

Die „dunkle“ Seite der Kosmologie

Workshop im Rahmen der
62. Fortbildungswoche

Kuffner Sternwarte

27. 2. 2008

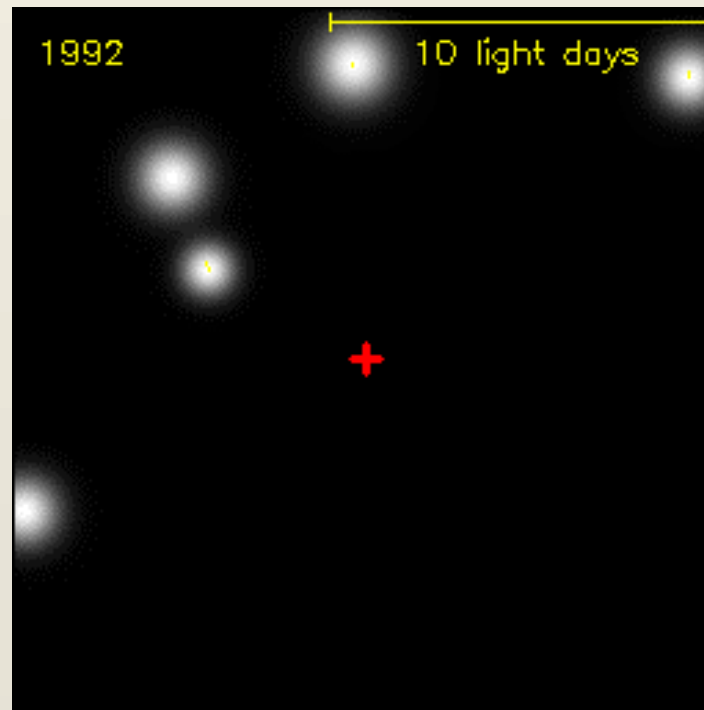
Franz Embacher

Fakultät für Physik
Universität Wien

4 Aufgaben

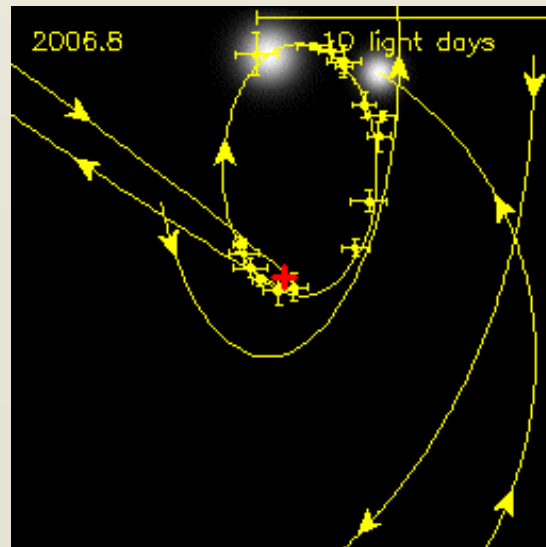
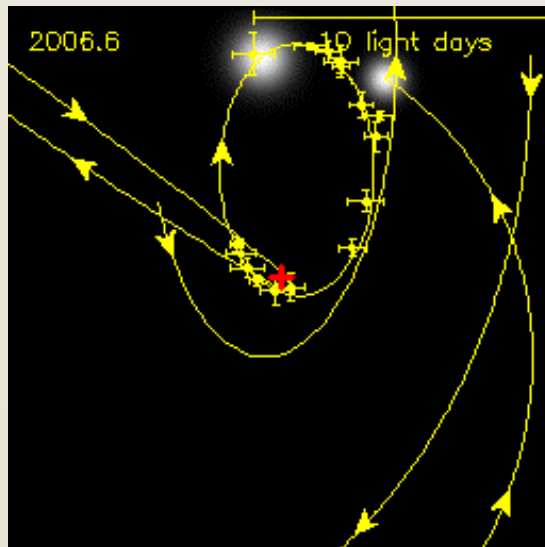
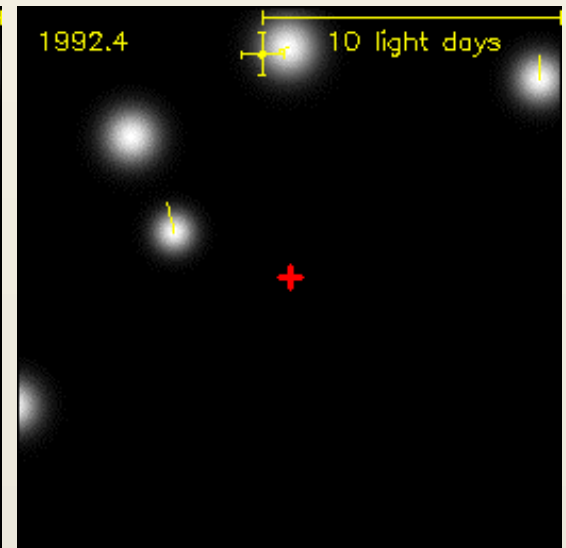
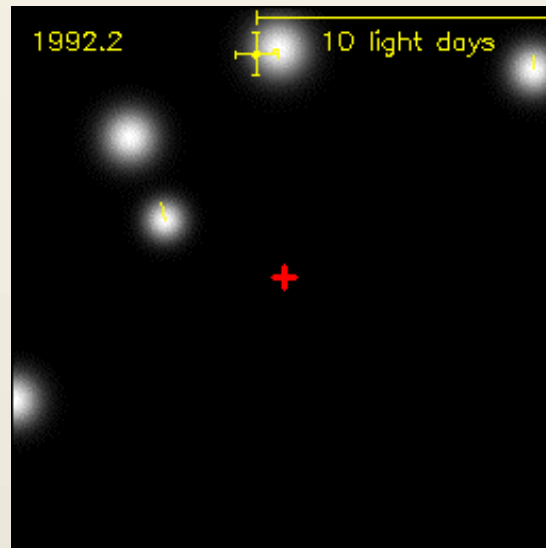
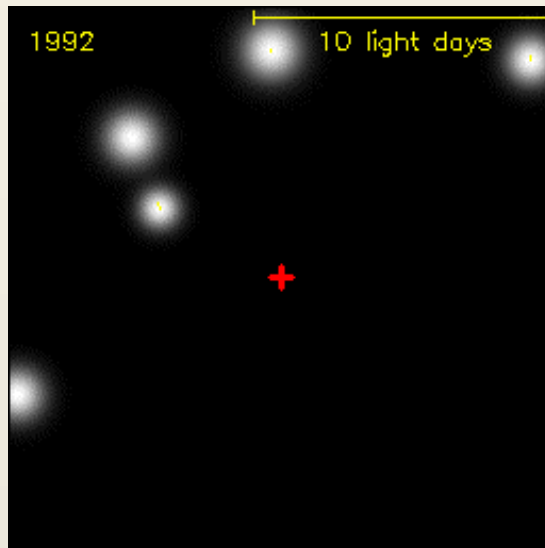
Aufgabe 1

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



Wenn Sie keine Animation sehen, sondern ein statisches Bild, versuchen Sie's mit dem untenstehenden Link oder mit [diesem!](#)

Aufgabe 1



Schnappschüsse

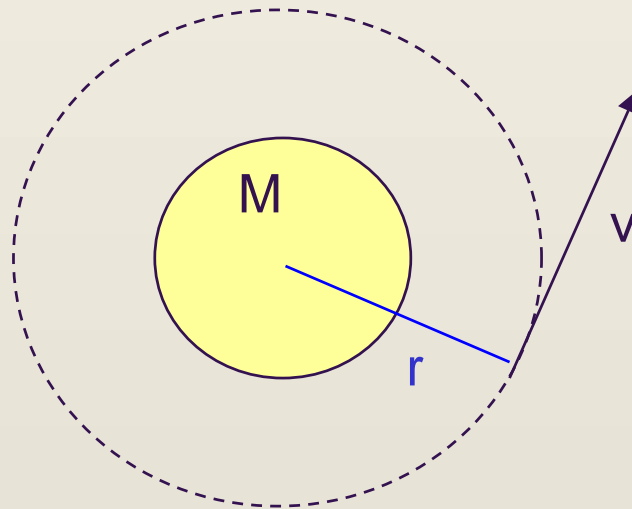
- 1992
- 1992.2
- 1992.4
- 2006.6
- 2006.8

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!**

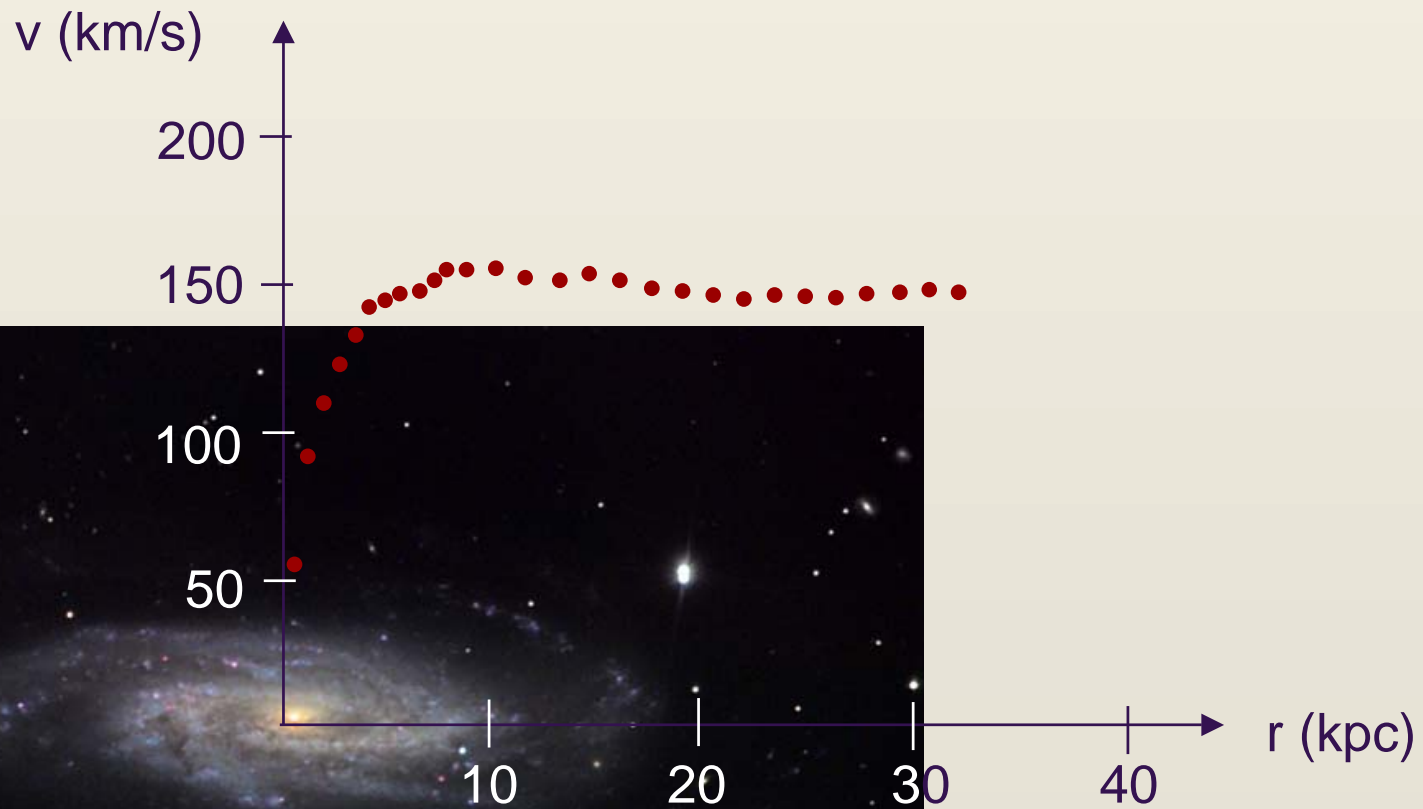
Aufgabe 2

- 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:

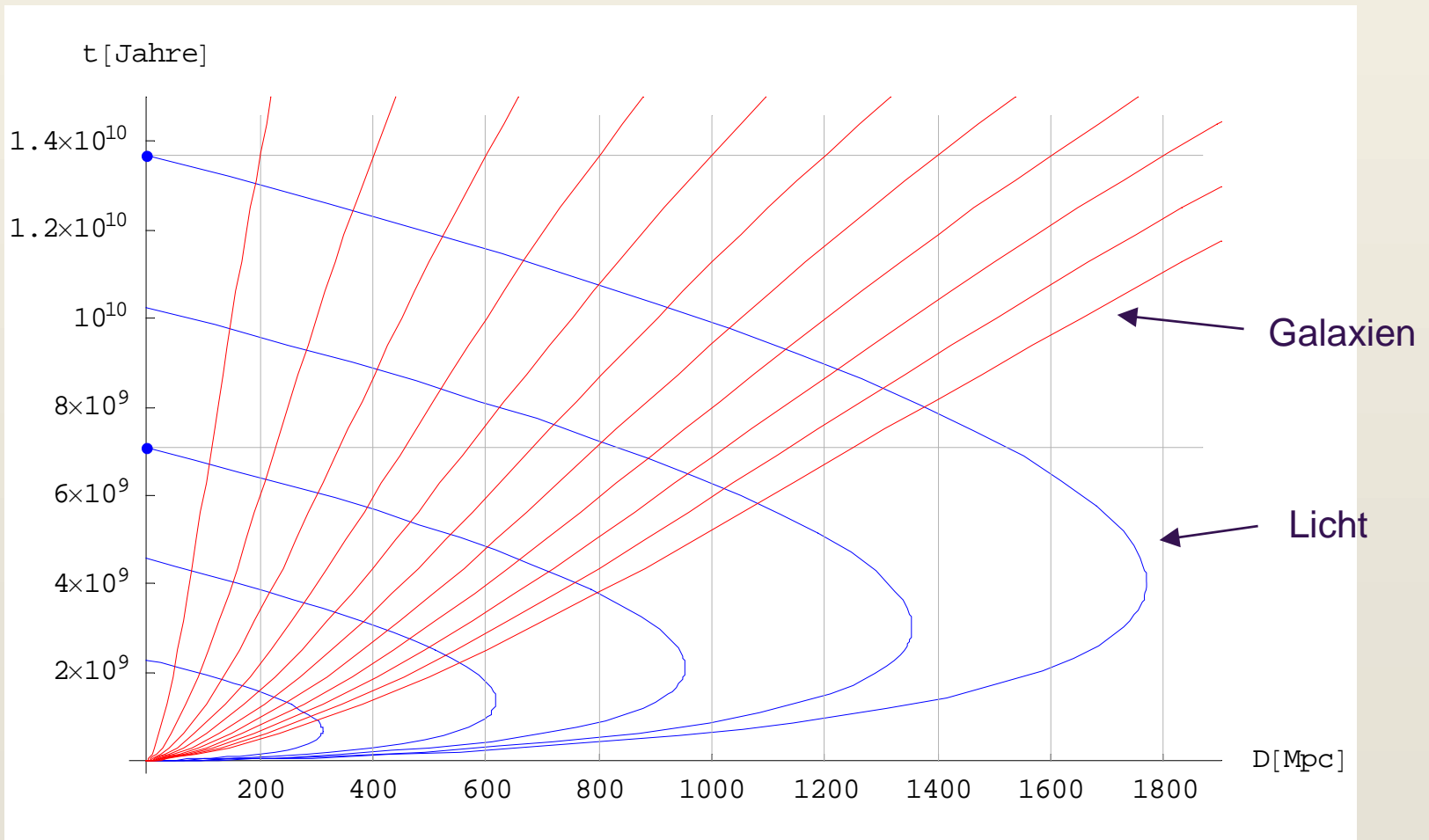
- Materie und Strahlung *bremsen* die Expansion des Universums.
- Eine nichtverschwindende Energiedichte des Vakuums *beschleunigt* die Expansion des Universums!

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

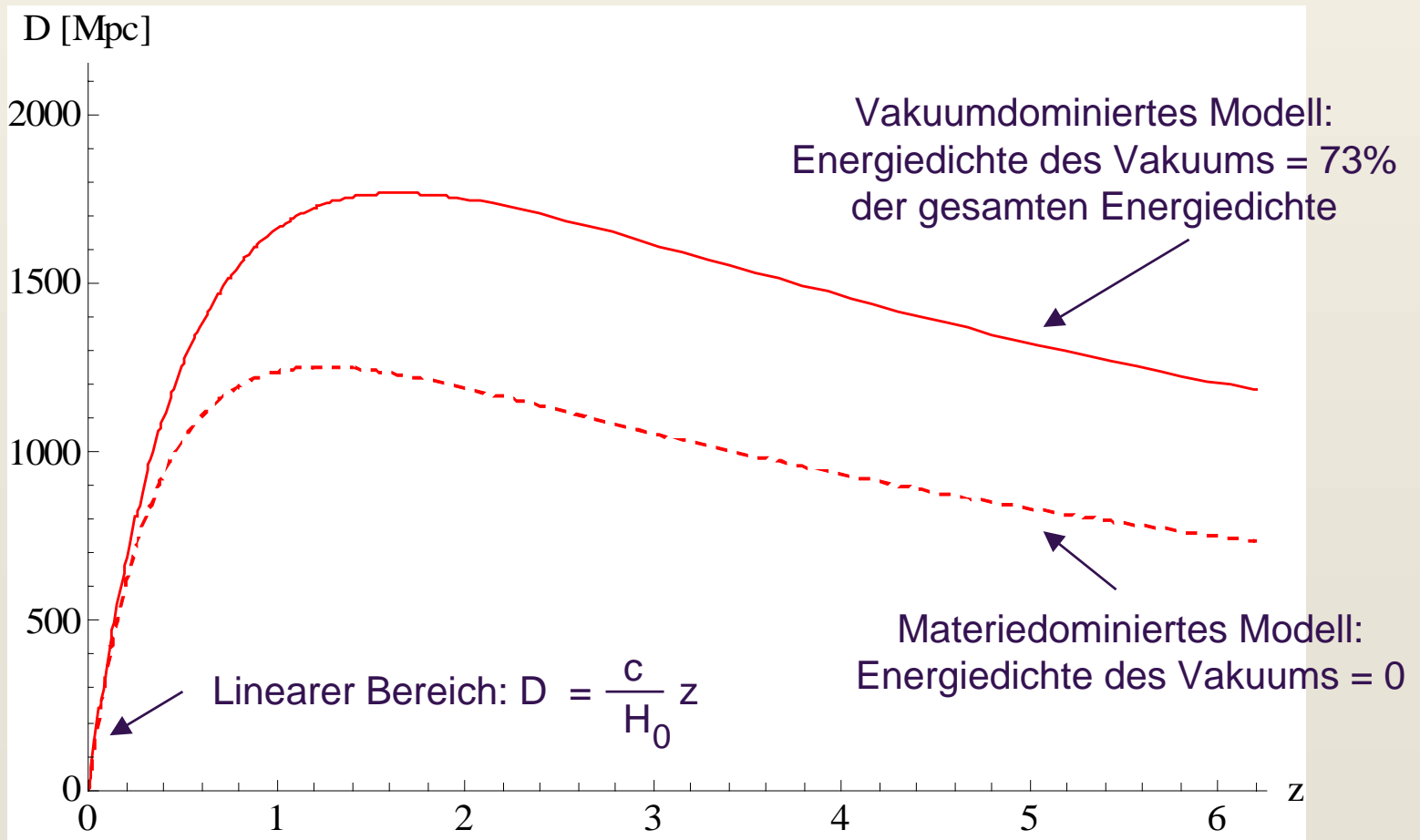
- der Rotverschiebung z des heute empfangenen Lichts und
- der Entfernung D der Galaxie, von der es stammt, zum Zeitpunkt der Lichtaussendung.

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.

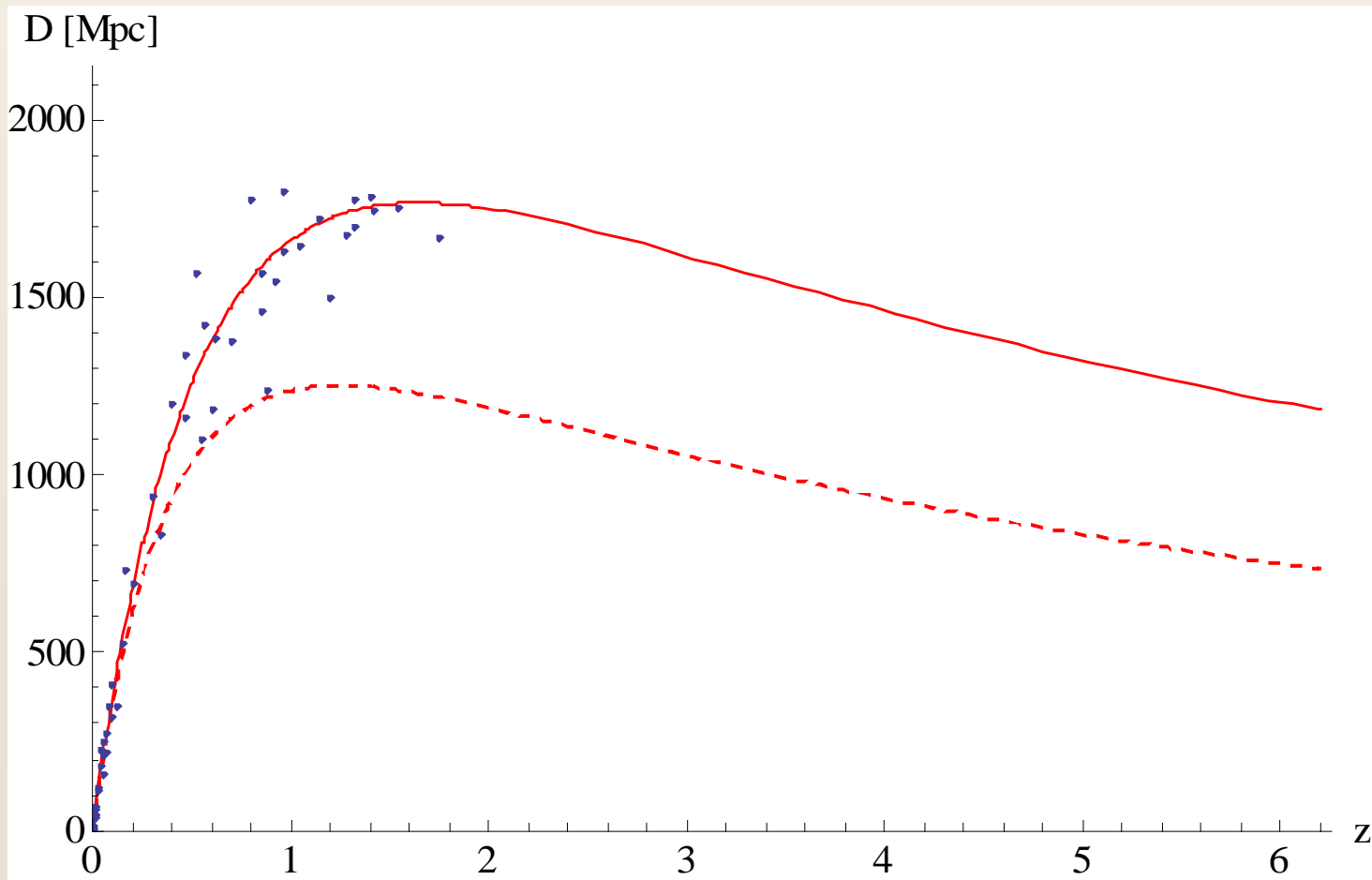
Aufgabe 3

Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation in zwei Weltmodellen:



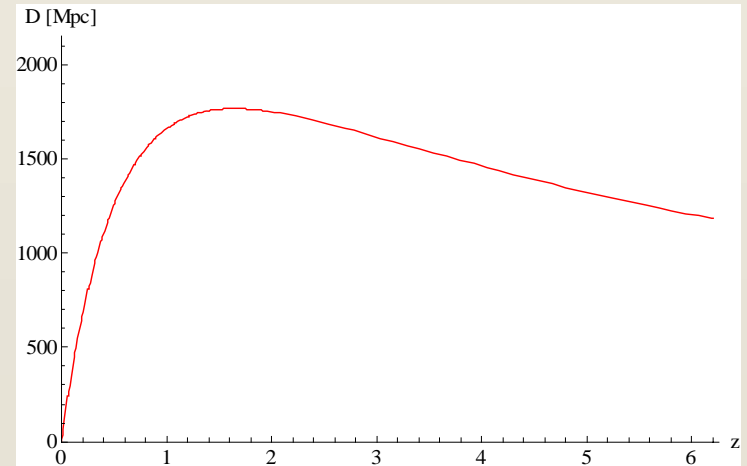
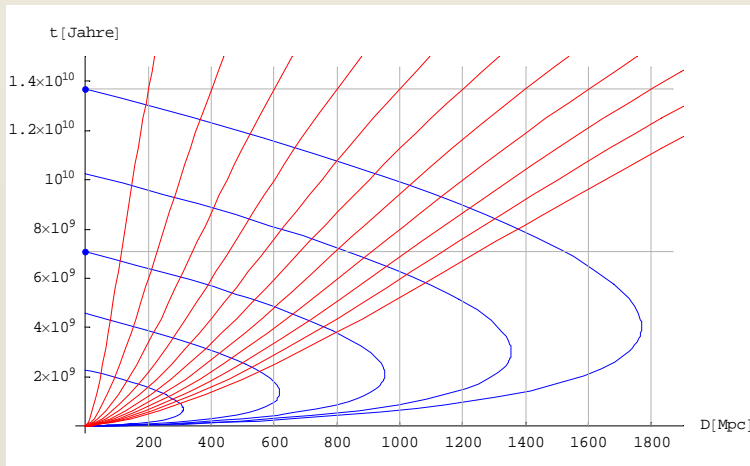
Aufgabe 3

Vergleich mit Supernova-Daten (seit 1998):



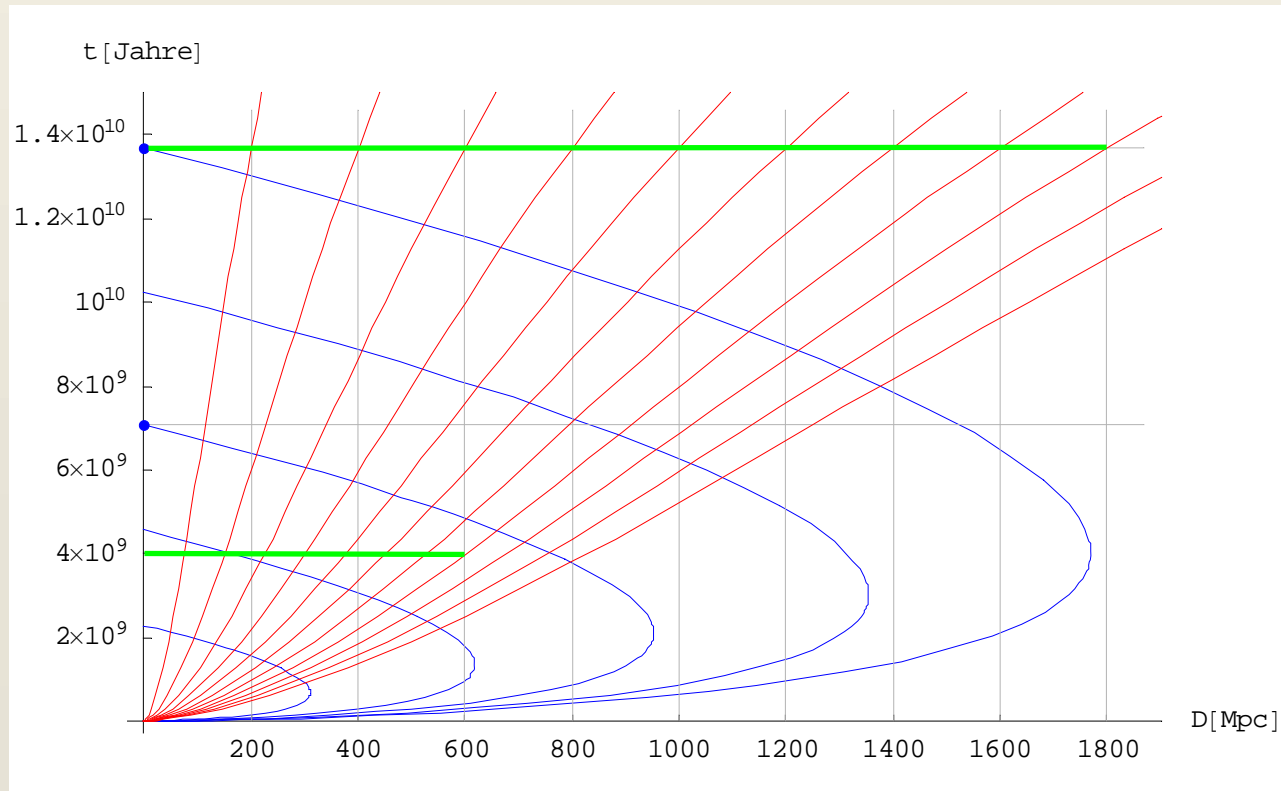
Aufgabe 3

- 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...

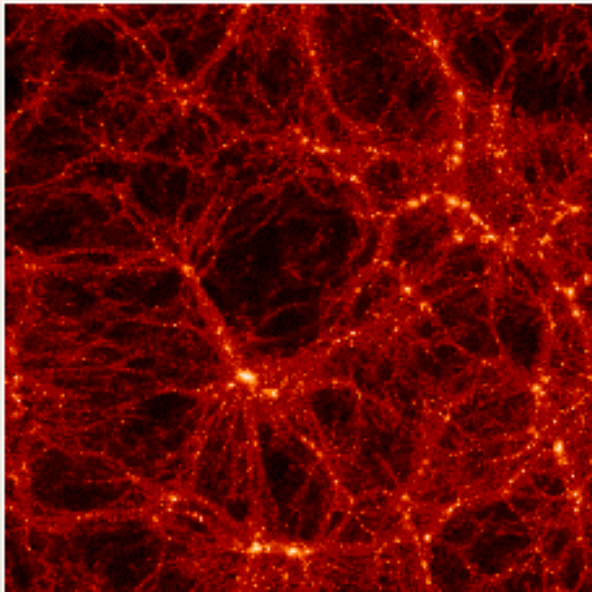
[Überspringen](#)

Nachbemerkung zu Aufgabe 2

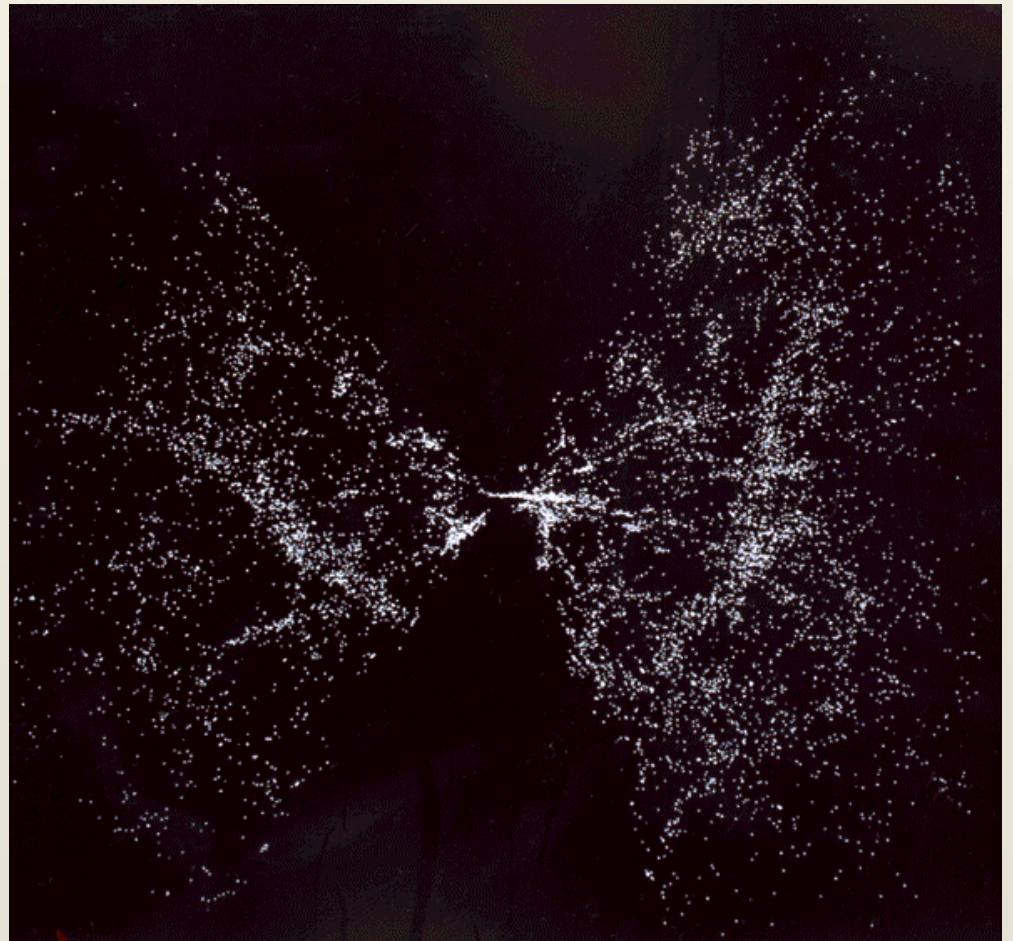
- Nur etwa **7%** der Materie ist gewöhnliche (baryonische) Materie (davon $\frac{1}{4}$ leuchtend), der Rest ist dunkle Materie!
- Dunkle Materie wechselwirkt (fast?) nur über die Schwerkraft.
- Beste Modelle: *cold dark matter* (CDM) = langsam bewegte Teilchen ($v \ll c$).
- CDM bildet „Potentialmulden“, 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:



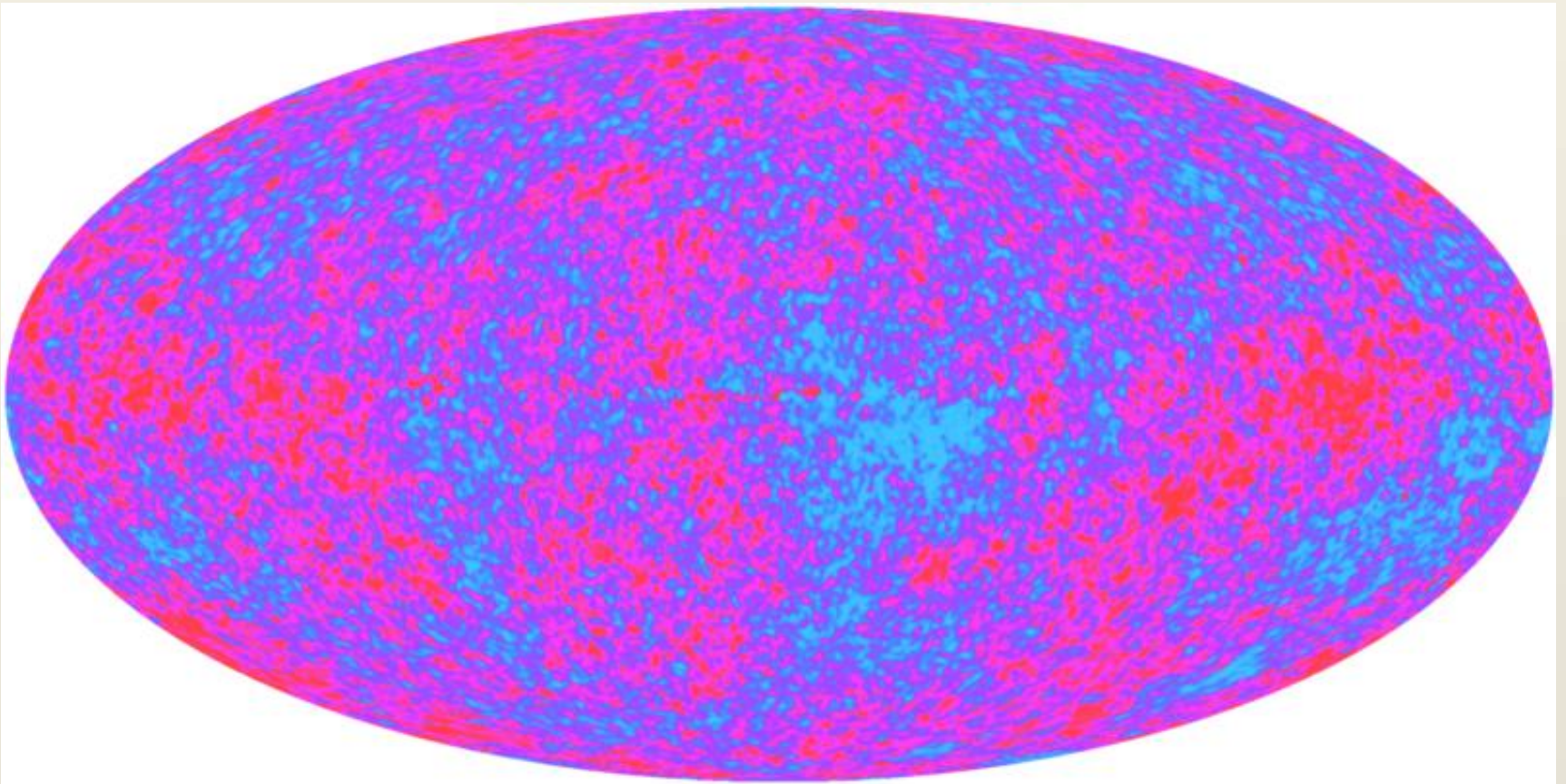
<http://www.mpa-garching.mpg.de/>



Nachbemerkung zu Aufgabe 2

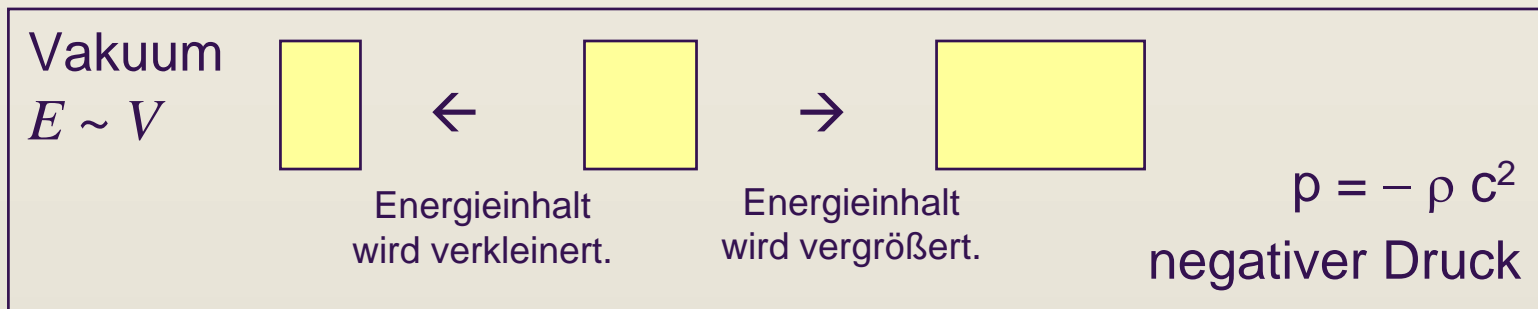
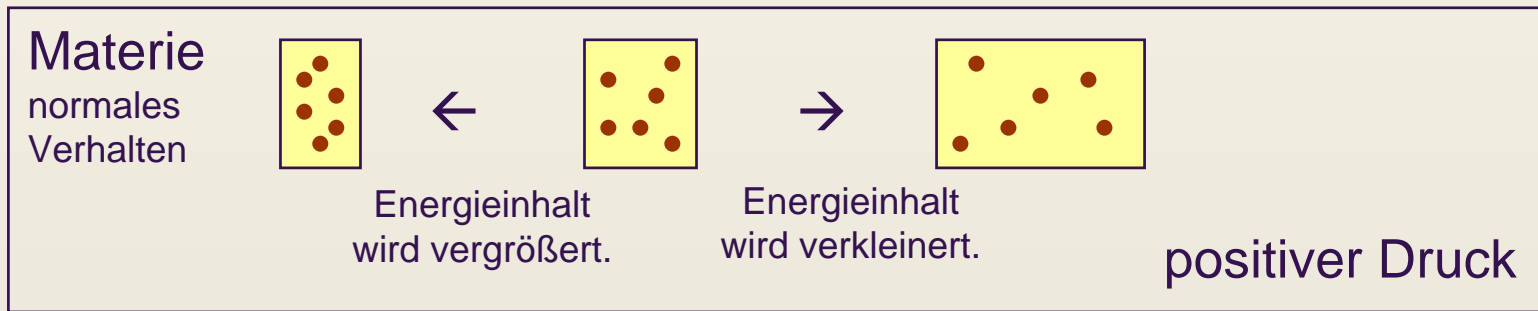
$$\frac{\Delta T}{T} = 6 \times 10^{-6}$$

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/>