

# **Messung der kosmischen Expansion mittels Supernovae**

---

**Benedikt Hegner**

**14.07.2003**

# Inhalt

---

- **Erste Hinweise**
- **Was ist eine Supernova?**
- **Kosmologische Modelle**
- **Aktuelle Beobachtungen**
- **Diskussion**

# Erste Beobachtungen

---

- **Definition der Rotverschiebung:**

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

- **Das Spektrum anderer Galaxien ist systematisch rotverschoben.**
- **Die Rotverschiebung ist für weiter entfernte Galaxien größer.**
- **Die Rotverschiebung wird durch Dopplerverschiebung erklärt: die Galaxien bewegen sich von uns fort.**

# Hubble-Beziehung

---

- **Edwin Hubble findet 1929 einen linearen Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Abstand:**

$$v = H \cdot D$$

mit  $H \approx 65 \frac{\text{km}}{\text{s}} \text{Mpc}$

- **Aus diesem Zusammenhang ergibt sich ein Zeitpunkt, zu dem alle Galaxien an einem Punkt vereinigt waren – dem „Urknall“:**

$$T_0 = 1/H \approx 15 \cdot 10^9 a$$

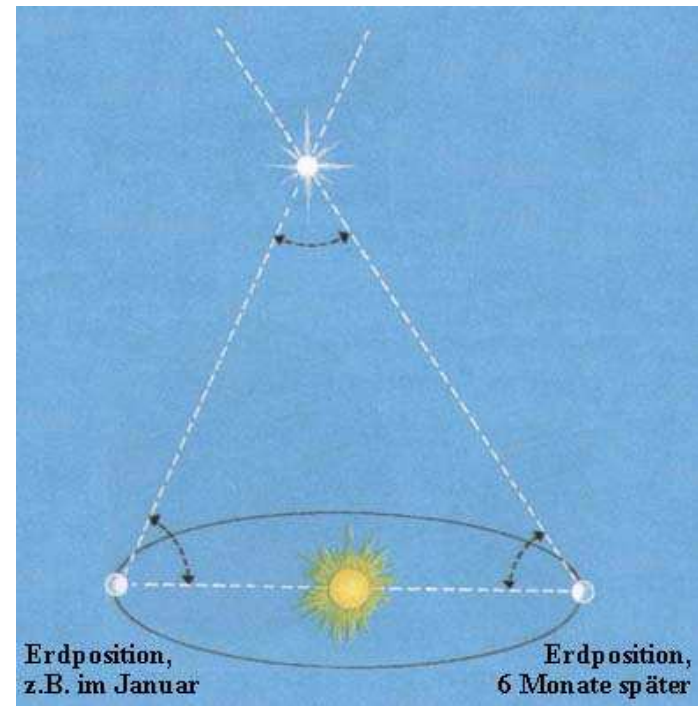


Edwin Hubble  
(1889 – 1953)

# Die kosmische Entfernungsleiter

## Eine Auswahl:

- **Parallaxe:** Messung der Sternposition zu verschiedenen Zeiten
- **Tully-Fisher-Relation:** Verbreiterung der Spektrallinien von Galaxien durch Rotation mit Linienbreiten-Leuchtkraft-Beziehung
- **Cepheiden:** Perioden-Leuchtkraft-Beziehung
- **Supernovae Typ Ia** als Standardkerzen



Sternparallaxe

# Helligkeiten (Magnitudes)

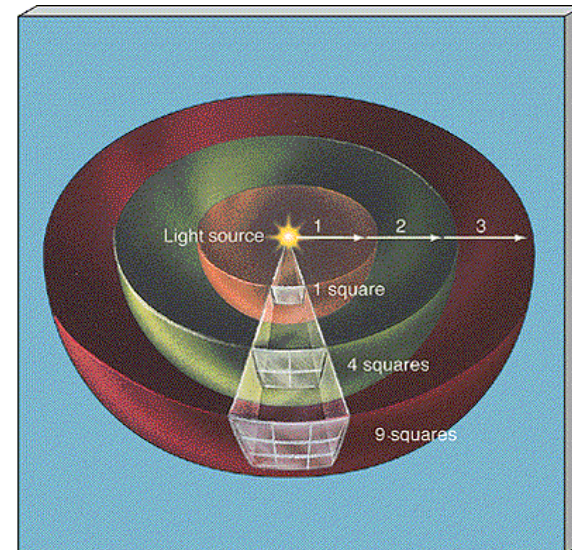
---

Helligkeiten nehmen mit zunehmender Entfernung quadratisch ab.

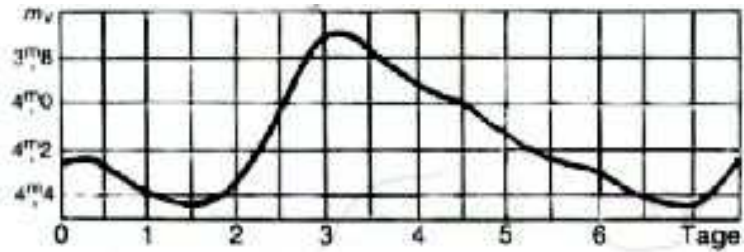
Sternhelligkeiten werden durch Magnitudes beschrieben.

Ein Unterschied von 6 mag entspricht einem Faktor 100.

Absolute Sternhelligkeiten werden auf eine Standardentfernung von 10 Parsec bezogen.

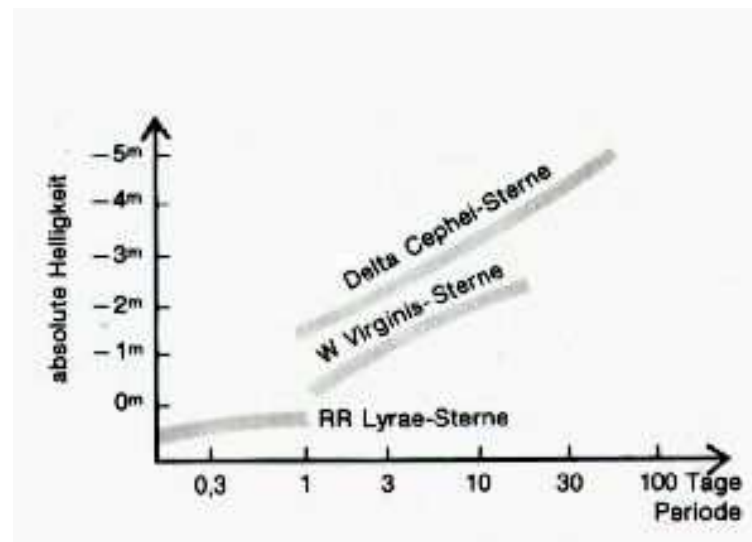


# Cepheiden



Verlauf der Helligkeit

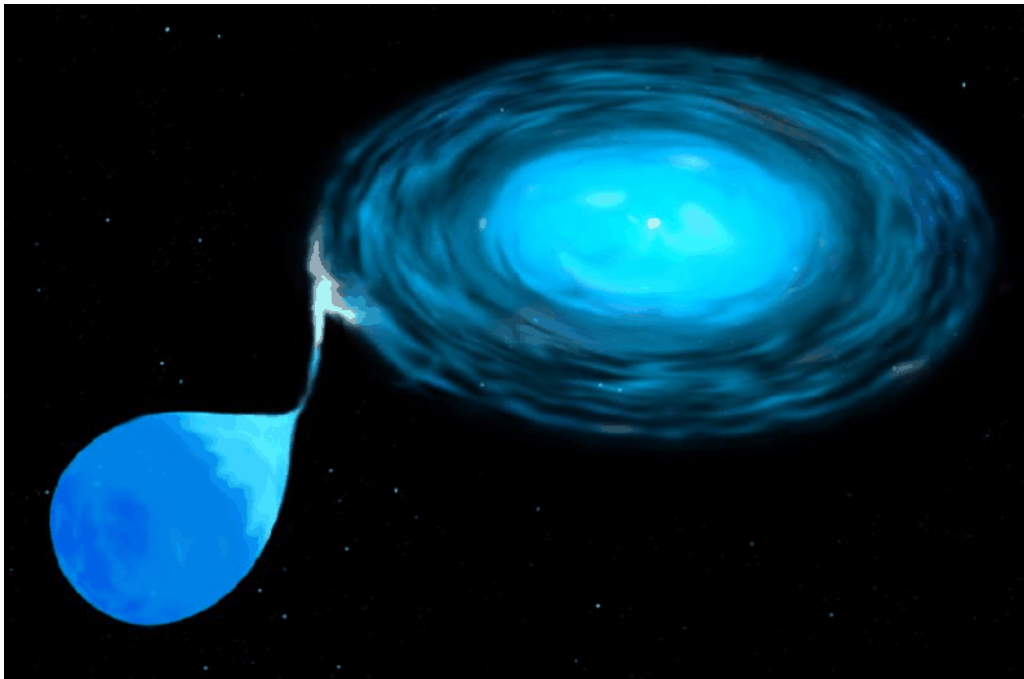
Perioden-Leuchtkraft-  
Beziehung



# Supernovae Typ Ia

---

- Enges Doppelsternsystem mit einem normalen Stern und einem weißen Zwerg
- Der weiße Zwerg ist ein ausgebrannter Stern mit einer Masse kleiner als 1,4 Sonnenmassen





# Supernovae Typ Ia

---

Material strömt vom normalen Stern zum weissen Zwerg



Akkretion bis 1,4 Sonnenmassen  
(Chandrasekhar-Grenze)



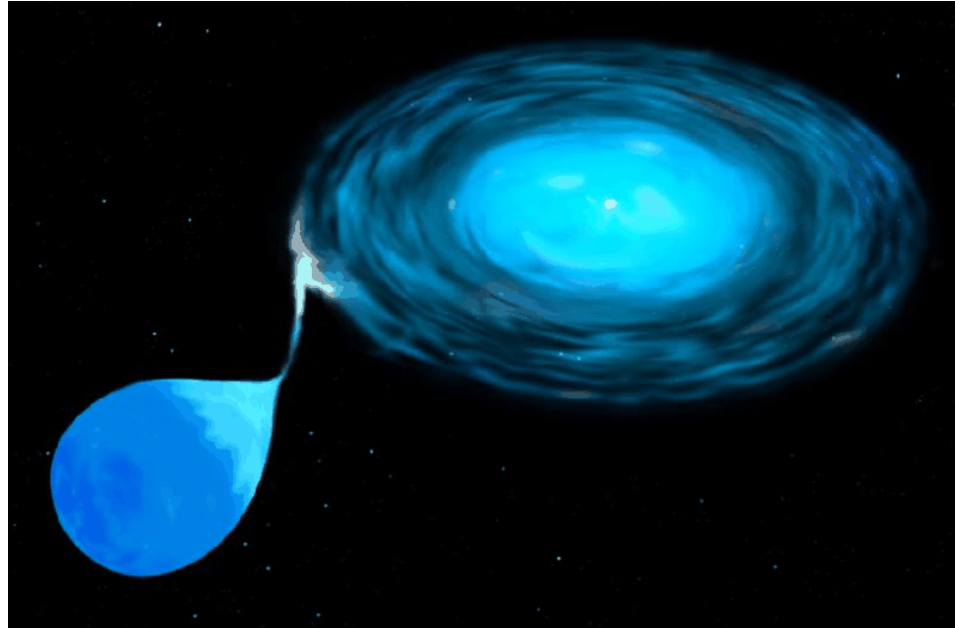
Gravitationskollaps



Zündung der Kohlenstoff-Fusion



Supernova-Explosion



# Helligkeit der Supernovae Typ Ia

- **Der explodierende Stern hat eine ungefähre Masse von 1,4 Sonnenmassen.**
- **Alle Supernovae Typ Ia haben also ähnliche Ausgangsbedingungen.**
- **Die Helligkeit ist somit fest definiert:**

$$M_{B,max} = -(19,2 \pm 0,2)mag$$

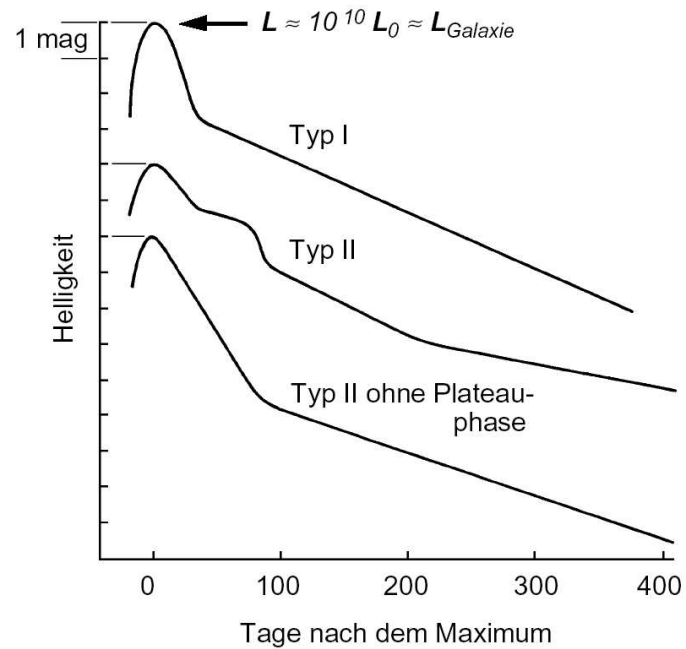
- **Im Maximum ist die Helligkeit vergleichbar mit einer ganzen Galaxie.**

**Wir haben ideale  
„Standardkerzen“!**

# Vergleich: andere Supernovae

## Klassifikation:

- I schwache Wasserstoff-Linien Ia  
Ib
- II starke Balmerlinien



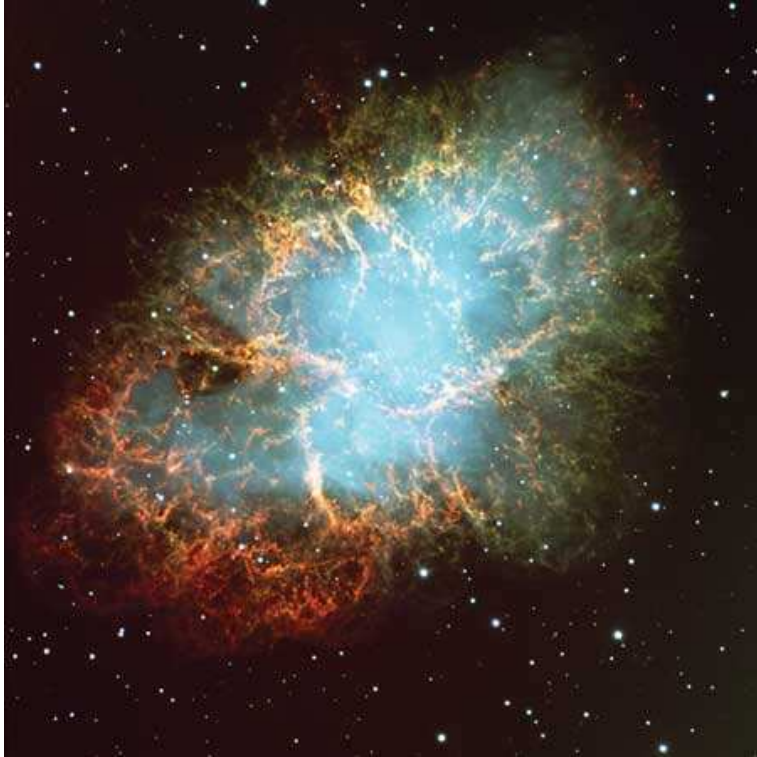
# Beispiel einer Supernova

---



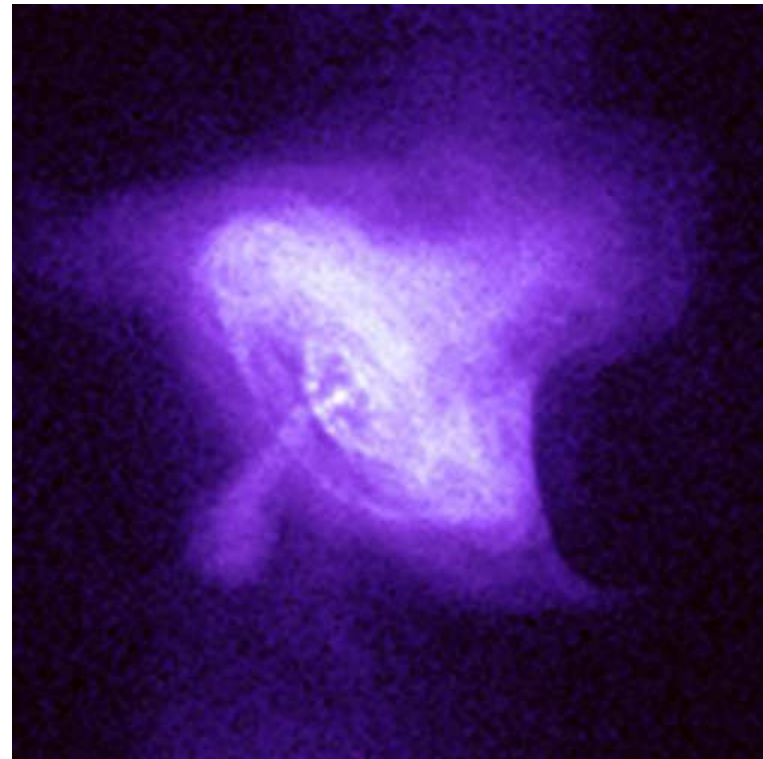
# Der Krebsnebel

---



Visueller Bereich

Röntgenbereich



# Kosmologische Modelle I

---

**Newton**      $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

**SRT**          $ds^2 = \eta_{\alpha\beta} \cdot dx^\alpha dy^\beta = c^2 dt^2 - dr^2$

**ART**          $ds^2 = g_{\mu\nu} \cdot dx^\mu dx^\nu$

# Robertson-Walker-Metrik

## Postulat:

Das Universum ist homogen und isotrop

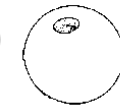


$$ds^2 = c^2 \cdot dt^2 - R^2 \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + (d\theta^2 + \sin^2 \theta \cdot d\phi^2) \right)$$

Skalenparameter

Krümmungsparameter

$k = 1$  (geschlossen)



$k = -1$  (offen)

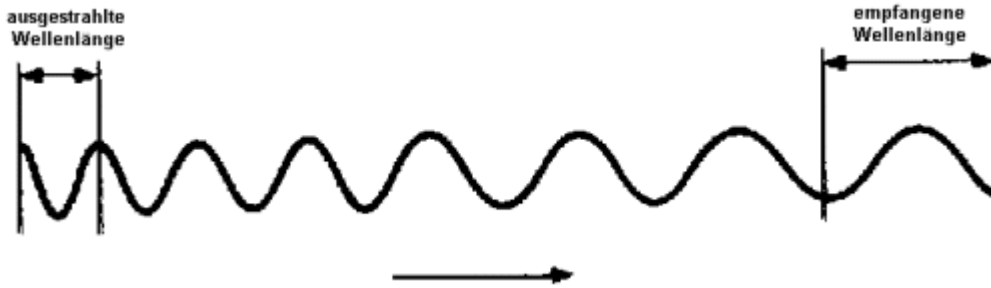


$k = 0$  (flach)



# Die Rotverschiebung in der ART

Es handelt sich um keinen Dopplereffekt,  
sondern der Raum dehnt sich aus.



Es gilt:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{R}{R_0}$$

Daraus folgt:

$$z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 = \frac{R}{R_0} - 1$$



# Redshift und Hubble-Parameter

## Taylor-Entwicklung von $R(t)$ um Zeitpunkt $t_0$

$$R(t) = R(t_0) \cdot \left( 1 + H_0(t - t_0) - \frac{1}{2}q_0 H_0^2 (t - t_0)^2 + \dots \right)$$

Hubble-Parameter

$$H_0 = \frac{c \cdot \dot{R}(t_0)}{R(t_0)}$$

Verzögerungs-Parameter

$$q_0 = \frac{\dot{R}(t_0) \cdot \ddot{R}(t_0)}{R(t_0)^2}$$

$$z \approx \frac{H_0}{c} D + \frac{(1 + q_0) H_0^2}{2c^2} D^2$$

# Friedmann-Lemaitre-Gleichungen

Die zeitliche Entwicklung von  $R(t)$  folgt aus den folgenden Gleichungen:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = -k \frac{c^2}{R^2} + \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{c^2}{3} \lambda$$
$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = -k \frac{c^2}{R^2} - \frac{8\pi G}{c^2} P + c^2 \lambda$$

Dichte

Druck      Kosmologische Konstante

# Parameter der Kosmologie

---

- Die Dichte des Universums wird beschrieben durch:

$$\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M \quad \text{Wirkt anziehend}$$

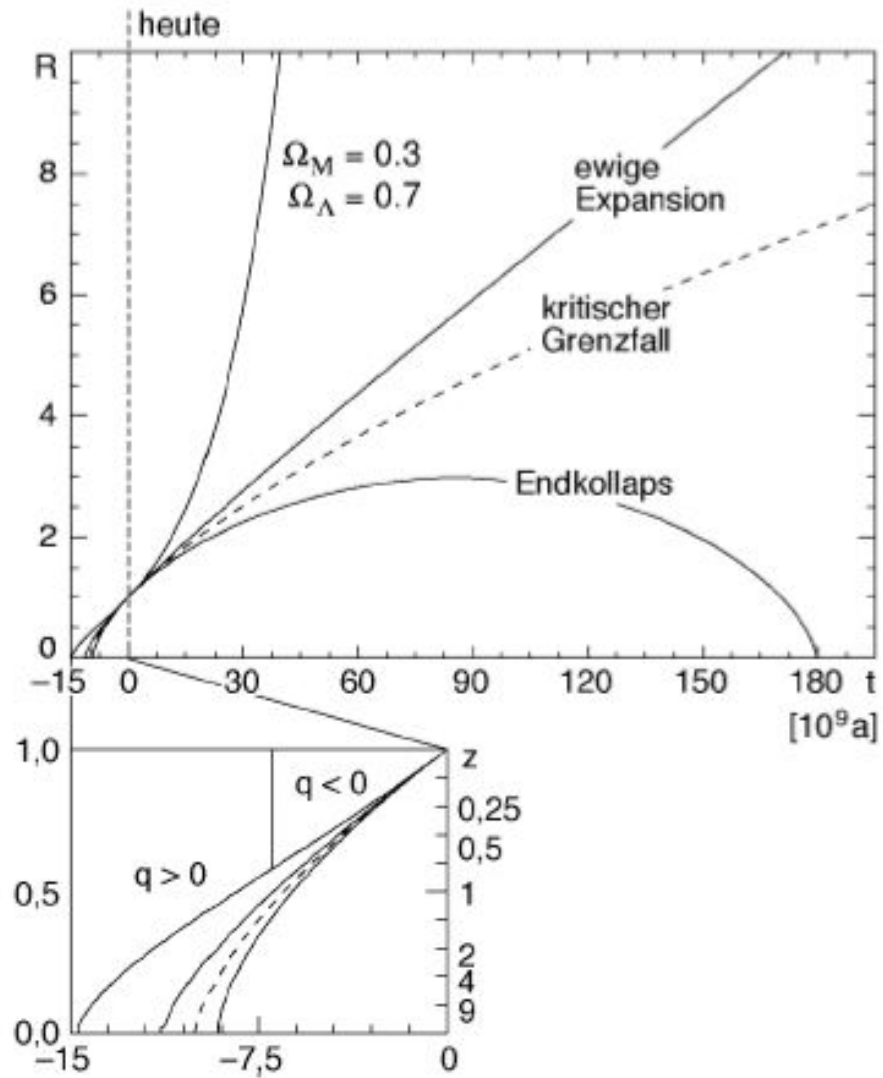
- Die kosmologische Konstante wird als Vakuumenergie gedeutet und wird beschrieben durch:

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} \quad \text{Wirkt abstossend}$$

- Die Parameter sind so normiert, daß gilt:

$$q = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda$$

# Ausdehnung des Universums



# **Aktuelle Projekte**

---

- **Supernova Cosmology Project**

- **Supernova High-Z Search**

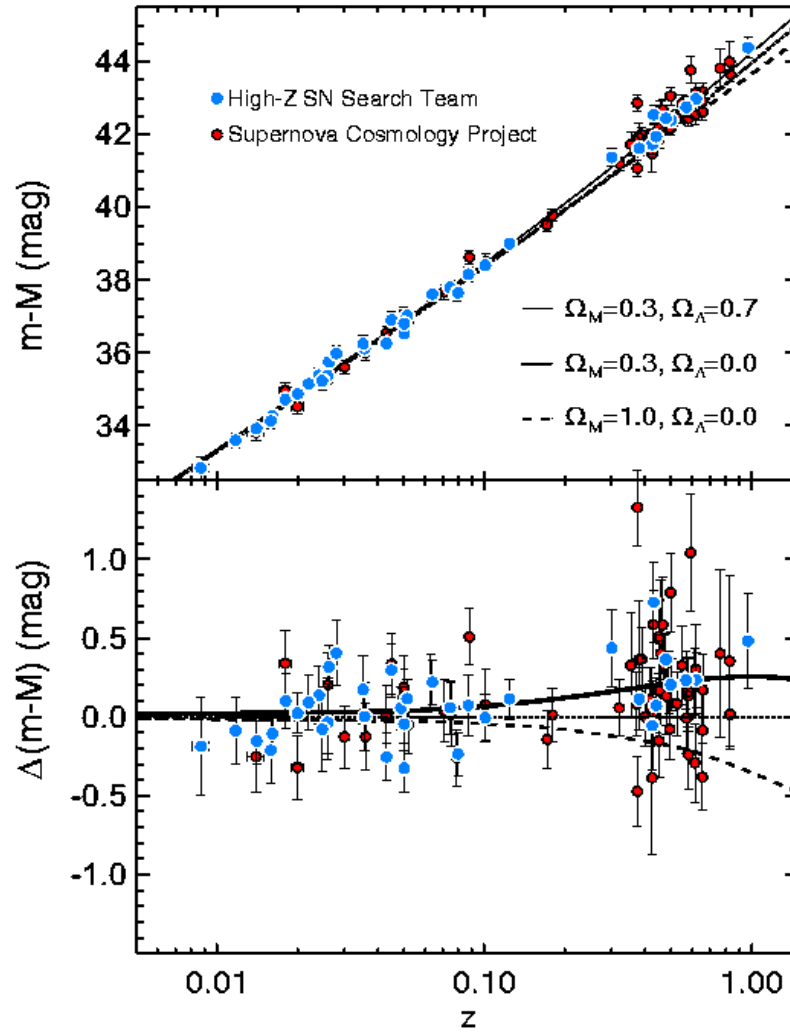
- **Beide Projekte suchen in möglichst weit entfernten Galaxien nach Ia Supernovae**
- **Helligkeiten und Rotverschiebung werden gemessen und gegeneinander aufgetragen.**
- **Ziel ist mit statistischen Methoden die kosmologischen Parameter möglichst weit einzugrenzen**

# Beobachtungs-Probleme

---

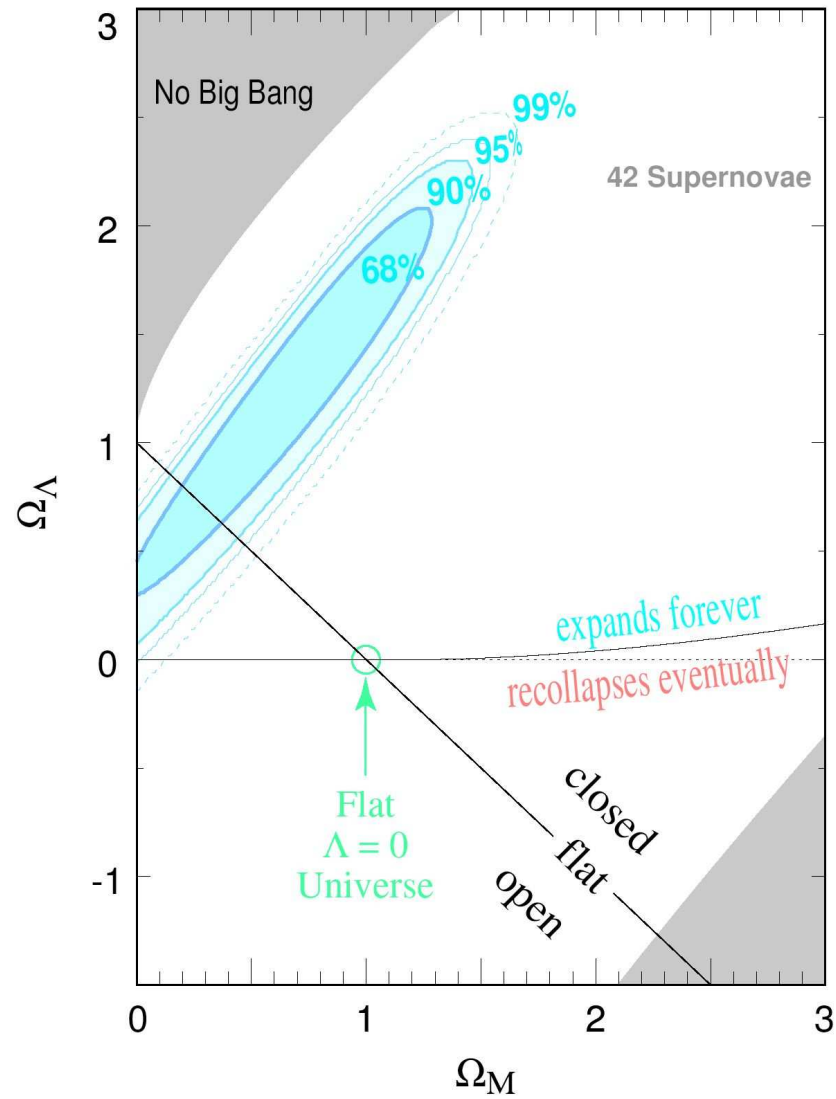
- **scheinare Helligkeit wird durch interstellare Materie verfälscht.**
- **Galaxien führen Eigenbewegungen aus.**
- **Dehnung des Spektrums führt zu geringerer Intensität.**
- **Verlassen des empfindlichen Detektorbereiches durch die Rotverschiebung**
- **Evolutionseffekte (chem. Zusammensetzung)**
- **Gravitationslinsen (Objekte erscheinen heller)**
- **Die Helligkeiten der Supernovae schwanken um 0,2 mag.**
- **Malmquist-Effekt**
- ...

# Ergebnisse



# Ergebnisse

Supernova Cosmology Project  
Perlmutter *et al.* (1998)





# Ergebnisse

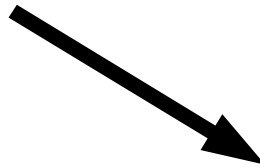
---

- **Wahrscheinlichste Werte der kosmischen Parameter:**

$$\Omega_M \approx 0,3 \quad \Omega_M + \Omega_\Lambda \approx 1$$

$$\Omega_\Lambda \approx 0,7 \quad q_0 \approx -0,6$$

- **Die kosmologische Konstante ist nicht vernachlässigbar.**
- **Das alte kosmologische Standardmodell ist somit ausgeschlossen.**



- **Das Universum dehnt sich aus.**
- **Die Ausdehnung ist beschleunigt.**
- **Das Universum stirbt den „Kältetod“.**
- **Das Universum ist nahezu flach.**
- **Das Alter des Universums ist:**

$$T_0 \approx 13,7 \cdot 10^9 a$$

# Ungeklärte Probleme

---

- Nach anderen Messungen scheint die uns bekannte baryonische Materie nur 5% der Materiedichte auszumachen.
- Woraus besteht die restliche Materie?
  - Die Vakuumenergiedichte ist konstant.
  - Die Materiedichte nimmt ab.
  - Warum haben beide heute die gleiche Größenordnung?
  - Und warum ist das Universum nahezu flach?
- Woher kommt die Vakuumenergie?
- Handelt es sich um Quantenfluktuationen?
- Warum liegen Ergebnisse der Teilchen- und Astrophysik so weit auseinander?