Kosmologie und Astroteilchenphysik

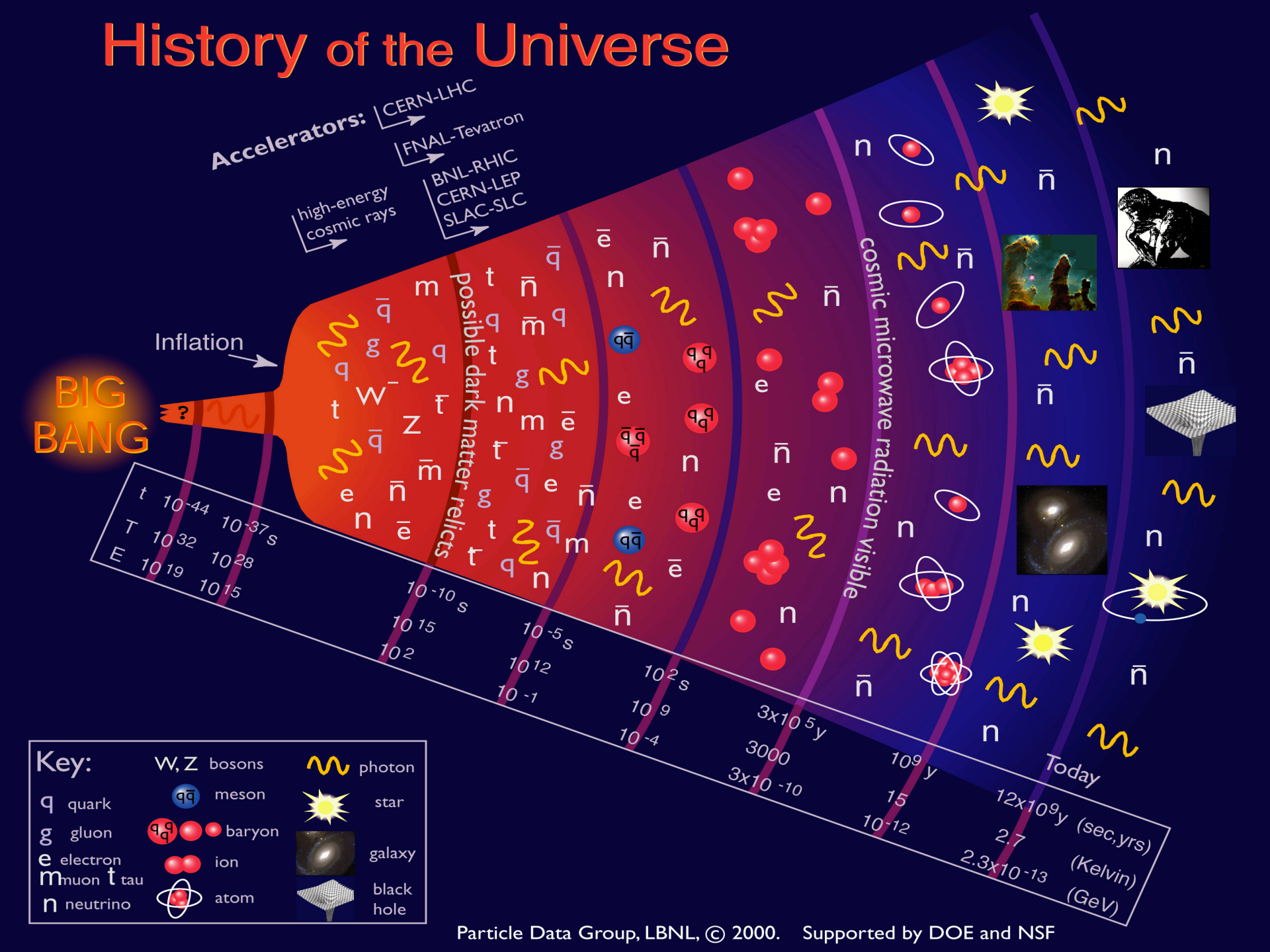
Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, Dr. Daniel Bemmerer

- Einführung in die Kosmologie
- Weltmodelle und kosmologische Inflation
- Thermische Geschichte des Universums
- Urknall-Nukleosynthese
- Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- **Supernovae als kosmische Standardkerzen (heute)**
- Neutronensterne
- Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- Altersbestimmung des Universums
- Fundamentale Physik und die Sonne

8. Vorlesung, 27.05.2014

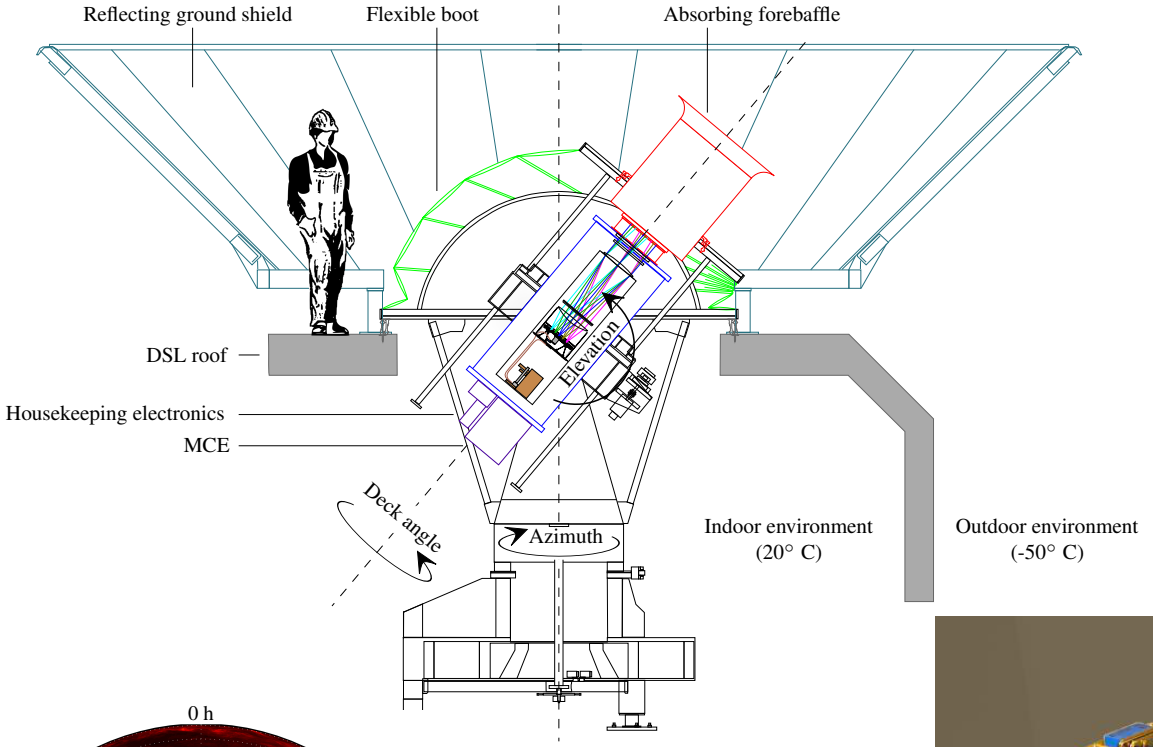
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Partner von DRESDEN concept exzellenz-dresden.de
HZDR
HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF
Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

History of the Universe



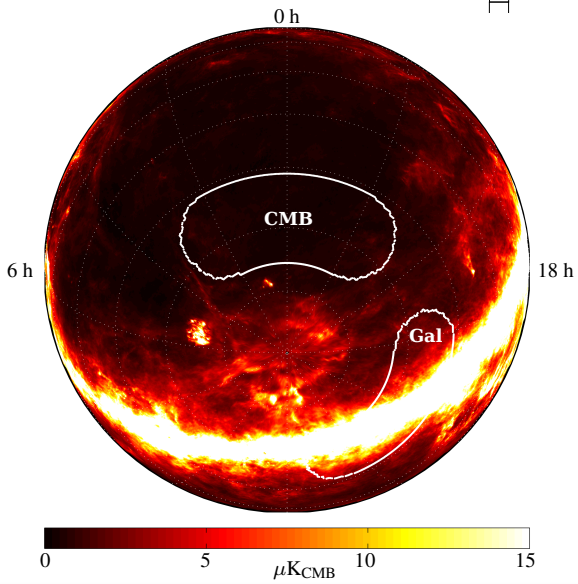
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

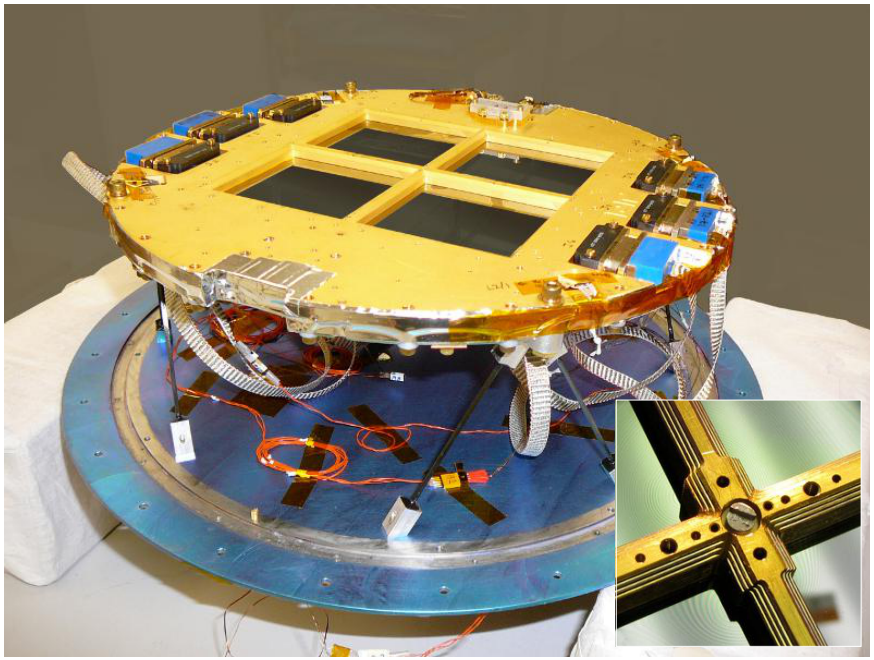
BICEP2 Daten zur Polarisation des Mikrowellen-Hintergrunds



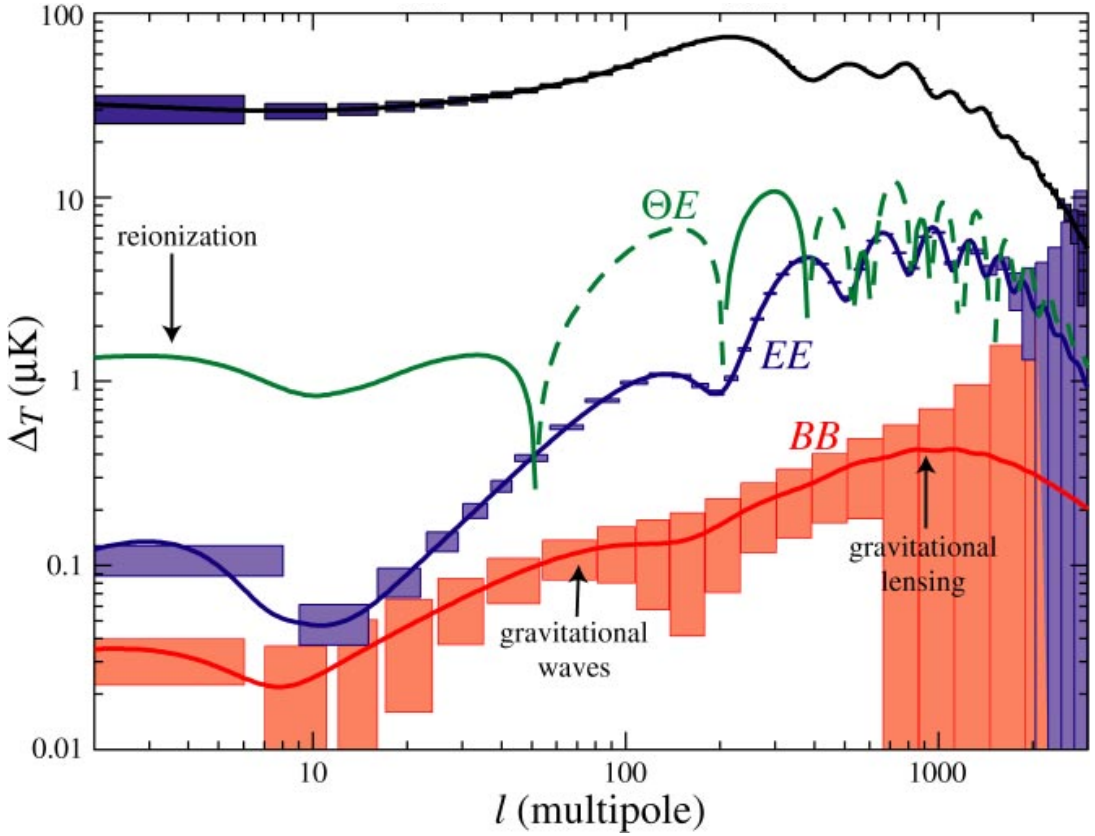
BICEP2-Instrument

- Mikrowellen-Teleskop am Südpol
- Nachweis der Polarisation der Mikrowellen-Quanten
- 4 * 128 Bolometer
- Bilder: arXiv (BICEP2)





Polarisation des Mikrowellen-Hintergrunds: Erwartung

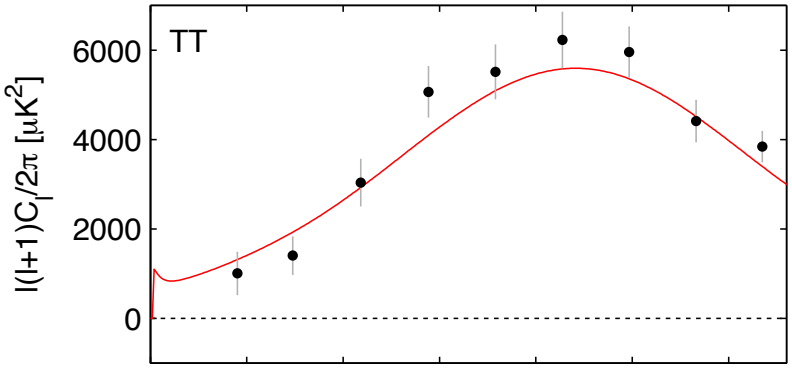


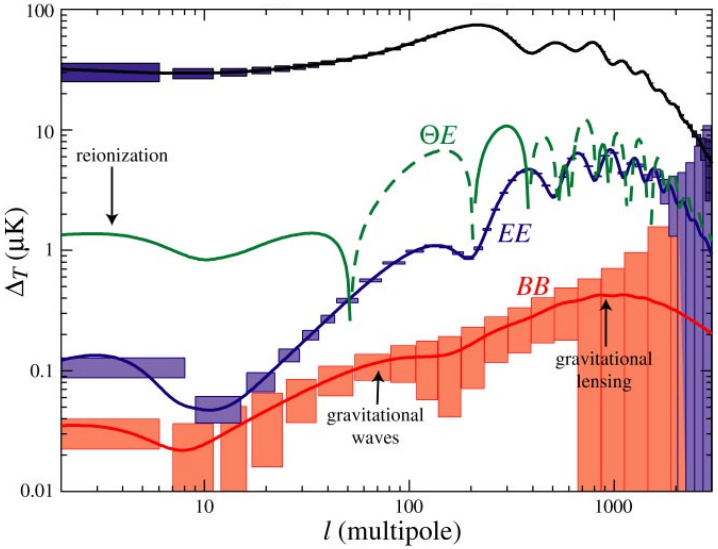
Hu et al. 2002

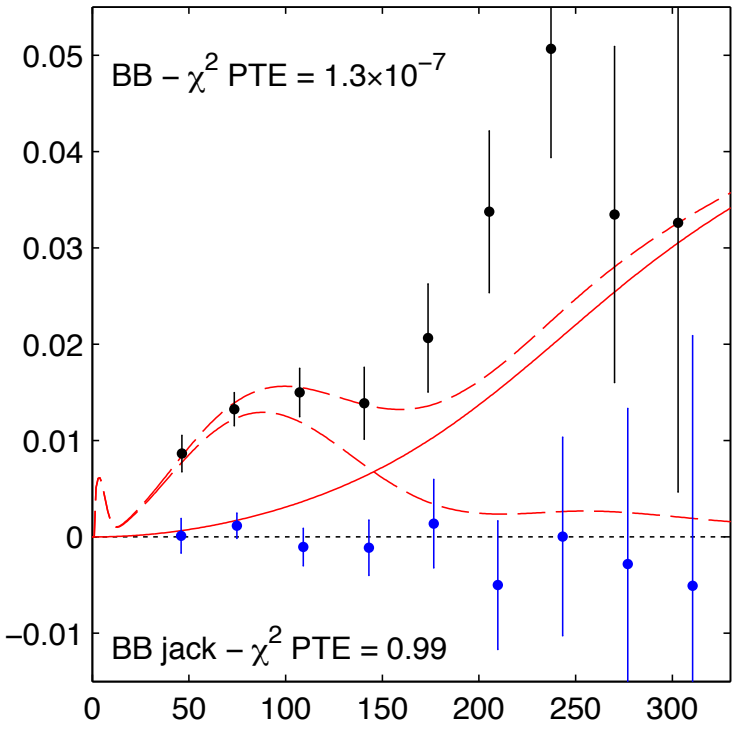
Observable für lineare Polarisation

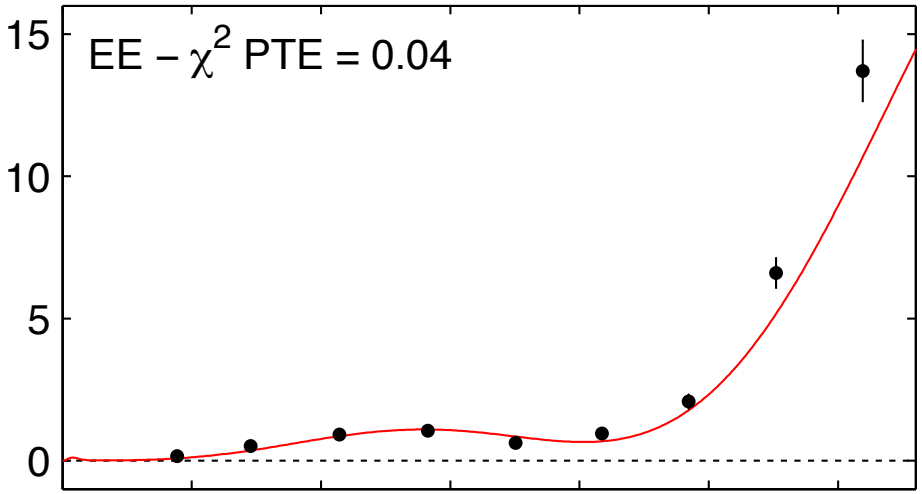
- E = Polarisation in Richtung des Wellenvektors (+) oder orthogonal dazu (-)
- B = Polarisation bei + / - 45°

Polarisation des Mikrowellen-Hintergrunds: BICEP2-Daten (1)



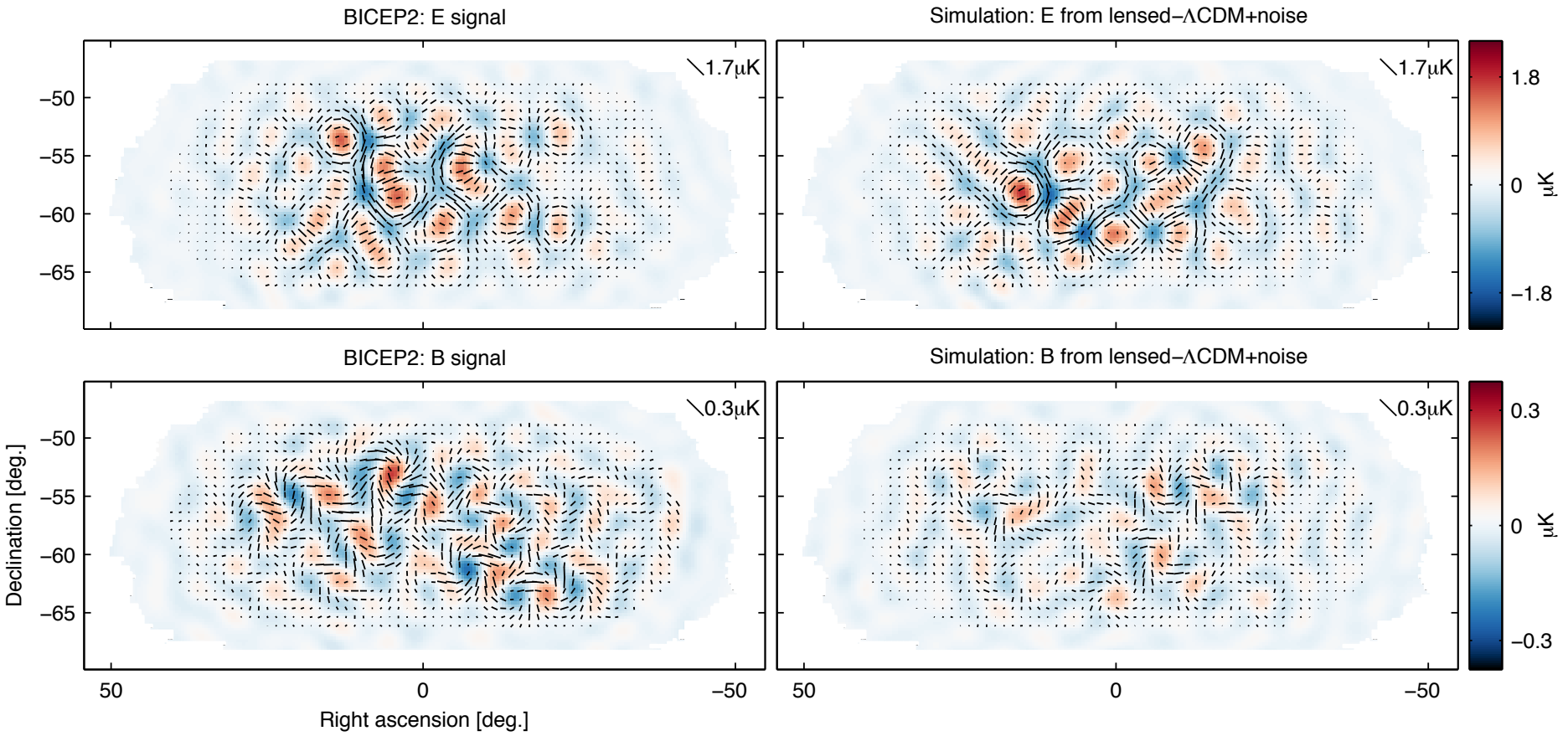




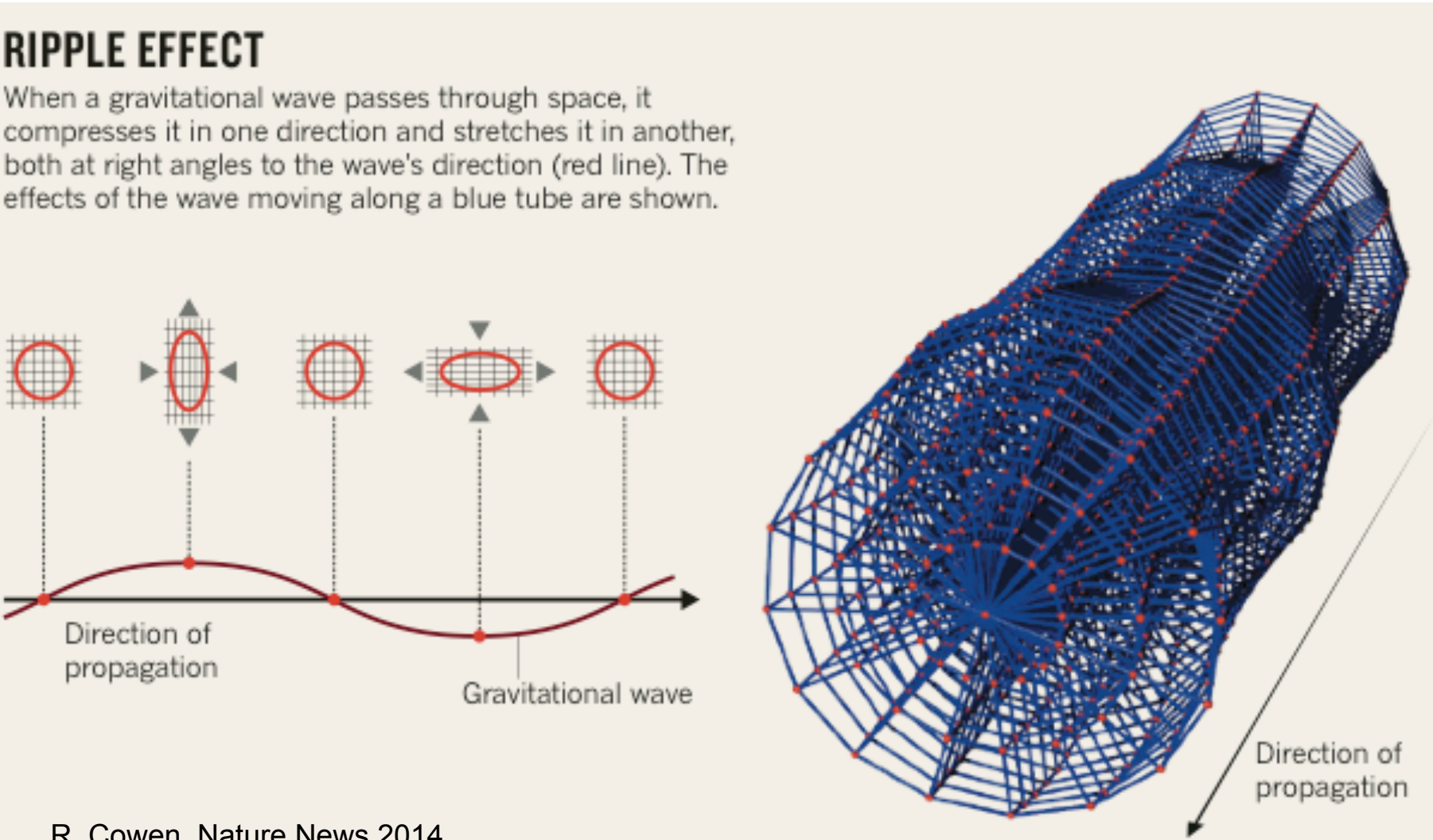


TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
DRESDEN concept
HZDR

Polarisation des Mikrowellen-Hintergrunds: BICEP2-Daten (2)



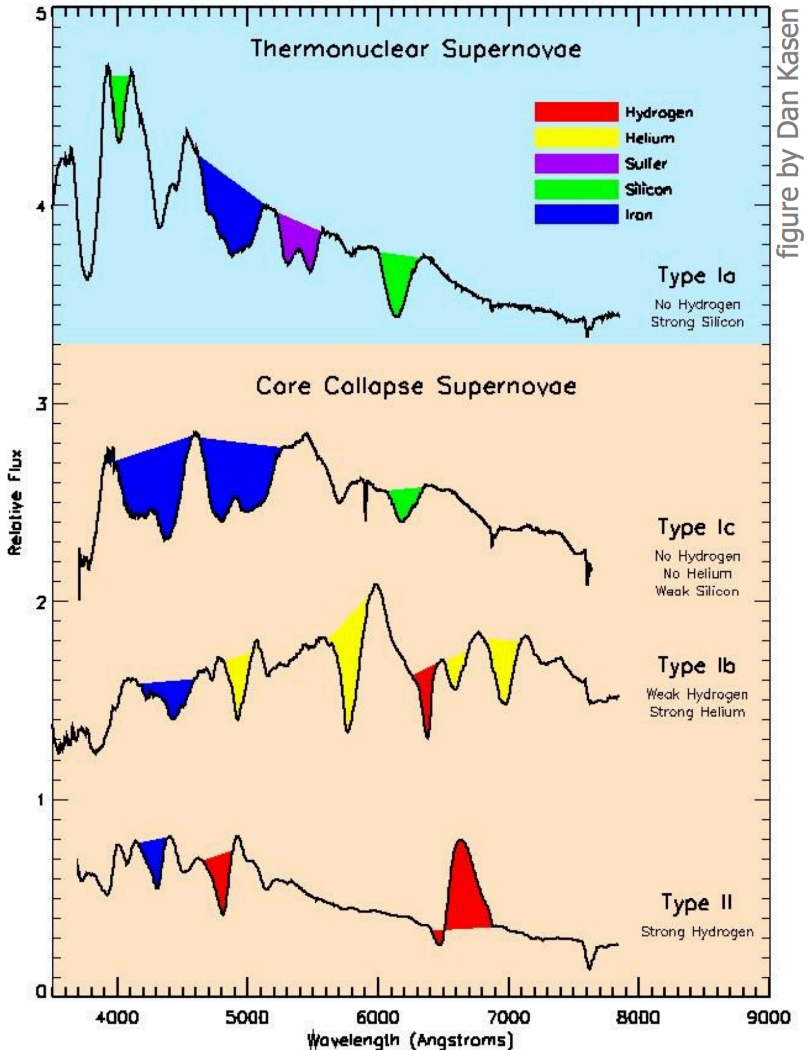
Polarisation des Mikrowellen-Hintergrunds: Interpretation

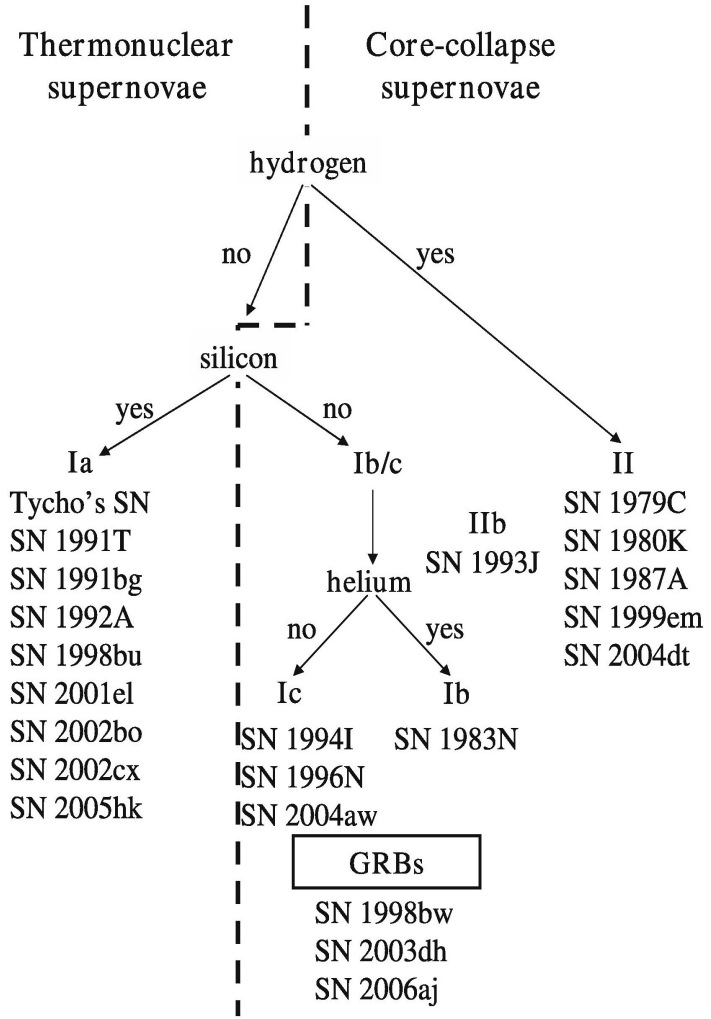


R. Cowen, Nature News 2014

Supernovae: Klassifizierung

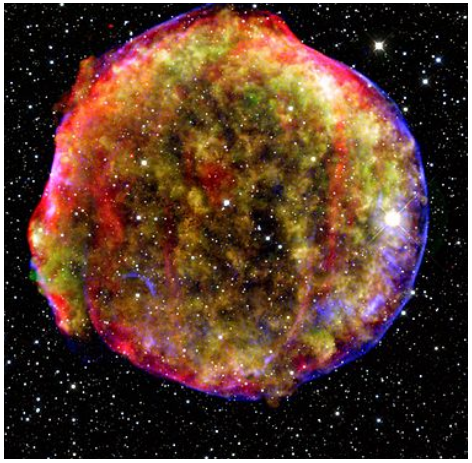
- Klassifizierung anhand der Spektallinien
- Wasserstoff aus äußerster Zwiebelschale oder nicht?





B. Leibundgut

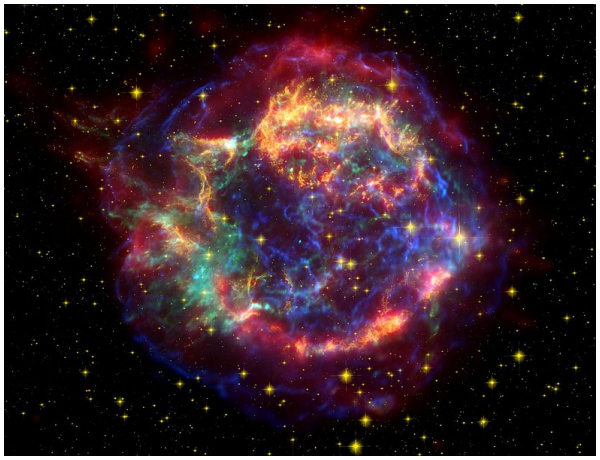
Supernovae vom Typ Ia und II, Theorien... und Beobachtungen



Supernovae Typ Ia

- Weißer Zwerg saugt Material von einem Begleiter auf
- Kurz vor Erreichen der Chandrasekhar-Masse zündet thermonukleares Brennen

- Keine H-Spektrallinien
- Kein Überrest
- Standardkerzen, aufgrund einer empirischen Kalibration
- Kosmologische Anwendung
  → Nobelpreis für Physik 2011

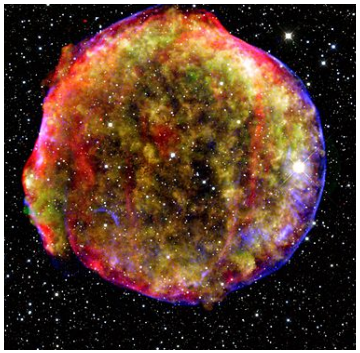


Supernovae Typ II

- Schwerer Stern erlebt einen Kernkollaps

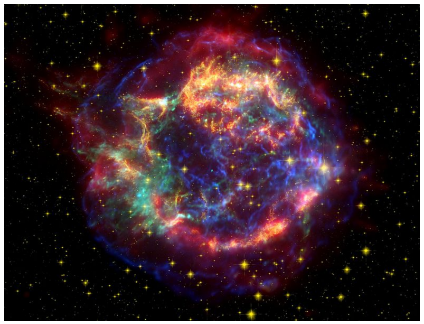
- H-Spektrallinien beobachtet
- Überrest ist ein Neutronenstern

Supernovae vom Typ Ia und II, Vorgängersterne



Typ Ia

Typ II



Vorgänger

- Leichter Stern, ~1 Sonnenmasse
- Wasserstoff-, dann Heliumbrennen
- Asche: ^{12}C (~50%), ^{16}O (~50%), ^{22}Ne (2%)
- Weißer Zwerg

Vorgänger

- Schwerer Stern, ~25 Sonnenmassen
- H, He, C/O, Si - Brennen
- Zwiebelstruktur

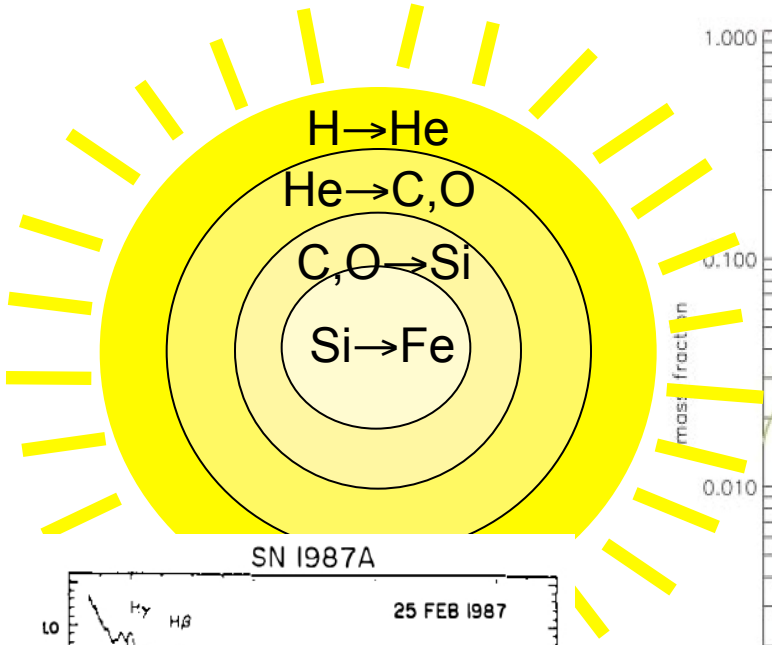
Supernova-Explosion (Typ Ia)

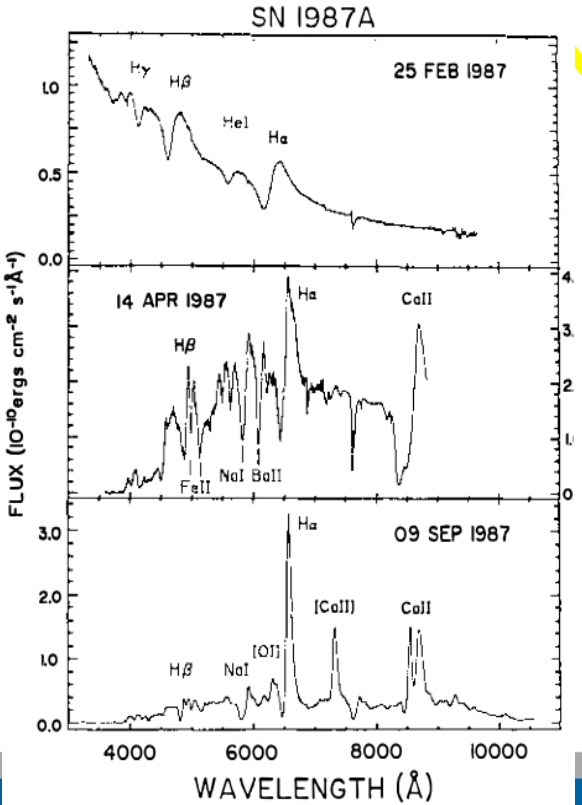
- Explosives thermonukleares Brennen (Kohlenstoff- und Sauerstoffbrennen)

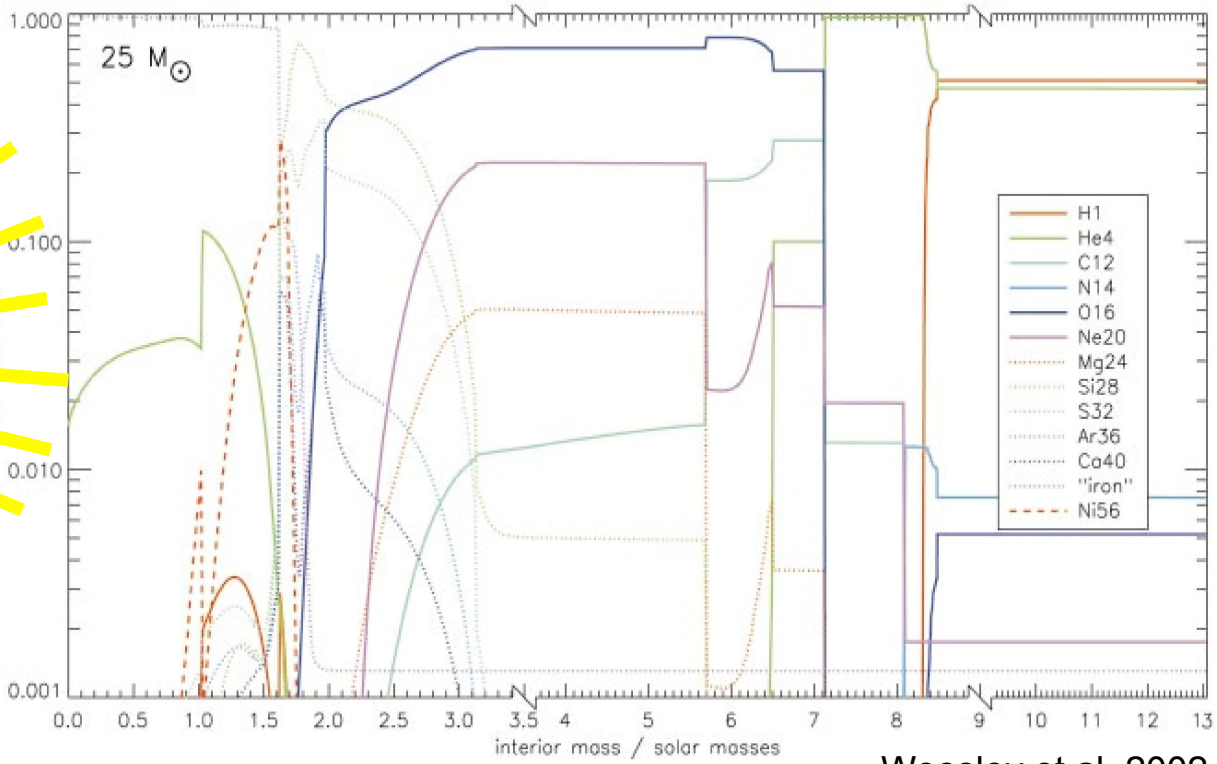
Supernova-Explosion (Typ II)

- Kernkollaps

core collapse - Supernova: SN 1987A

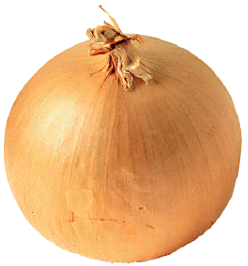






Woosley et al. 2002

- Massiver Stern
- Vor der Explosion Schalenbrennen



D. Arnett et al.

Entfernungsmessung im Universum

- Gehören nahe beieinander erscheinende Sterne zusammen?
- Wie groß ist unser Universum?
- Was ist die Zukunft des Universums?

Zwei prinzipielle Verfahren zur Bestimmung der Entfernung d

1. Parallaxe, geeignet für ≤ 10^3 Lichtjahre

   Beobachtung des Sterns von zwei verschiedenen Orten aus,
   Bestimmung des Winkels α zwischen beiden Beobachtungen

$$d = \frac{1\,\mathrm{AU}}{\tan\alpha}$$

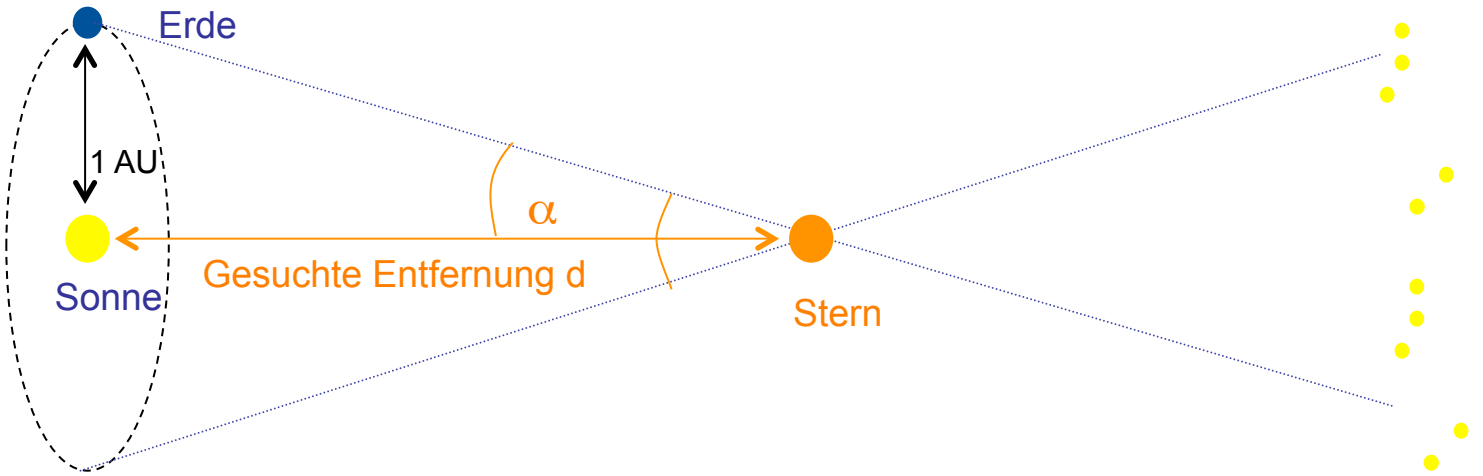
2. Standardkerze, geeignet für ≤ 10^{10} Lichtjahre

   Vergleich der beobachteten Helligkeit m des Sterns mit Standard M

$$d = 10\,\mathrm{pc} \cdot 10^{(m-M)/5}$$

Entfernungsmessung mittels Parallaxe, Prinzip

Mittlerer Erdbahnradius = 1 AU (astronomical unit)



$$d = \frac{1\,\mathrm{AU}}{\tan\alpha}$$

- Gute Winkelauflösung vonnöten
- Lange Basislinie hilft (→säkulare Parallaxe)
- Definition der Längeneinheit parsec (pc, Parallaxsekunde):
  1 pc = 1 AU / tan 1'' (Bogensekunde) = 2.06 * 10^5 AU = 3.26 Lichtjahre
- 1838 von Bessel auf 61 Cyg angewendet: α = 0.314''
  d = 1 / 0.314 pc = 3.18 pc = 10.4 Lichtjahre

Bestimmung der Entfernung des 61sten Sterns des Schwans.

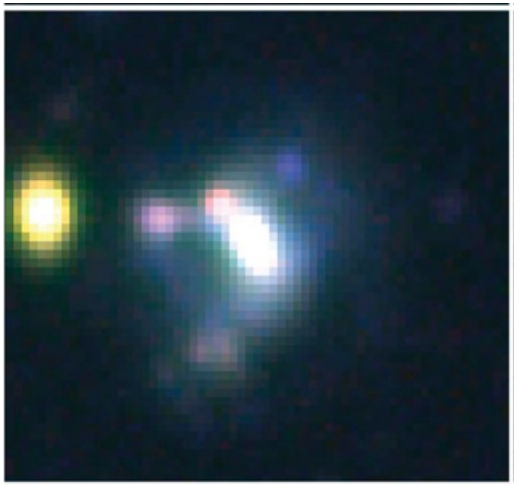
Von Herrn Geheimen-Rath und Ritter *Bessel*.

Als es *Bradley* gelungen war, seine Beobachtungen in *Kew* und *Wansted*, welche die Entdeckungen der Aberration und Nutation herbeiführten, durch diese allein genügend zu erklären, ohne dazu der Annahme einer jährlichen Parallaxe der beob- ist nicht zu bezweifeln; allein wenn eine Untersuchung über die jährliche Parallaxe eines Fixsterns unternommen werden soll, so sind sie dennoch die einzigen, welche seine Wahl leiten können.

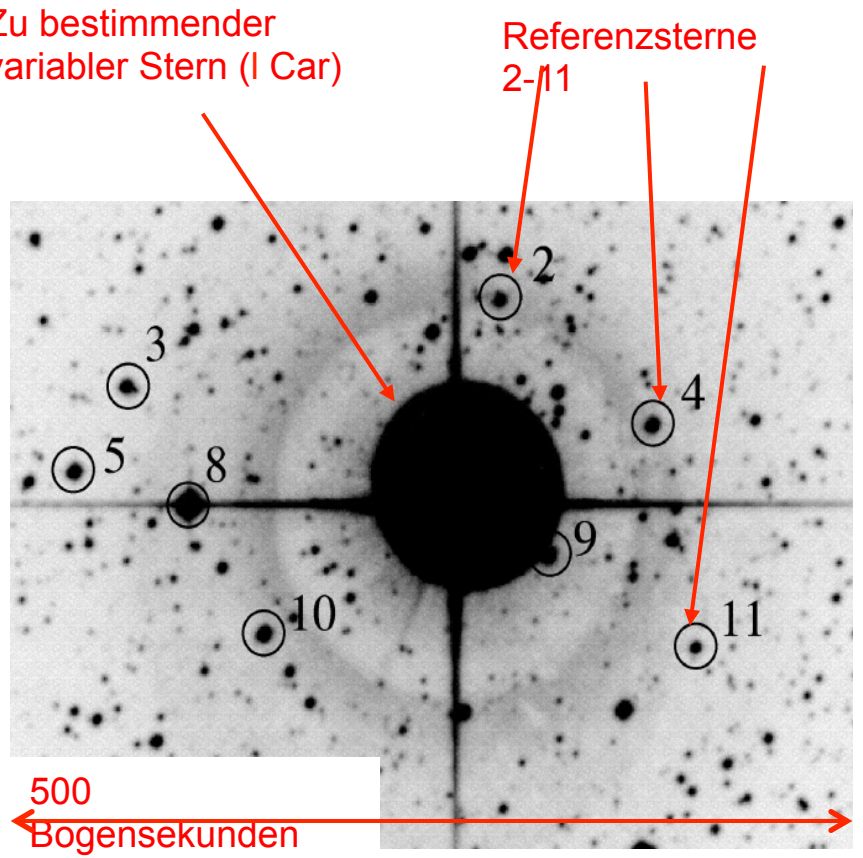
Entfernungsmessung mittels Parallaxe, moderne Anwendung

Parallaxenmessungen mit Hubble Space Telescope, auf 10^{-4} Bogensekunden genau:
G. Benedict et al., Astron. J. 133, 1810 (2007)

Erdgestützt (8 m)

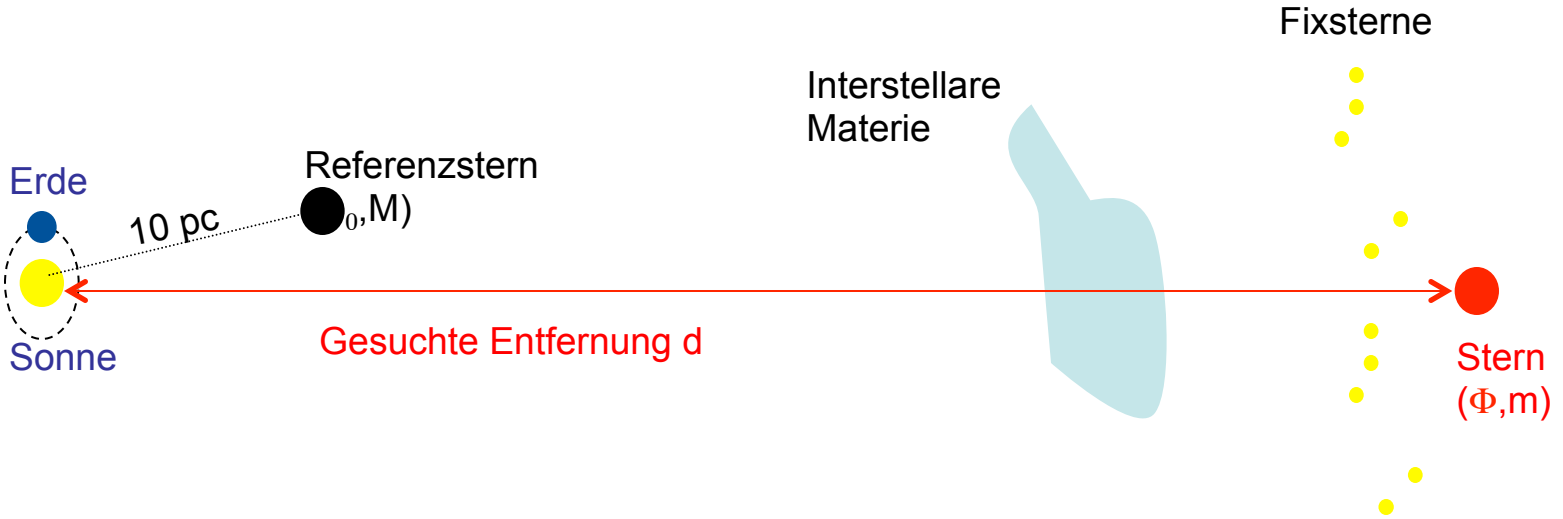


Hubble-Satellit (2.4 m)



Karte aus Digital Sky Survey (nur zur Illustration)

Entfernungsmessung mittels Standardkerze: Prinzip



- Quadratisches Abstandsgesetz: $\Phi \sim d^{-2}$
- Helligkeit in Magnituden m: $m = -2.5 \log_{10}\Phi + C$
- Referenzstern in 10 pc Abstand: Fluss Φ_0, Helligkeit M

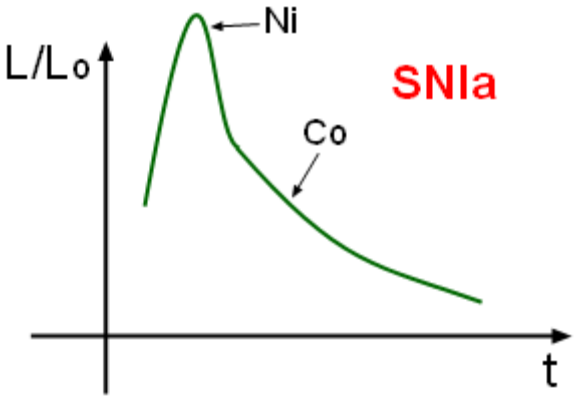
$$d = 10\,\mathrm{pc} \cdot 10^{(m-M)/5}$$

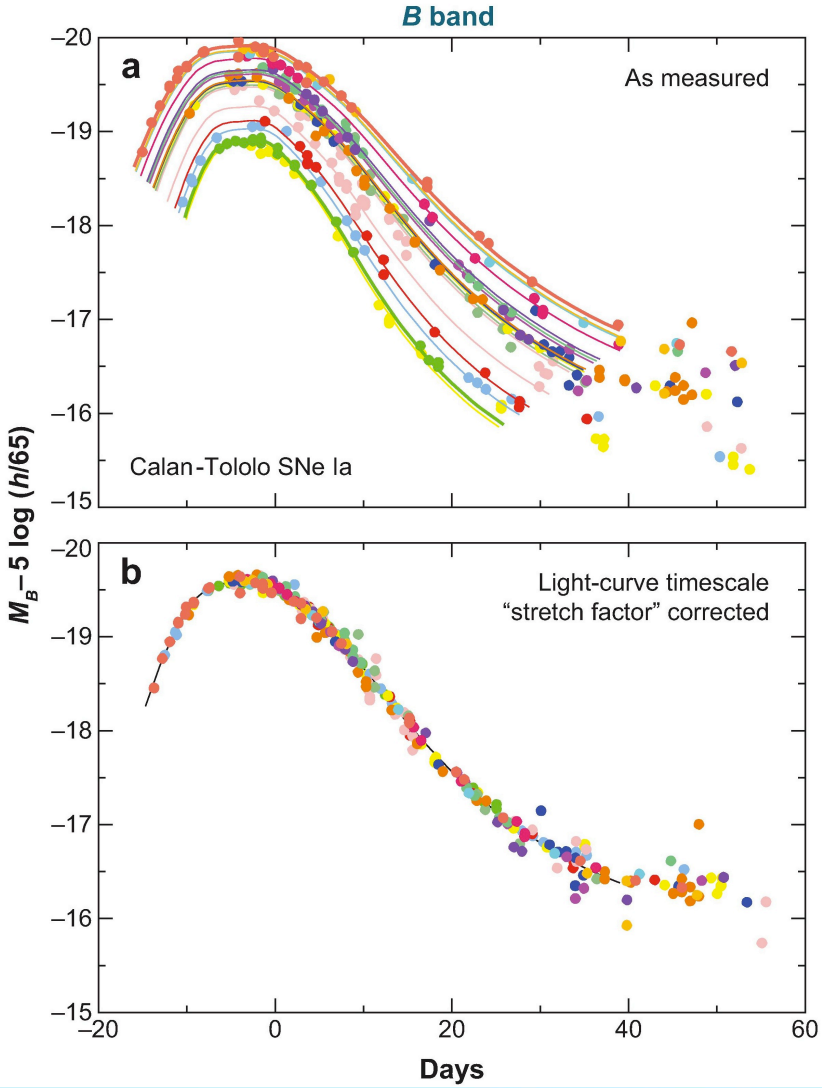
Standardkerzen mit empirischer Kalibrierung sind zum Beispiel:

- Veränderliche Sterne (Cepheiden, M hängt linear von der Periode ab)
- Supernovae vom Typ Ia (Helligkeit M im Maximum hängt von der Form der Lichtkurve ab)

Standardisierung der Lichtkurve von Supernovae Ia

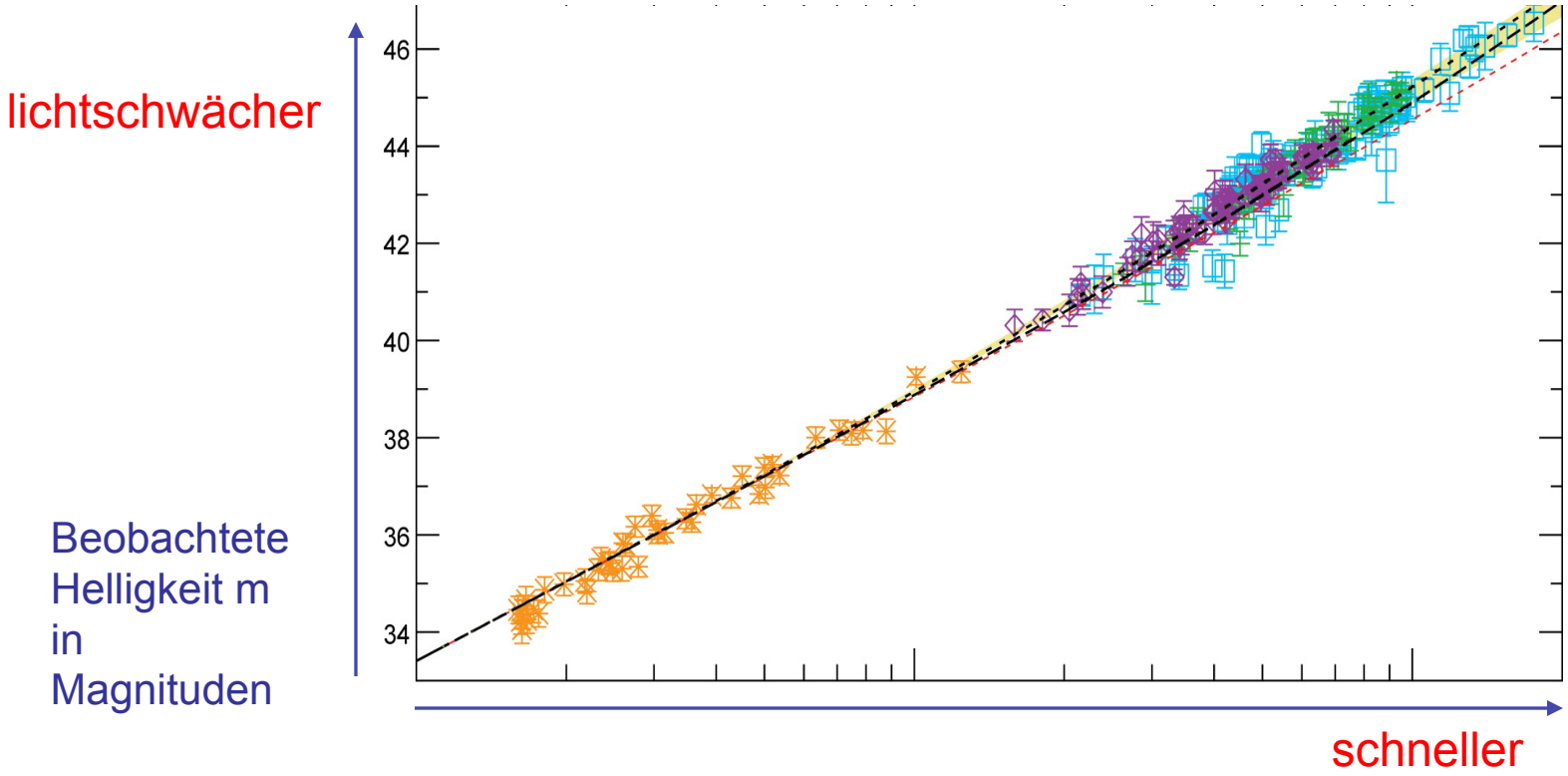
- Untersuchung einer Vielzahl von Supernovae vom Typ Ia
- Sehr helle, recht häufig auftretende Ereignisse
- Kalibrierung anhand der Form der Lichtkurve



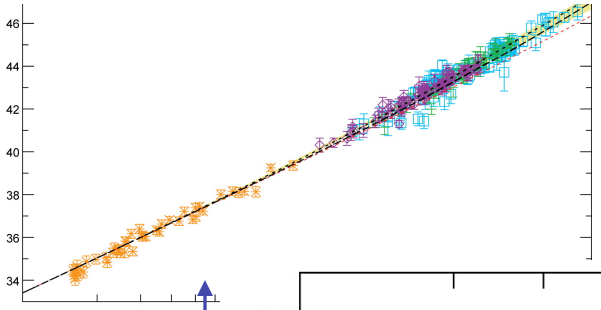


Entfernungsmessung mittels Standardkerze: Supernova Ia

- Supernova vom Typ Ia = Weißer Zwerg, der Material von einem Begleitstern ansaugt
- Explosives Kohlenstoff- und Sauerstoff-Brennen
- Sehr helle, recht häufig auftretende Ereignisse
- Referenzhelligkeit M empirisch kalibrierbar (durch Lichtkurve, Infrarotemission)



Entfernungsmessung und Kosmologie (1)



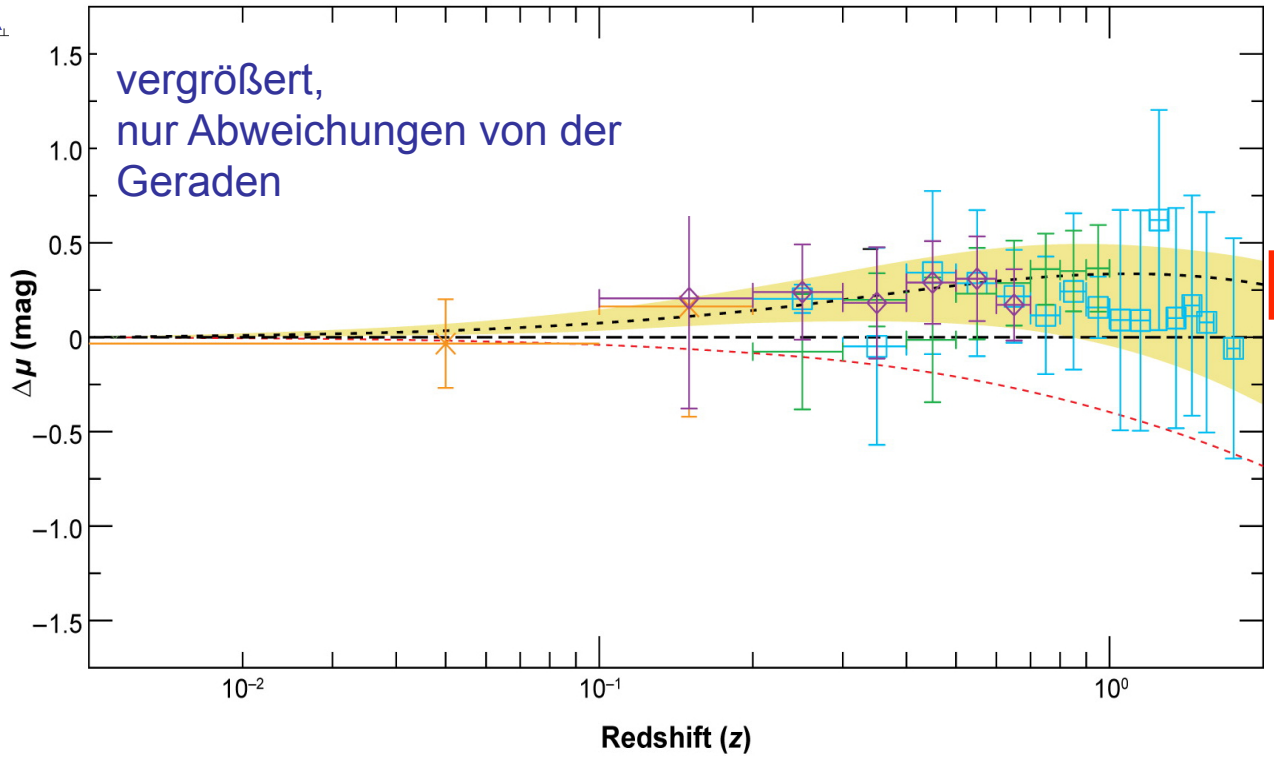
Weit entfernte Supernovae sind lichtschwächer als erwartet!

Evidenz für eine kosmologische Konstante $\Omega_\Lambda > 0$.

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

Licht-
schwächer

vergrößert,
nur Abweichungen von der
Geraden



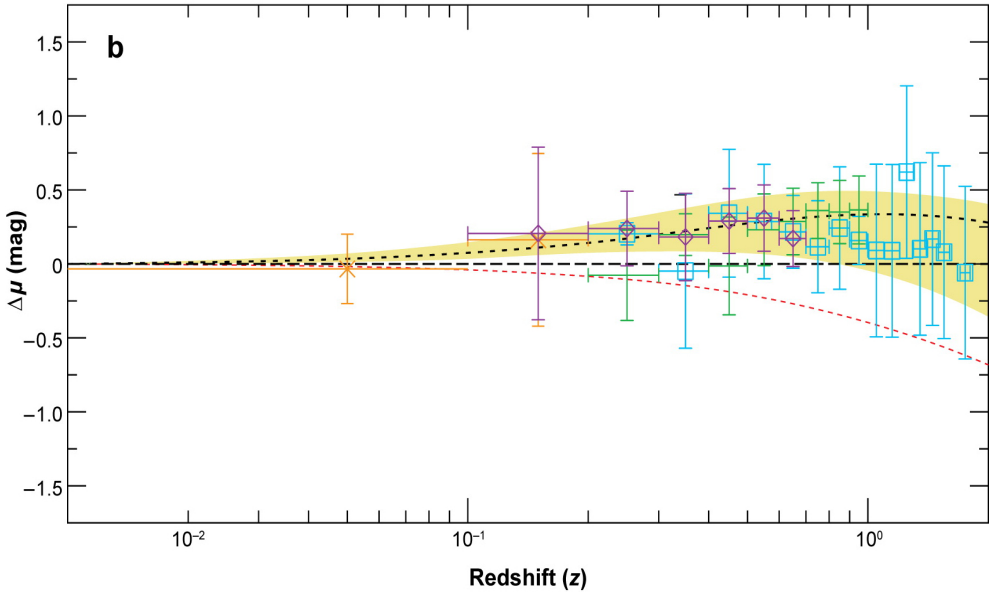
schneller

$\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$

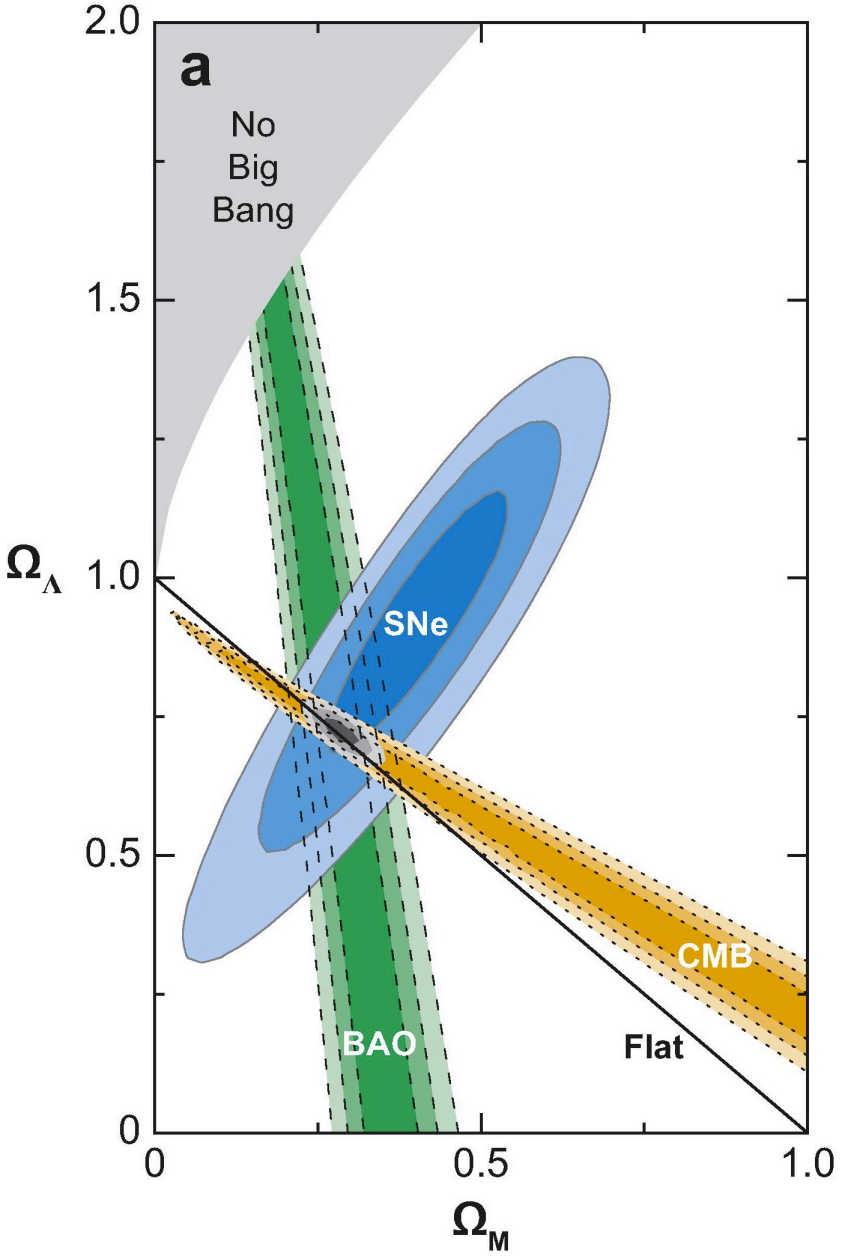
$\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.0$

$\Omega_M=1.0$, $\Omega_\Lambda=0.0$

Entfernungsmessung und Kosmologie (2)



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



Zusammenfassung

- Supernovae
- core collapse - Supernovae
- Thermonukleare Supernovae (Typ Ia)
- Entfernungsmessung im Universum