

Relativistische Astrophysik

Methoden der Astronomie für Nicht-Physiker

Björn Malte Schäfer & Markus Pössel

Astronomisches Rechen-Institut/Haus der Astronomie

20.10.2016 – 26.1.2017

Einsteins Relativitätstheorie(n)

In dieser Vorlesung: Bisherige Modelle für Objekte, Lichtausbreitung auf Basis der **klassischen Physik** (+Quantenmechanik)

Hier: **Speziellen Relativitätstheorie** (1905) und **Allgemeinen Relativitätstheorie** (1915) — deutlich anderes Verständnis von Raum, Zeit und Gravitation!

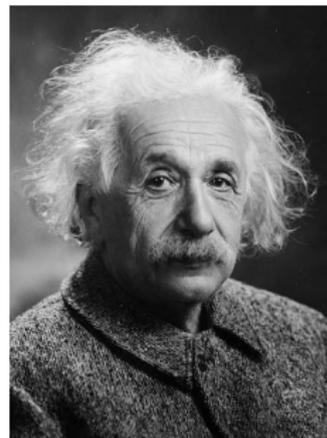


Foto via Library of Congress

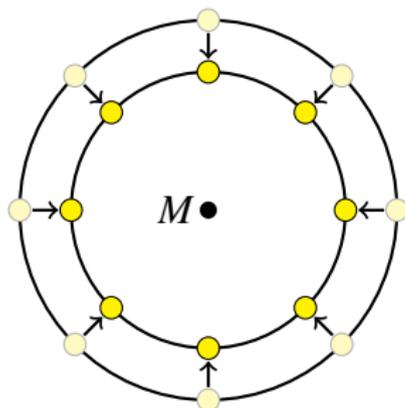
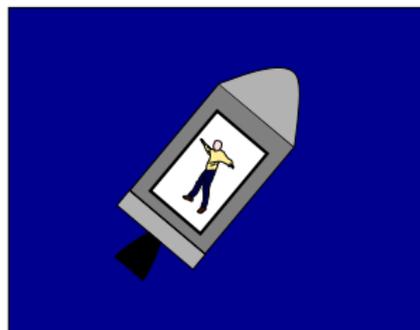
Allgemeine Relativitätstheorie

Gravitation ist keine Kraft, sondern Eigenschaft der Raumzeit-Geometrie

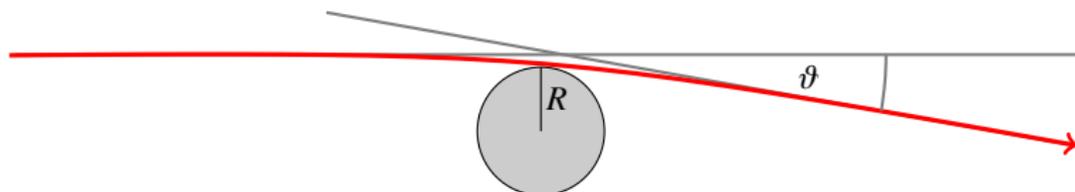
„Die Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll; die Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich verzerren soll“

(nach John Wheeler)

Voraussetzung dafür: Universalität des freien Falls! (Gravitation ist Teil der Bühne, nicht der Akteure)



Systematische Tests: Lichtablenkung



Rechnungen im Rahmen der ART ergeben (im Bogenmaß):

$$\vartheta = \frac{4GM}{c^2 R} = 1.75'' \cdot \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-1}$$

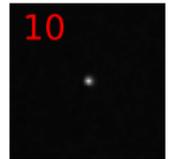
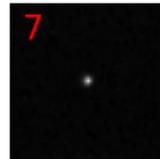
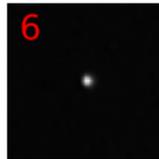
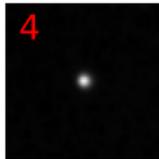
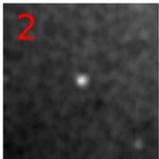
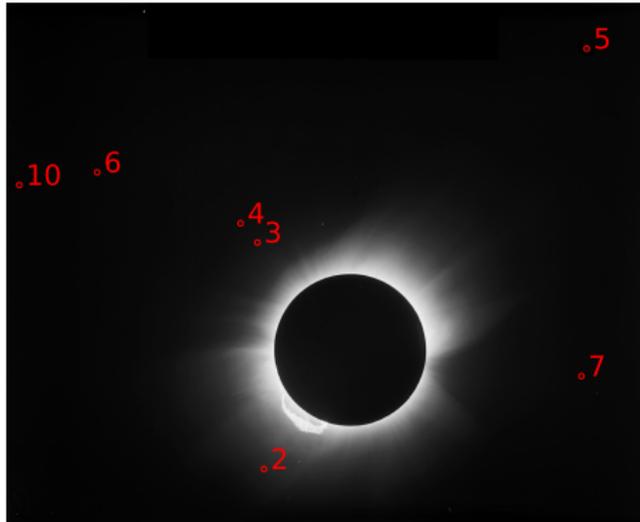
Newton'sche Rechnungen (geben nur den halben Wert) näherungsweise mit einfachen Dimensionsbetrachtungen, exakt über Kepler'sche Hyperbelbahnen herleiten.

Lichtlaufzeit-Verzögerung (Shapiro-Effekt) durch längere Wege

Systematische Tests: Lichtablenkung 1919



Systematische Tests: Lichtablenkung 1919



Heidelberger Kopie der Sobral-Platte Nr. 3

VLBI-Messungen an Quasaren

VLBI = Very Long Baseline
Interferometry: Radioteleskope
zusammenschalten

Geologischer Nutzen:
Kontinentaldrift, Erdvermessung

Lichtablenkung: Beobachtung von
Quasarpaares, Genauigkeit bis

$$\gamma - 1 < 10^{-4}$$

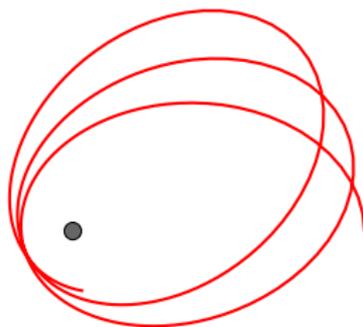
möglich (Lambert 2011)

Ende Vorlesung 12.1.2017



Bild: user:Hajor via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 2.0

Periheldrehung des Merkur



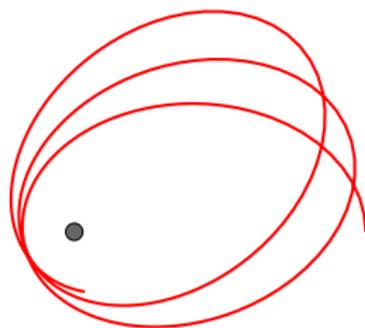
Ellipsenbahn (Kepler!) wird zur Rosette – sonnennächster Punkt (Perihel) wandert.

Periheldrehung des Merkur

Messung: Urbain Le Verrier 1859:
Gesamt-Periheldrehung 530" pro
Jahrhundert (Venus 280", Jupiter 150",
andere Planeten 100"), davon 43" pro
Jahrhundert unverstanden.

Le Verrier postuliert Planeten innerhalb der
Merkurbahn (analoges Vorgehen wie bei
Neptun)

Einstein nutzt Daten bei Formulierung der
ART, insbes. Akademiepapier vom 18.
November 1915.

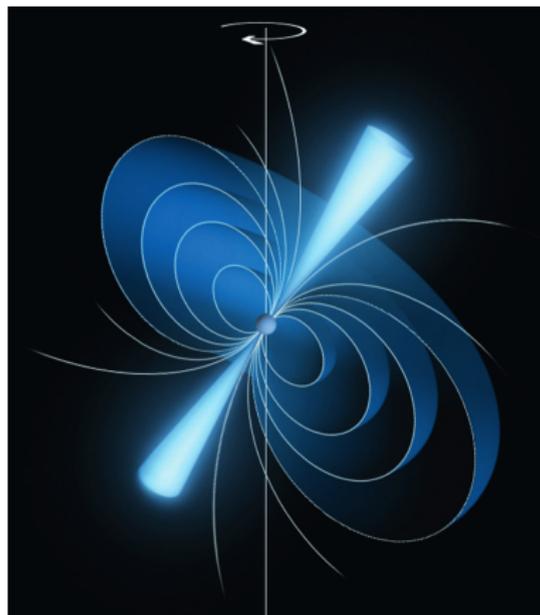


Moderne Tests

Binärpulsar PSR B1913+16
(1974) und Doppelpulsar PSR
J0737-3039 (2003)

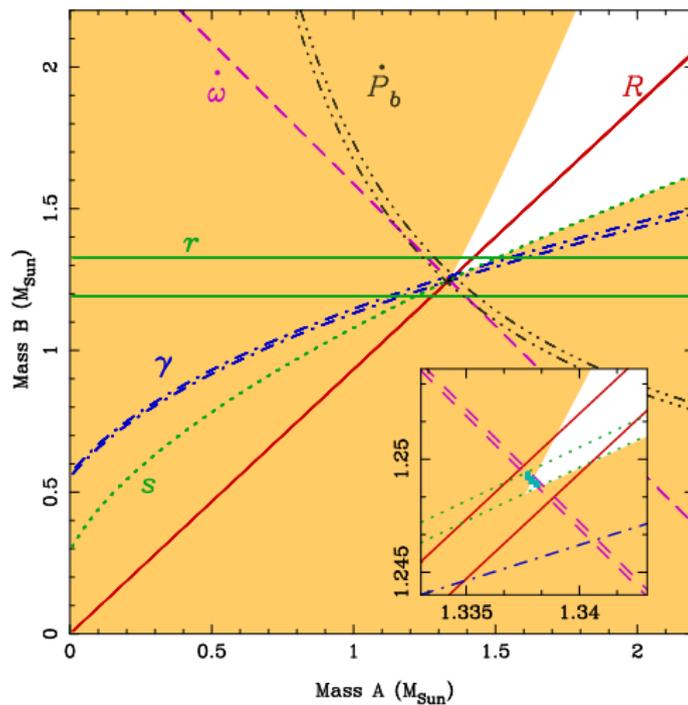
Doppelpulsar: je 1,3
Sonnenmassen, Perioden 22 ms
(A) und 2,8 s (B)

Bahndrehung (entspricht
Periheldrehung): knapp $17^\circ/\text{Jahr}$
vs. $1/100 \text{ Grad/Jh.}$



<http://www.mpg.de/mpf.2013.3>

Doppelpulsar PSR J0737-3039



Planeten-Massenbestimmung mit Pulsaren

Verzögerungseffekte durch Planeten-Masseneffekte für vier Pulsare (PSRs J0437-4715, J1744-1134, J1857+0943, J1909-3744): Massen der Planeten des Sonnensystems bestimmen!

Planet	M/M_{\odot} (Sonden etc.)	M/M_{\odot} (Pulsare)	δ_i/σ_i
Merkur	$1.66013(7) \cdot 10^{-7}$	$1.6584(17) \cdot 10^{-7}$	1.02
Venus	$2.44783824(4) \cdot 10^{-6}$	$2.44783(17) \cdot 10^{-6}$	0.05
Mars	$3.2271560(2) \cdot 10^{-7}$	$3.226(2) \cdot 10^{-6}$	0.58
Jupiter	$9.54791898(16) \cdot 10^{-4}$	$9.547921(2) \cdot 10^{-4}$	1.01
Saturn	$2.85885670 \cdot 10^{-4}$	$2.858872(8) \cdot 10^{-4}$	1.91

Massenbestimmung mit Pulsaren: Champion et al. 2010

Moderne Tests

Längst geht es nicht mehr nur um Tests der ART, sondern um Werkzeuge oder Störeffekte.

Gravitationslinsen: z.B. Massenbestimmung

Gaia-Parallaxenmessung: Für genaueste Messungen der Sternpositionen muss Lichtablenkung berücksichtigt werden!

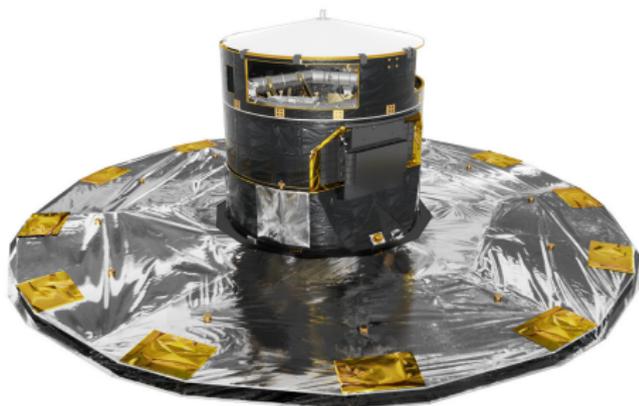
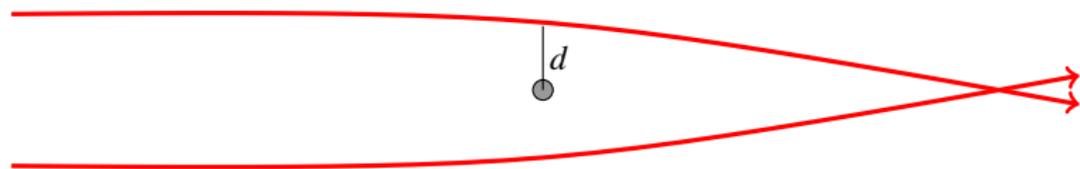


Bild: ESA/ATG medialab

Gravitationslinsen

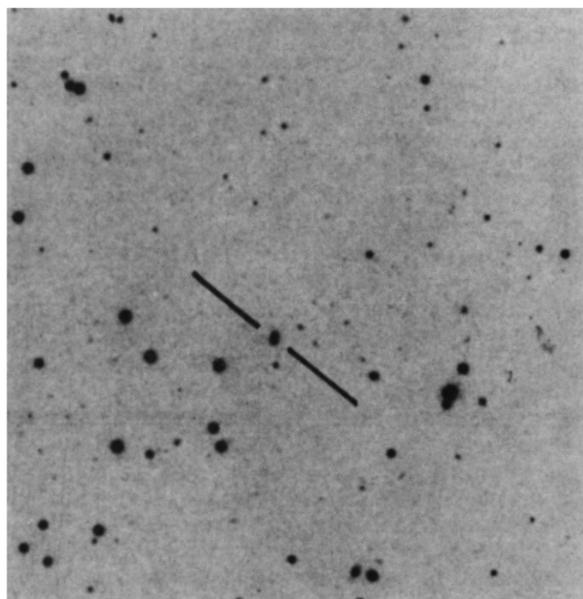


Lichtablenkung kann zu optischer Verstärkung/Vergrößerung bzw. Verzerrung führen; Grundgleichung Ablenkungswinkel (im Bogenmaß) von

$$\vartheta = \frac{4GM}{c^2 d}$$

für Lichtstrahlen, die um d vom „Linsenzentrum“ parallelversetzt sind.

Erste Gravitationslinse: Q0957+561



Walsh et al. 1979

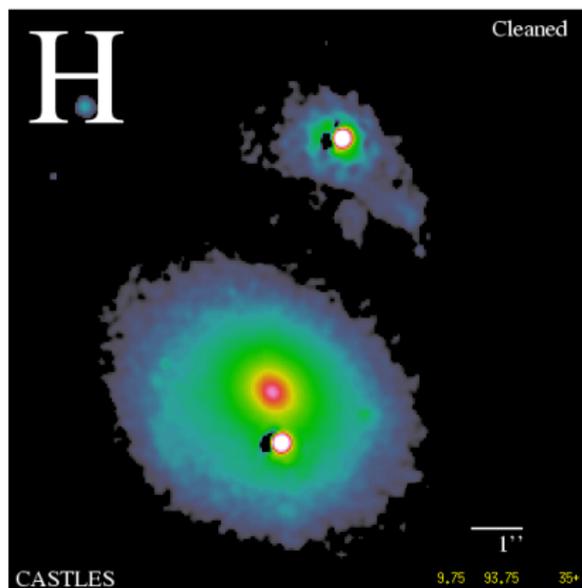
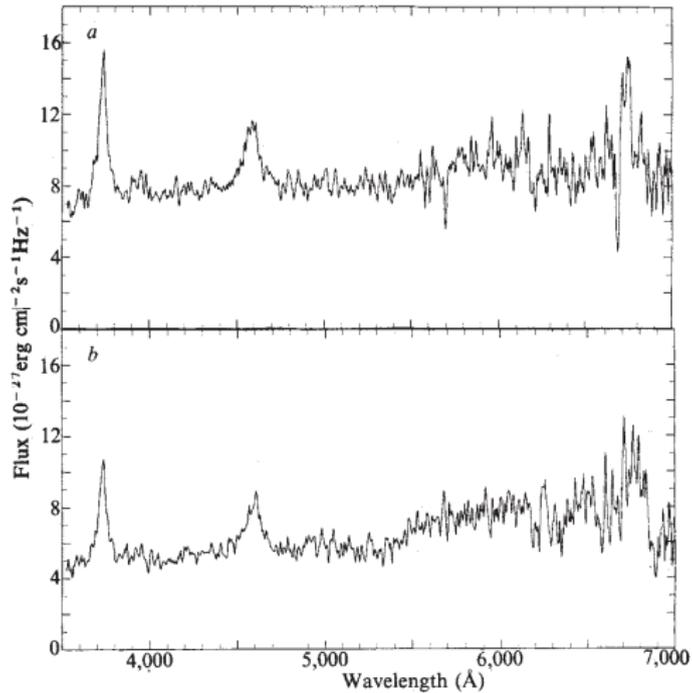


Bild: Castles Survey

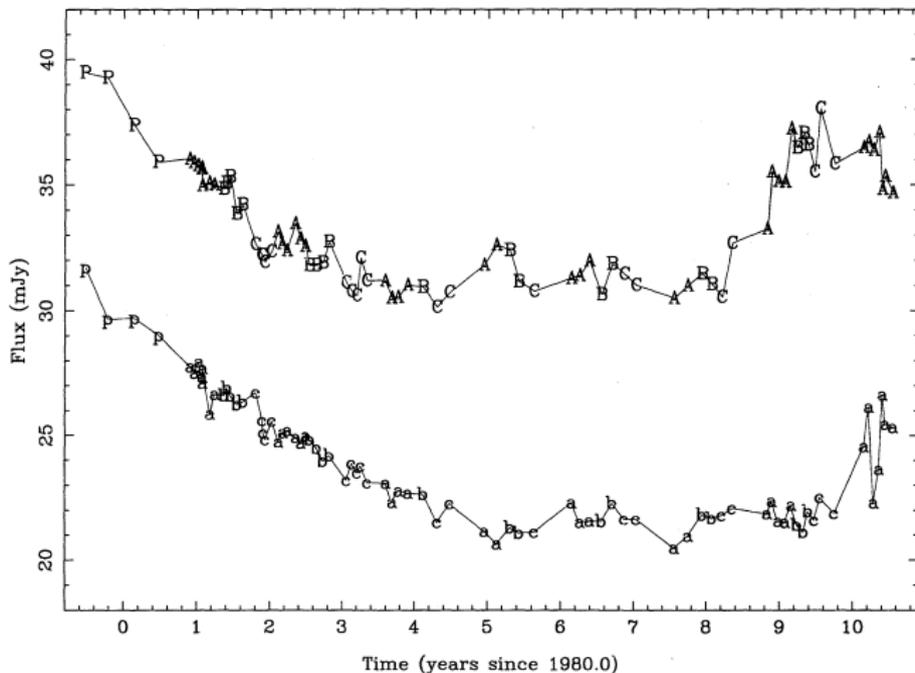
Walsh, Carswell, Weymann 1979:
Doppelquasar oder gelinster Quasar?

Erste Gravitationslinse: Q0957+561



Walsh et al. 1979

Erste Gravitationslinse: Q0957+561: Zeitverzögerung



Verzögerung 1.48 Jahre. Bild: Lehár et al. 1992

Gravitationslinse in MACS J1149.6+2223

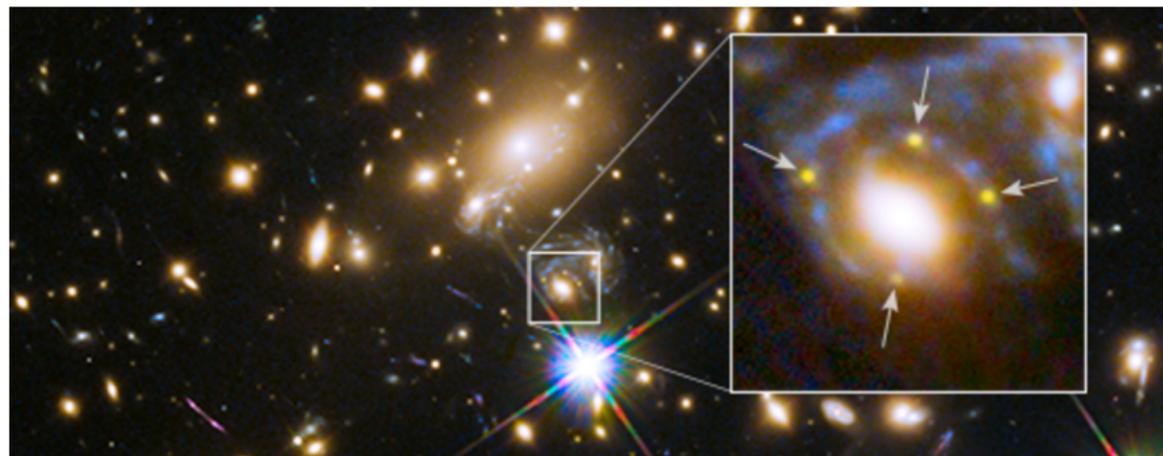


Bild: NASA, ESA, S. Rodney (John Hopkins University, USA) and the FrontierSN team; T. Treu (University of California Los Angeles, USA), P. Kelly (University of California Berkeley, USA) and the GLASS team; J. Lotz (STScI) and the Frontier Fields team; M. Postman (STScI) and the CLASH team; and Z. Levay (STScI)

Linse: Elliptische Galaxie MACS J1149.6+2223 ($z = 0.544$
entsprechend Lichtlaufzeit 5.4 Mia. Jahre), dahinter Supernova
($z = 1.491$, Lichtlaufzeit 9.4 Mia. Jahre)

Gravitationslinse in MACS J1149.6+2223

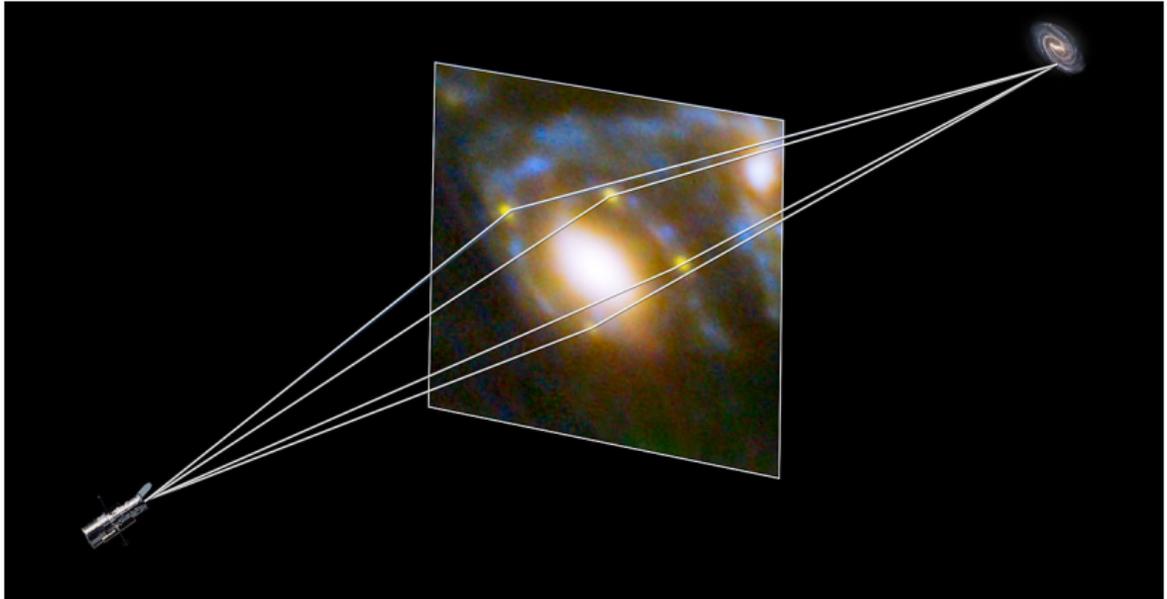


Bild: NASA / ESA

Gravitationslinse in MACS J1149.6+2223

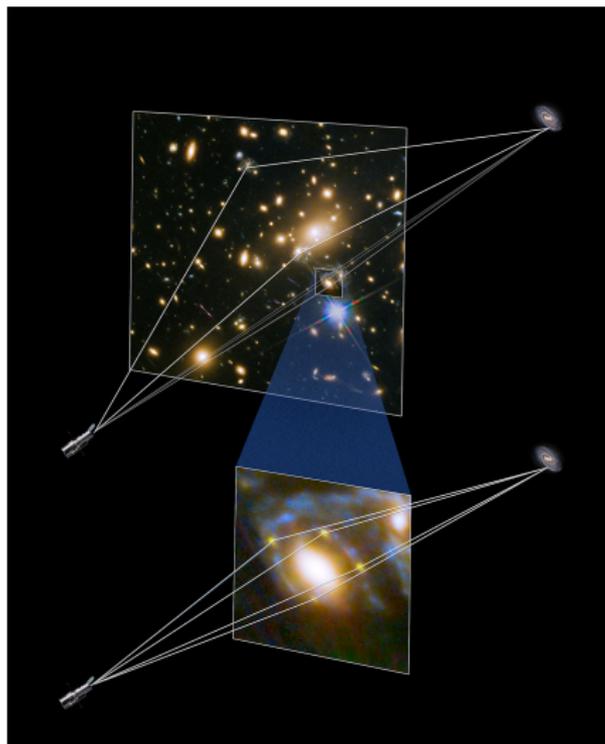


Bild: NASA / ESA

Gravitationslinse in MACS J1149.6+2223

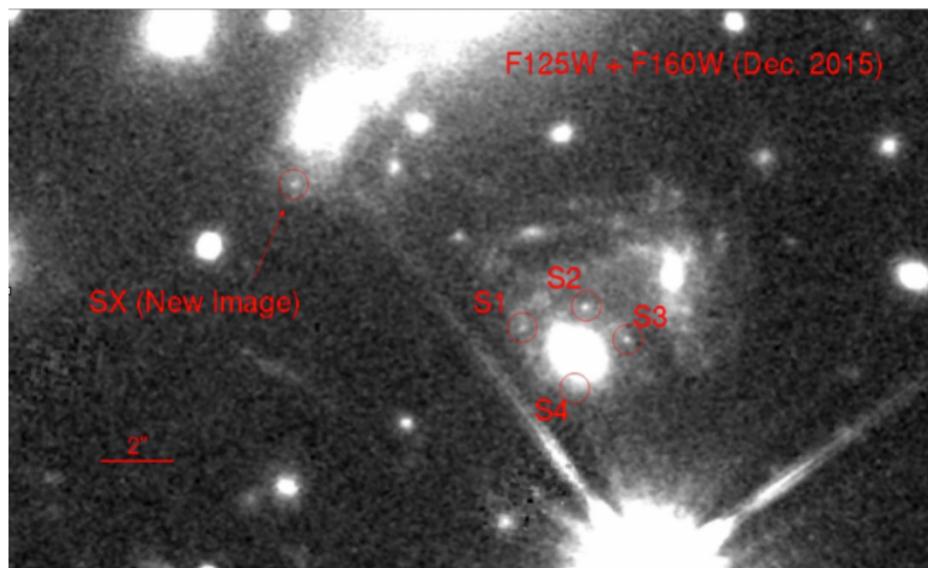


Bild: Patrick Kelly et al. mit dem Hubble Space Telescope

Dezember 2015 (nach Vorhersage im März 2015):
Erwartetes 5. Bild nachgewiesen!

J1000+0221 und Massenbestimmung

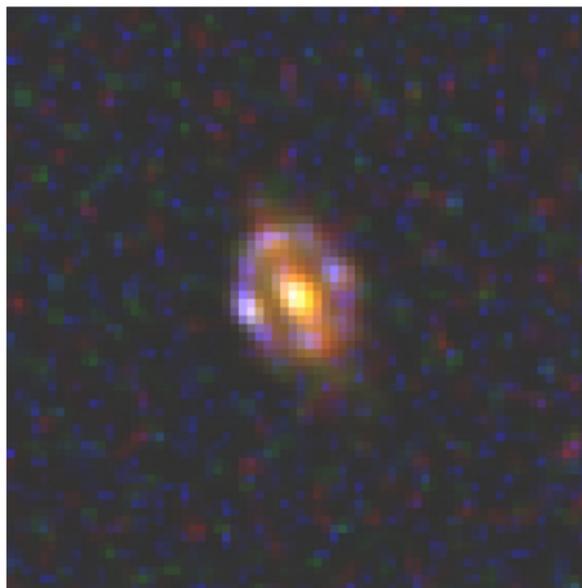


Bild: MPIA / A. van der Wel

Linse bei $z = 1.53$ (9.4 Mia. Jahre Lichtlaufzeit)

Masse bestimmbar zu $7.6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$

Massenverteilung in Galaxienhaufen: Abell 2218

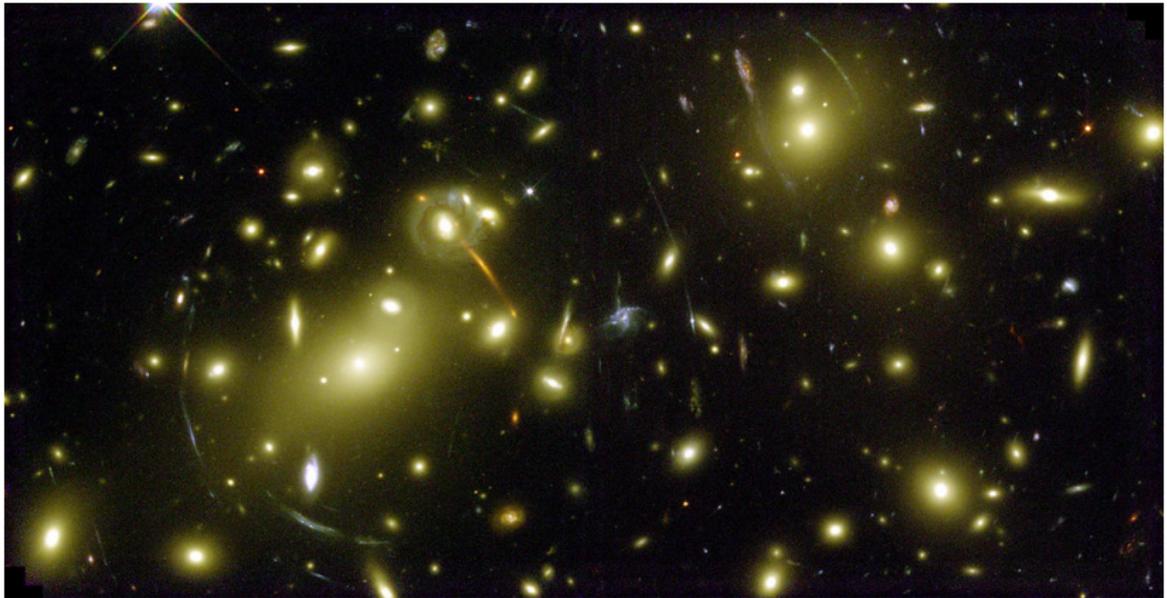


Bild: NASA, Andrew Fruchter, ERO Team [Sylvia Baggett (STScI), Richard Hook (ST-ECF), Zoltan Levay (STScI)] (STScI)

Aus Linsen-Bögen: Massenverteilung in Galaxienhaufen rekonstruierbar
(incl. Dunkle Materie!)

Abell 2744: Gravitationslinse als Teleskop

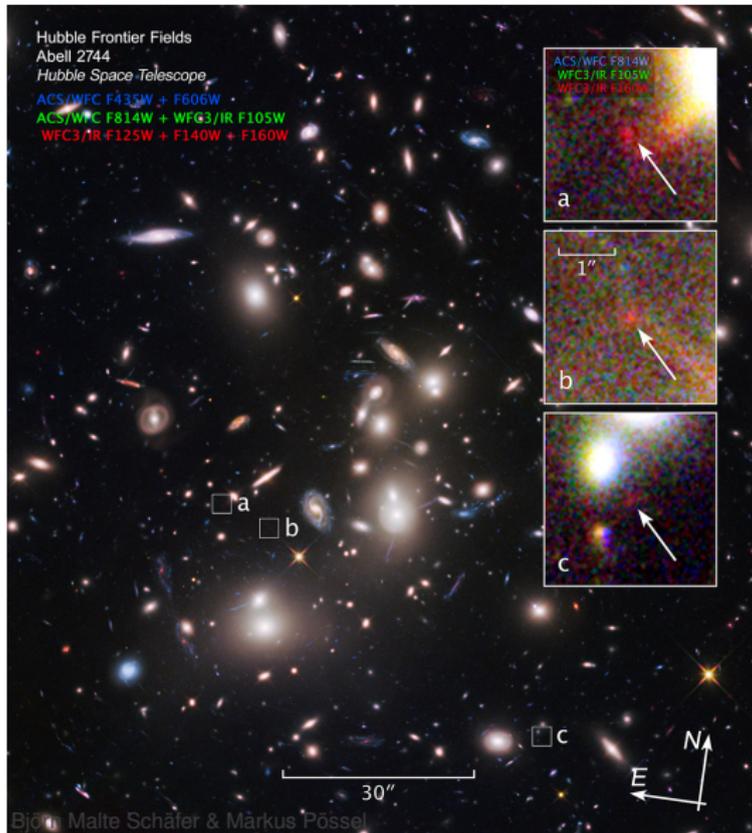


Bild: NASA, ESA, A. Zitrin (California Institute of Technology), and J. Lotz, M. Mountain, A. Koekemoer, and the HFF Team (STScI)

Microlensing

Animation: B. Scott Gaudi, Ohio State University

Microlensing event: OGLE-2013-BLG-0723

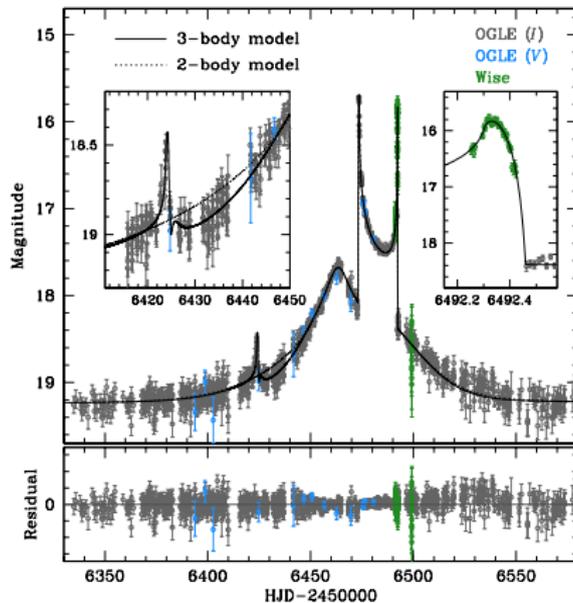


Image: Udalski et al. 2015

Venusartiger Planet ($0.69 M_{\oplus}$) umkreist Braunen Zwerg ($0.031 M_{\oplus}$) in Begleitung von Stern niedriger Masse ($0.097 M_{\oplus}$)

Weak Lensing: Bullet Cluster

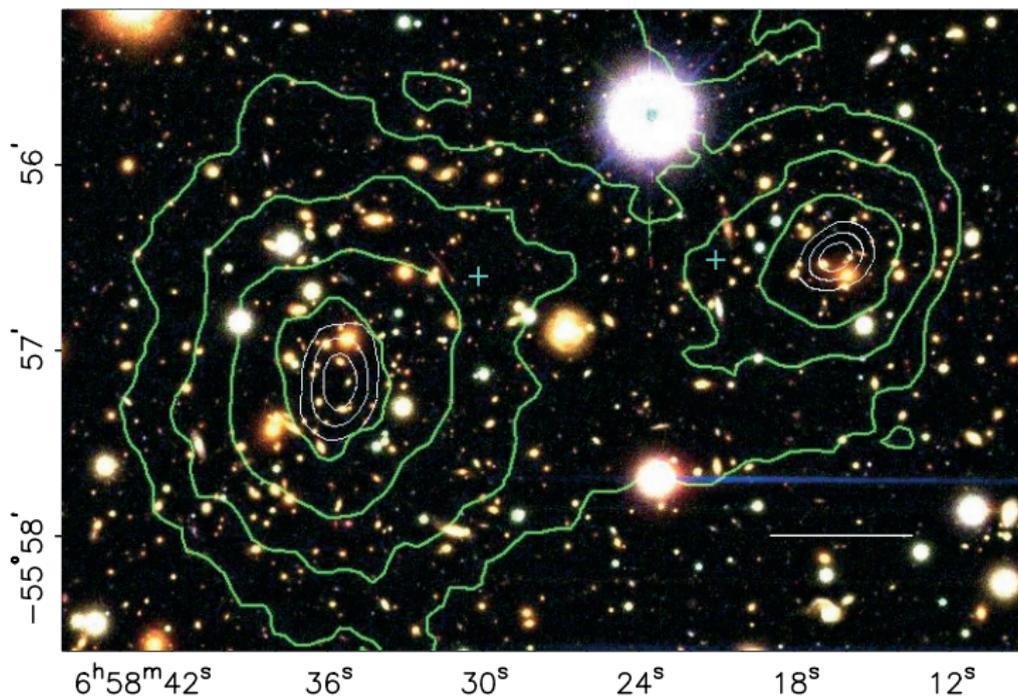
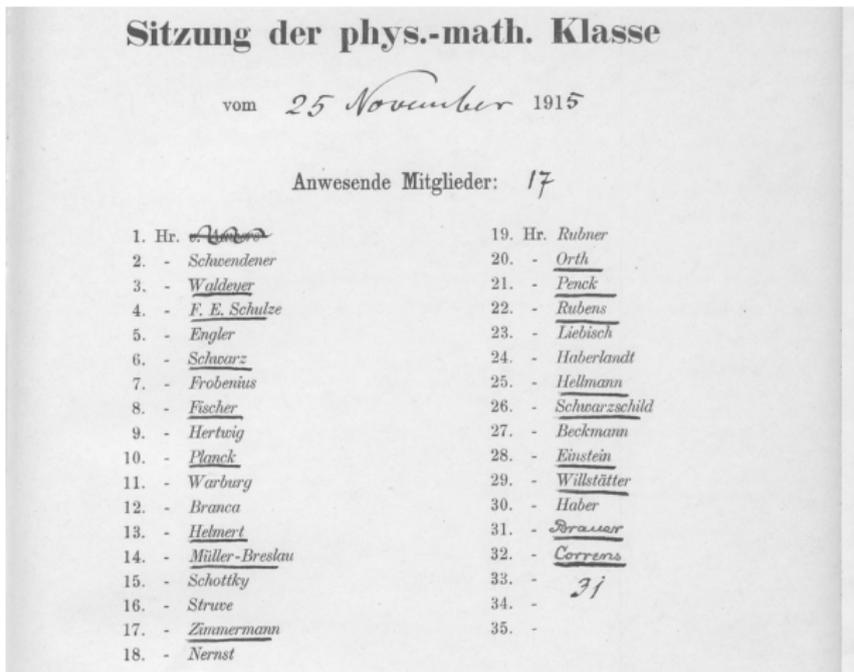


Image: Clowe et al. 2006

Stabilitätsbetrachtungen: Schwarzschild 1916



Sitzungsbericht Preussische Akademie der Wissenschaften – Schwarzschilds erste Arbeit (Massepunkt) bereits zur Sitzung vom 13. Januar 1916!

Stabilitätsbetrachtungen: Schwarzschild 1916

„Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit“, 24.2.1916

ist damit eine Grenze der Konzentration gegeben. über die hinaus eine Kugel inkompressibler Flüssigkeit nicht existieren kann. Wollte man unsere Gleichungen auf Werte $\cos \gamma_a < 1/3$ anwenden, so erhielte man bereits außerhalb des Kugelmittelpunktes Unstetigkeiten. Man kann jedoch für größeres γ_a Lösungen des Problems finden, welche wenigstens außerhalb des Kugelmittelpunktes stetig sind, wenn man zu dem Fall $\lambda = 0$ übergeht und die Bedingung $K = 0$ (Gl. 27) erfüllt. Auf dem Wege über diese Lösungen, welche freilich physikalisch bedeutungslos sind, da sie unendlichen Druck im Mittelpunkt ergeben, kann man zu dem Grenzfall einer auf einen Punkt konzentrierten Masse übergehen und findet dann auch die Relation $\rho = \alpha^3$ wieder, welche nach der früheren Untersuchung für den Massenpunkt gilt. Es sei hier noch bemerkt, daß man von einem Massenpunkt nur reden kann, insofern man die Variable r benutzt, welche sonst auffälligerweise für die Geometrie und Bewegung innerhalb unsres Gravitationsfeldes keine Rolle spielt. Für einen außen messenden Beobachter folgt gemäß (40), daß eine Kugel von gegebener Gravitationsmasse $\alpha^2 k^2$ keinen kleineren außen gemessenen Radius haben kann, als:

$$P_a = \alpha.$$

Für eine Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit wird die Grenze $9/8\alpha$. (Für die Sonne wird α gleich 3 km, für eine Masse von 1 g gleich $1.5 \cdot 10^{-28}$ cm.)

Schwarzschildradius

Allgemein (Ring-Kriterium, Thorne): Wird ein Körper so zusammengepresst, dass er in allen Orientierungen durch einen Ring mit dem Radius

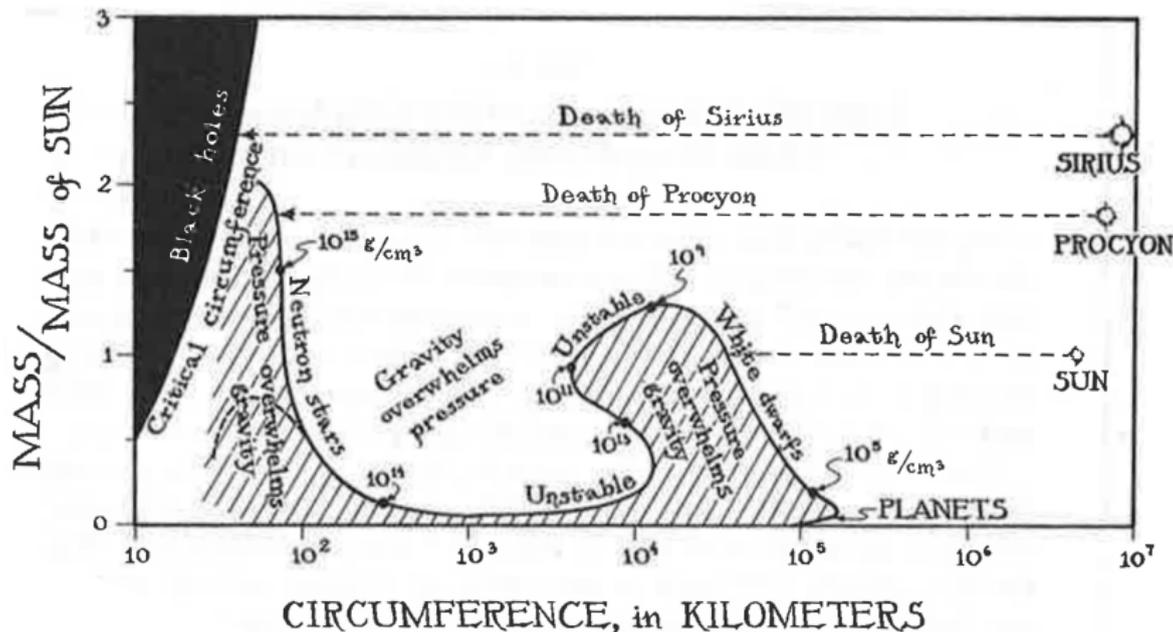
$$\mathcal{R} = \frac{2GM}{c^2}$$

(Schwarzschildradius) passt, handelt es sich um ein Schwarzes Loch:

Eine Raumregion, in die Licht und Materie hineinfallen können, aus der aber nichts, was einmal hineingefallen ist, wieder herauskommen kann. Begrenzungsfläche heißt *Horizont*.

Stabilitätsrechnungen

Erst Oppenheimer, Volkoff u.a., hier genauere Rechnungen (Harrison, Wheeler, Wakano, Thorne und andere 1950+):



Quelle: Abb. 5.5. in Kip Thorne, *Black Holes and Time Warps*, W.W. Norton 1994

Sternentwicklung

Stellare Schwarze Löcher als Endzustand der Sternentwicklung sehr massereicher Sterne – Supernovae (mit Endprodukt Neutronenstern) vergleichsweise gut bekannt, Entstehung Schwarzer Löcher weniger gut.

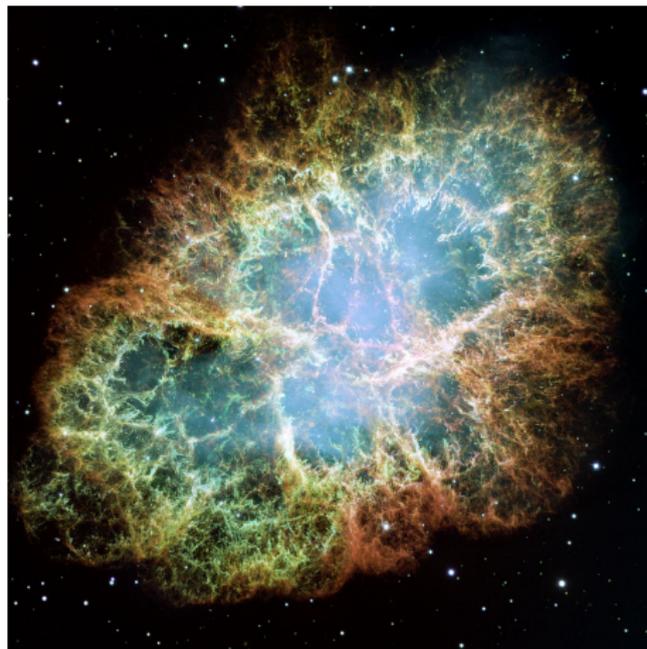
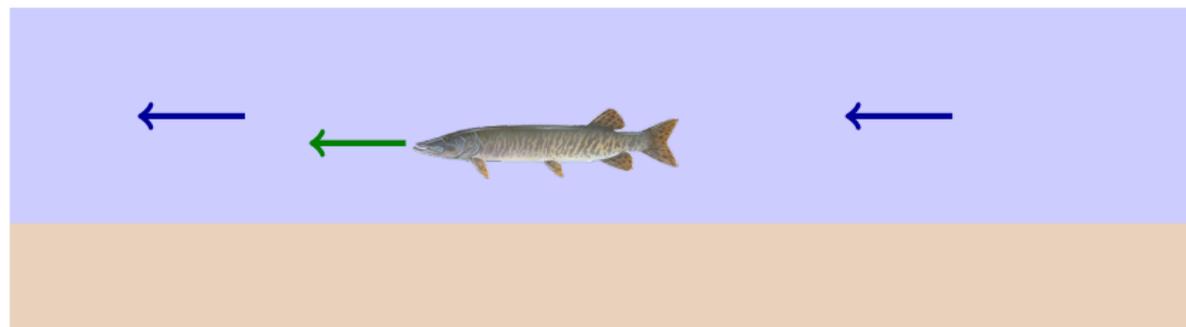


Bild: NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)

Flussmodell für Schwarze Löcher



1968ff Theorie Schwarzer Löcher (Wheeler, Penrose, ...)

Flussmodell: Fische schwimmen mit konstanter Geschwindigkeit („Fischgeschwindigkeit“); Fluss fließt je nach Profil schneller oder langsamer

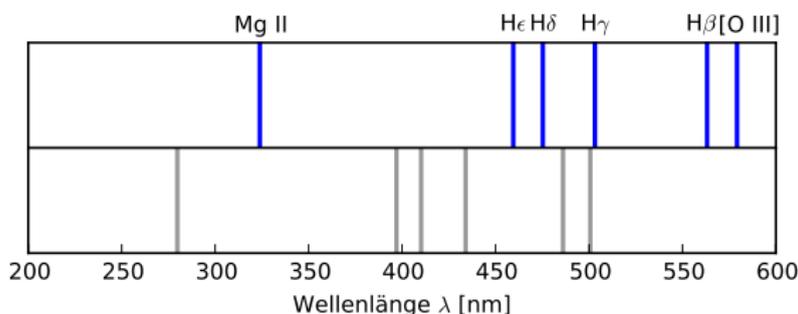
Flussgeschwindigkeit > Fischgeschwindigkeit: Horizont

Flussmodell ist sogar exakt formulierbar, cf.

<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0411060>

Der erste Quasar: 3C 273

Maarten Schmidt 1963: Untersucht Radioquelle 3C 273



Objekt sieht aus wie Stern
(d.h. strukturlos): Schmidt
benennt es "Quasistellare
Radioquelle", kurz *Quasar*.
Aber: so hell wie 10^{12}
Sonnen, und kurzfristige
Schwankungen (=kompakt!)

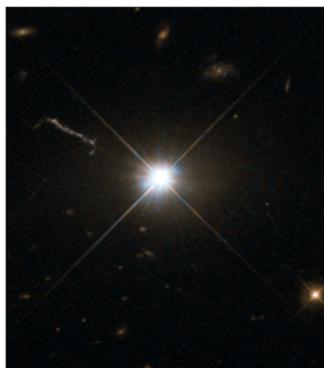


Bild: NASA/ESA Hubble

Schwarze Löcher

Kernregionen aktiver Gaxien:

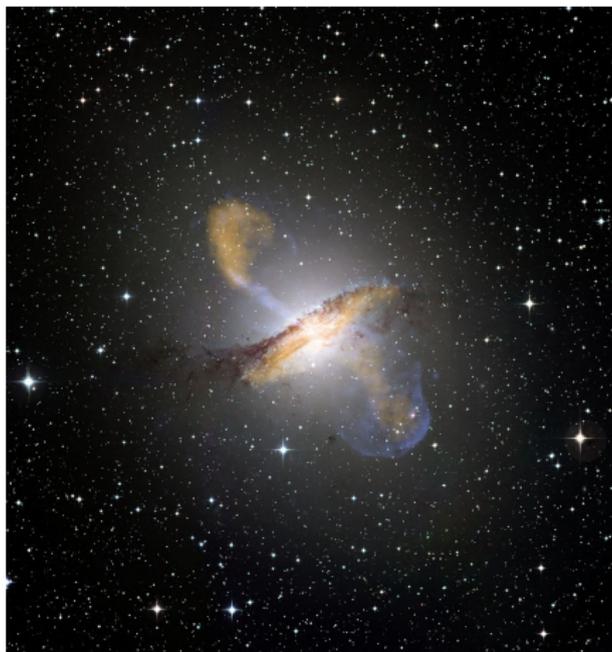


Bild: ESO/WFI (Optical); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (Submillimetre); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (X-ray)

Energiegewinn

Körper der Masse m , der aus dem Unendlichen auf einen kompakten Körper mit Masse M und Radius R fällt, hat beim Aufprall die Bewegungsenergie

$$E_{kin} = m \frac{GM}{R}.$$

Definiere die (massenbezogene) Energieeffizienz einer Reaktion als

$$\eta \equiv \frac{\text{freigesetzte Energie}}{\text{Ruheenergie der beteiligten Teilchen}}$$

Einige Werte für die Energieeffizienz

Brennwert einiger Stoffe als Maß für Energieeffizienz chemischer Reaktionen:

Material	Brennwert in MJ/kg	η
Wasserstoff H_2	141.8	$1.8 \cdot 10^{-10}$
Ethanol C_2H_6O	29.7	$1.1 \cdot 10^{-10}$
Propan C_3H_8	50.4	$1.2 \cdot 10^{-10}$
Steinkohle (50% C)	30	$1.4 \cdot 10^{-10}$

Vorsicht: Brennwert ist auf Brennstoff bezogen;
für η -Berechnung auch Sauerstoff miteinbeziehen!

Einige Werte für die Energieeffizienz

Kernspaltung (hier: U-235):

$$\eta_{ks} = \frac{200 \text{ MeV}}{235 \cdot 938 \text{ MeV}} = 0,9 \text{ Promille}$$

Kernfusion: pp I (Sonne):

$$\eta_{kf} = \frac{26 \text{ MeV}}{4 \cdot 938 \text{ MeV}} = 0,7\%$$

Akkretion von Materie auf einen kompakten Körper (theoretische Obergrenzen):

$$\eta = \frac{GM}{c^2 R} = \begin{cases} 0,2 \text{ Promille} & \text{Weißer Zwerg} \\ 20\% & \text{Neutronenstern} \\ 50\% & \text{Schwarzes Loch} \end{cases}$$

Ende Vorlesung 19.1.2017

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße



Bild: ESO/S. Guisard (www.eso.org/sguisard)

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

In den 1990er Jahren dank
Adaptiver Optik an
Großteleskopen:

Reinhard Genzel (MPI
Extraterrestrische Physik,
VLT der ESO)

und

Andrea Ghez (UCLA,
Keck-Teleskope)

nehmen das Zentrum der
Milchstraße auf's Korn:
Sagittarius A*

Animation: Ghez et al. / UCLA

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

Sterne seit mittlerweile 20 Jahren verfolgt – Massenbestimmung
via Kepler: 2,6 Millionen Sonnenmassen

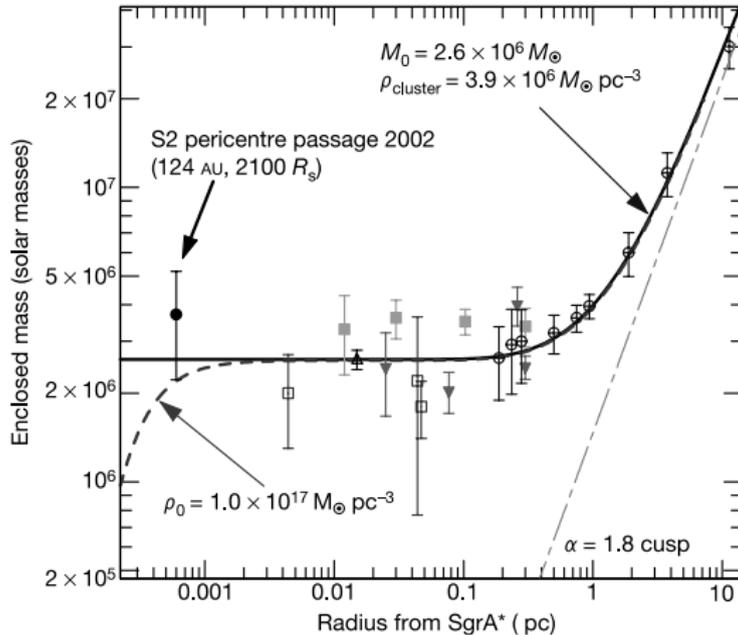
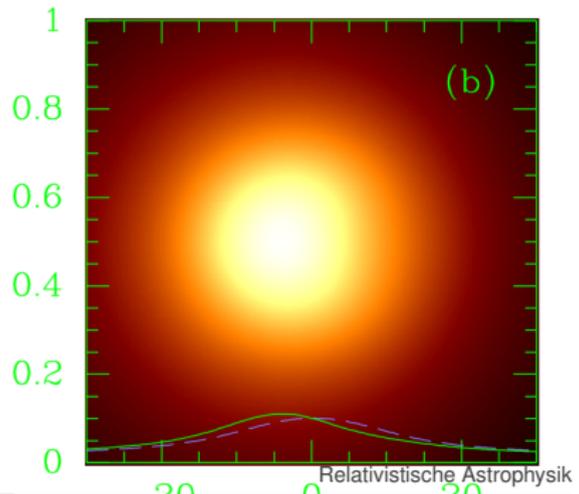
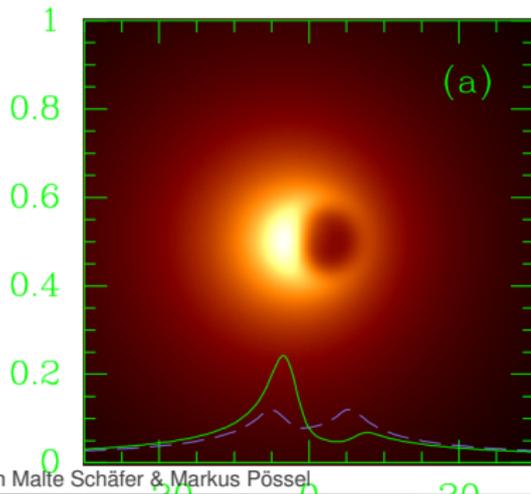


Bild aus Schödel et al. 2002

Reichte das zum Nachweis

Ausschlussprinzip: Was kann es sonst sein? Aber: Bei ganz starker Gravitation war ART noch nicht getestet!

Nachweis Horizont durch direkte Abbildung – Ablenkungseffekte plus Schwarzes Loch? \Rightarrow Event Horizon Telescope



Gravitationswellen

Wellenartige Störungen, breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus;
Analogie zu elektromagnetischen Wellen (aber: nicht Dipol,
sondern Quadrupol)

Erstmals Einstein 1916, aber lange Zeit unklar, ob
Koordinateneffekt oder real.

Nobelpreis 1993 für indirekten Nachweis (Effekte auf Bahn eines
Binärpulsars)

Entstehen bei gewaltigen, systematischen Massenbewegungen:
astronomischer Informationsträger,
„Gravitationswellen-Astronomie“, Signale von Prozessen, die man
sonst nicht beobachten kann

Wirkung von Gravitationswellen

Wirkung auf kräftefrei im Weltraum schwebende Teilchen (extrem stark übertrieben, tatsächliche Größenordnung relative Abstandsänderungen $h \sim 10^{-21}$):

Nachweis mit interferometrischem Detektor

Nachweis mit interferometrischem Detektor

Gravitationswellen

18.9.2015 –
12.1.2016: Advanced
LIGO erster
„observing run“ (O1),
vorher „engineering
run“ für die
verbesserte Technik
u.a. aus Deutschland
(MPI für
Gravitationsphysik)

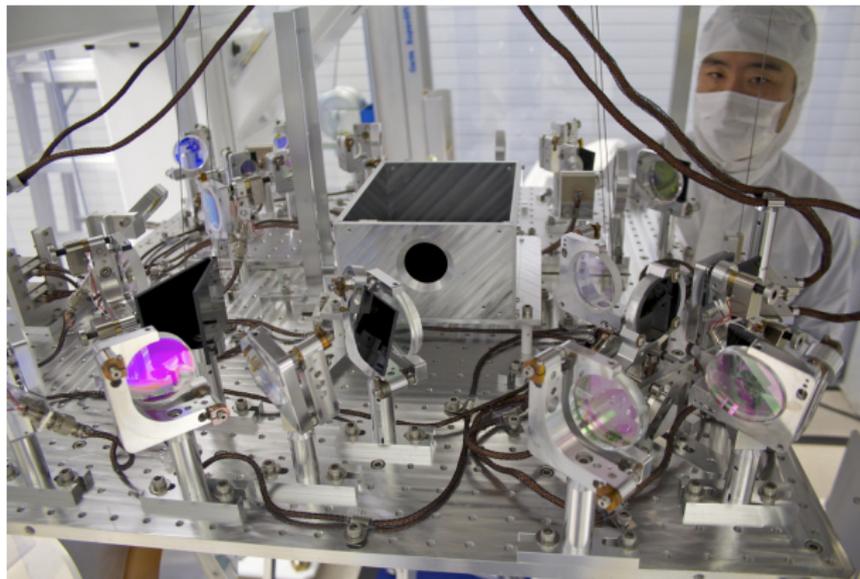


Bild: Caltech/MIT/LIGO Lab

Störquellen limitieren die Messung



Bild: Caltech/MIT/LIGO Lab

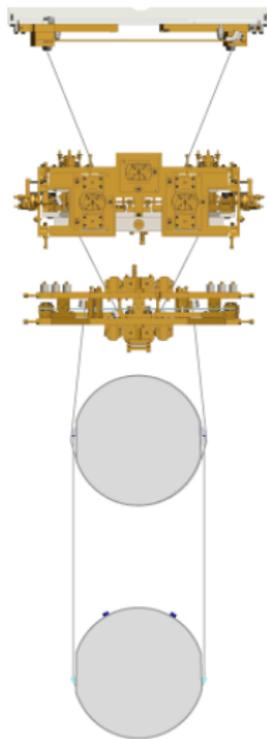


Bild: Abb. 6 in Pitkin et al. 2011
Relativistische Astrophysik

Advanced LIGO-Detektor-Layout

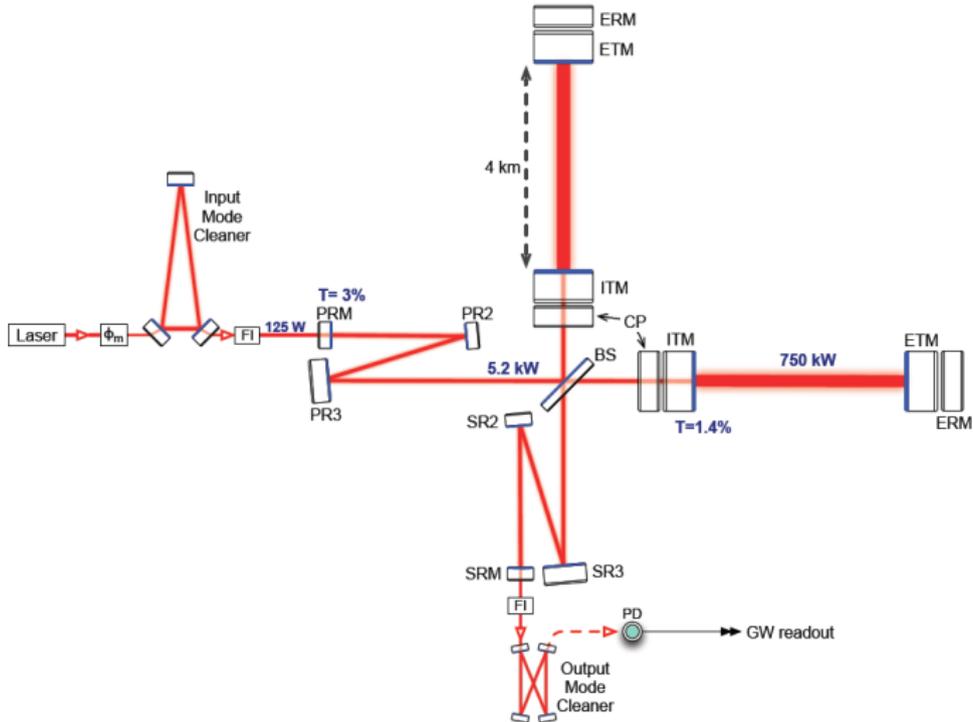


Abb. 1 in LIGO Scientific Collaboration 2014

Suchen nach bekannten Signalen

Suche nach bekannten Signalen: Verschmelzende Neutronensterne und/oder Schwarze Löcher. Problem: Vollständige Raumzeitsimulationen nötig, numerische Relativitätstheorie

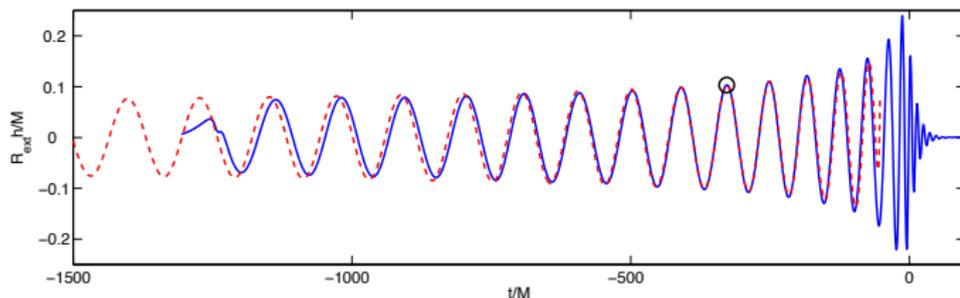


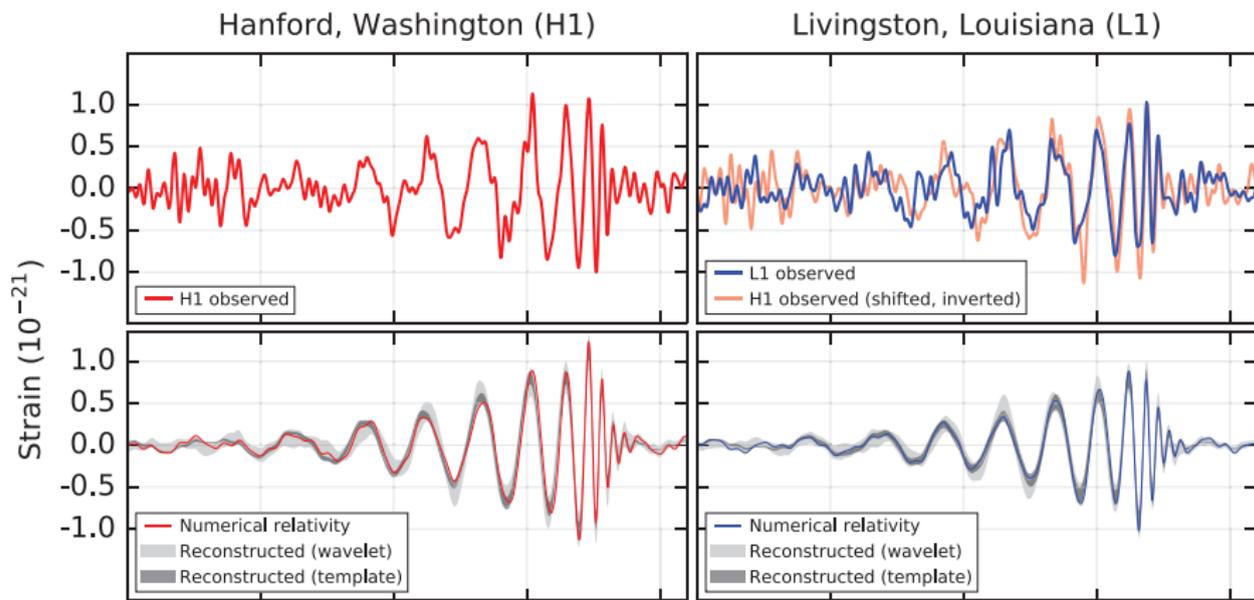
Bild: Baker et al.

2006

Simulationen erst ab 2005 stabil! (Frans Pretorius)

Gravitationswellen-Nachweis

Signal vom 14.9.2015, veröffentlicht 11.2.2016.

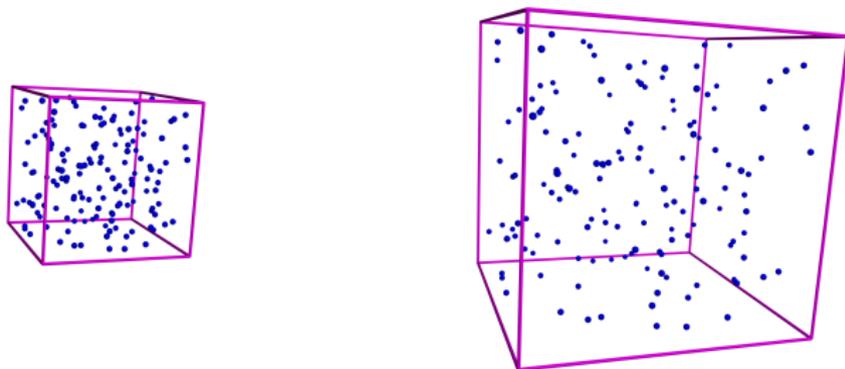


Gravitationswellen-Nachweis

Interpretation (Vergleich mit Modellen): Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher

Schwarzloch-Masse 1	$32 - 41 M_{\odot}$
Schwarzloch-Masse 2	$25 - 33 M_{\odot}$
Endmasse	$58 - 67 M_{\odot}$
Energie Gravitationswellen	$2.5 - 3.5 M_{\odot} c^2$
Abstand von uns	$0.75 - 1.9 \text{ GLj}$

Expandierendes Universum



Aus Hubble-Diagramm (original und später): Expansion mit Skalenfaktor $a(t)$ erklärt Beobachtungen.

Dynamik von $a(t)$? Annahme: Homogenität, Isotropie

Modellsituation zur Dynamik

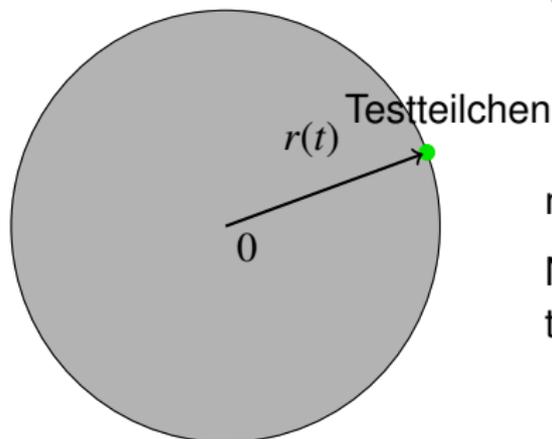
Wie verändert sich

$$r(t) = \frac{a(t)}{a_0} r_0$$

mit der Zeit?

Newton: Nur Masse im Kugellinneren trägt bei. Gravitationsgesetz:

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2}.$$



Welche Masse trägt bei?

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2}.$$

In der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es mehr Gravitationsladungen als nur die Masse!

- 1 Energie und Masse sind äquivalent, $E = mc^2$
- 2 *Druck* trägt bei (wichtig z.B. bei Gravitationskollaps von Sternen)

In der Situation, um die es hier geht, ist effektiv

$$M = M_E + M_P = U/c^2 + V \frac{3p}{c^2} = V(\rho + 3p/c^2)$$

mit U der Gesamtenergie, V dem Volumen der Massenkugel, ρ der Massendichte (= Energiedichte/ c^2) und p dem Druck darin.

Gleichungen für $a(t)$: Newton'sche Näherung

Newton'sche Ableitung (siehe Handreichung) führt auf korrekte Form der **Friedmann-Gleichung 2. Ordnung**

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

zur **zeitlichen Änderung der Dichte**

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}(\rho + p/c^2) = 0$$

und zur **Friedmann-Gleichung erster Ordnung**

$$\frac{\dot{a}^2 + Kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho.$$

Kosmologische Modelle

Bisher haben wir vor allem Modelle für isolierte Objekte behandelt.
Jetzt: kosmologische Modelle = Universum als Ganzes

	Isolierte Objekte	Universum
Vereinfachung:	Kugelsymmetrie	Homogenität und Isotropie
Materie:	Zustandsgleichung	Zustandsgleichung
Dynamik:	Druck/Gravitation	Friedmann-Gleichung

Unterschiedliche Arten von Materie

Zustandsgleichung beschreibt Materieeigenschaften:

$$p = p(\rho).$$

Sobald definiert, wird

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} (\rho + p/c^2) = 0$$

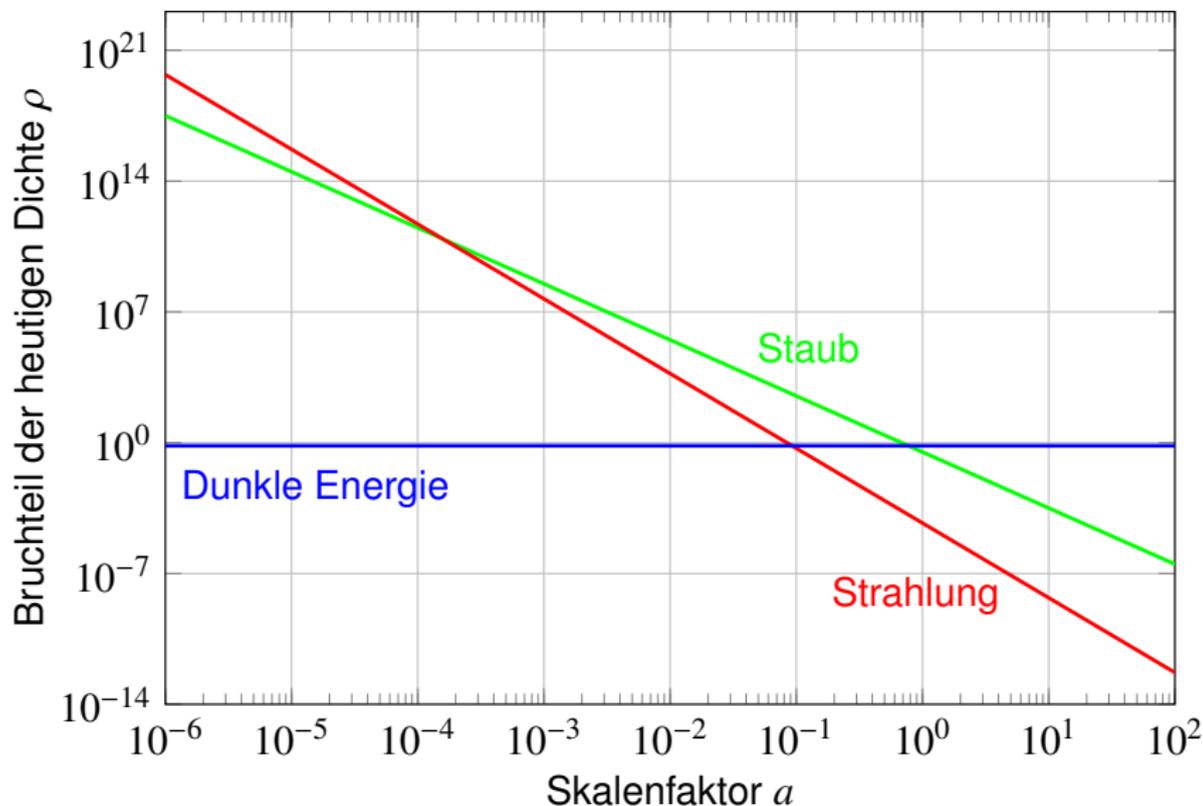
direkt lösbar.

Einfache Arten von Materie

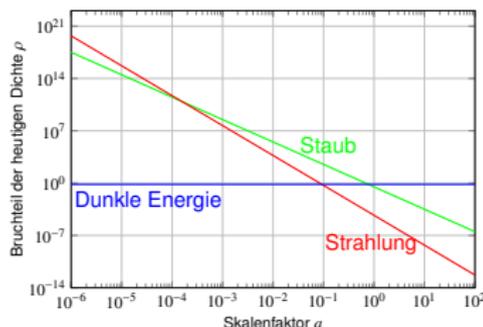
	Zustandsgleichung	Dichte
Staub	$p = 0$	$\rho(t) \sim 1/a(t)^3$
Strahlung	$p = \rho c^2 / 3$	$\rho(t) \sim 1/a(t)^4$
Dunkle Energie	$p = -\rho c^2$	$\rho(t) = \text{const.}$

Alternativ: Anstatt Dunkler Energie kosmologische Konstante Λ

Grenzfälle: Epochen des Universums



Unterschiedliche Epochen in Abhängigkeit von $a(t)$



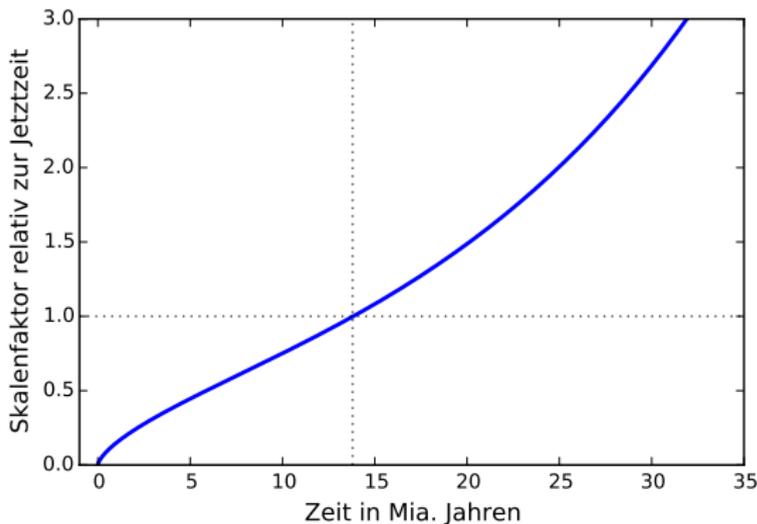
Je nach Epoche dominiert ein unterschiedlicher Anteil — betrachte Lösungen mit nur einer Sorte $\Omega \neq 0$.

Zweimal Vorsicht:

- Noch keine Aussage zur zeitlichen Entwicklung — möglicherweise einige a -Werte gar nicht erreicht!
- In Wirklichkeit kann sich Materie verändern — Teilchen benehmen sich erst wie Staub (nicht-relativistisch), bei kleinerem a dann wie Strahlung (relativistisch)

FLRW-Raumzeit mit $K = 0, \Omega_\Lambda > 0$

Daraus unser eigenes Universum:



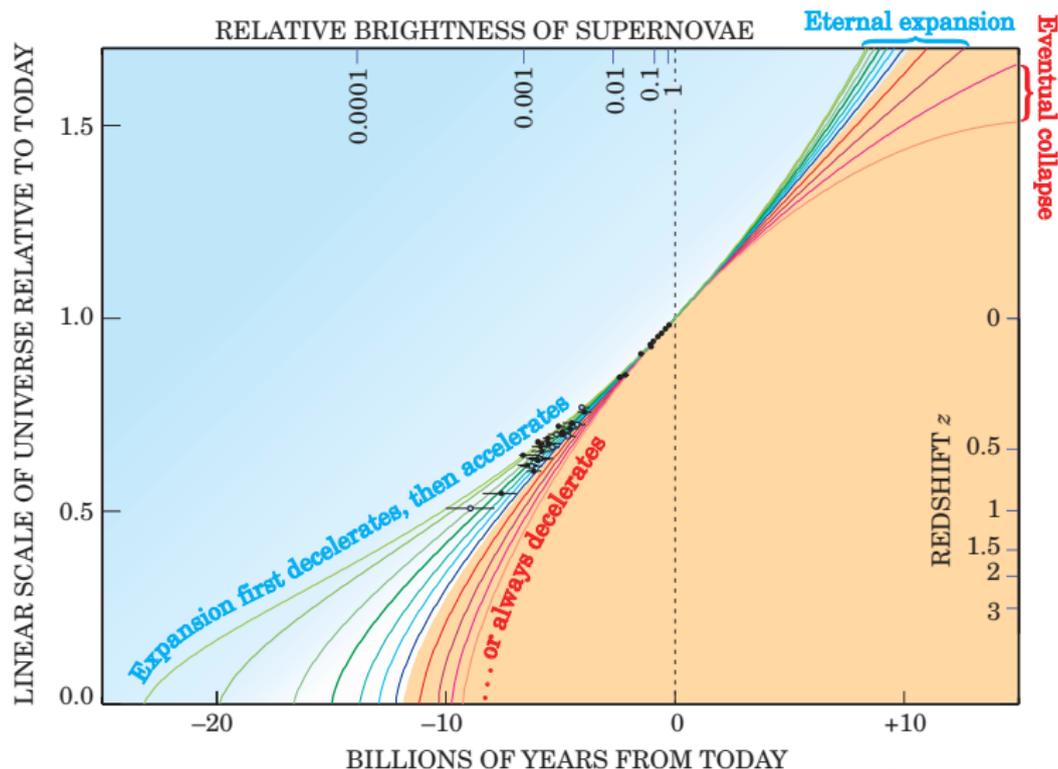
Aktuelle Werte:

$$t_0 = 13.8 \cdot 10^9 \text{ a}; \text{ Hubblekonstante } H_0 = 67.9 \text{ km/s Mpc}^{-1};$$

$$\Omega_\Lambda = 0.69; \Omega_m = 0.31 \text{ (davan } \Omega_b = 0.05 \text{ und } \Omega_{\text{cdm}} = 0.26).$$

Die Expansionsgeschichte rekonstruieren

Perlmutter, *Physics Today* 2003



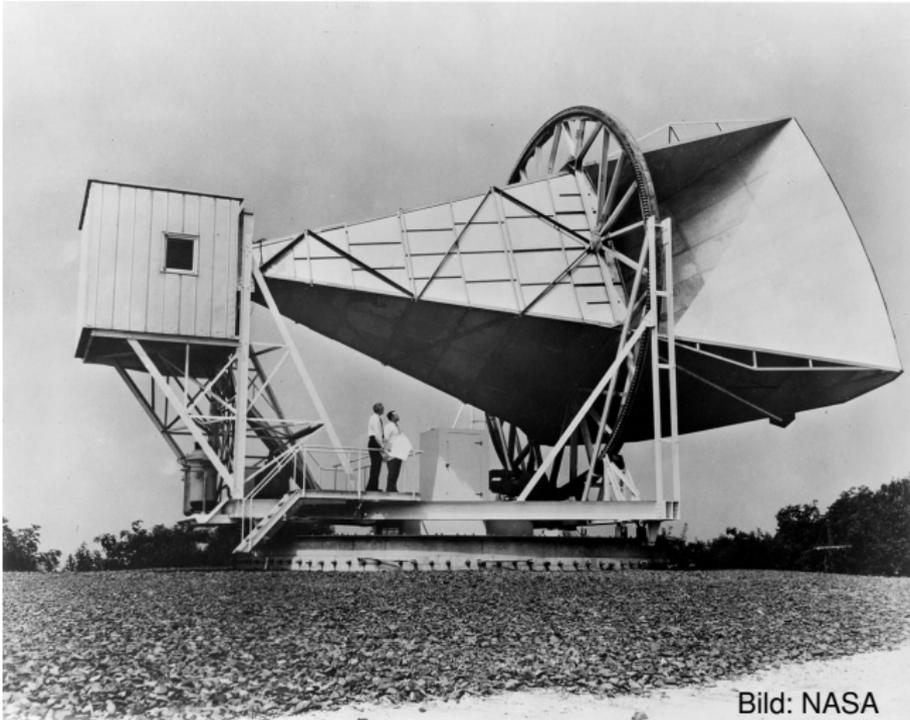
Urknallphase: Das frühe, heiße Universum

In der Vergangenheit war das Universum sehr viel kleiner als heute — zumindest in dem Sinne, dass $a(t)$ deutlich kleiner war als a_0 .

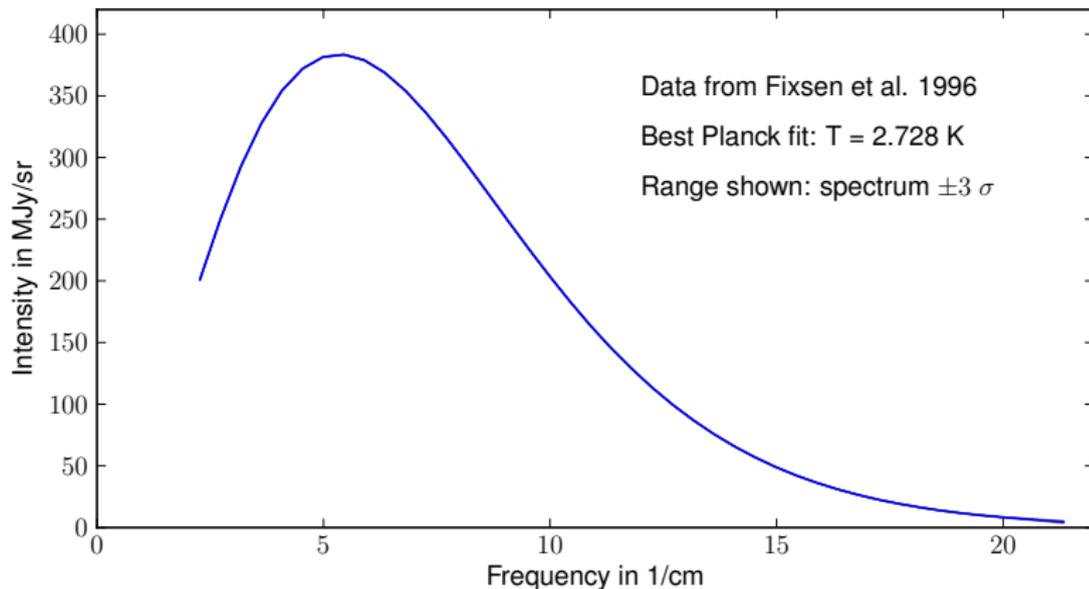
Kosmische Geschichte zurückverfolgen: Vergangenheit war dicht und heiß \Rightarrow **Urknallphase**

Schlüsselement zum Verständnis des frühen Universums:
kosmische Hintergrundstrahlung!

Entdeckung Hintergrundstrahlung: Penzias & Wilson

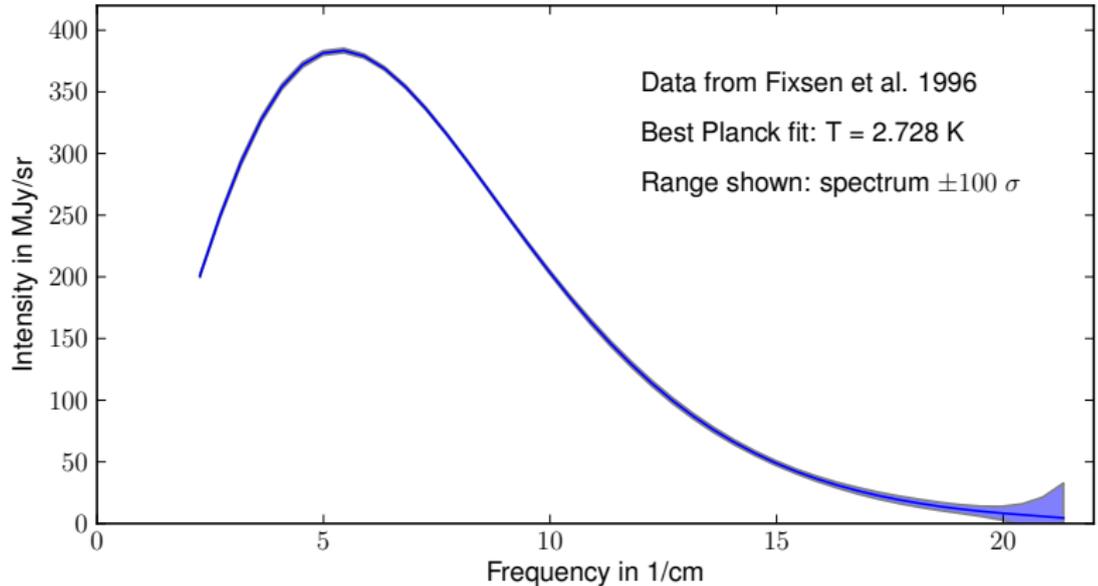


Planck-Kurve: COBE-FIRAS (Mather et al.)



Daten aus Fixsen et al. 1996 via <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

Planck-Kurve: COBE-FIRAS (Mather et al.)



Daten aus Fixsen et al. 1996 via <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

Verhältnis Materieteilchenzahl vs. Lichtteilchenzahl

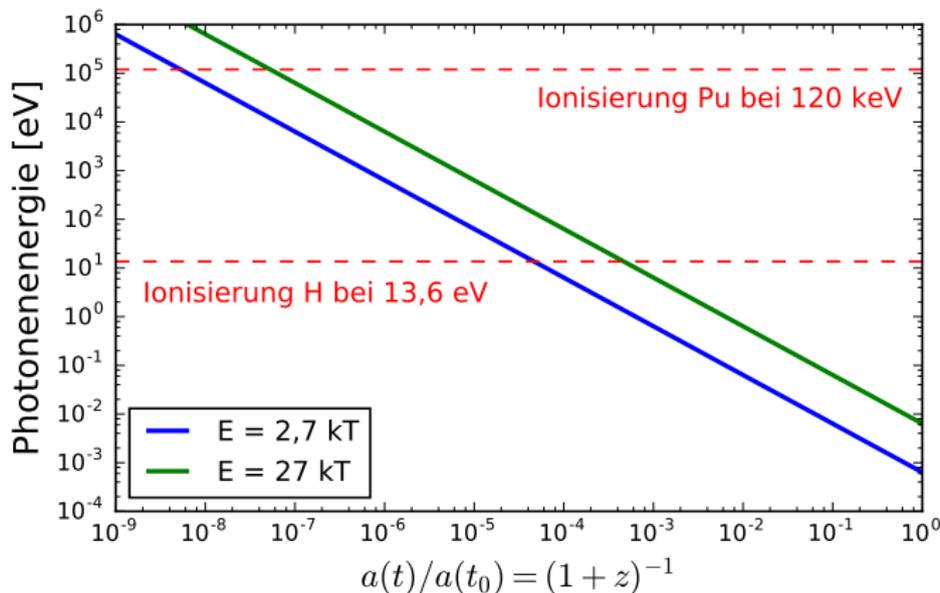
Aus Thermodynamik:

$$\eta \equiv \frac{n_b}{n_\gamma} = (0,6 \dots 3,6) \cdot 10^{-9}$$

Photonenzahl \gg Baryonenzahl!

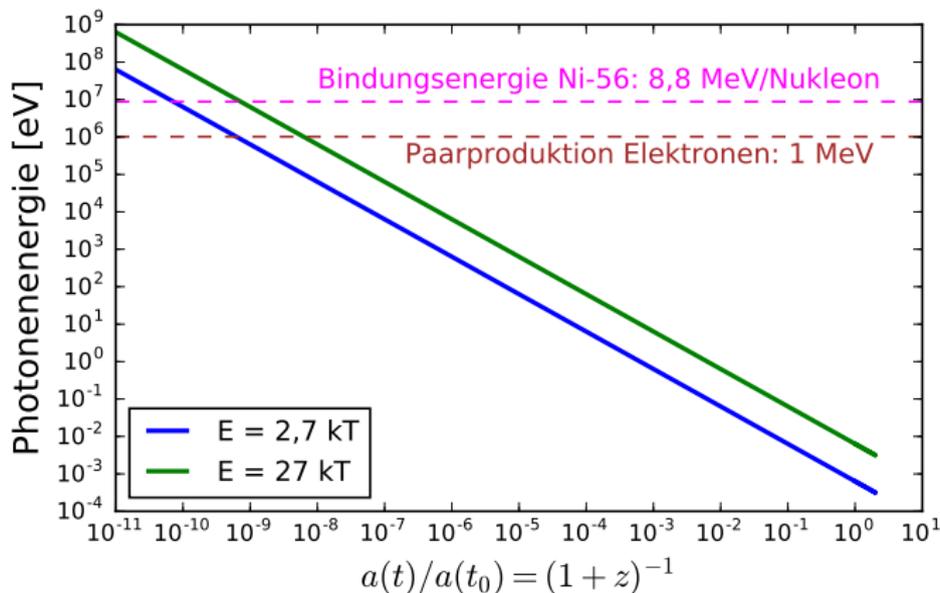
- n_γ und n_b skalieren in gleicher Weise mit $a(t)$; ihr Verhältnis η bleibt konstant
- winziger η -Wert zeigt: alles findet in einem Photonen-Bad statt, das durch Reaktionen mit den Baryonen kaum beeinflusst wird
- Temperatur wächst wie $T(t) \sim 1/a(t)$

Entwicklung Photonenenergie mit Skalenfaktor



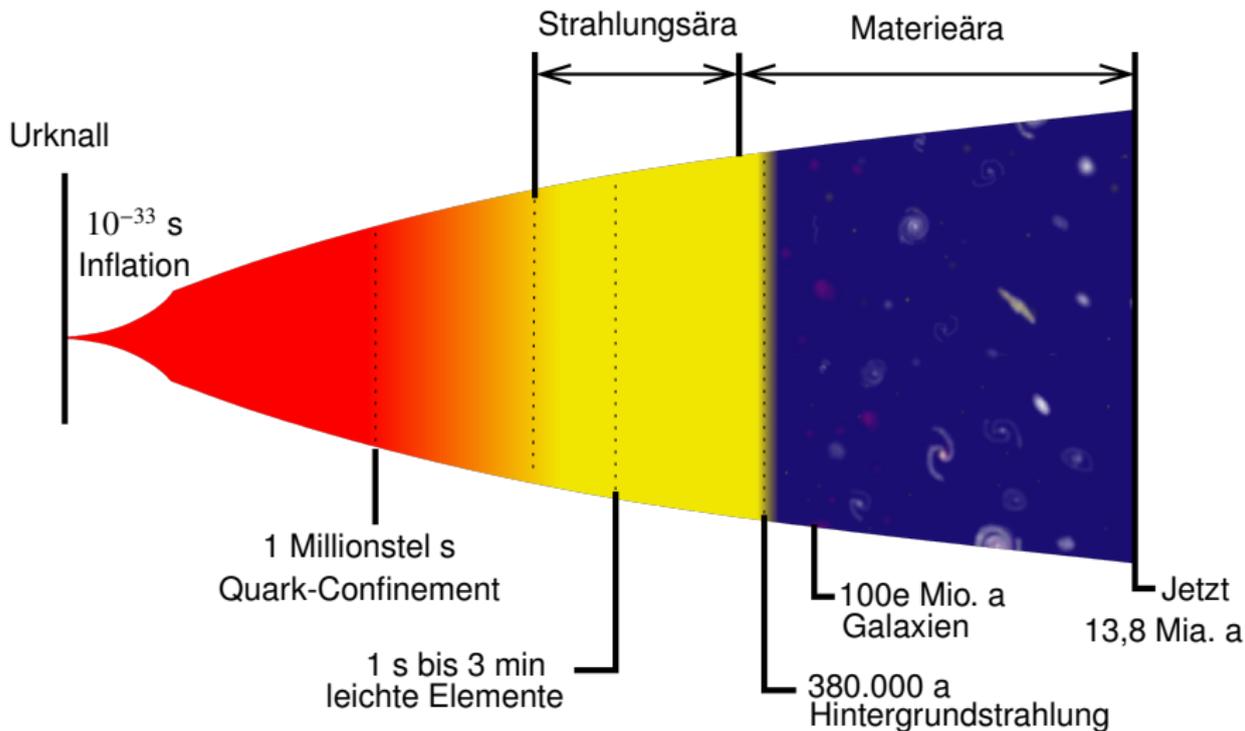
$2,7 \text{ kT}$ ist durchschnittliche Photonenenergie, 27 kT die Mindestenergie des hochenergetischsten Bruchteils η – Ausgangspunkt heutiger Wert: $kT = 0,2 \text{ meV}$

Entwicklung Photonenenergie mit Skalenfaktor



2,7 kT ist durchschnittliche Photonenenergie, 27 kT die Mindestenergie des hochenergetischsten Bruchteils η – Ausgangspunkt heutiger Wert: $kT = 0,2 \text{ meV}$

Die kosmische Geschichte



Inhomogenitäten in der Hintergrundstrahlung

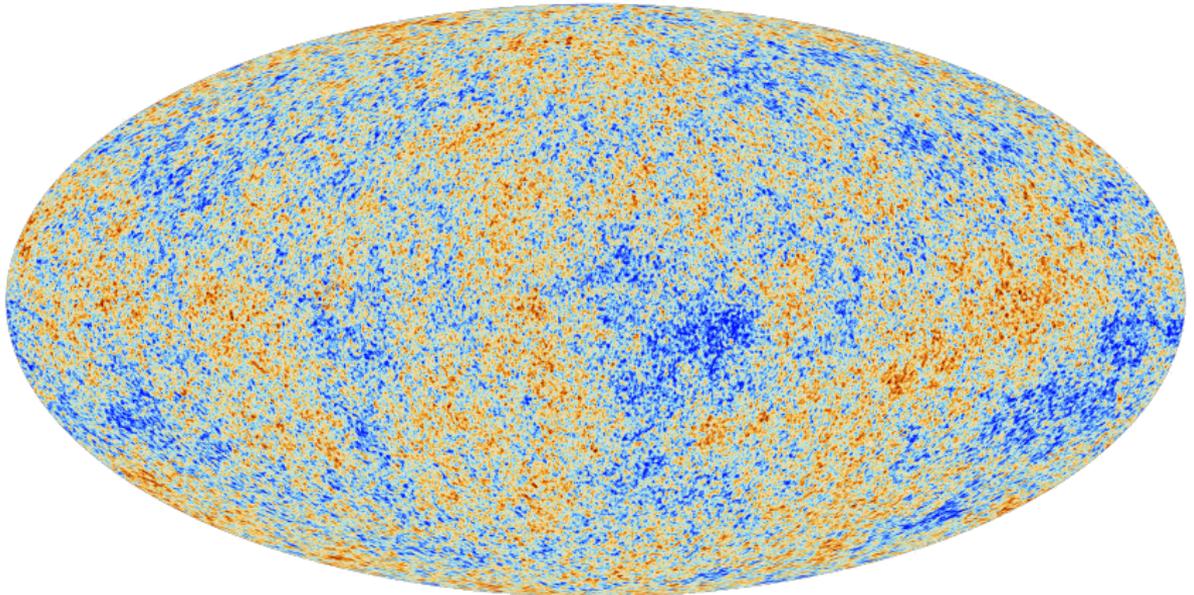


Bild: ESA/Planck Collaboration

Parameterbestimmung aus der Hintergrundstrahlung

Spektrum der Inhomogenitäten hängt von den Parametern ab, z.B. $\Omega_m, \Omega_b, \Omega_\Lambda$ (insbes. Höhe und Ausprägung der Maxima)

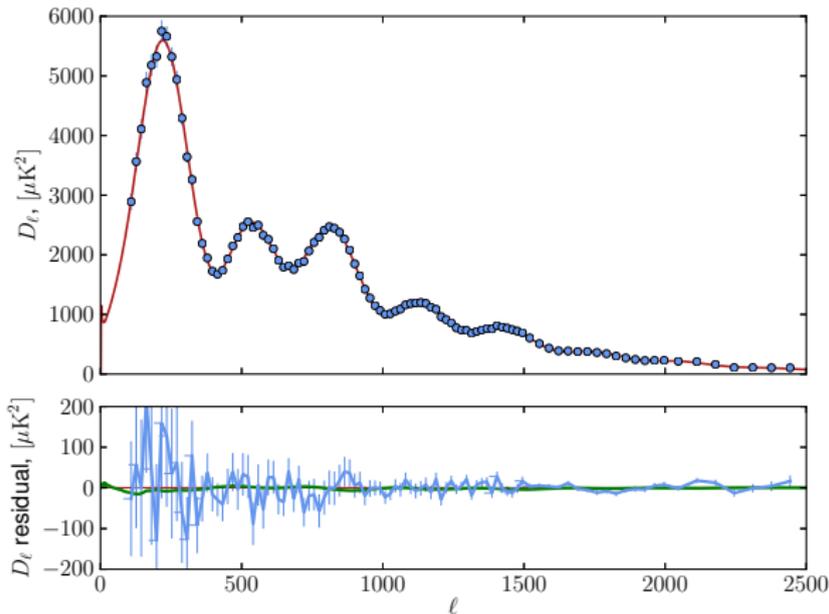


Bild: ESA/Planck Collaboration, A&A 571, A15 (2014)

Parameterbestimmung

$$\Omega_m = \left\{ \begin{array}{l} \Omega_b = 4,9\% \\ \Omega_{cdm} = 26,8\% \end{array} \right\} = 31,7\%$$

$$\Omega_\gamma = 0,005\%$$

$$\Omega_\Lambda = 68,3\%$$

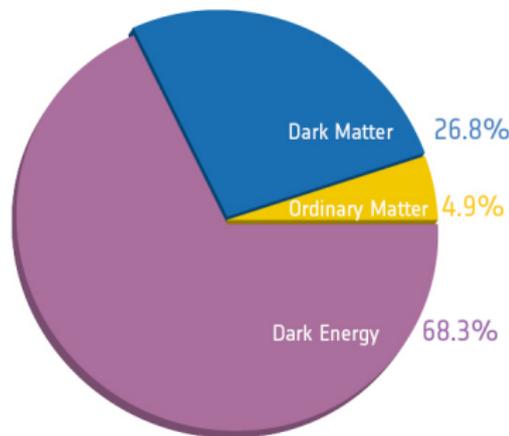


Bild: ESA/Planck Collaboration

Wobei Ω_b = normale (baryonische) Materie (Protonen, Neutronen, ...)

Ω_{cdm} = dunkle Materie (keine Wechselwirkung mit Licht),

Ω_Λ = (beschleunigende) Dunkle Energie

Mehr als nur Parameterbestimmung

Suzuki et al. 2011

