

A visualization of the expansion of the universe. A bright yellow and white central point radiates outwards, with numerous galaxies of various colors (blue, white, yellow) scattered across a dark red and purple background. The galaxies appear to be moving away from the center, illustrating the expansion of space.

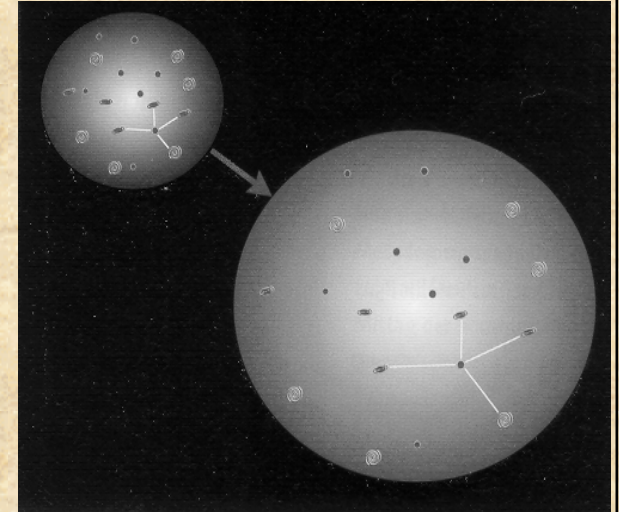
Die Expansion des Kosmos

Mythos und Wirklichkeit

Dr. Wolfgang Steinicke
MNU-Tagung – Freiburg 2012

Eine Auswahl populärer Mythen und Probleme der Kosmologie

- Der Urknall vor 13,7 Mrd. Jahren war eine Explosion der Materie in einem vorhandenen (leeren) Raum.
- Das expandierende Universum ist wie ein Luftballon in eine höhere Dimension eingebettet und kann „von außen“ betrachtet werden.
- Alles dehnt sich alles aus, also auch Galaxien und Sterne.
- Kurz nach dem Urknall war das Universum „so groß wie eine Erbse“ – heute hat es einen Radius von 13,7 Mrd. Lj.
- Die Rotverschiebung der Galaxien ist Folge ihrer Fluchtbewegung (Doppler-Effekt) und ihre Geschwindigkeit kann die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten.
- Wir überblicken das gesamte Universum.
- Wie kann das Universum beim Urknall in einem Punkt konzentriert gewesen sein und die Kosmische Hintergrundstrahlung uns aus allen Richtungen erreichen?



Aufklärung ist ohne Mathematik möglich – durch **graphische Kosmologie**
(trotzdem keine leichte Kost).

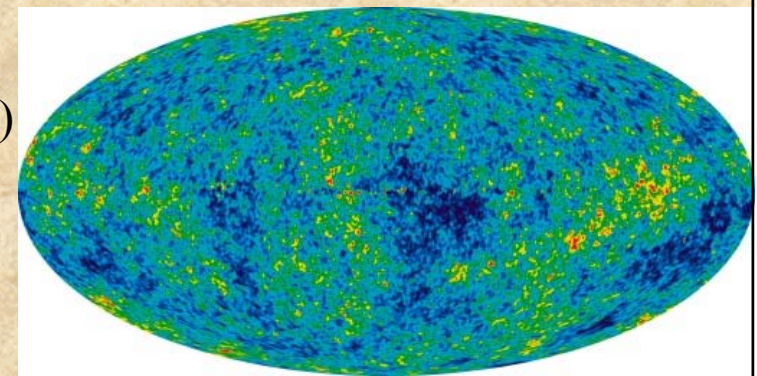
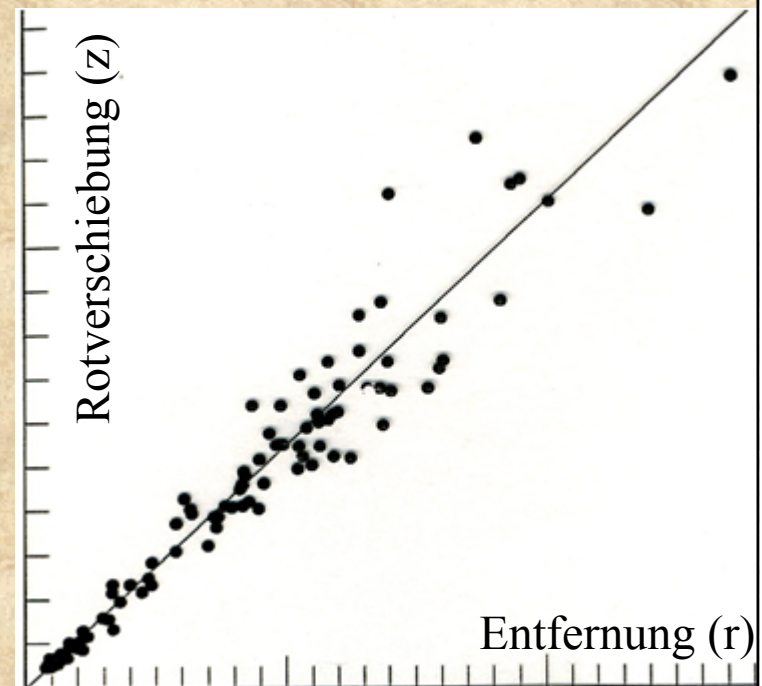
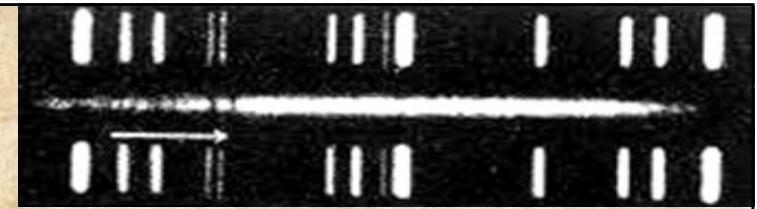
Standardmodell der Kosmologie

- Die Raum-Zeit-Struktur des Kosmos wird durch Einsteins **Allgemeine Relativitätstheorie (ART)** beschrieben

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

Λ = Kosmologische Konstante ($\Lambda > 0$: „Antigravitation“)

- **Kosmologisches Prinzip**: Das Universum ist homogen und isotrop: Es erscheint an allen Orten und in allen Richtungen gleich. → Es ist unbegrenzt.
- Das Universum begann mit dem **Urknall (UK)** vor 13,7 Mrd. Jahren in einer Raum-Zeit-Singularität.
- Seitdem expandiert das Universum – beobachtet als Rotverschiebung der Galaxien (**Hubble-Gesetz**).
- Relikt des UK: **Kosmische Hintergrundstrahlung (HGS)**
Sie entstand 380.000 Jahre nach dem UK und erreicht uns aus allen Richtungen (Temperatur ≈ 3 K).
- Standardmodell (ART, Teilchenphysik) liefert die beobachtete **kosmische Elementverteilung** (70% H, 27% He) und beschreibt die Strukturbildung (Simulationen).



Wird die Rotverschiebung der Galaxien durch eine Fluchtbewegung verursacht?

Edwin Hubble (1929): Rotverschiebung $z \sim$ Entfernung r

H_0 = heutiger Wert des Hubble-Parameters = 71 (km/s)/Mpc

c = Lichtgeschwindigkeit (LG) = 299.792,458 km/s

$$z = \frac{H_0}{c} r$$

Deutung als **Doppler-Effekt**: Wellenlänge des Lichts wird bei radialer Bewegung von uns weg (Geschwindigkeit v) um den Faktor $1+z$ vergrößert (**Rotverschiebung**): $z \sim v$

→ Rotverschiebung durch Galaxienbewegung mit **Fluchtgeschwindigkeit**: $v \sim r$

→ **Hubble-Gesetz**: $z \sim r$

Klassischer Doppler-Effekt:

$$z = v/c \quad (v \text{ beliebig})$$

Spezielle Relativitätstheorie (SRT):

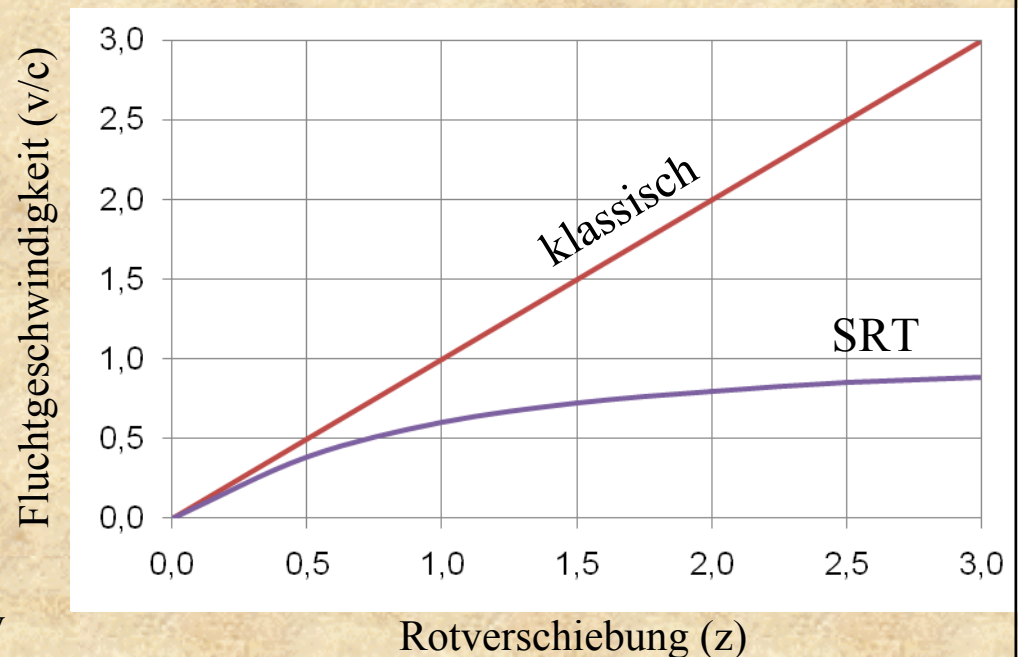
$$z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

Maximale Fluchtgeschwindigkeit ist die Lichtgeschwindigkeit ($v = c$, $z = \infty$).

Kein materieller Körper kann sie erreichen.

Klassisch und SRT:

z ist ein Maß für die Fluchtgeschwindigkeit v



Rotverschiebung in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

Falsch: Universum **statisch**

Galaxie bewegt sich mit Geschwindigkeit v relativ zum Raster (**aktiv**). Licht ist bei Emission nur in unsere Richtung rotverschoben (z bleibt konstant!)

Richtig: Universum **expandiert**

Galaxie entfernt sich (**passiv**): keine Bewegung relativ zum Raster.
 v ist die **Expansionsgeschwindigkeit**.
 Lichtwellen in jeder Richtung gedehnt
 → **kosmologische Rotverschiebung**
 (z nimmt mit der Zeit zu!)

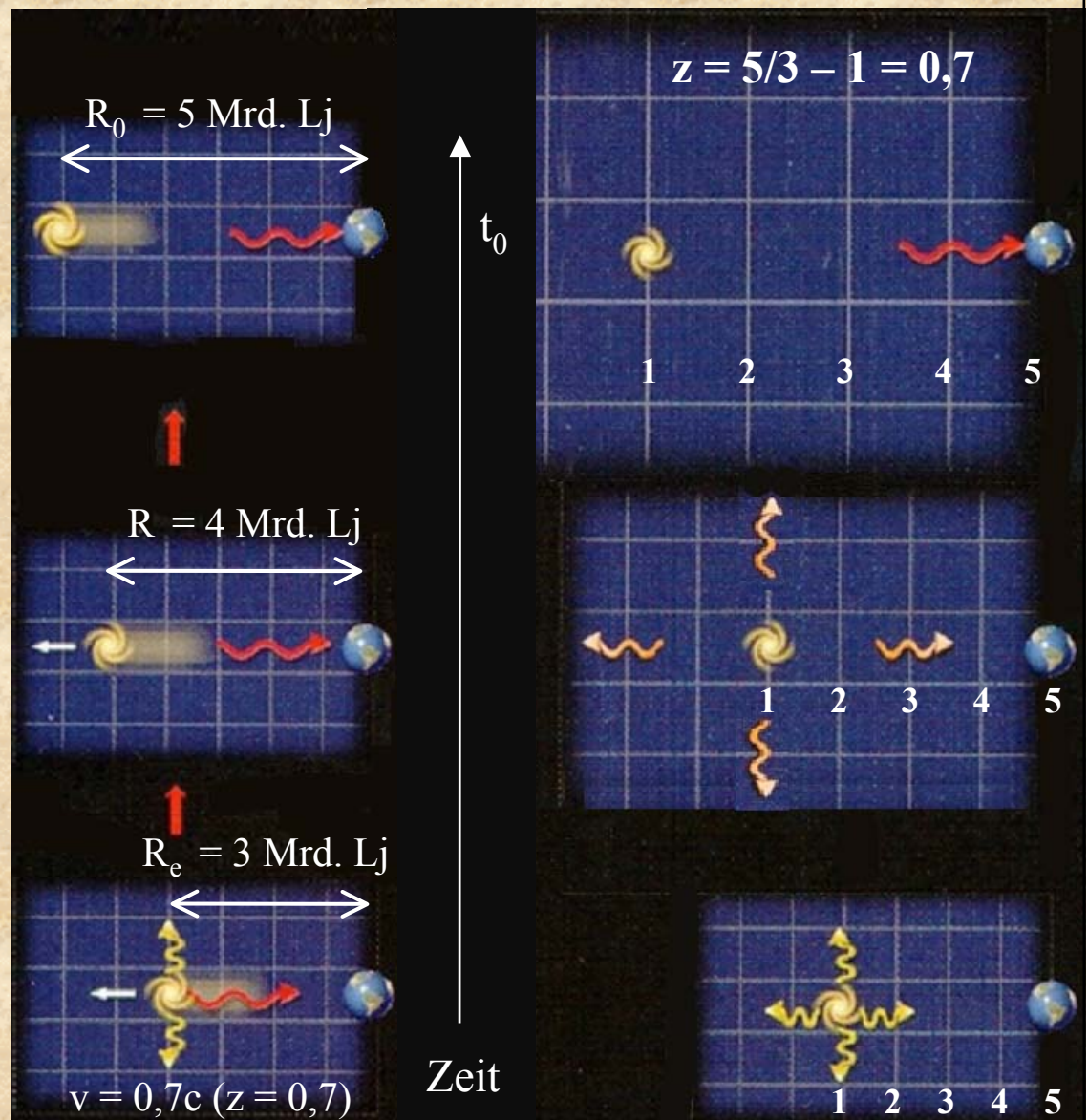
t_0 = heute (13,7 Mrd. J. nach UK)

R_0 = **proper distance**

heutiger instantaner Abstand
 (≠ comoving distance = konstant)

R_e = Abstand bei Emission ($< R_0$)

Beziehung:
$$z = \frac{R_0}{R_e} - 1$$



ART: z ist ein **Maß für den Abstand** und nicht für die Geschwindigkeit!

Homogen-isotrope Weltmodelle

Sie unterscheiden sich im:

- Expansionsverhalten
(**Form der Weltlinie** einer Galaxie)
- Zeitpunkt des Urknalls (**Weltalter**)

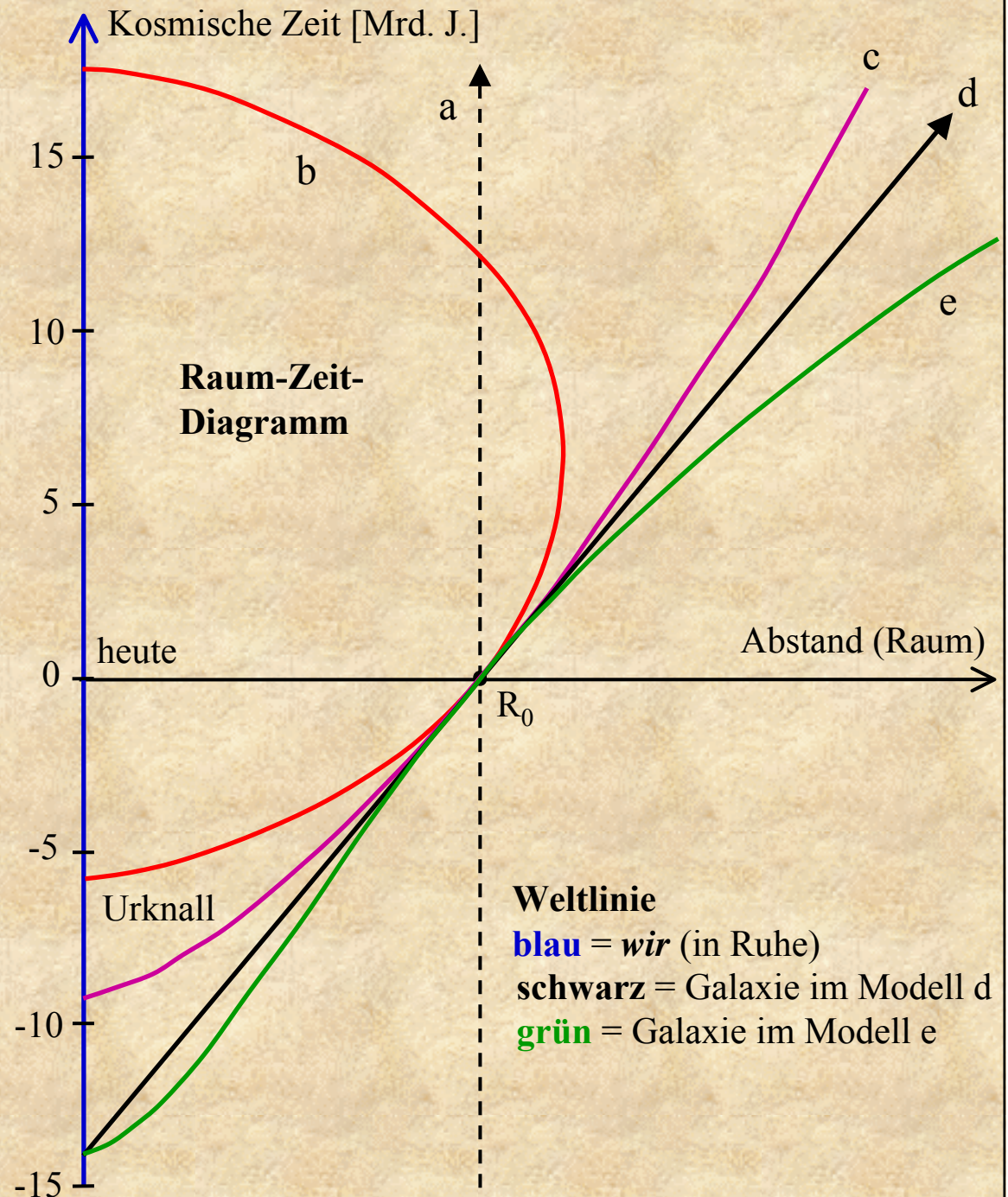
a) Einsteins statisches Universum mit normaler Materie (sphärisch, endlich)

b) viel Materie
geschlossenes Universum (sphärisch, endlich)
Expansion → Kontraktion

c) wenig Materie
Grenzfall zum offenen Universum (flach, unendlich)
verzögerte Expansion

d) keine Materie
offenes Universum (negativ gekrümmt, unendlich)
konstante Expansion
Weltlinie = **Gerade** mit Steigung H_0

e) Λ CDM-Konkordanz-Modell
4% normal, 26% dunkle Materie, 70% dunkle Energie (Λ)
offenes Universum (flach, unendlich)
beschleunigte Expansion



Kann die Fluchtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit überschreiten?

Expandierendes Universum: Galaxien sind nicht in Bewegung (keine „Fluchtgeschwindigkeit“)
→ SRT nicht zuständig → **Expansionsgeschwindigkeit** $v > c$ ist in der ART erlaubt!

Modell d (offen, unendlich, konst. Expansion):

Weltlinie = Gerade

Galaxie: A (**wir**) erfährt Expansion mit $v = 0$

B mit $v = \frac{1}{2}c$

C mit $v = c$ (Steigung 45°)

D mit $v = 2c$

Hubble-Sphäre (HS):

Ort aller Galaxien mit $v = c$

heutiger Radius: $R_H = ct_0 = 13,7$ Mrd. Lj

Orte innerhalb der HS: $v < c$

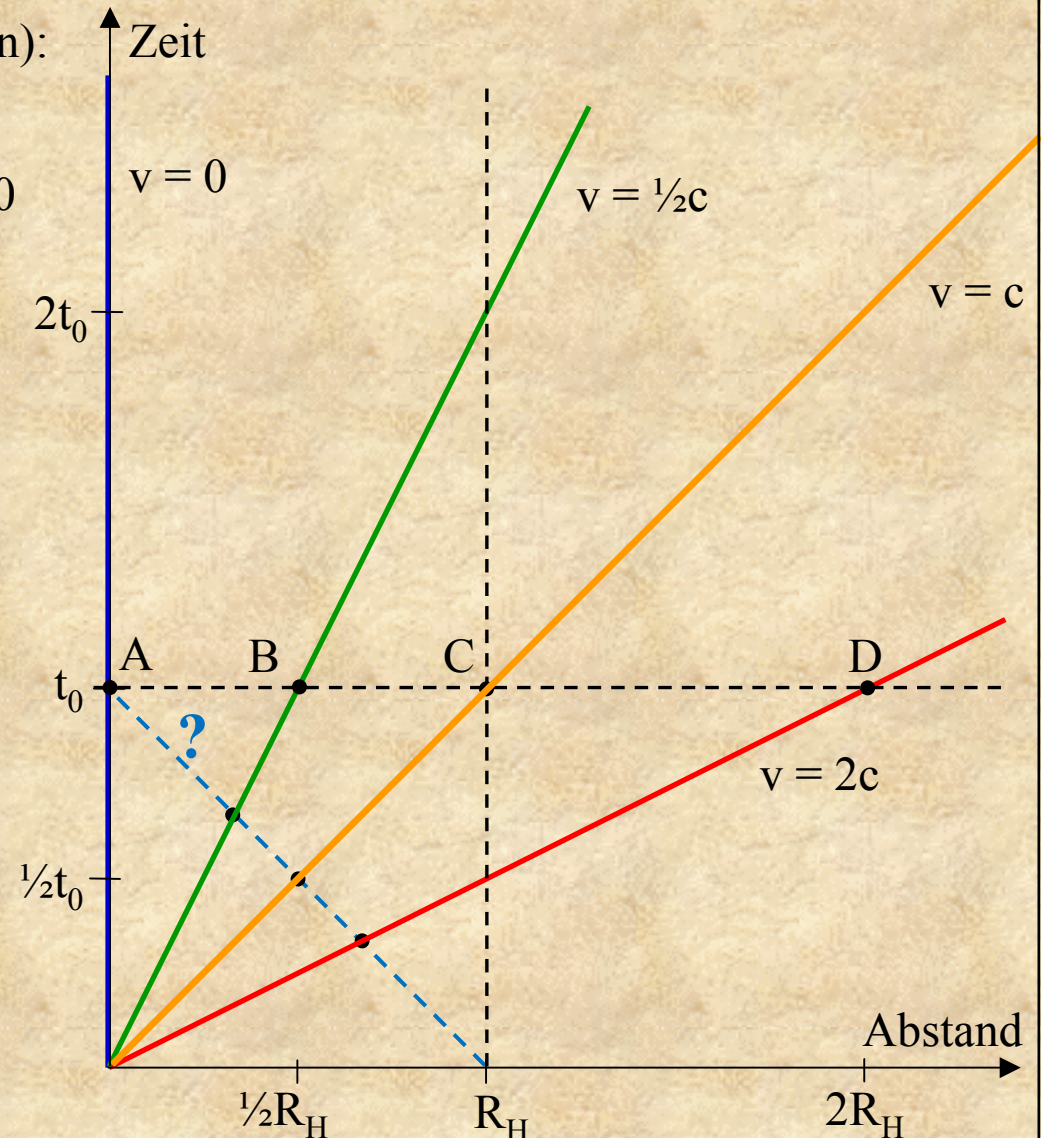
(z.B. grüne Weltlinie)

Orte außerhalb der HS: $v > c$

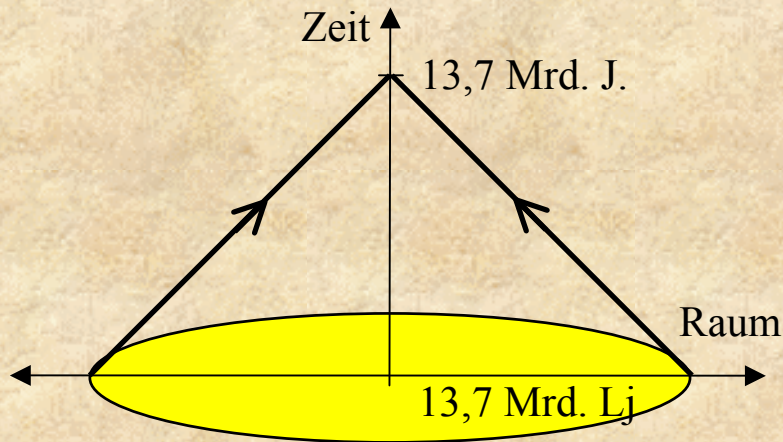
(z.B. rote Weltlinie)

Können wir Galaxien mit $v \geq c$ heute sehen?

Ist die **Weltlinie von Licht**, das uns heute erreicht (Galaxien, Urknall) eine Gerade?



Falsch: Weltlinie auf **Lichtkegel**
mit Radius 13,7 Mrd. Lj.

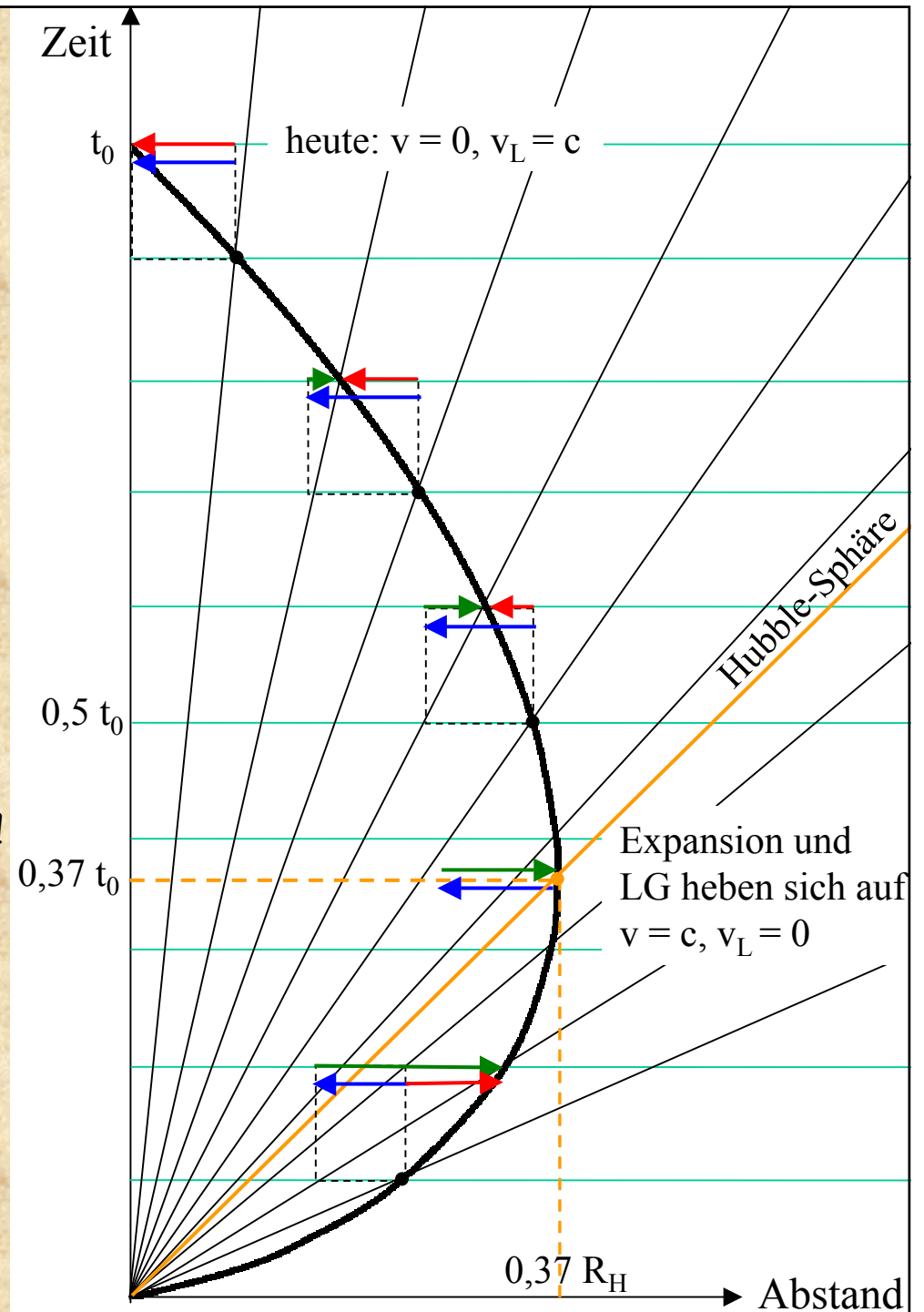


Wenn Strahlung des UK uns heute aus allen Richtungen erreicht, wie kann er dann „an einem Punkt“ stattgefunden haben?

Richtig: **Lichtkegel** nur im statischen Kosmos!
Licht (c lokal konstant) muss gegen die Expansion ankämpfen →
effektive (globale) Lichtgeschwindigkeit v_L

$$v_L = c - v$$

Wie sieht die **wahre Weltlinie von Licht** aus, das uns heute erreicht?



Weltlinie von Licht ist birnenförmig.
 Lichtlaufzeit: $\tau = 13,7$ – kosmische Zeit.

Galaxie mit $v = 0,7 c$

Emissionszeit: $t_e = 6,85$ Mrd. J.

Emissionsabstand: $R_e = 4,7$ Mrd. Lj

proper distance: $R_0 = 9,4$ Mrd. Lj

Rotverschiebung: $z = 9,4/4,7 - 1 = 1$

Lichtlaufzeit: $\tau = 6,85$ Mrd. J.

Galaxie auf der HS ($v = c$): $z = 1,7$

$t_e = 5,1$ Mrd. J., $R_e = 5,1$ Mrd. Lj,

$R_0 = 13,7$ Mrd. Lj, $\tau = 8,6$ Mrd. J.

Quasar mit $z = 9$ ($v = 2,2 c$):

$t_e = 1,37$ Mrd. J., $R_e = 3,2$ Mrd. Lj

$R_0 = 32$ Mrd. Lj, $\tau = 12,33$ Mrd. J.

Hintergrundstrahlung: $z = 1090$ ($v = 7c$)

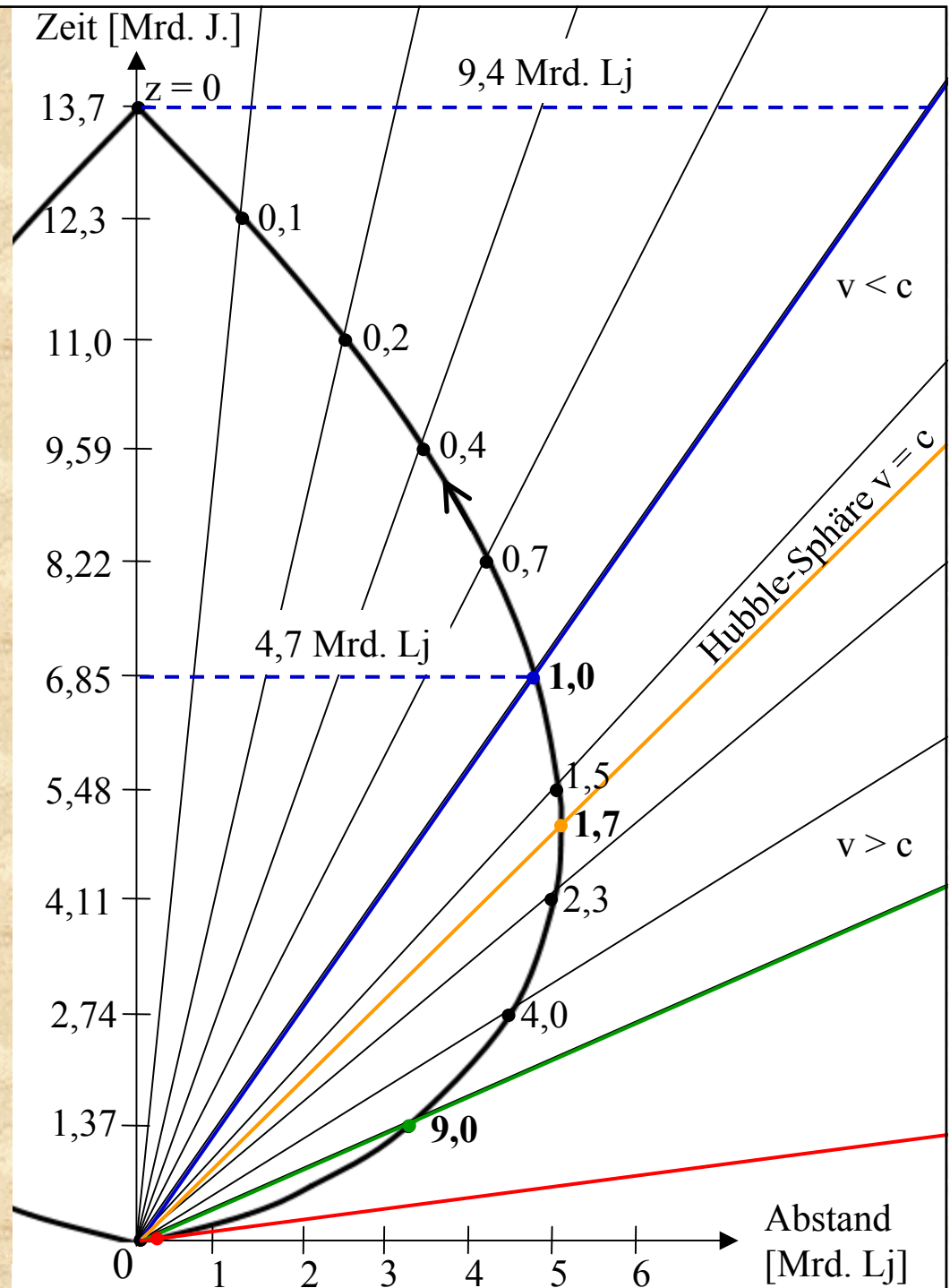
380.000 J., $R_e = 40$ Mio. Lj

3K-Strahlung des UK kommt von einem „Punkt“ und erreicht uns aus allen Richtungen (Isotropie)!

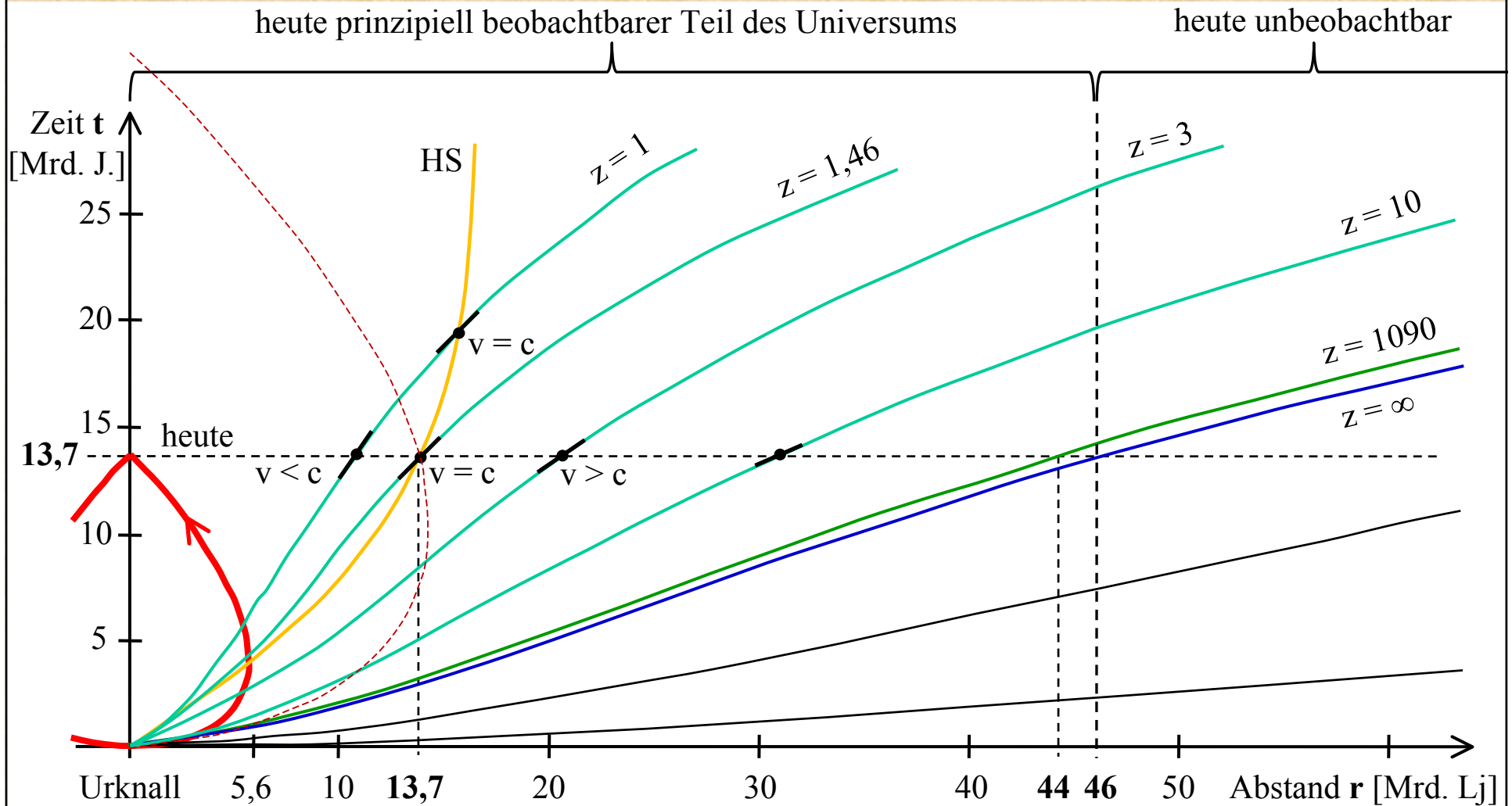
Es gilt: $z \sim \tau$

Strahlung = **Mischung** aus $z = 0 \dots \infty$.

Wir sehen Galaxien mit $v \geq c$!



Wie groß ist das beobachtbare Universum? Λ CDM-Modell (Weltlinie \neq Gerade)



Galaxien-Weltlinien (heutiges z) **Beschleunigte Expansion** (v nicht konstant); $v = H r$ (Hubble! für alle t)

Hubble-Sphäre ($v = c$) keine Gerade; Galaxie mit $z = 1,46$ liegt heute auf der HS; Licht trifft ein: 33 Mrd. J.

Hintergrundstrahlung ($z = 1090$); heutiger Abstand (proper distance) = 44 Mrd. Lj.

Partikelhorizont ($z = \infty$): heutiger Abstand = 46 Mrd. Lj (Radius des beobachtbaren Universums)

War das Universum früher kleiner und fand der Urknall an einem Punkt statt?

Falsch:

Das gesamte Universum hatte kurz nach dem Urknall die „Größe einer Erbse“.

Richtig:

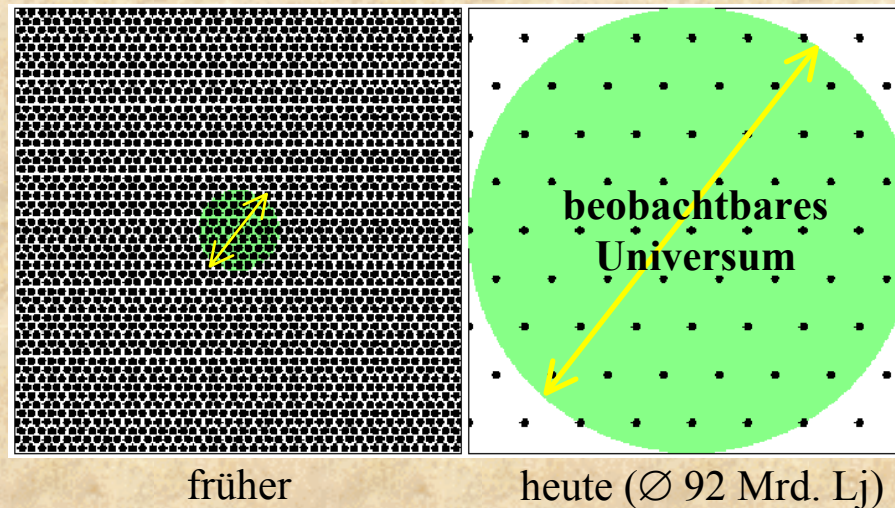
Das **beobachtbare Universum** hatte zu diesem Zeitpunkt die „Größe einer Erbse“.

Das gesamte Universum ist unendlich groß → es ist zu allen Zeiten unendlich groß!

Kontrahiert man einen unendlich großen Raum, so bleibt er unendlich.

Die Punkte liegen „dichter“!

Nicht das gesamte Universum war beim Urknall in einem Punkt konzentriert sondern nur das **beobachtbare Universum**!



Das Universum ist homogen und isotrop → Der Urknall fand überall statt!

Literaturhinweise

Lineweaver, C. H., Davis, T. M., Der Urknall - Mythos und Wahrheit, Spektrum der Wissenschaft, 5/2005, S. 37

Davis, T. M., Lineweaver, C. H., Expanding Confusion: common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the universe,
<http://www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/DavisLineweaver04.pdf>

Beyvers, G., Krusch, E., Kleines 1x1 der Relativitätstheorie, Springer-Verlag 2009

Harrison, E., Cosmology: The Science of the Universe, Cambridge University Press 2000

Schulz, H., Je größer die Rotverschiebung, desto näher der Quasar, Sterne und Weltraum 2/1997, S. 124