

# Die „dunkle“ Seite der Kosmologie

Workshop im Rahmen der  
62. Fortbildungswoche

Kuffner Sternwarte

27. 2. 2008

Franz Embacher

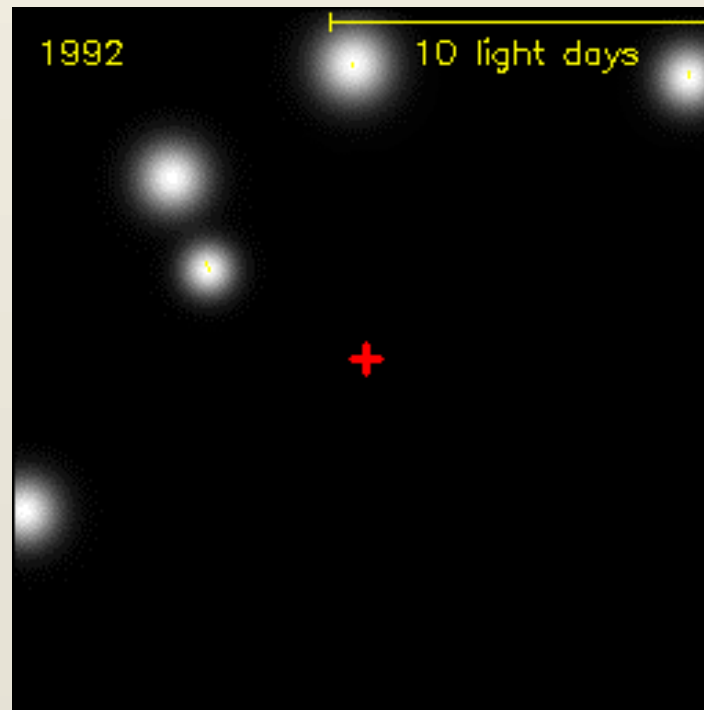
Fakultät für Physik  
Universität Wien

4 Aufgaben

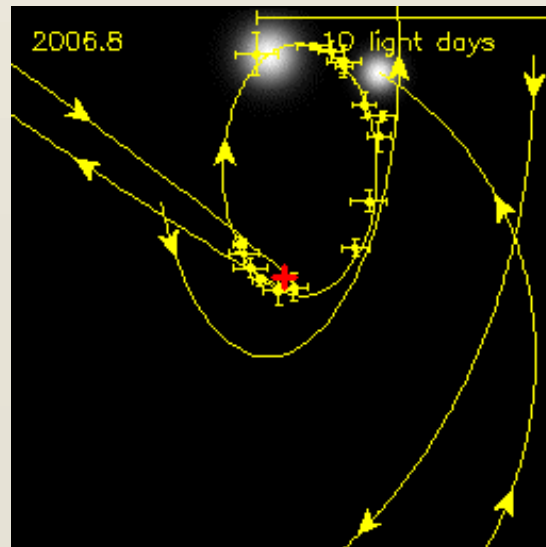
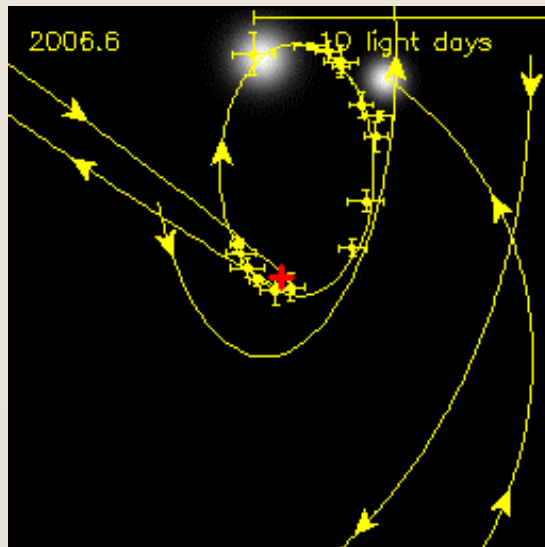
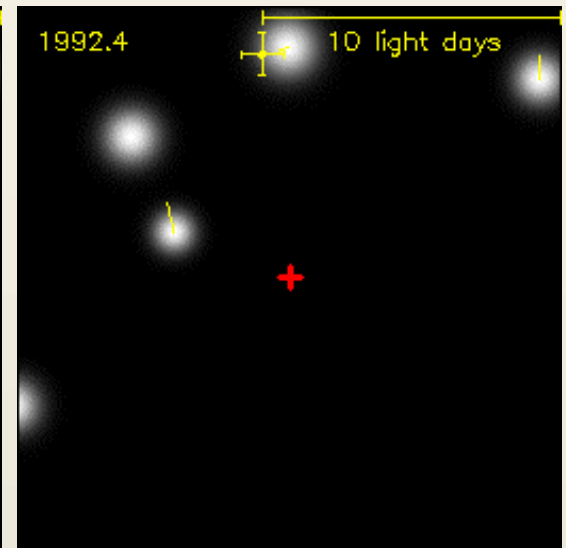
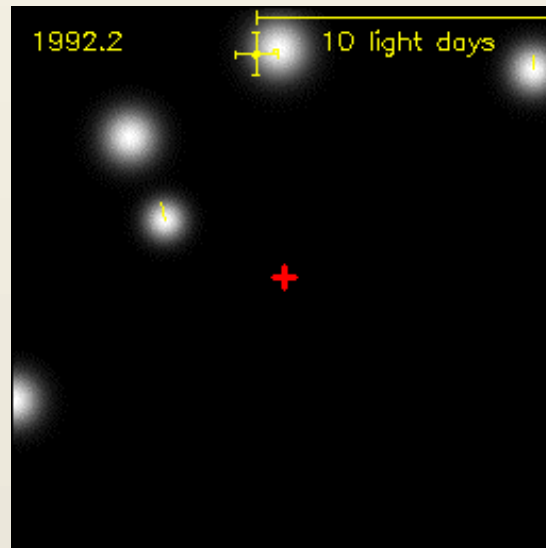
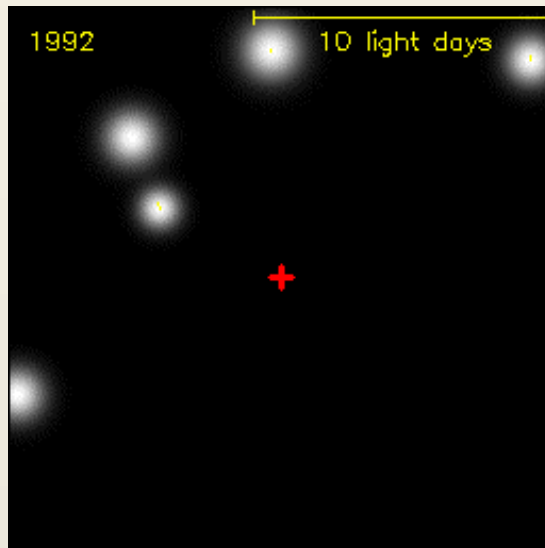
# Aufgabe 1

---

- Im Zentrum der Milchstraße befindet sich ein „dunkles“ Objekt (Sagittarius A\* = Sgr A\*), um das Sterne kreisen:



# Aufgabe 1



Schnappschüsse

- 1992
- 1992.2
- 1992.4
- 2006.6
- 2006.8

# Aufgabe 1

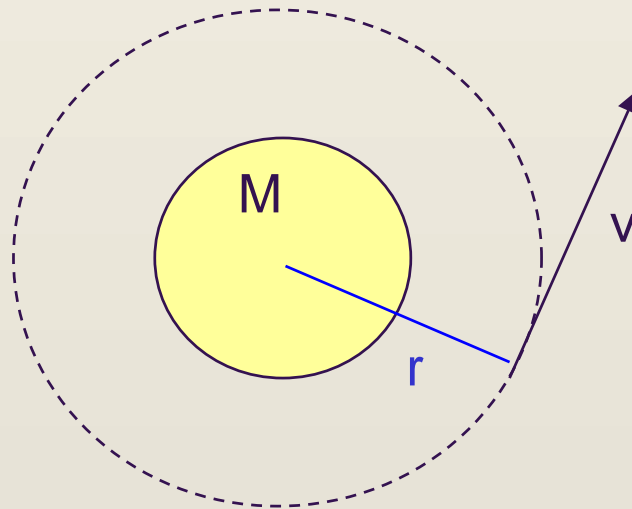
---

- Sgr A\* emittiert vor allem im Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums.
- Sgr A\* ist im nahen Infrarot und im Röntgenbereich schwach sichtbar und „flackert“: Seine Helligkeit ist einmal pro Tag etwa eine halbe Stunde lang stark erhöht. Die charakteristische Zeit dieser Änderung beträgt etwa 10 Minuten.
- **Aufgabe: Schätzen Sie die Masse dieses Objekts ab! Argumentieren Sie, dass Sgr A\* höchstwahrscheinlich ein schwarzes Loch ist!**

## Aufgabe 2

---

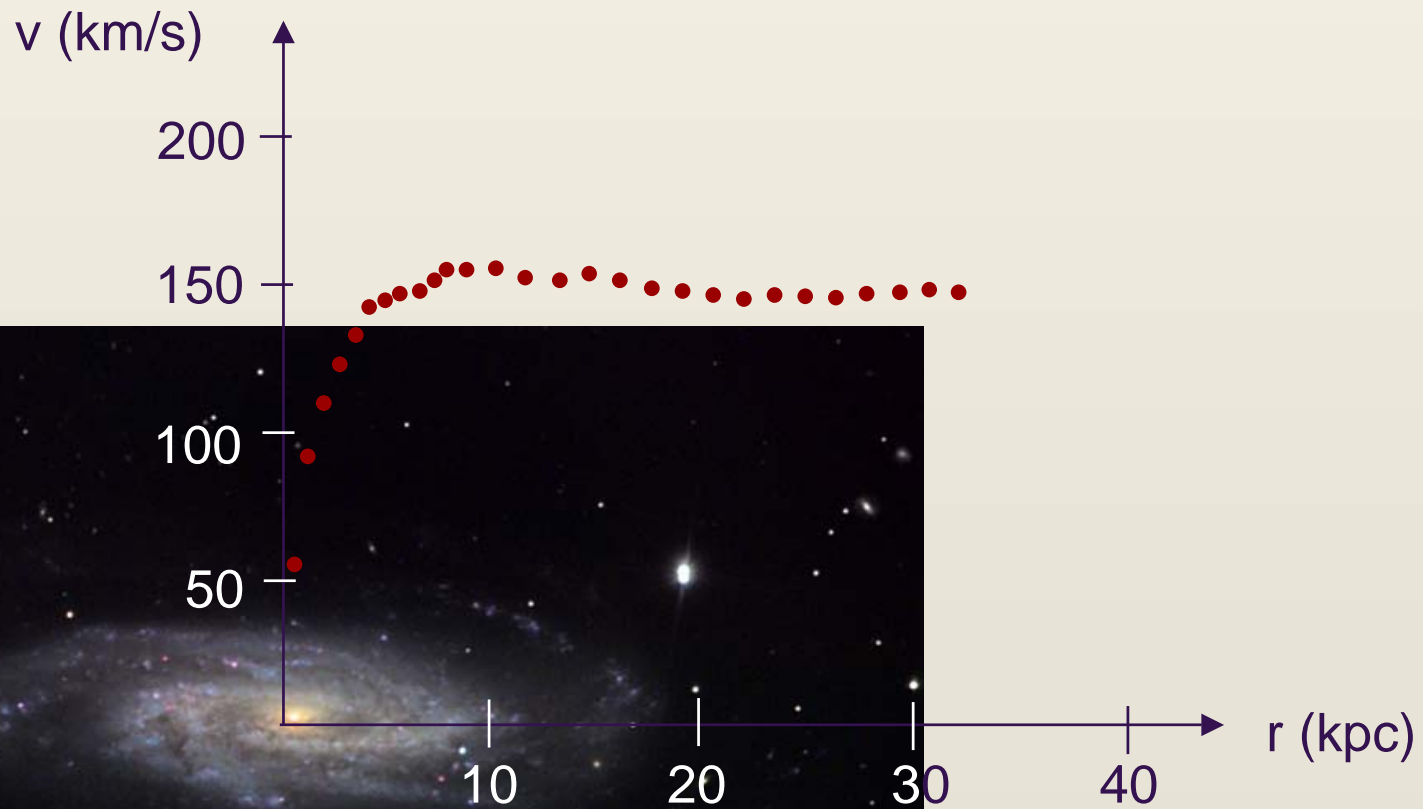
- Rotationsgeschwindigkeit von Sternen, die „weit draußen“ um eine Galaxie kreisen:



## Aufgabe 2

---

- Rotationskurve der Galaxie NGC 3198:





## Aufgabe 2

---

- Argumentieren Sie, dass die Galaxie NGC 3198 von einem „Halo“ aus **dunkler** (nicht sichtbarer) **Materie** umgeben sein muss!
- Schätzen Sie die **Masse** der leuchtenden Materie (unter der Annahme, dass die dunkle Materie dort vernachlässigbar ist) ab!
- Können Sie aus der Flachheit der Rotationskurve abschätzen, ob die **Dichte der dunklen Materie** nach außen hin abnimmt, zunimmt oder konstant ist?

## Aufgabe 3

---

Kosmologisches Prinzip: Das Universum ist (im Großen) homogen und isotrop.

→ Expansion des Universums = gleichmäßige „Dehnung“ aller Längen (z.B. Entfernungen zwischen Galaxien) im Universum

**Skalenfaktor:**  $a(t) = \frac{\text{Entfernung zur Zeit } t}{\text{Entfernung heute}}$

**Rotverschiebung** des heute empfangenen Lichts:

$$z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_{\text{emittiert}}}{\lambda_{\text{emittiert}}}$$

**Zusammenhang** der Rotverschiebung mit dem Skalenfaktor zur Zeit der Lichtaussendung:

$$a = \frac{1}{1 + z}$$



## Aufgabe 3

---

Aus den Grundgleichungen der Kosmologie folgt:

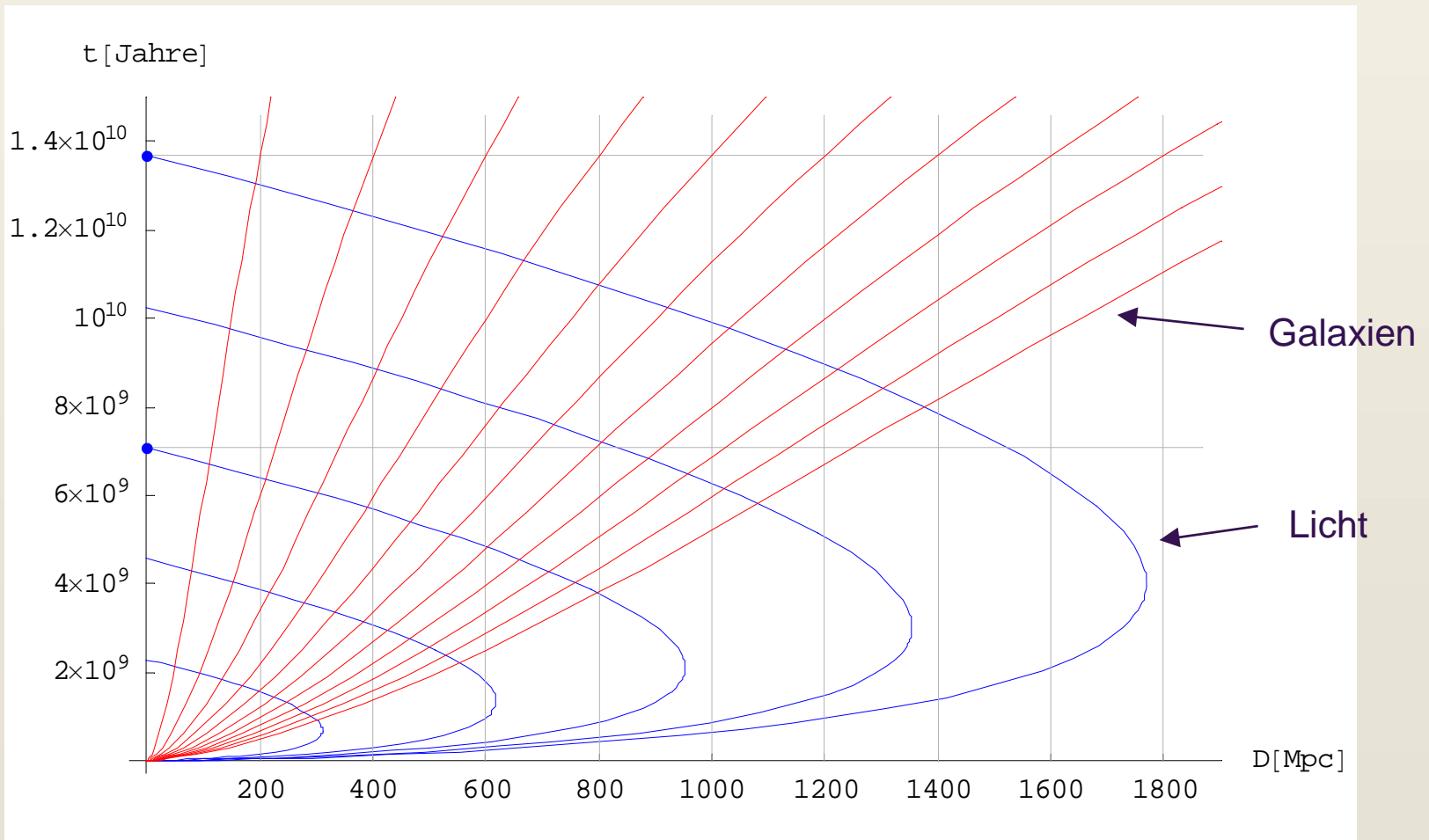
- Materie und Strahlung *bremsen* die Expansion des Universums.
- Eine nichtverschwindende Energiedichte des Vakuums *beschleunigt* die Expansion des Universums!

Das moderne Standardmodell der Kosmologie:

- Das Vakuum besitzt eine nichtverschwindende Energiedichte (**dunkle Energie**, kosmologische Konstante).
- Die Energiedichte des Vakuums beträgt (heute) etwa 73% der gesamten Energiedichte des Universums. Das heutige Universum ist *vakuumdominiert* und expandiert *beschleunigt*.

# Aufgabe 3

Raumzeitdiagramm des Standardmodells der Kosmologie:



## Aufgabe 3

---

Die **Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation** ist der Zusammenhang zwischen

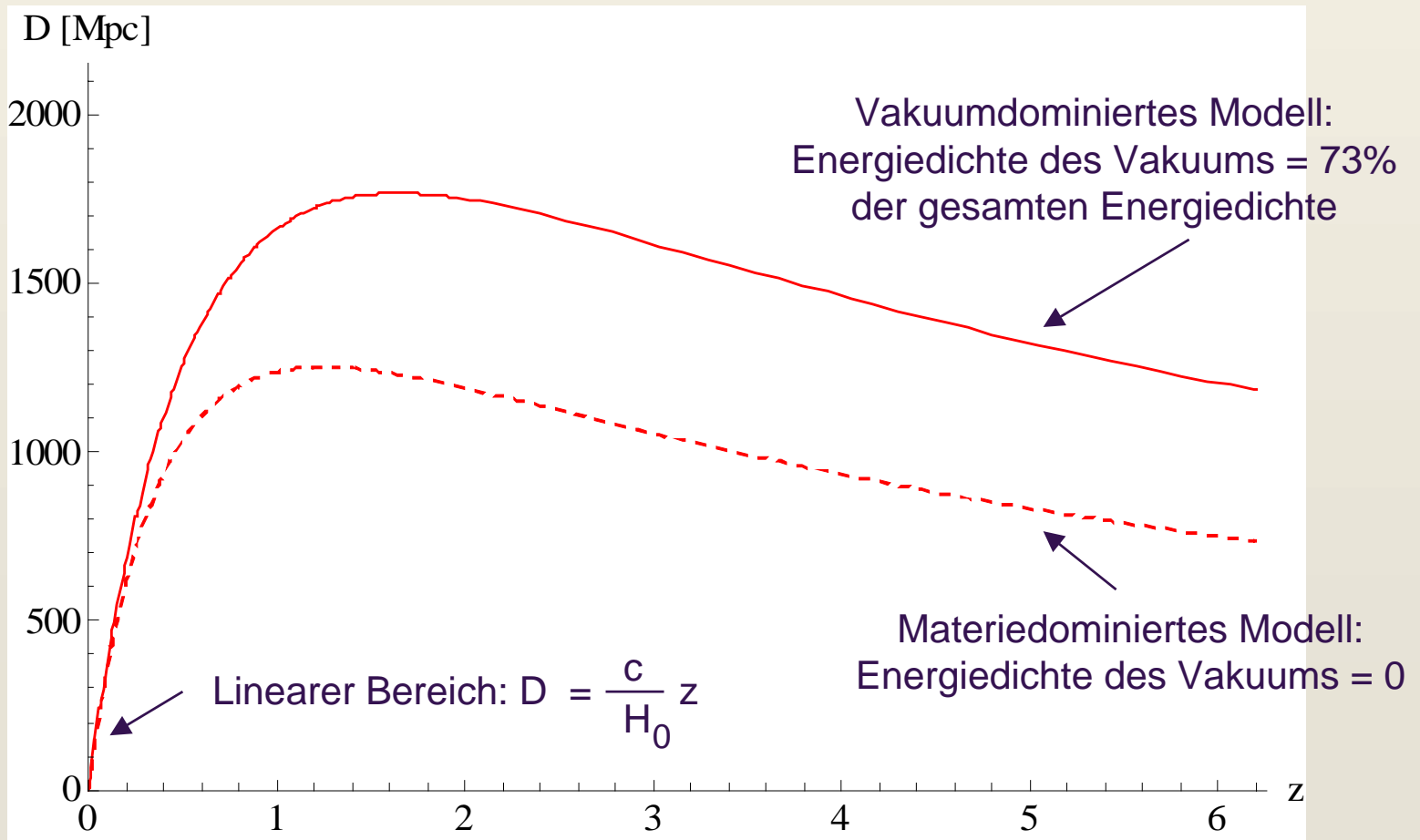
- der Rotverschiebung  $z$  des heute empfangenen Lichts und
- der Entfernung  $D$  der Galaxie, von der es stammt, zum Zeitpunkt der Lichtaussendung.

Beide Größen sind **beobachtbar**:

- $z$  ... direkt durch Analyse des beobachteten Spektrums
- $D$  ... indirekt, falls das Licht von einem Prozess stammt, dessen absolute Helligkeit bekannt ist (einer so genannten „Standardkerze“). Besonders wichtige (näherungsweise) Standardkerzen sind Supernovae vom Typ Ia.

# Aufgabe 3

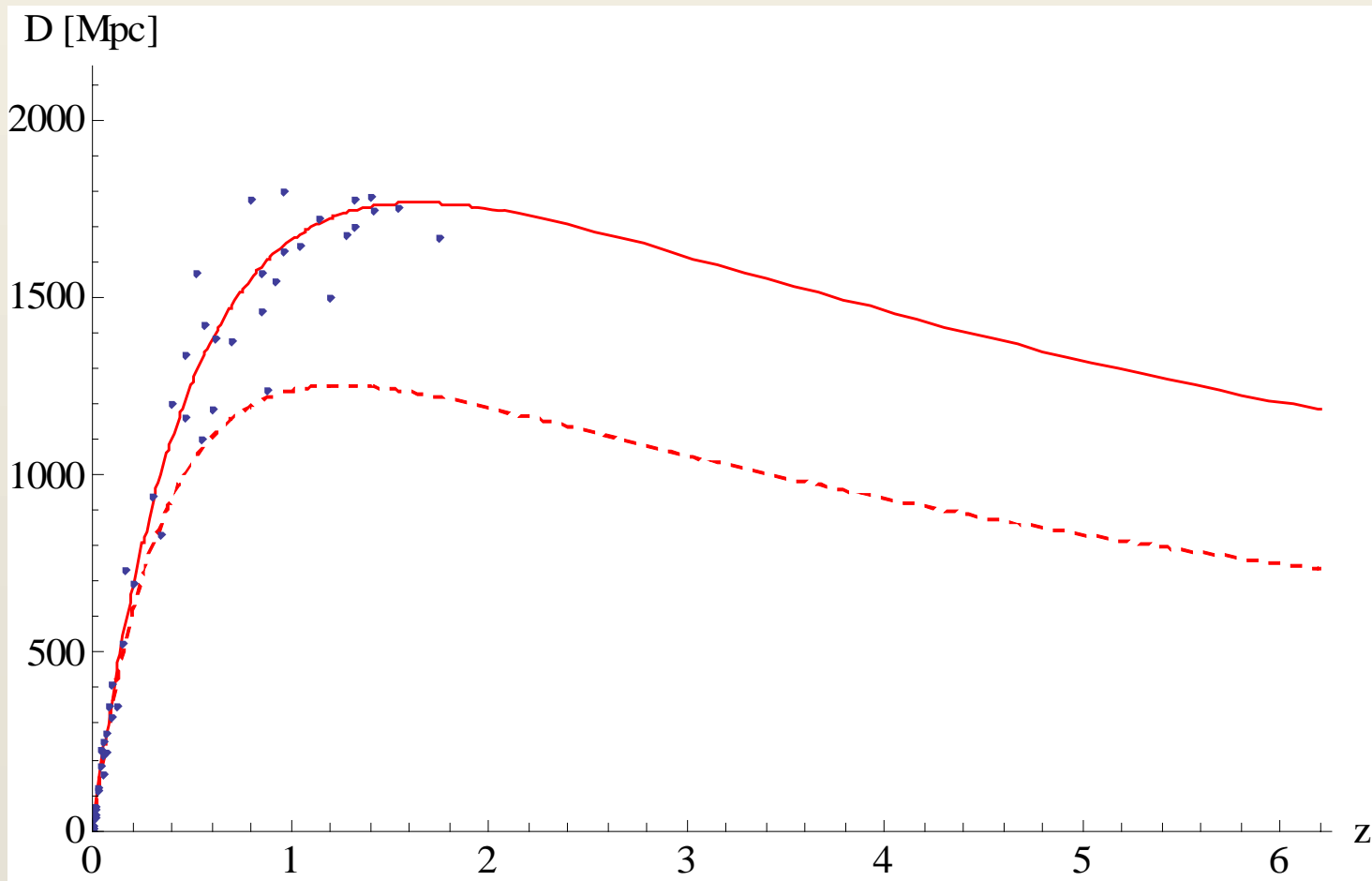
Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation in zwei Weltmodellen:



# Aufgabe 3

---

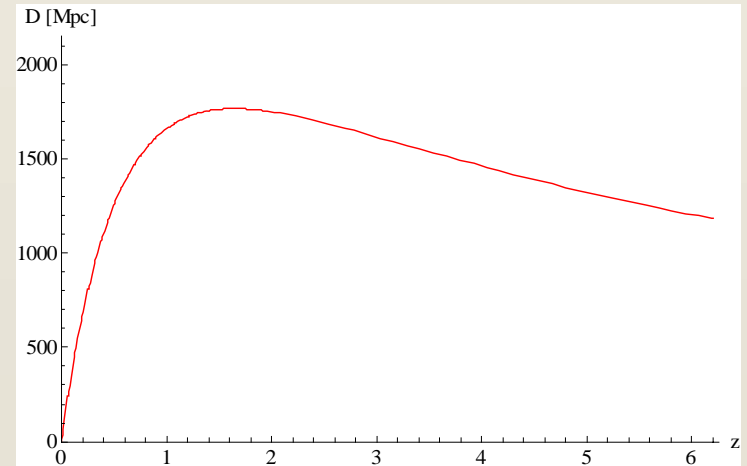
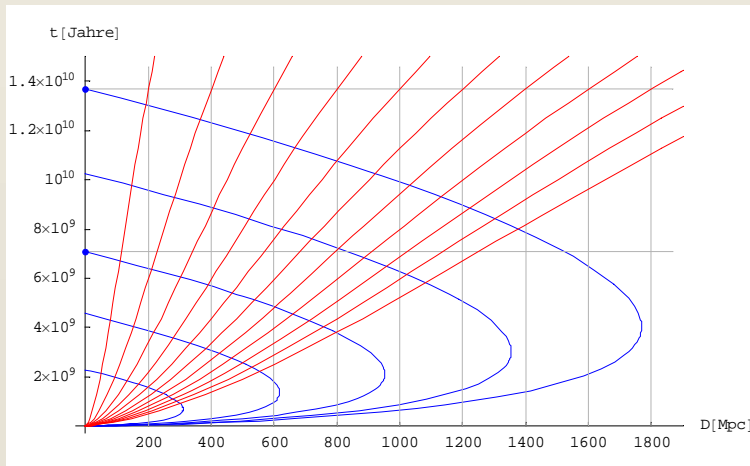
Vergleich mit Supernova-Daten (seit 1998):



# Aufgabe 3

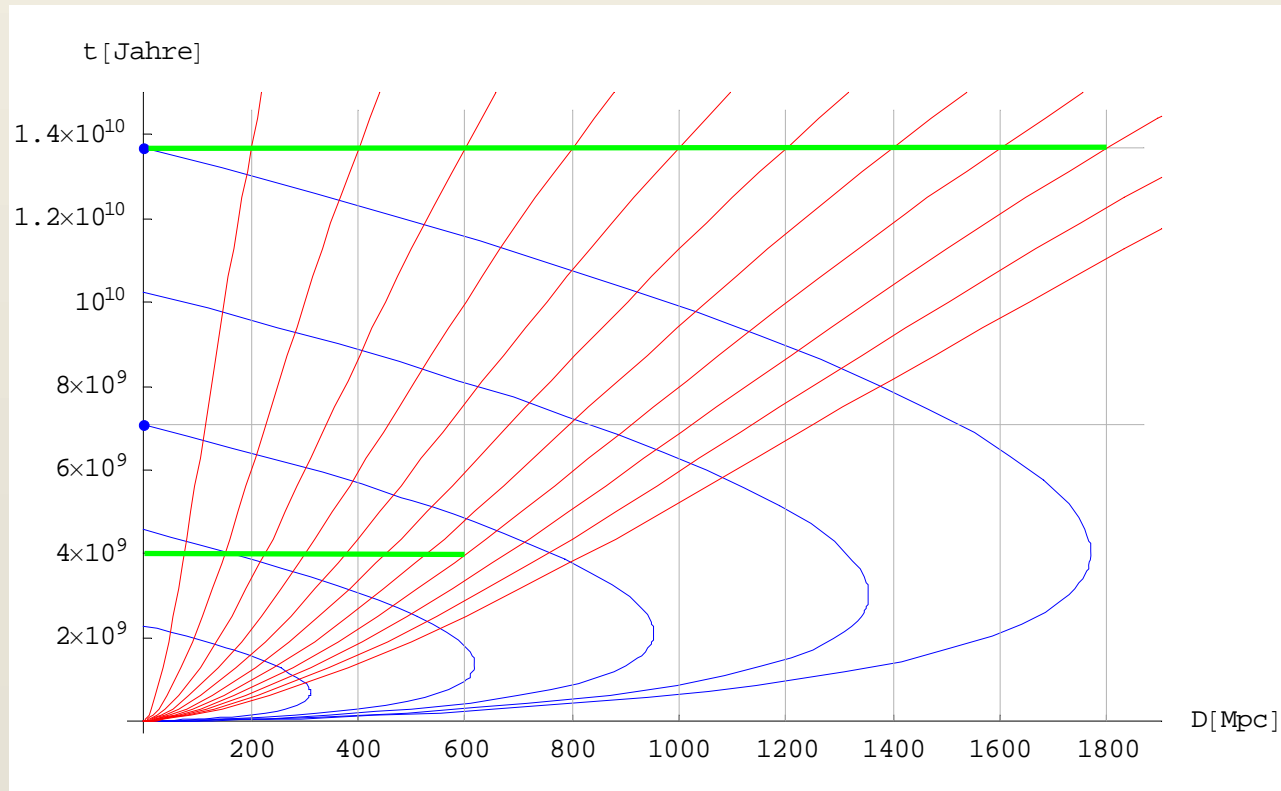
---

- Konstruieren Sie aus dem angegebenen Raumzeitdiagramm des kosmologischen Standardmodells die entsprechende Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation!



# Aufgabe 3

- Tipp: Beachten Sie bei der Ermittlung des Skalenfaktors, dass dieser lediglich von der Zeit abhängt. Er kann anhand der zeitlichen Entwicklung der Entfernung einer *beliebigen* Galaxie bestimmt werden! Beispielsweise ist der Skalenfaktor zur Zeit  $t = 4 \times 10^9$  Jahre der Quotient der beiden hier grün hervorgehobenen Längen:





## Aufgabe 4

---

- Führen Sie eine Internet-Recherche durch:  
Wie kommt eine **Supernova vom Typ Ia** zustande?  
Wieso können Supernovae dieses Typs  
(näherungsweise) als „Standardkerzen“ angesehen  
werden?

## Einige Zahlenwerte und Formeln

---

$$G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg s}^2)$$

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ pc} = 3.0857 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$\text{Sonnenmasse} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$\text{Drittes Keplersches Gesetz: } \frac{T^2}{a^3} = \frac{4 \pi^2}{G M}$$

$$\text{Schwarzschildradius: } R_S = \frac{2 G M}{c^2}$$

# Nachbemerkungen

---

Einige Nachbemerkungen zu den Aufgaben...

[Überspringen](#)

## Nachbemerkung zu Aufgabe 2

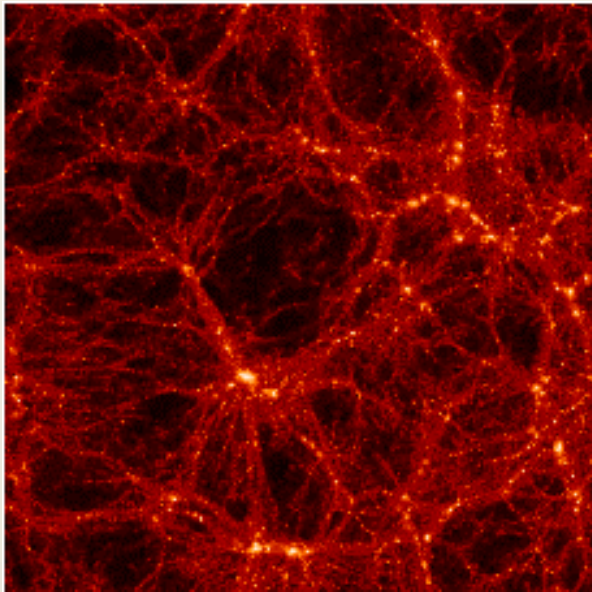
---

- Nur etwa **7%** der Materie ist gewöhnliche (baryonische) Materie (davon  $\frac{1}{4}$  leuchtend), der Rest ist dunkle Materie!
- Dunkle Materie wechselwirkt (fast?) nur über die Schwerkraft.
- Beste Modelle: *cold dark matter* (CDM) = langsam bewegte Teilchen ( $v \ll c$ ).
- CDM bildet „Potentialmulden“, in die die gewöhnliche Materie „fällt“.
- Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung → „Aufnahme“ der Verteilung der dunklen Materie zur Zeit der „Rekombination“ (modulo nachträglicher Streuung der Photonen an Elektronen).

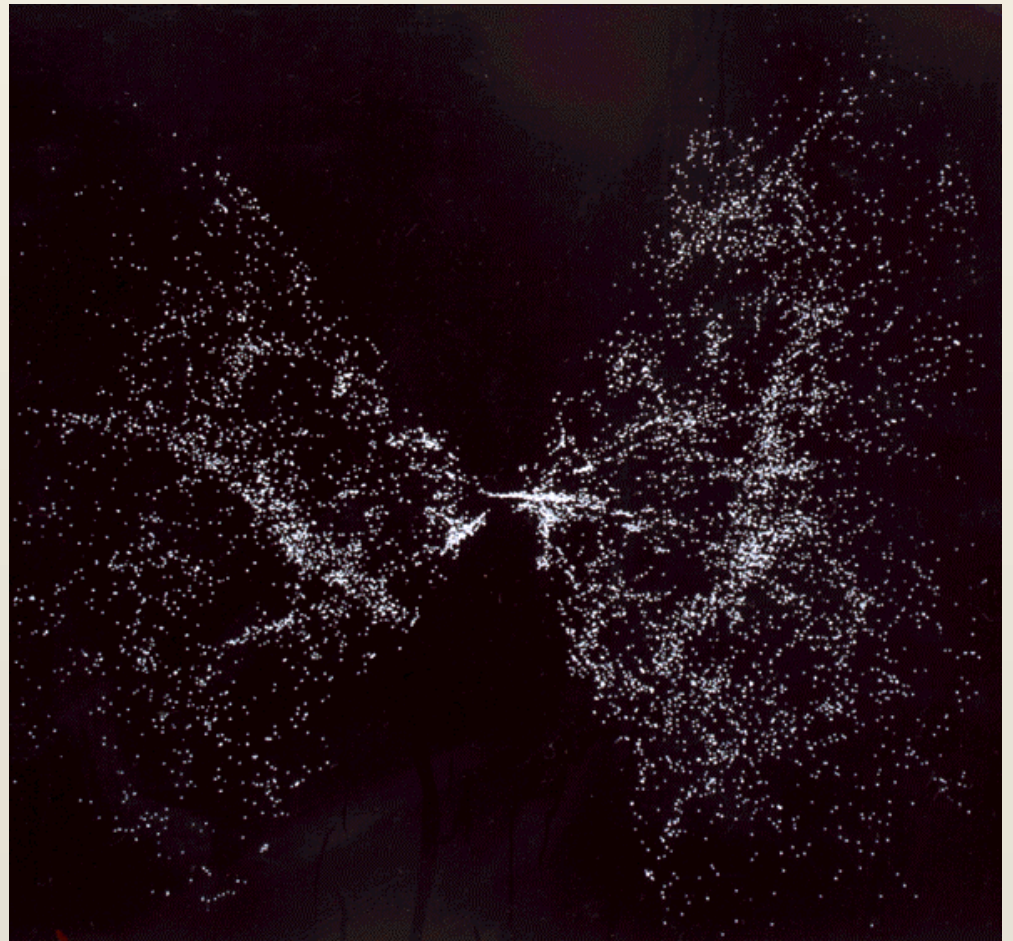
## Nachbemerkung zu Aufgabe 2

---

CMD-Computer-Simulation vs. großräumige Galaxienverteilung:



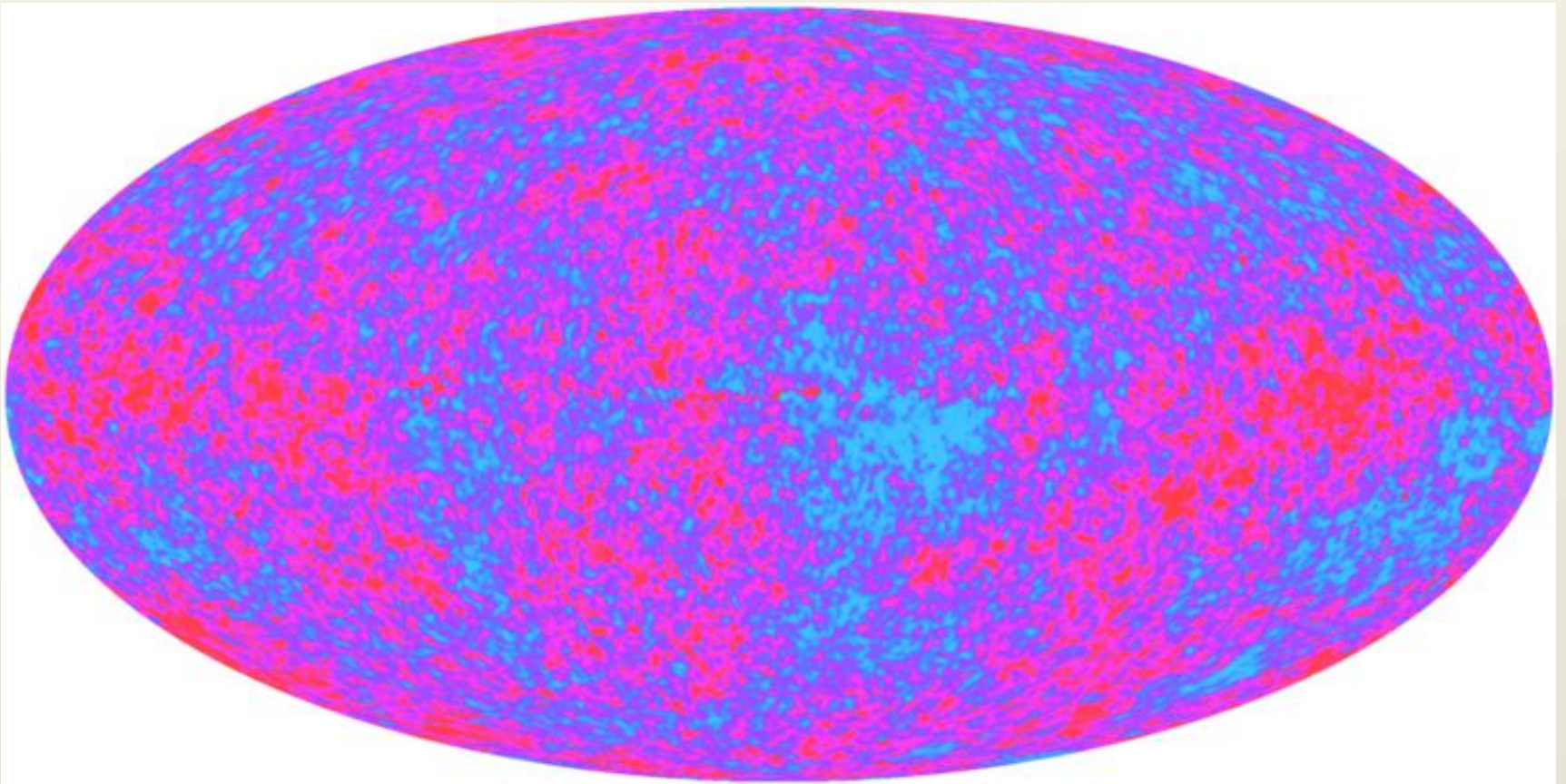
<http://www.mpa-garching.mpg.de/>



## Nachbemerkung zu Aufgabe 2

$$\frac{\Delta T}{T} = 6 \times 10^{-6}$$

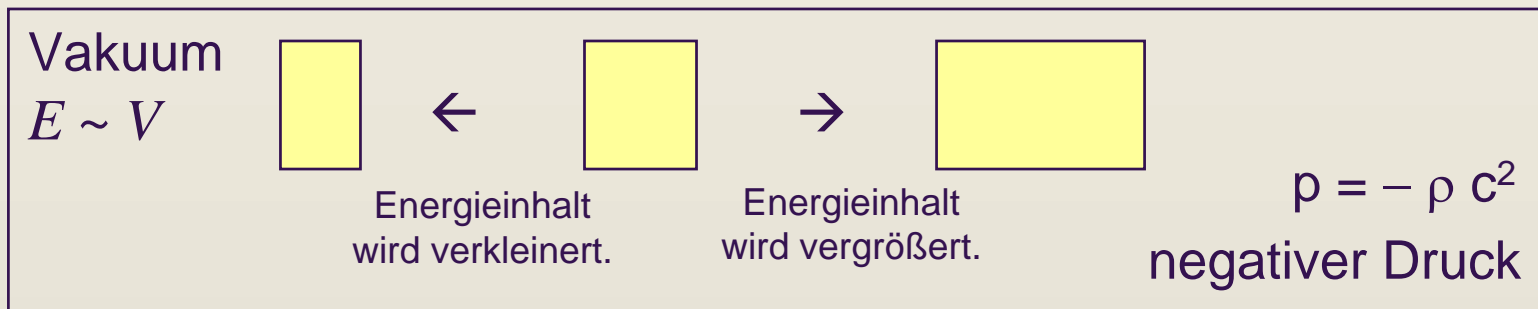
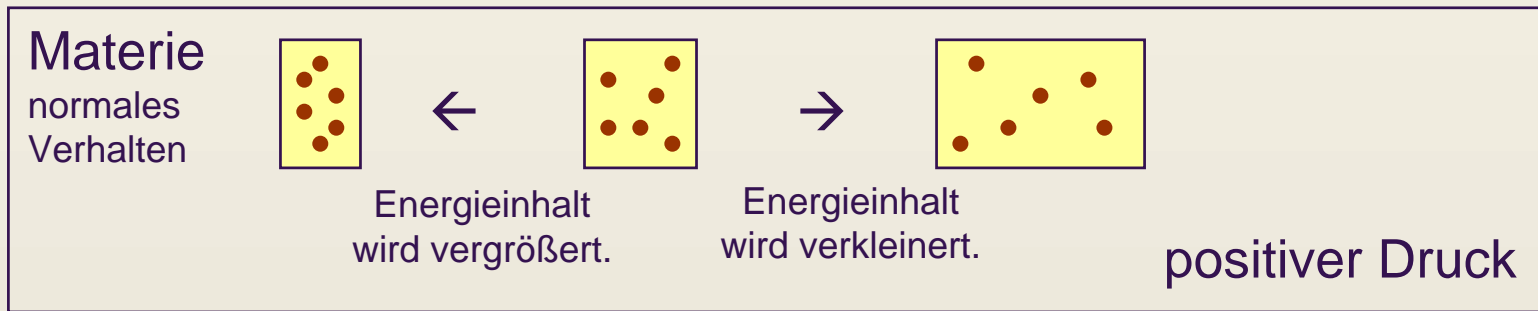
Kosmische Hintergrundstrahlung, WMAP, 2003





## Nachbemerkung zu Aufgabe 3

Wieso wirkt die Energiedichte des Vakuums *beschleunigend* auf die Expansion?



Eine der Grundgleichungen der Kosmologie lautet

$$\frac{\ddot{a}}{a} = - \frac{4 \pi G}{3} \left( \rho + \frac{3 p}{c^2} \right)$$

Vorzeichen!



## Nachbemerkung zu Aufgabe 3

---

Energieinhalt des Universums nach dem modernen Standardmodell:

- 73% dunkle Energie
- 27% Materie und Strahlung:
  - 23% dunkle Materie
  - 4% gewöhnliche (baryonische) Materie:
    - 0.5% leuchtend
    - 3.5% nicht leuchtend
  - 0.3% Neutrinos
  - 0.005% Photonen (Hintergrundstrahlung)

Danke für's Mitmachen...

---

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/dunkleSeitederKosmologie/>