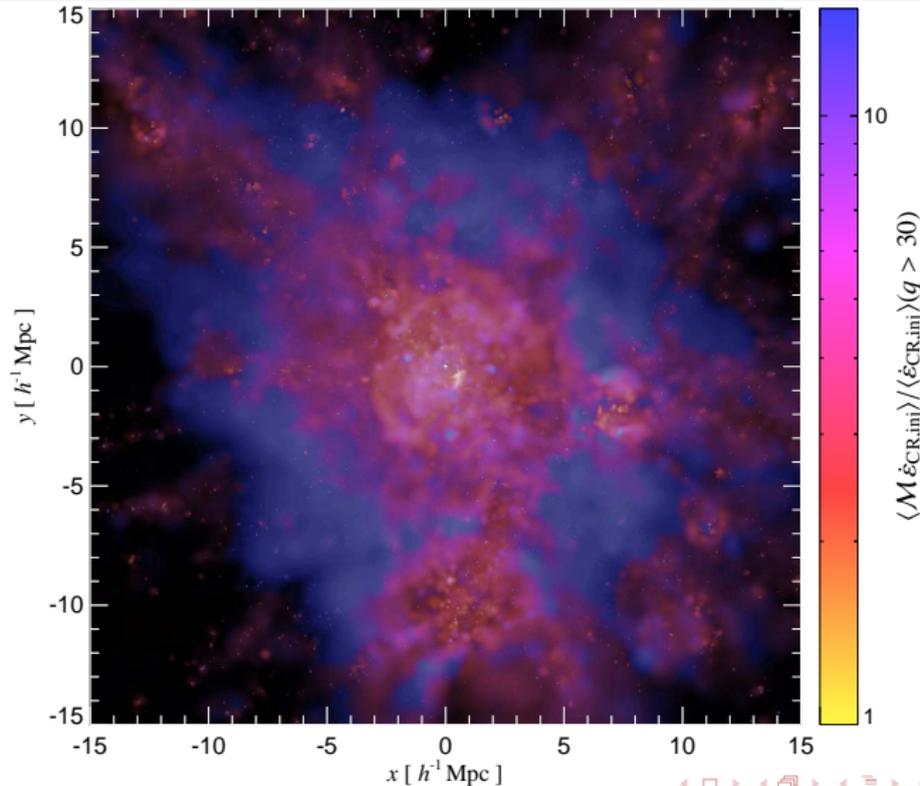
# Machzahlverteilung gewichtet mit $\epsilon_{\text{diss}}$



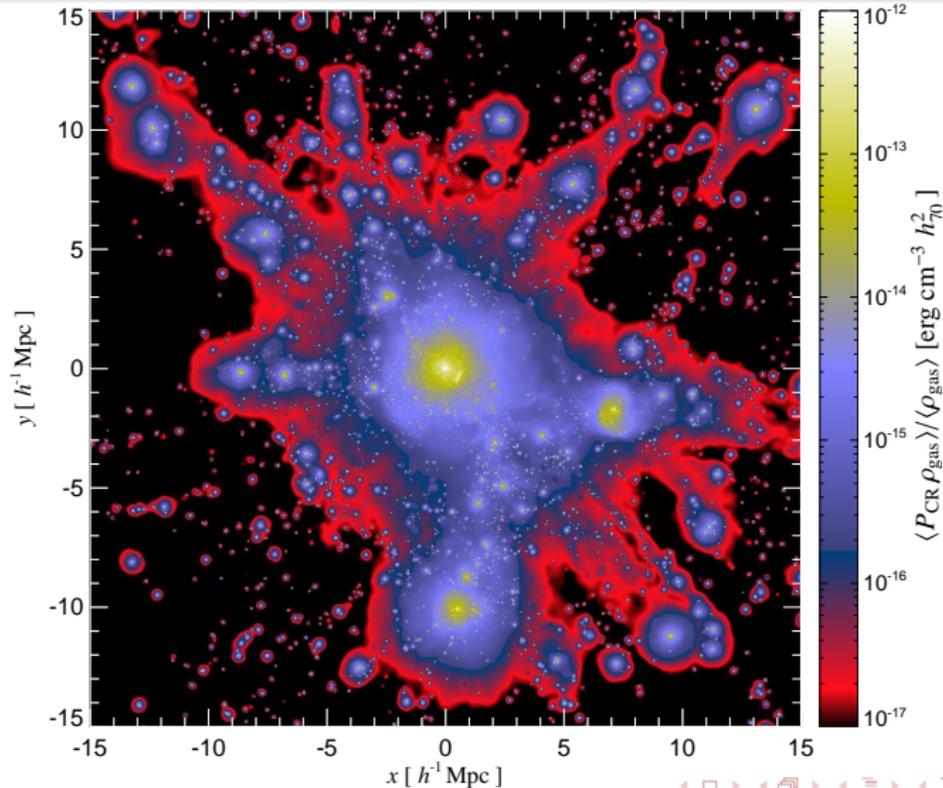
# Machzahlverteilung gewichtet mit $\varepsilon_{\text{CR},\text{inj}}$



# Machzahlverteilung gewichtet mit $\epsilon_{\text{CR, inj}}(q > 30)$



# Druck der kosmischen Strahlung $P_{\text{CR}}$



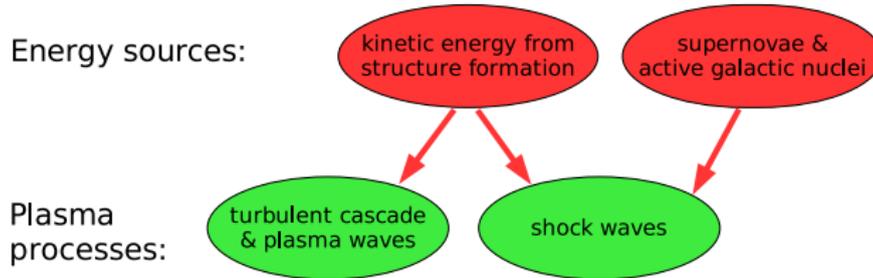
# Inhaltsübersicht

- 1 Physikalische Kosmologie
  - Strukturentstehung im Universum
  - Konzept einer Stoßwelle
  - Teilchenbeschleunigung
- 2 Kosmologische Simulationen
  - Beobachtungen von Galaxienhaufen
  - Physikalische Prozesse in Galaxienhaufen
  - Kosmische Strahlung in Galaxienhaufen
- 3 **Nicht-thermische Emission**
  - Radioemission von Stoßwellen
  - Hadronische Radioemission
  - Hochenergetische Gammastrahlung



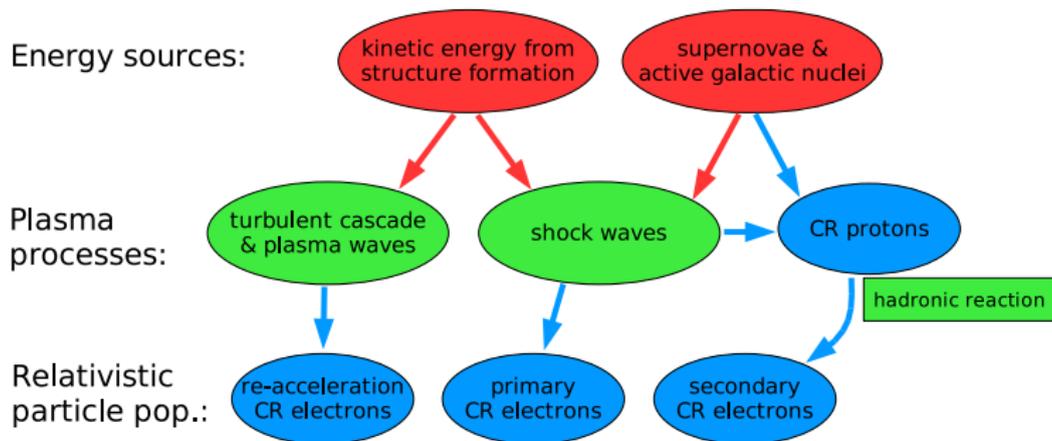
# Nicht-thermische Prozesse

Relativistic populations and radiative processes in clusters:



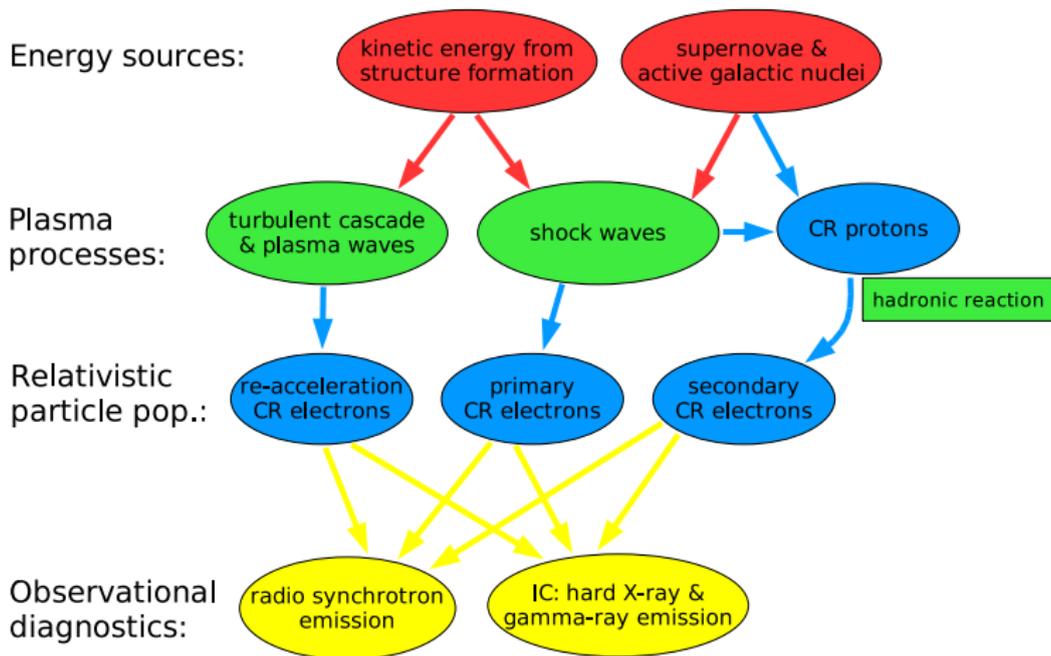
# Nicht-thermische Prozesse

Relativistic populations and radiative processes in clusters:



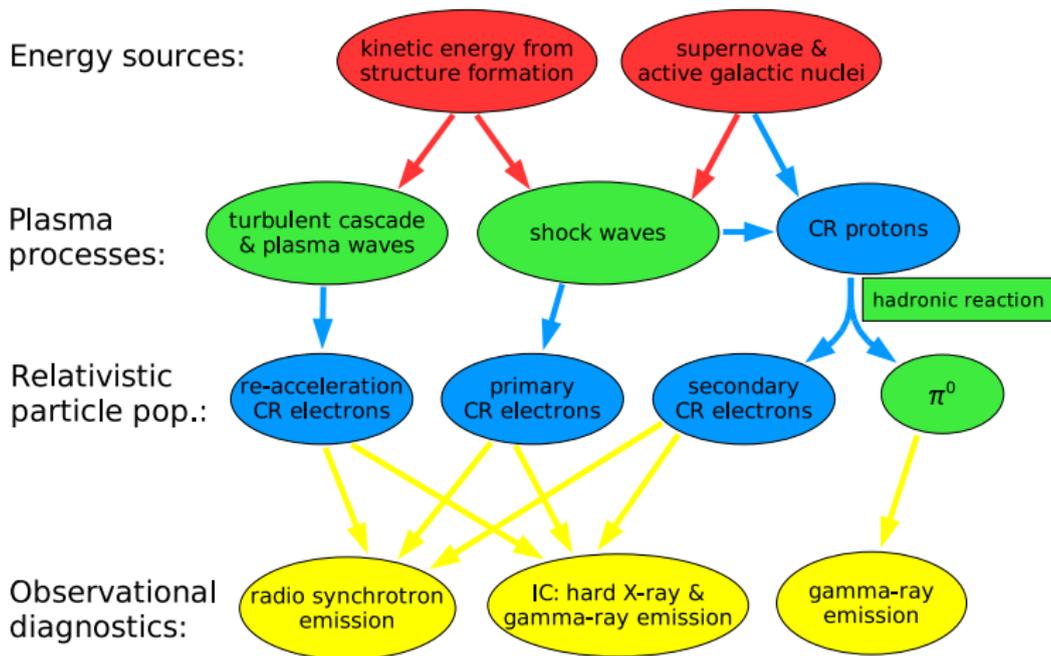
# Nicht-thermische Prozesse

Relativistic populations and radiative processes in clusters:

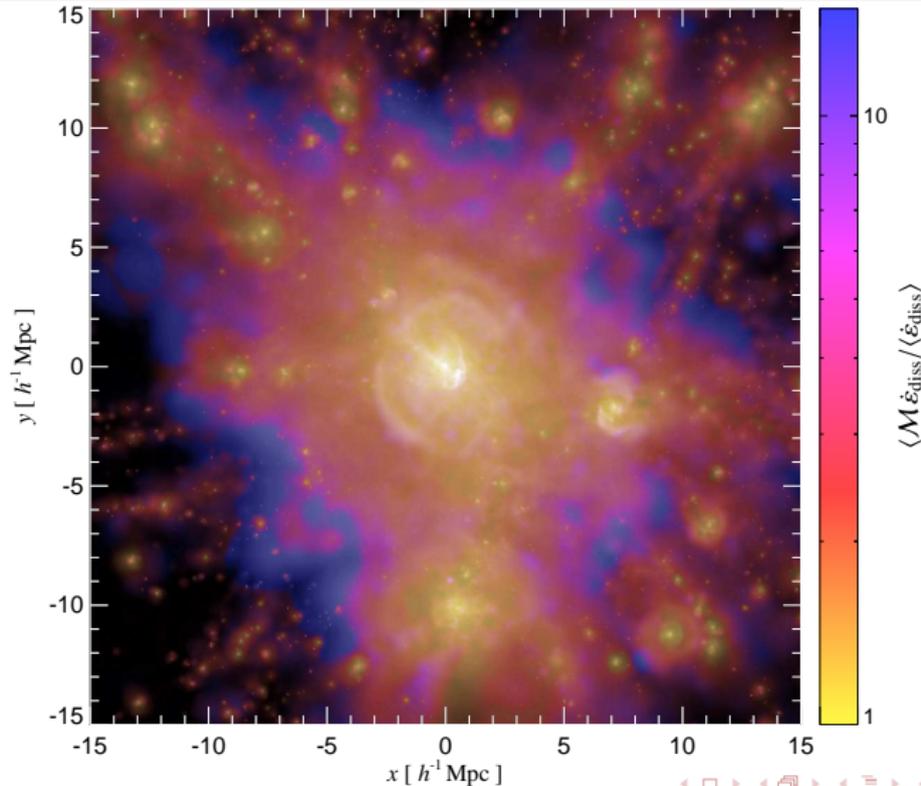


# Nicht-thermische Prozesse

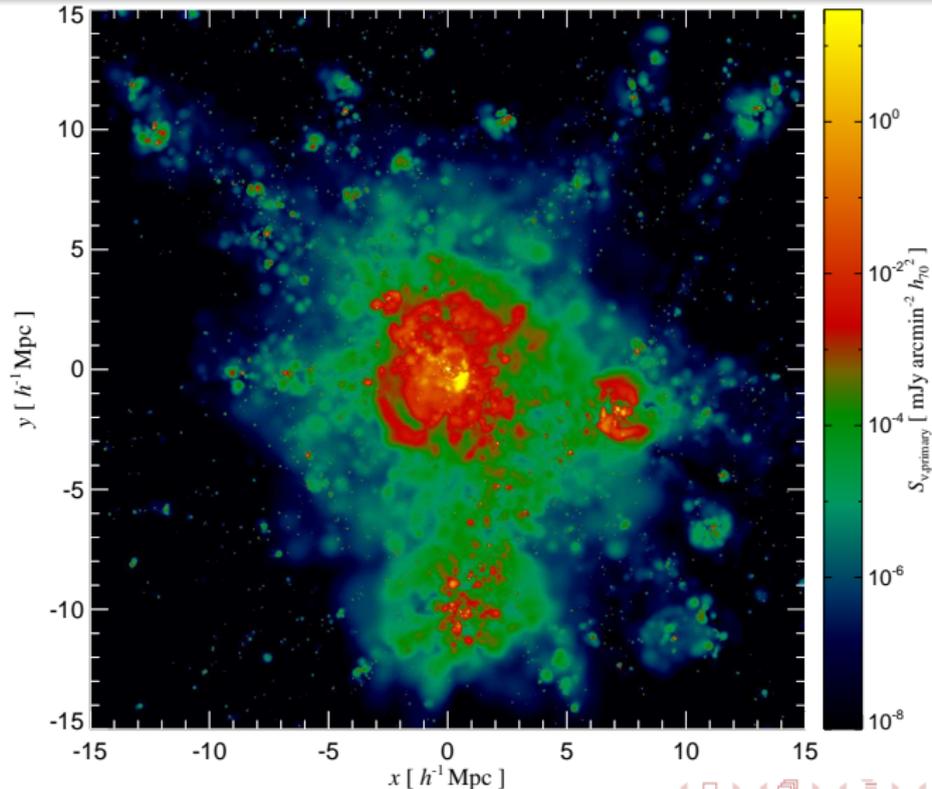
Relativistic populations and radiative processes in clusters:



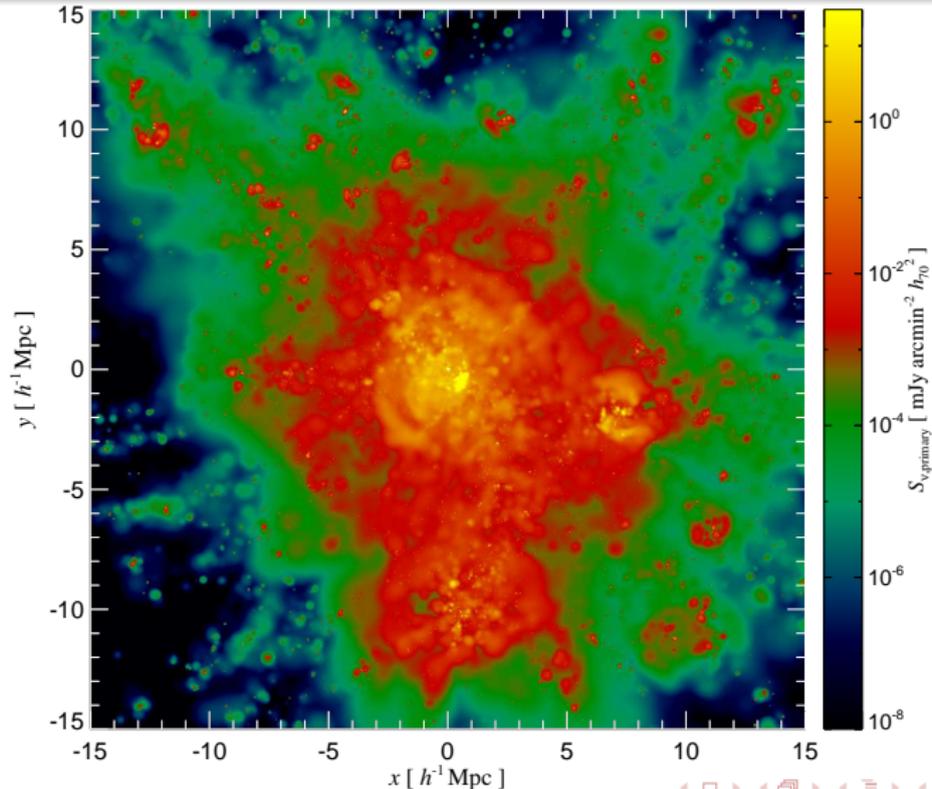
# Kosmisches Netz: Machzahlen



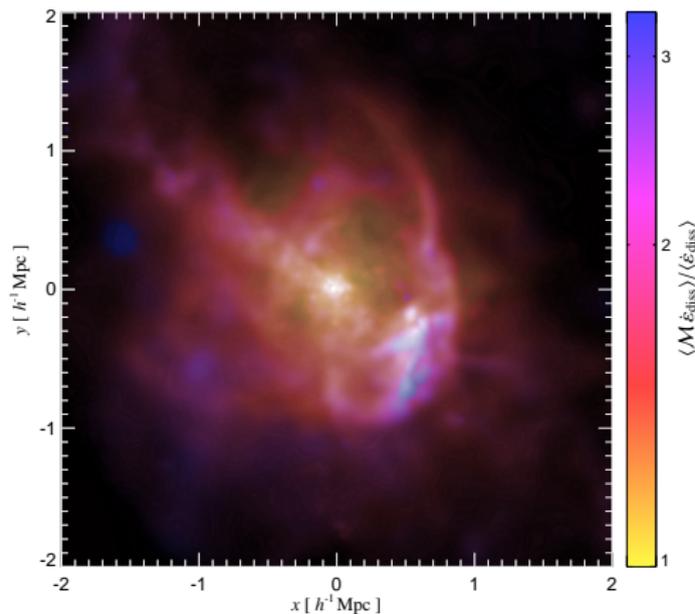
# Radiogischt (Relikte): primäre $e^{+/-}$ (150 MHz)



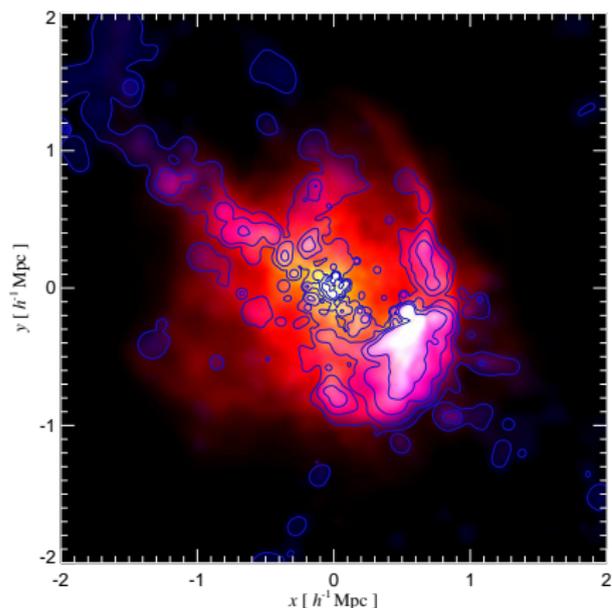
# Radiogischt: primäre $e^{+/-}$ (150 MHz), stärkeres Magnetfeld



# Radiogischt erleuchtet kosmische Magnetfelder



Kosmologische Stoßwelle, die durch eine Haufenkollision auslöst wurde.



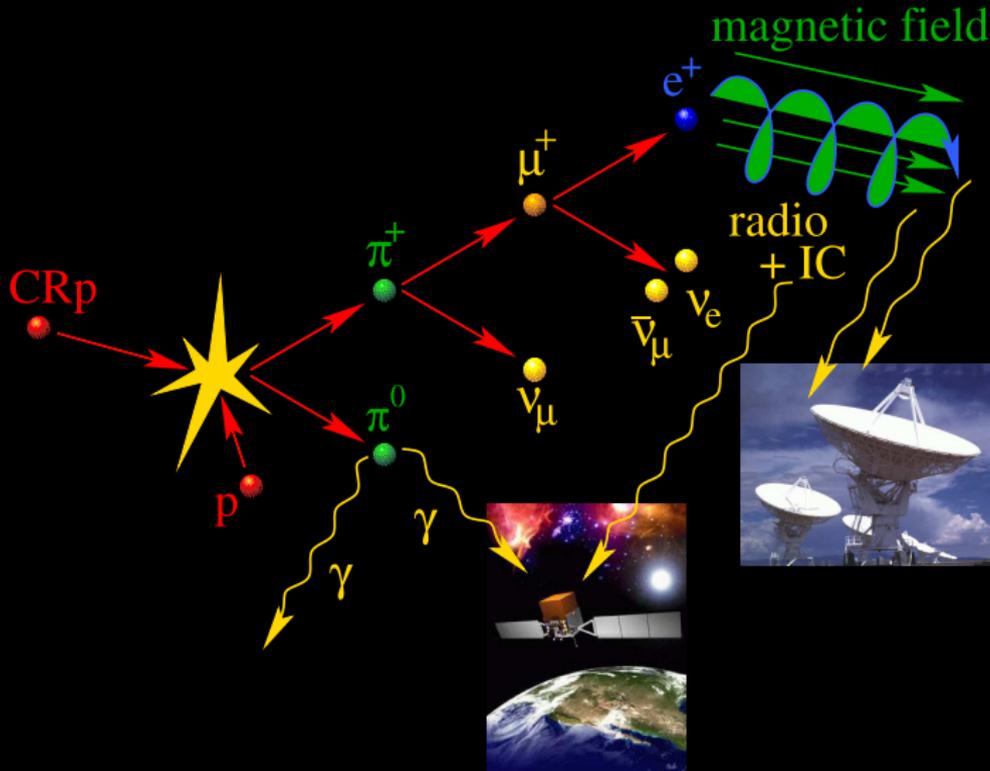
rot/gelb: dissipierte Stoß-Energie

blau/Konturen: 150 MHz Radio-Gischt-

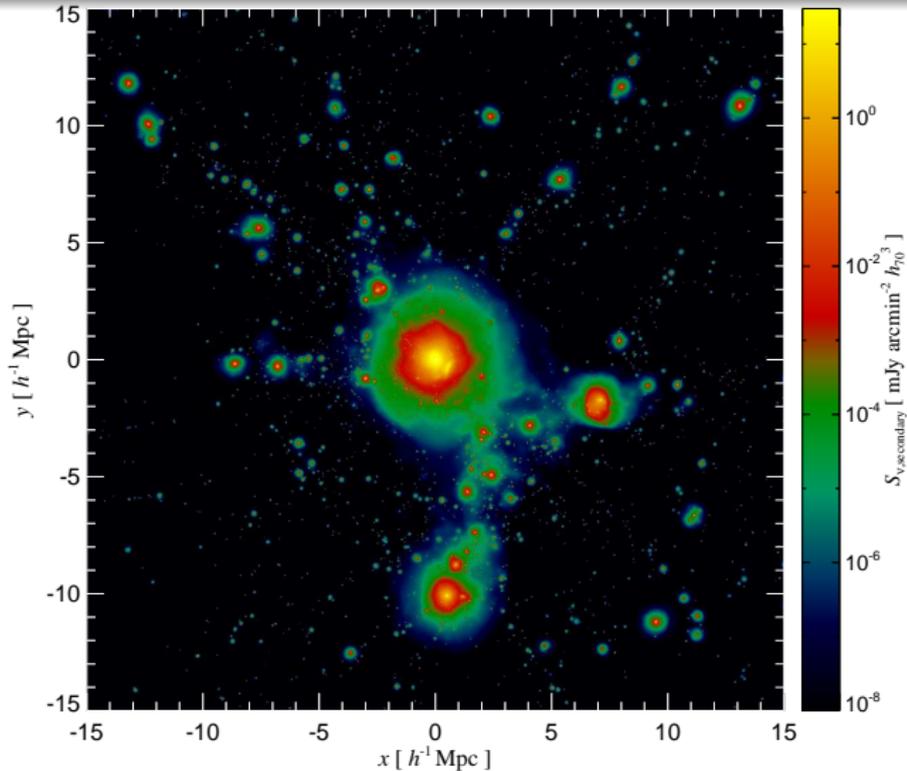
Emission der stoßbeschleunigten  $e^{+/-}$



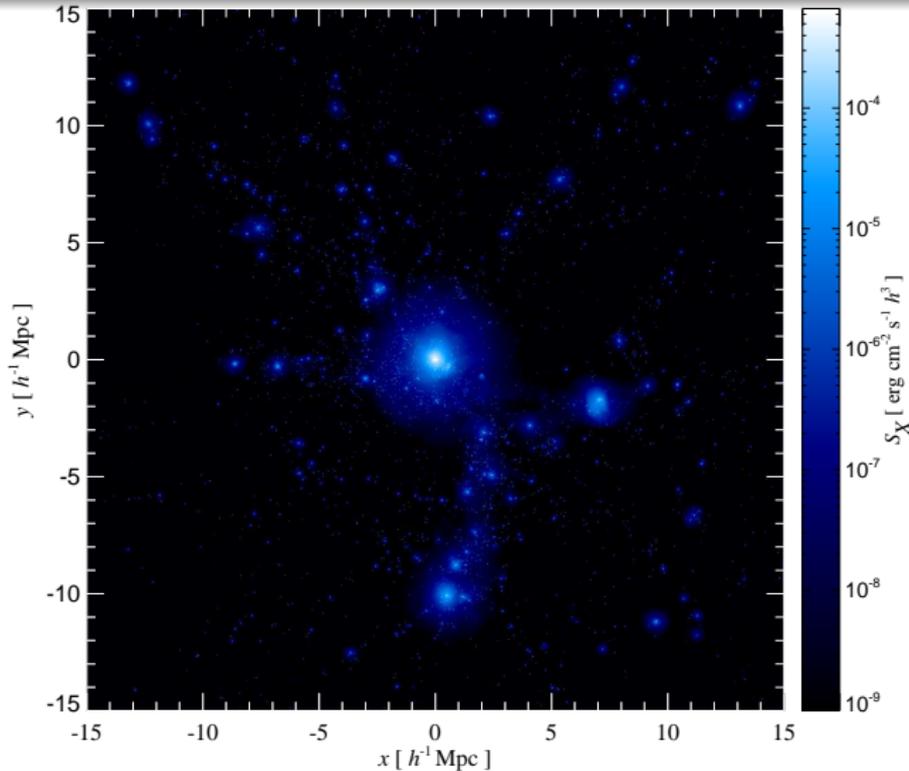
# Hadronische Wechselwirkung kosmischer Strahlung



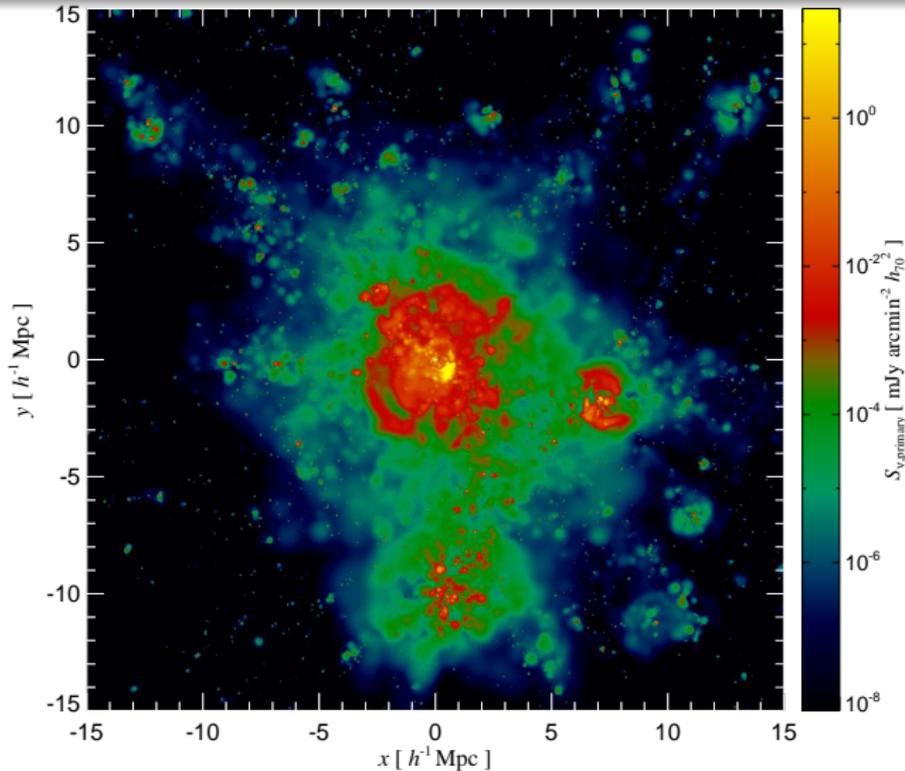
# Radioemission durch hadronisch beschleunigte $e^{+/-}$



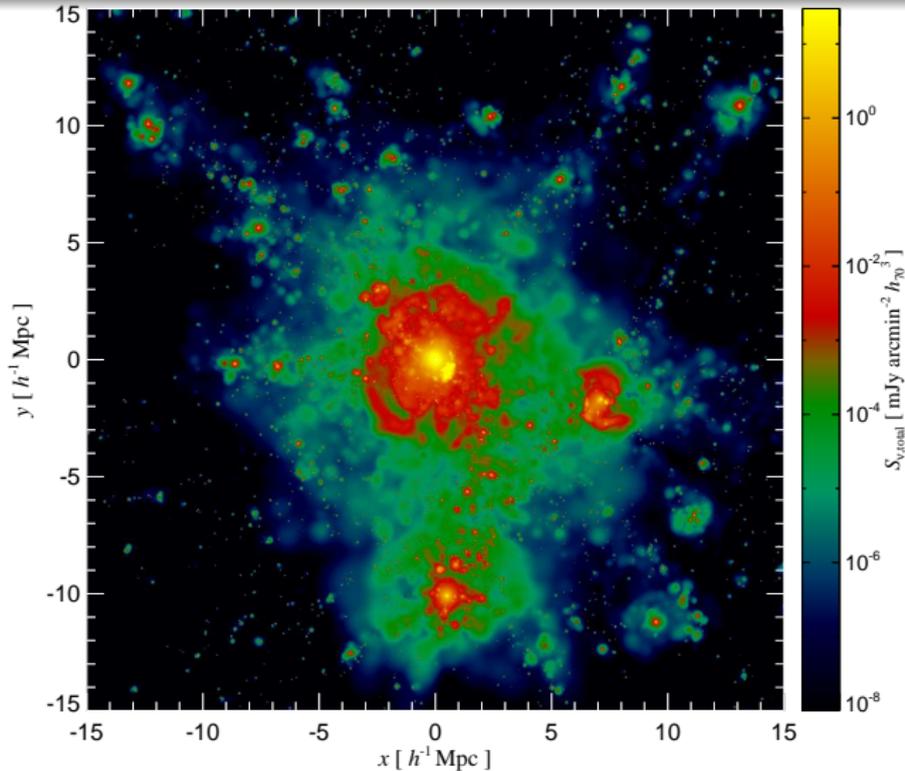
# Thermische Röntgenemission



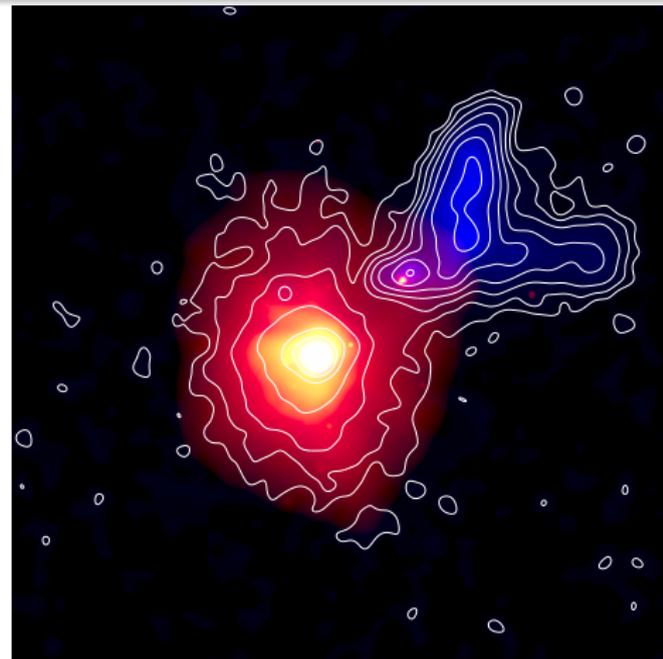
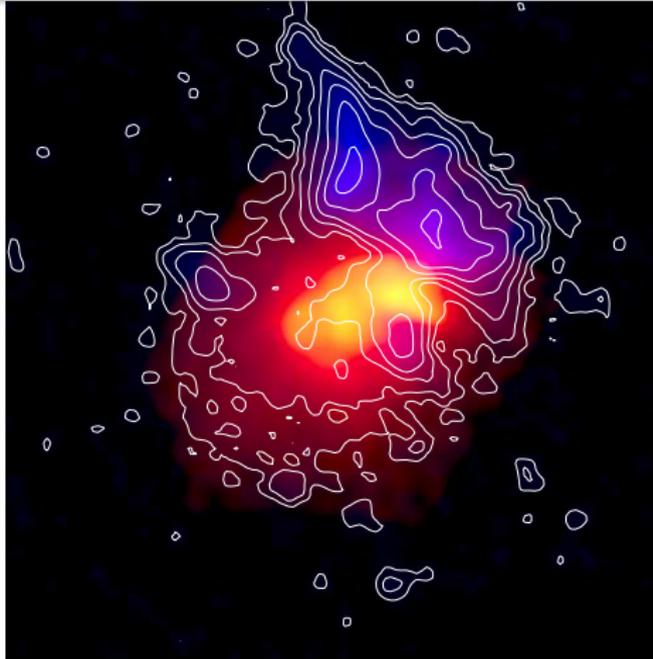
# Radiogischt: primäre $e^{+/-}$ CRe (150 MHz)



# Vereinheitlichtes Modell der Radiohalos (CP, Enßlin, Springel 2008)

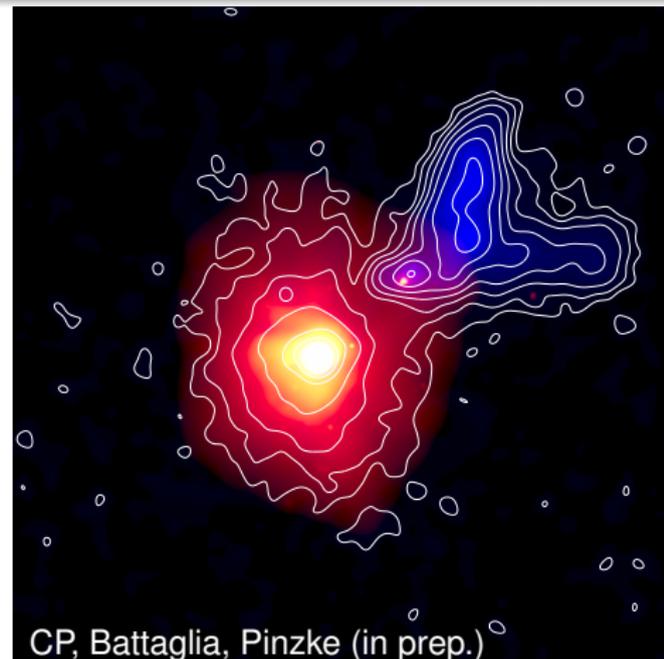
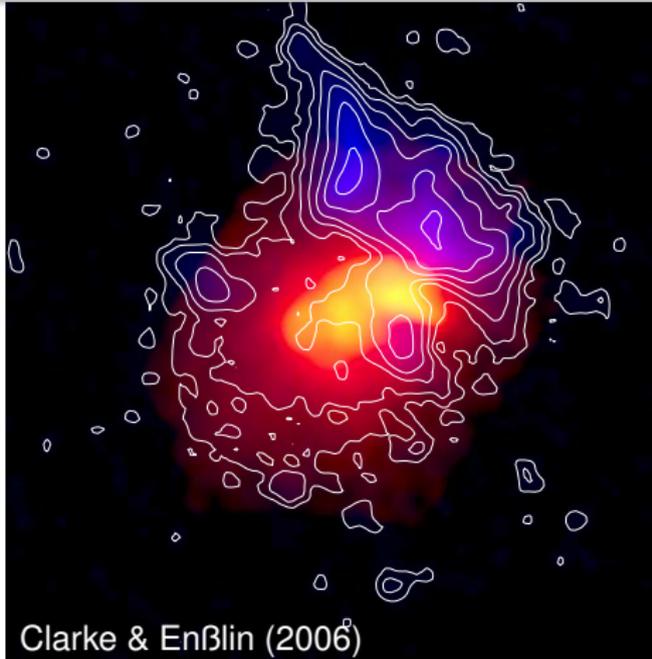


# Quiz: welches ist die Simulation/Beobachtung?



**rot/gelb:** thermische Röntgenemission,  
**blau/Konturen:** 1.4 GHz Radioemission mit Radiohalo und -relikt

# Beobachtung – Simulation von A2256



rot/gelb: thermische Röntgenemission,  
blau/Konturen: 1.4 GHz Radioemission mit Radiohalo und -relikt

# Nicht-thermische Emission von Galaxienhaufen

## Entzifferung des "Gedächtnisses" der Strukturformation

- **Primäre, stoßbeschleunigte  $e^{+/-}$**  bilden einen Schappschuß der gegenwärtigen Strukturentstehung ab.
- **Kosmische Strahlung/hadronische  $e^{+/-}$**  sind wiederum ein Maß für die zeitintegrierten Nichtgleichgewichtsaktivitäten in Haufen über die gesamte kosmische Geschichte.

Wie können wir an diese Informationen über nicht-thermische Populationen gelangen? → neue Ära der Multi-Frequenzexperimente:

- **LOFAR, GMRT, MWA, LWA, SKA:** Radiointerferometer bei tiefen Radiofrequenzen ( $\nu \simeq (15 - 240)$  MHz)
- **NuSTAR:** zukünftiger Röntgensatellit ( $E \simeq (1 - 100)$  keV)
- **Fermi** Gammastrahlungsteleskop ( $E \simeq (0.1 - 300)$  GeV)
- **abbildende Luft-Tscherenkov Teleskope** ( $E \simeq (0.1 - 100)$  TeV)

# Nicht-thermische Emission von Galaxienhaufen

## Entzifferung des "Gedächtnisses" der Strukturformation

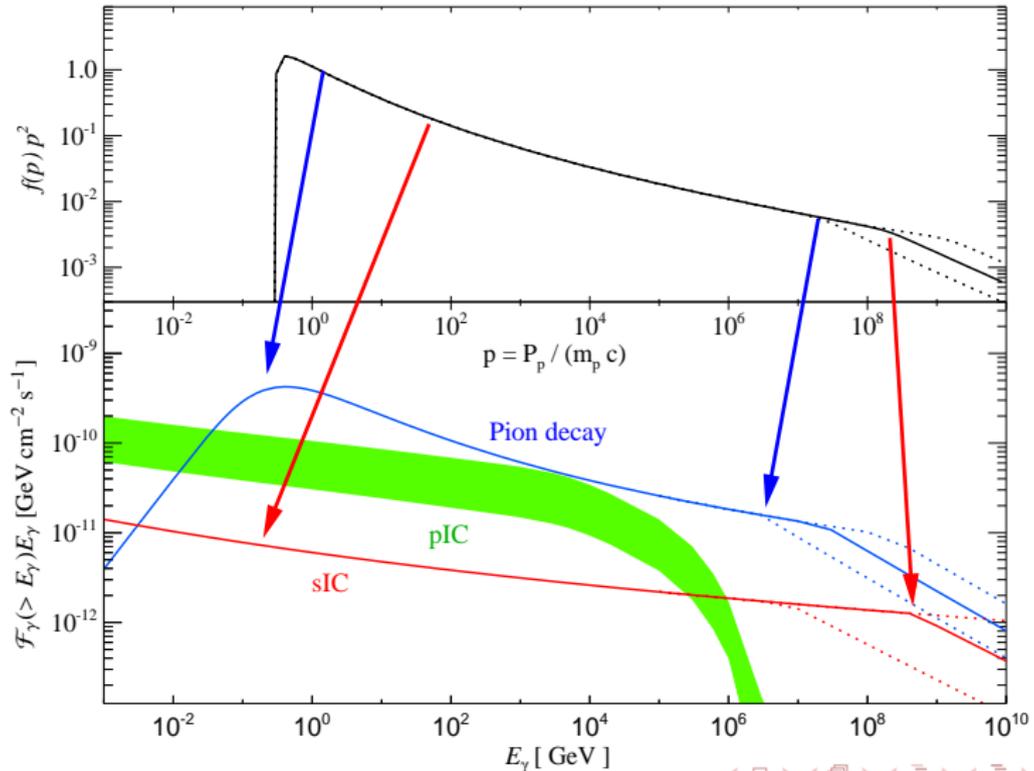
- **Primäre, stoßbeschleunigte  $e^{+/-}$**  bilden einen Schappschuß der gegenwärtigen Strukturentstehung ab.
- **Kosmische Strahlung/hadronische  $e^{+/-}$**  sind wiederum ein Maß für die zeitintegrierten Nichtgleichgewichtsaktivitäten in Haufen über die gesamte kosmische Geschichte.

Wie können wir an diese Informationen über nicht-thermische Populationen gelangen? → neue Ära der Multi-Frequenzexperimente:

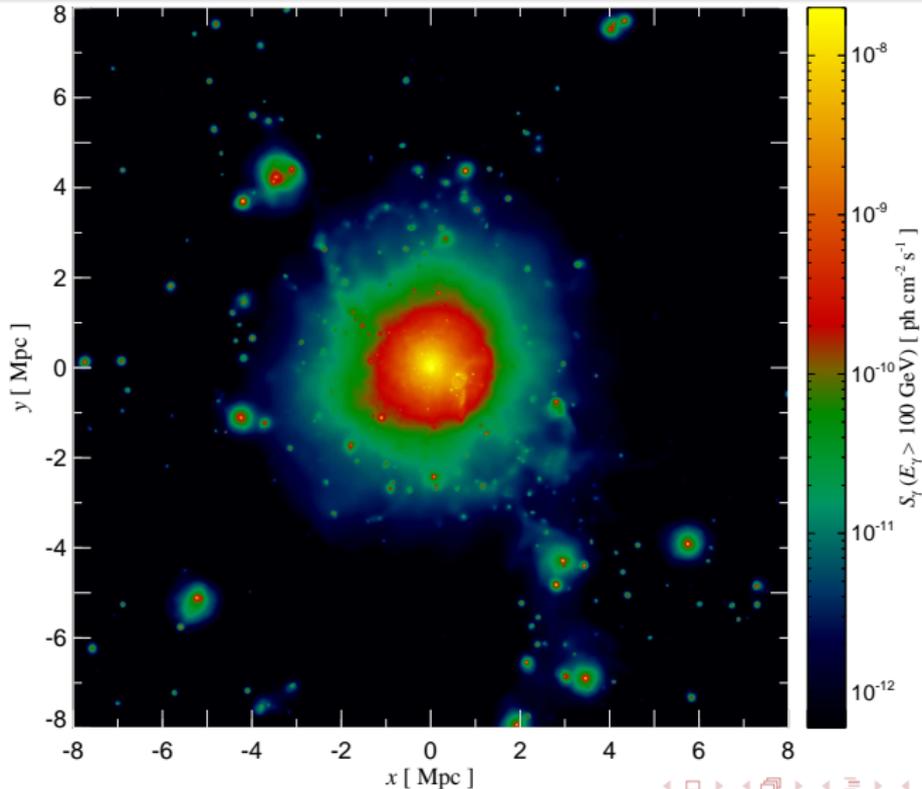
- **LOFAR, GMRT, MWA, LWA, SKA:** Radiointerferometer bei tiefen Radiofrequenzen ( $\nu \simeq (15 - 240)$  MHz)
- **NuSTAR:** zukünftiger Röntgensatellit ( $E \simeq (1 - 100)$  keV)
- **Fermi** Gammastrahlungsteleskop ( $E \simeq (0.1 - 300)$  GeV)
- **abbildende Luft-Tscherenkov Teleskope** ( $E \simeq (0.1 - 100)$  TeV)



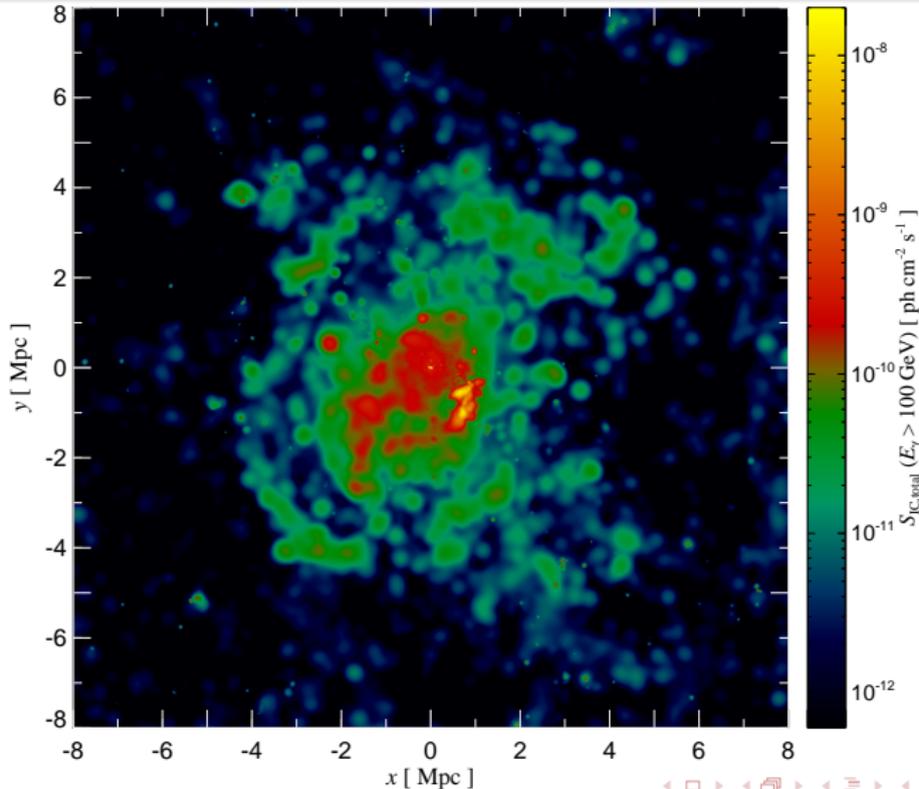
# Spektrum der Gammastrahlung (Pinzke & CP 2010)



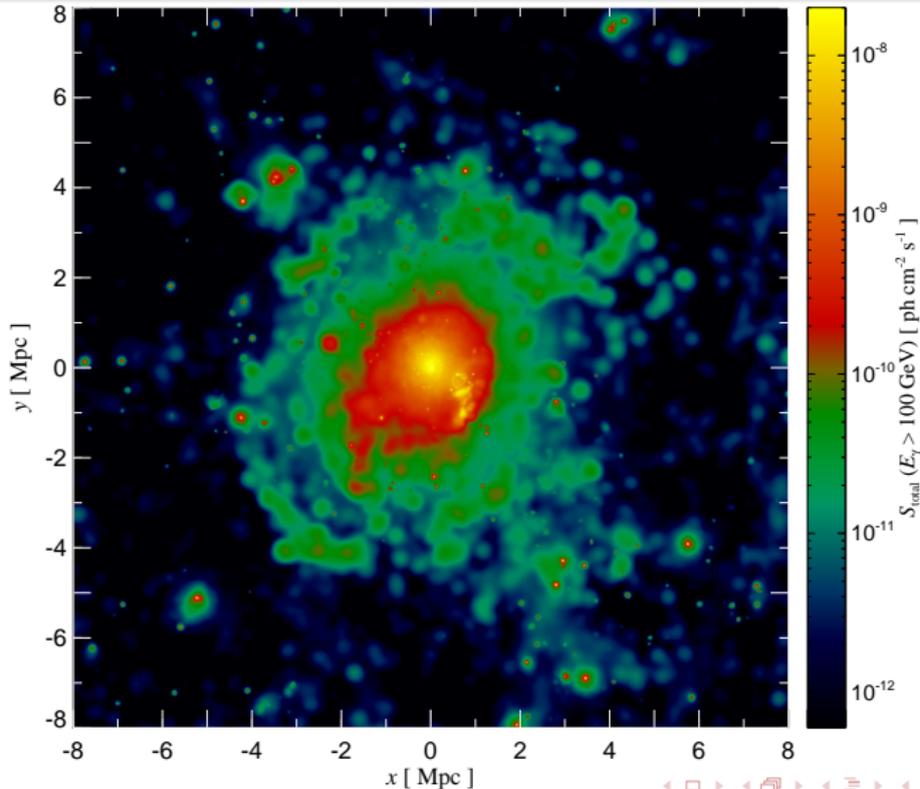
# Hadronische Gammastrahlung, $E_\gamma > 100$ GeV



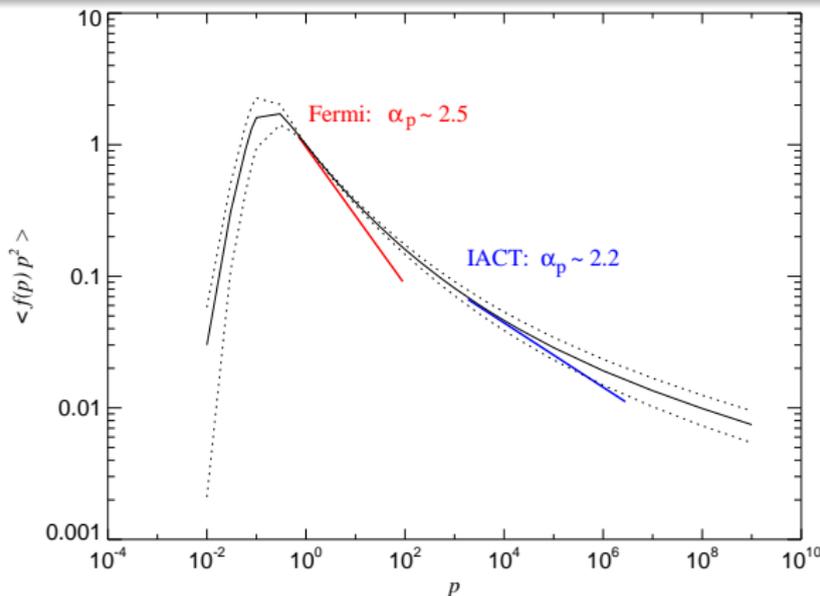
# Inverse Compton Emission, $E_{IC} > 100 \text{ GeV}$



# Gesamte Gammastrahlung, $E_\gamma > 100$ GeV



# Universelles CR-Spektrum in Galaxienhaufen

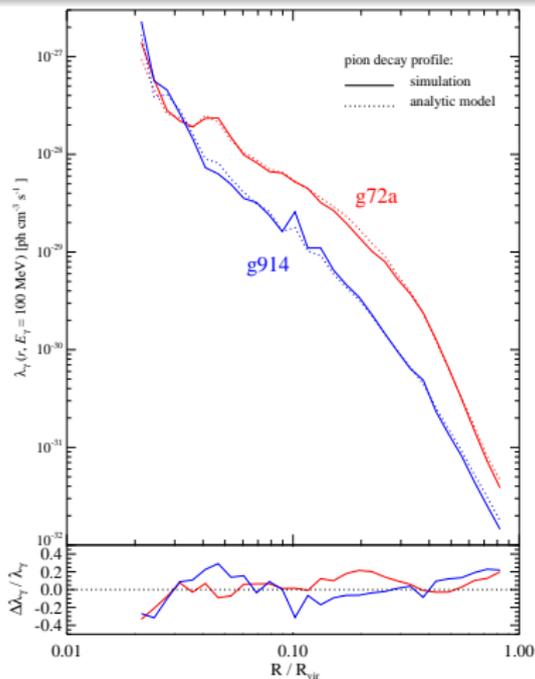


Spektrum der kosmischen Strahlung hat **universelle konkave Form** →  
 Abbildung der hierarchischen Strukturentwicklung und der Abfolge von  
 Stoßwellen, die jedes Flüssigkeitselement in der kosmischen Geschichte  
 erfahren hat (Pinzke & CP 2010).

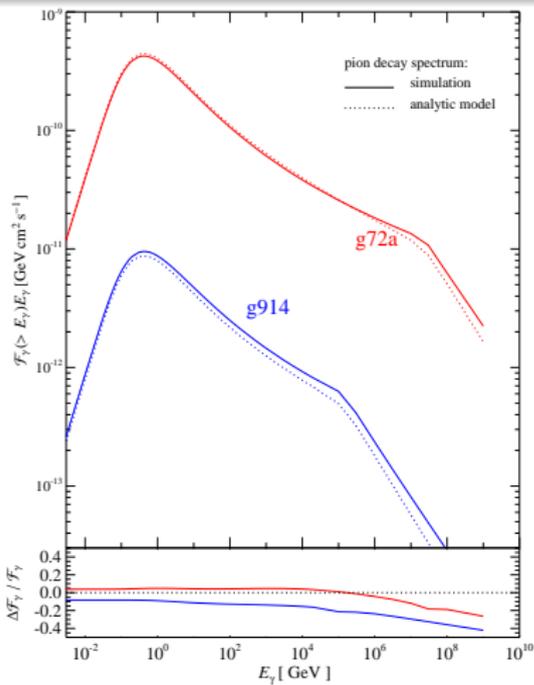


# Semianalytisches Modell der $\gamma$ -Strahlung in Haufen

Vergleich: Simulation vs. analytisches Modell,  $M_{\text{vir}} \simeq (10^{14}, 10^{15}) M_{\odot}$



Radiales Gamastrahlungsprofil

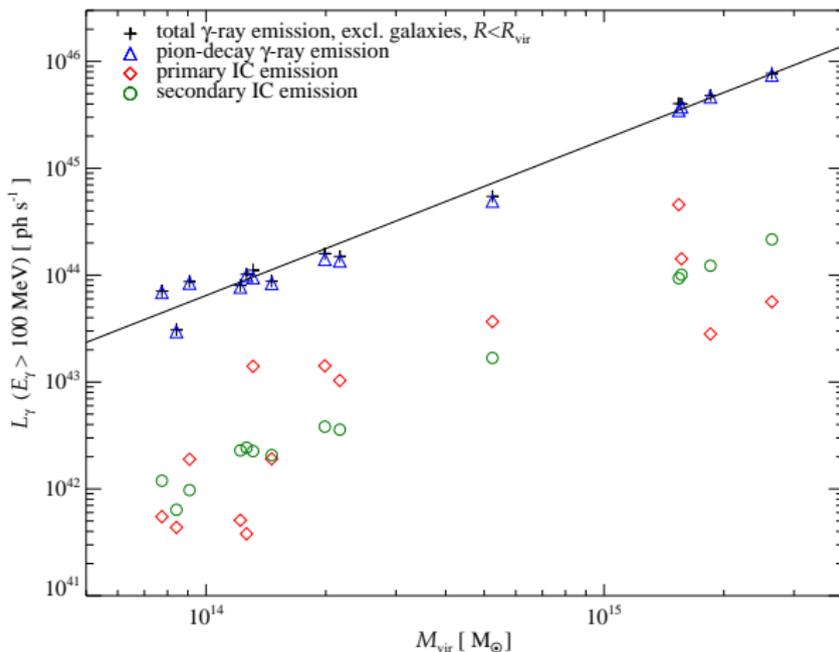


Spektrum des Pionzerfalls



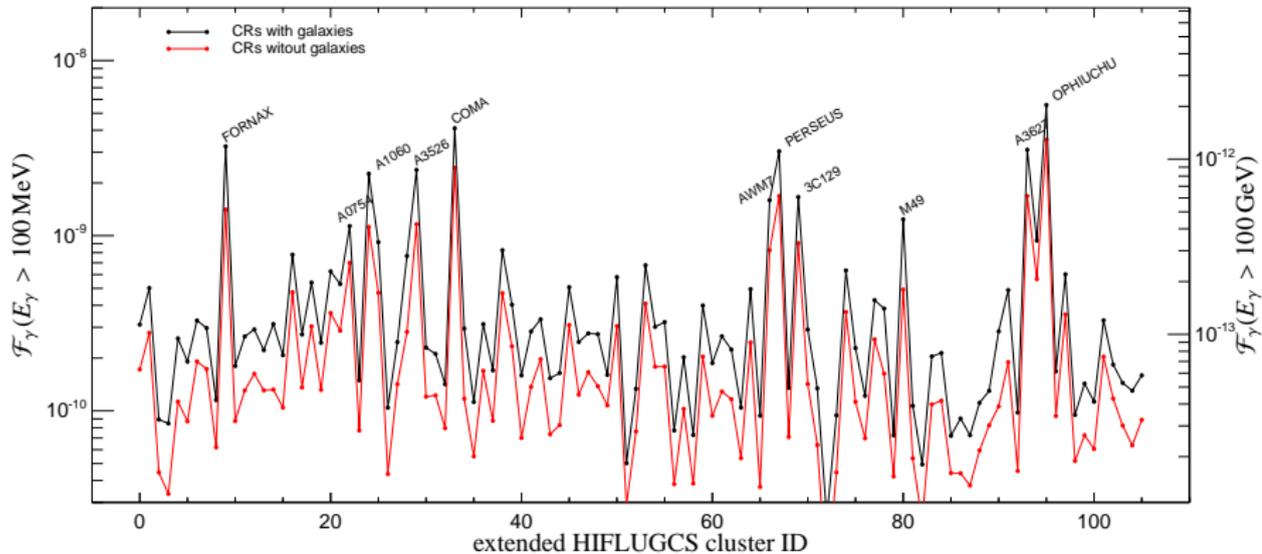
CITA-ICAT

# Skalenrelationen der Gammastrahlung



Skalenrelationen + vollzählige Stichprobe der hellsten Röntgenhaufen (HIFLUGCS) → Vorhersagen für *Fermi* und *IACT*'s

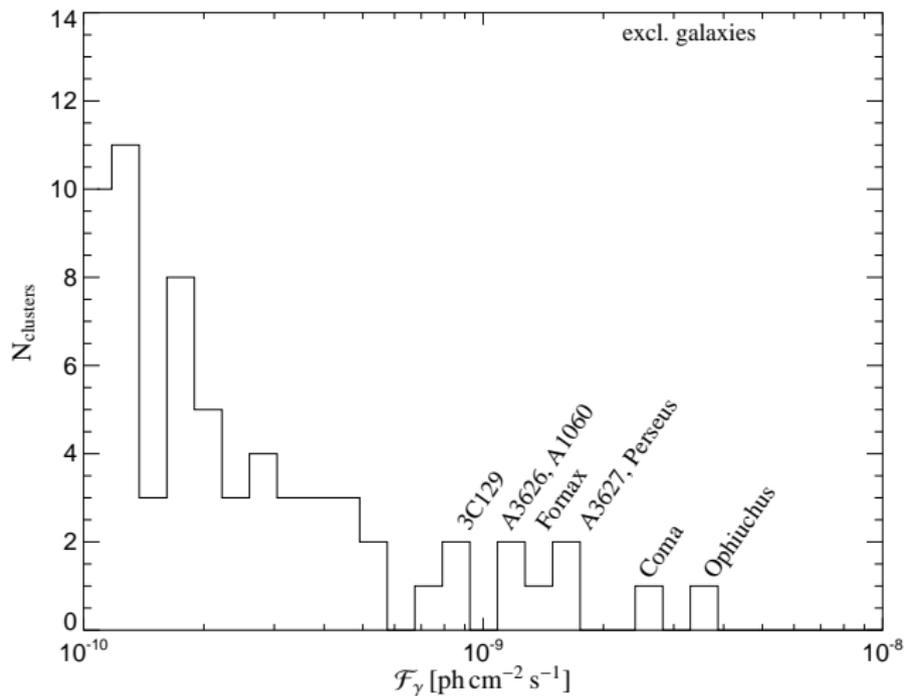
# Vorhersagen für *Fermi* und *IACTs*



schwarz: optimistisches Modell, einschließlich der 'Galaxien', die den Gammafluß zu hoch schätzen; rot: realistisches Modell, ausschließlich der 'Galaxien'



# Vorhersagen für *Fermi* und *IACTs* – hellsten Objekte



# Zusammenfassung

Im Gegensatz zum thermischen Plasma **konserviert die kosmische Strahlung die Informationen über ihre Entstehung und ihren Transport** und ermöglicht uns einen einmaligen Einblick in den Prozess der Strukturentstehung!

- 1 **Kosmologische hydrodynamische Simulationen** sind unverzichtbar für unser Verständnis der nicht-thermischen Prozesse in Galaxienhaufen  
→ **Verknüpfung von Beobachtung und Simulationen**
- 2 **Multifrequenz Ansatz** (Radio-, Röntgen-, und Gammastrahlung):
  - **Grundlagenforschung in der Plasma-Astrophysik:** Beschleunigung an Stoßwellen, Magnetfelder, Turbulenz
  - **Beschaffenheit der dunklen Materie**
  - **goldene Stichprobe** von Galaxienhaufen für die Präzisionskosmologie



# Literatur

- Pinzke, Pfrommer, 2010, in prep., *Simulating the gamma-ray emission from galaxy clusters: a universal cosmic ray spectrum and spatial distribution*
- Battaglia, Pfrommer, Sievers, Bond, Enßlin, 2009, MNRAS, 393, 1073, *Exploring the magnetized cosmic web through low frequency radio emission*
- Pfrommer, 2008, MNRAS, 385, 1242 *Simulating cosmic rays in clusters of galaxies – III. Non-thermal scaling relations and comparison to observations*
- Pfrommer, Enßlin, Springel, 2008, MNRAS, 385, 1211, *Simulating cosmic rays in clusters of galaxies – II. A unified scheme for radio halos and relics with predictions of the  $\gamma$ -ray emission*
- Pfrommer, Enßlin, Springel, Jubelgas, Dolag, 2007, MNRAS, 378, 385, *Simulating cosmic rays in clusters of galaxies – I. Effects on the Sunyaev-Zel'dovich effect and the X-ray emission*
- Pfrommer, Springel, Enßlin, Jubelgas, 2006, MNRAS, 367, 113, *Detecting shock waves in cosmological smoothed particle hydrodynamics simulations*
- Enßlin, Pfrommer, Springel, Jubelgas, 2007, A&A, 473, 41, *Cosmic ray physics in calculations of cosmological structure formation*