

Die dunkle Seite des Universums

Dunkle Materie und dunkle Energie

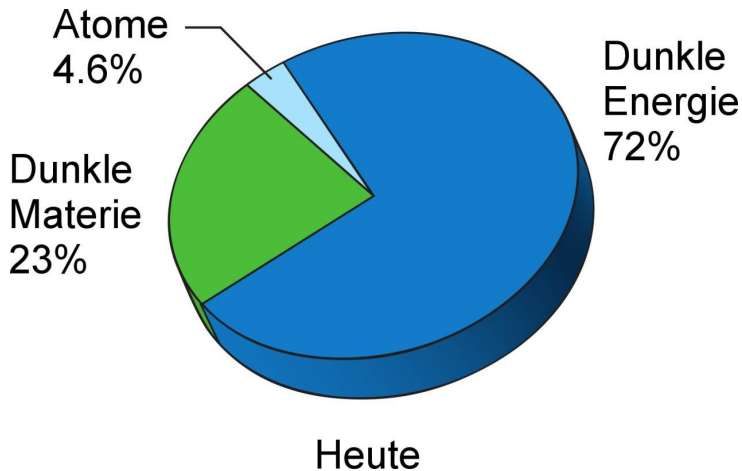
Julian Merten

Institut für Theoretische Astrophysik
Zentrum für Astronomie
Universität Heidelberg

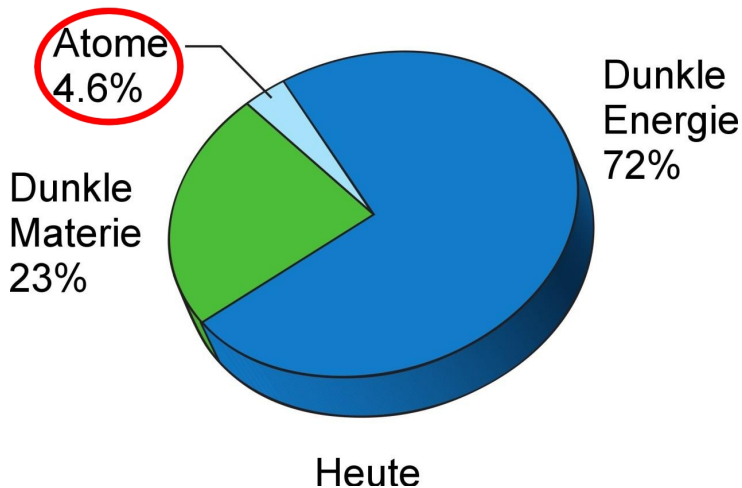
Ravensburg, 26. Juni 2009



Eine zunächst phantastische Geschichte

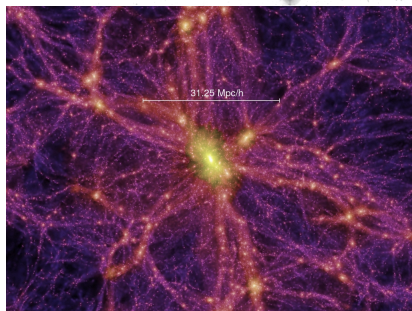


Eine zunächst phantastische Geschichte



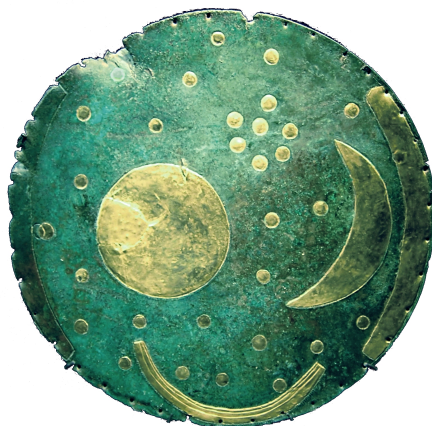
Ein Ausblick auf 90 dunkle Minuten

- Ein kurzer Blick auf die moderne Kosmologie
- Dunkle Materie
 - Warum brauchen wir sie?
 - Wie können wir sie beobachten?
 - Woraus besteht sie?
- Dunkle Energie
 - Große Kerzen und ein beschleunigtes Universum.
 - Der kosmische Mikrowellenhintergrund.
 - Was ist dunkle Energie?
- Zukünftige Experimente



- Kosmologie beschreibt das Universum als Ganzes.
 - Wie ist es entstanden?
 - Woraus besteht es?
 - Wie hat es sich entwickelt?

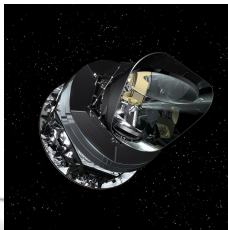
- Kosmologie beschreibt das Universum als Ganzes.
 - Wie ist es entstanden?
 - Woraus besteht es?
 - Wie hat es sich entwickelt?
- Eine der ältesten Fragen der Menschheit.
⇒ Wir suchen nach einem Weltmodell.



- Kosmologie beschreibt das Universum als Ganzes.
 - Wie ist es entstanden?
 - Woraus besteht es?
 - Wie hat es sich entwickelt?
- Eine der ältesten Fragen der Menschheit.
⇒ Wir suchen nach einem Weltmodell.
- Ein florierender Teilbereich der Astrophysik.
 - Nobelpreise 2002 und 2006.



- Kosmologie beschreibt das Universum als Ganzes.
 - Wie ist es entstanden?
 - Woraus besteht es?
 - Wie hat es sich entwickelt?
- Eine der ältesten Fragen der Menschheit.
⇒ Wir suchen nach einem Weltmodell.
- Ein florierender Teilbereich der Astrophysik.
 - Nobelpreise 2002 und 2006.
 - Verlangt nach vielfältigen Beobachtungen.

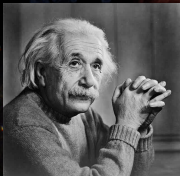


Ein modernes Weltmodell



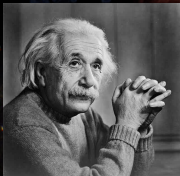
Ein modernes Weltmodell

Allgemeine
Relativitätstheorie

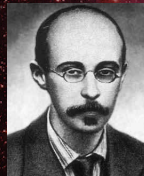


Ein modernes Weltmodell

Allgemeine
Relativitätstheorie

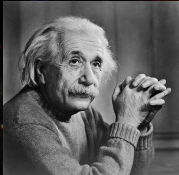


Symmetriannahmen

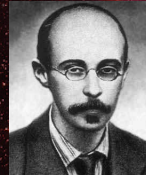


Ein modernes Weltmodell

Allgemeine
Relativitätstheorie



Symmetriannahmen

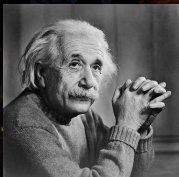


Die Dynamik des
Universums

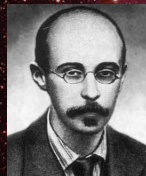
$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}$$

Ein modernes Weltmodell

Allgemeine
Relativitätstheorie



Symmetriannahmen



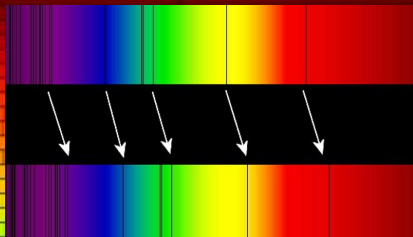
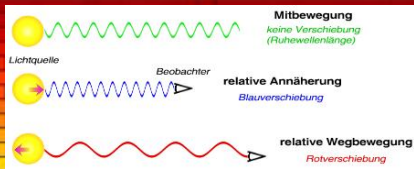
Die Dynamik des
Universums

Eine Beschreibung des
Universums

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}$$

$$H_0, \Omega_b, \Omega_m, \Omega_r, \Omega_\Lambda, \\ K, \sigma_8, n_s$$

Eine direkte Konsequenz: Kosmologische Rotverschiebung



Die ältesten uns bekannten

Objekte:

GRB 090423

$z = 7.8$

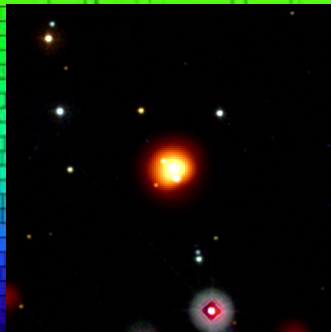
13 Milliarden Jahre

QSO SDSS

J114816.54+525150.2

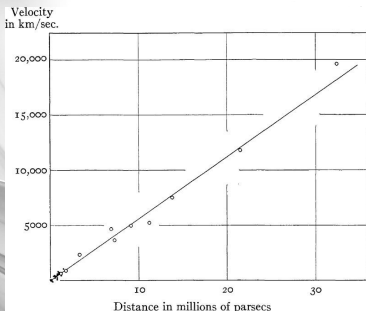
$z = 6.42$

12,8 Milliarden Jahre



Eine wichtige Entdeckung

- Weit entfernte Galaxien bewegen sich von uns weg.
- Diese "Flucht" nimmt zu umso größer die Entfernung zu uns ist.
- Direkter Hinweis auf die Expansion des Universums.

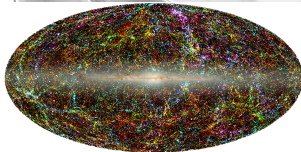


Kosmologische Beobachtungen

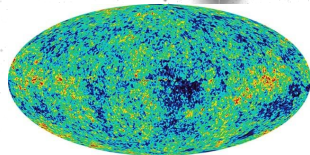
Kosmische Expansion



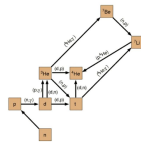
Strukturentstehung



Mikrowellenhintergrund



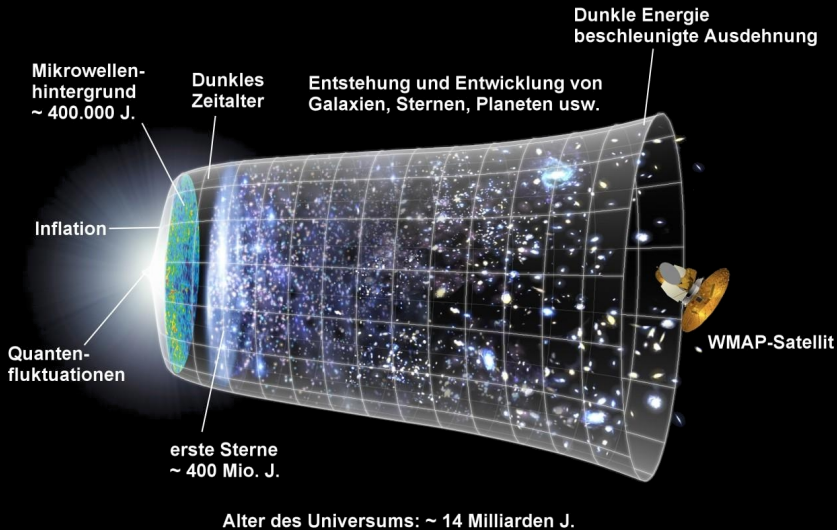
Entstehung der Elemente



The background of the slide is a white field filled with numerous small black dots representing stars. On the left side, there is a bright light source creating a lens flare effect with several overlapping semi-transparent, wavy grey bands that curve across the frame. The text Λ CDM is centered in the middle of the slide.

Λ CDM

Das Kosmologische Standardmodell



Warum dunkle Materie?

- 1933 Fritz Zwicky



- 1933 Fritz Zwicky
- Ermittelte die Masse der Galaxien im Coma Galaxienhaufen.
- Diese war deutlich höher als ihre Helligkeit vermuten ließ.



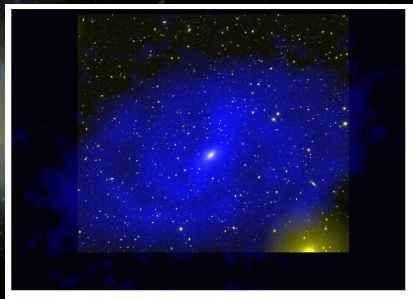
- 1933 Fritz Zwicky
- Ermittelte die Masse der Galaxien im Coma Galaxienhaufen.
- Diese war deutlich höher als ihre Helligkeit vermuten ließ.
- Damals nahm diese Beobachtung niemand wirklich ernst.



Rotationskurven

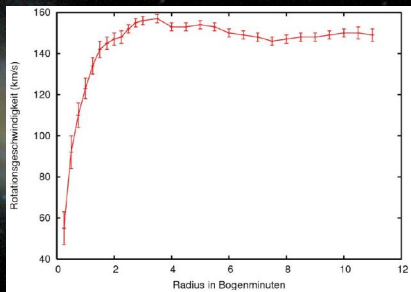


- Jahrzehnte später wurde Zwicky doch bestätigt.



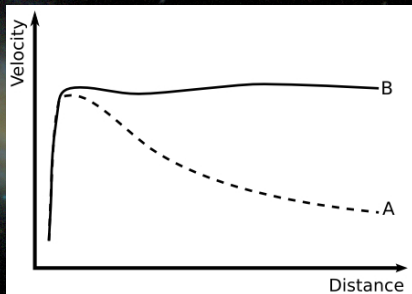
Rotationskurven

- Jahrzehnte später wurde Zwicky doch bestätigt.
- Beobachtungen von Sternen und Wasserstoffwolken in Galaxien ergeben:



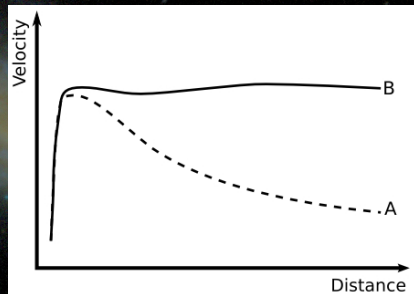
Rotationskurven

- Jahrzehnte später wurde Zwicky doch bestätigt.
- Beobachtungen von Sternen und Wasserstoffwolken in Galaxien ergeben:
- Das passt nicht zur Erwartung:



Rotationskurven

- Jahrzehnte später wurde Zwicky doch bestätigt.
- Beobachtungen von Sternen und Wasserstoffwolken in Galaxien ergeben:
- Das passt nicht zur Erwartung:
- Es muss eine zusätzliche Massenkomponekte geben.
- Diese Komponente leuchtet nicht.



Galaxienhaufen: Die Fakten



Galaxienhaufen: Die Fakten

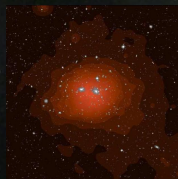
- Galaxienhaufen sind die massereichsten durch ihre Gravitation gebundenen Objekte, die wir kennen.

Galaxienhaufen: Die Fakten

- Galaxienhaufen sind die massereichsten durch ihre Gravitation gebundenen Objekte, die wir kennen.
- Sie enthalten viele Hunderte Galaxien.

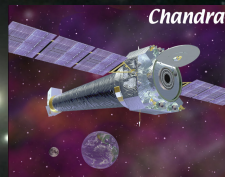
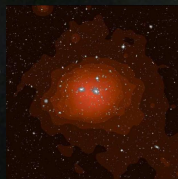
Galaxienhaufen: Die Fakten

- Galaxienhaufen sind die massereichsten durch ihre Gravitation gebundenen Objekte, die wir kennen.
- Sie enthalten viele Hunderte Galaxien.
- Sie zählen zu den stärksten Quellen von Röntgenstrahlung im Universum.



Galaxienhaufen: Die Fakten

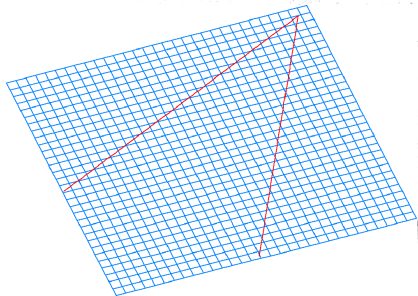
- Galaxienhaufen sind die massereichsten durch ihre Gravitation gebundenen Objekte, die wir kennen.
- Sie enthalten viele Hunderte Galaxien.
- Sie zählen zu den stärksten Quellen von Röntgenstrahlung im Universum.



- Es gibt mehrere Methoden ihre Gesamtmasse zu bestimmen:
 - Bewegung der Galaxien.
 - Helligkeit des beobachteten Röntgenlichts.
 - Der Gravitationslinseneffekt.

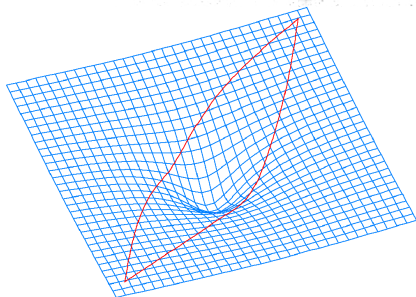
Der Gravitationslinseneffekt

- Die Grundlage des Effekts ist Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie.



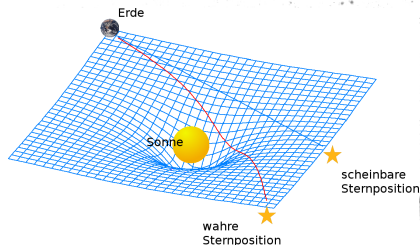
Der Gravitationslinseneffekt

- Die Grundlage des Effekts ist Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie.
- Sehr massereiche Objekte krümmen die Raumzeit.



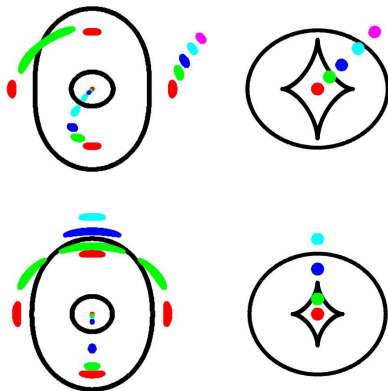
Der Gravitationslinseneffekt

- Die Grundlage des Effekts ist Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie.
- Sehr massereiche Objekte krümmen die Raumzeit.
- Diese Krümmung beeinflusst den Weg eines Lichtstrahls.



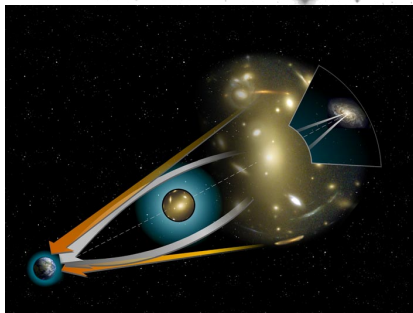
Der Gravitationslinseneffekt

- Die Grundlage des Effekts ist Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie.
- Sehr massereiche Objekte krümmen die Raumzeit.
- Diese Krümmung beeinflusst den Weg eines Lichtstrahls.
- Die Bilder von Objekten wirken verzerrt.



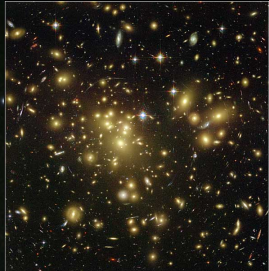
Der Gravitationslinseneffekt

- Die Grundlage des Effekts ist Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie.
- Sehr massereiche Objekte krümmen die Raumzeit.
- Diese Krümmung beeinflusst den Weg eines Lichtstrahls.
- Die Bilder von Objekten wirken verzerrt.
- Sehr verschiedene Objekte können als Gravitationslinse fungieren.

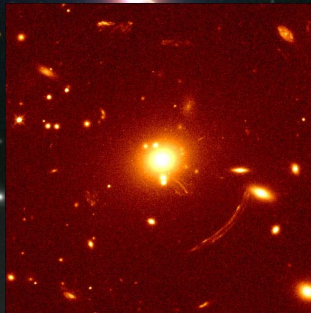


Galerie berühmter Linsen

Galaxy Cluster Abell 1689 HST • ACS



NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Hebrew Univ.), H. Ford (JHU),
M. Clampitt (STScI), G. Harris (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory),
the ACS Science Team and ESA STScI-PRC03-01a



Galaxy Cluster Abell 2218 HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



Ein besonderes Beispiel

WEAK-LENSING MASS RECONSTRUCTION OF THE INTERACTING CLUSTER 1E 0657-558: DIRECT EVIDENCE FOR THE EXISTENCE OF DARK MATTER¹

DOUGLAS CLOWE²

Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung der Universität Bonn, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn, Germany; dclowe@as.arizona.edu

ANTHONY GONZALEZ

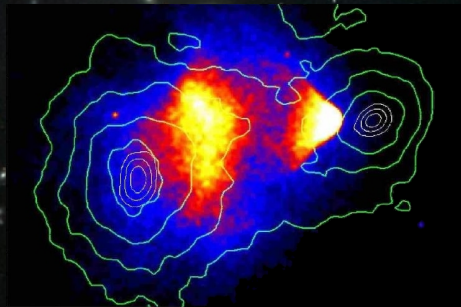
Department of Astronomy, University of Florida, 211 Bryant Space Science Center, Gainesville, FL 32611-2055

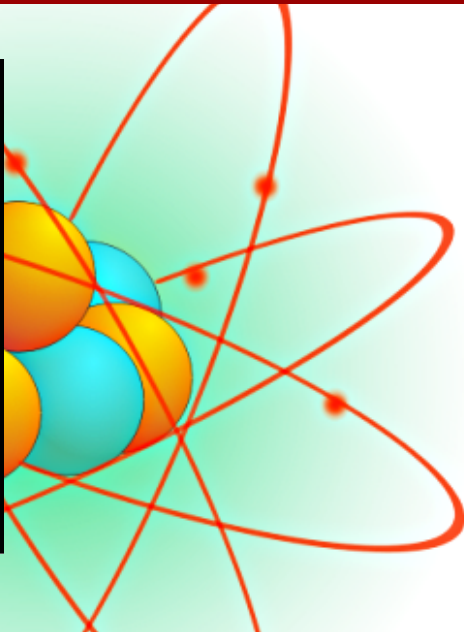
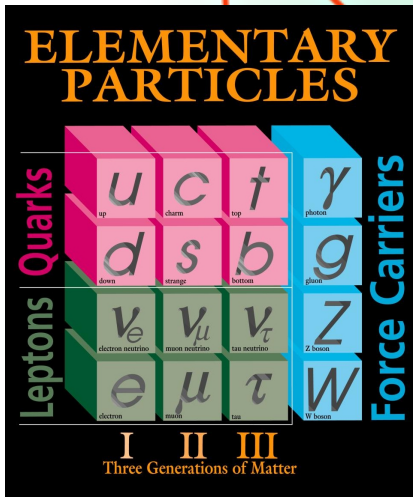
AND

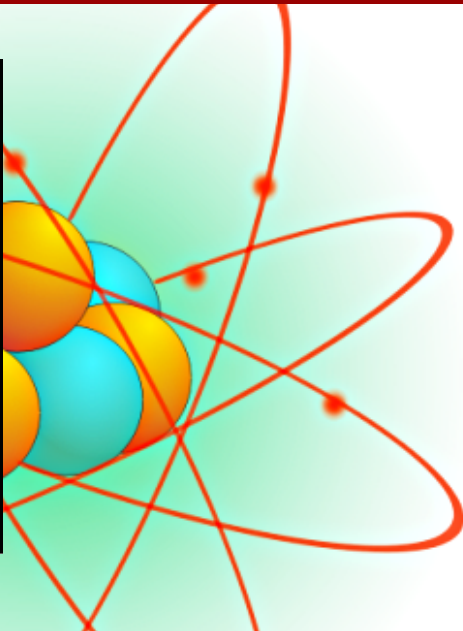
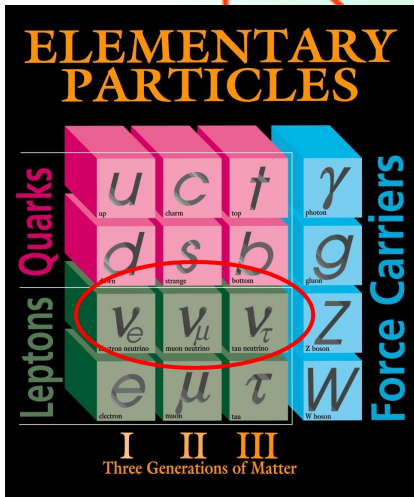
MAXIM MARKEVITCH

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138

Received 2003 October 28; accepted 2003 December 11





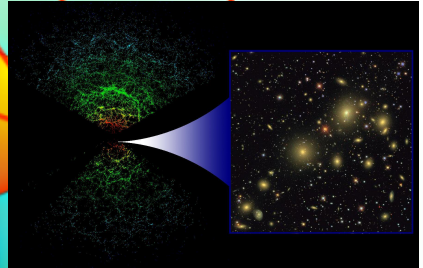


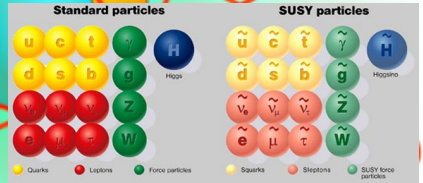
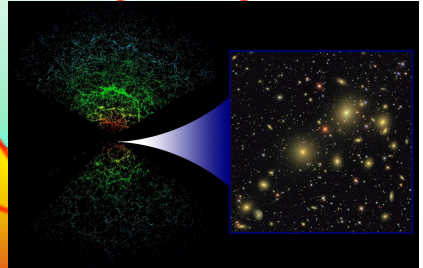
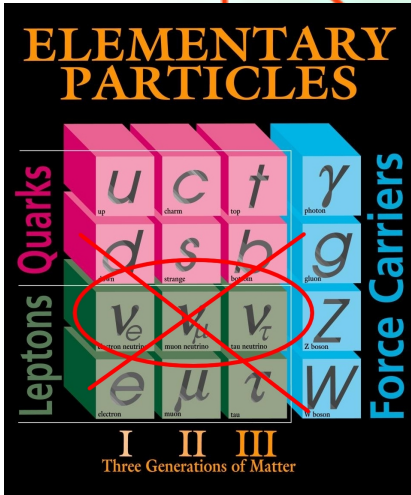
Unser Teilcheninventar

ELEMENTARY PARTICLES

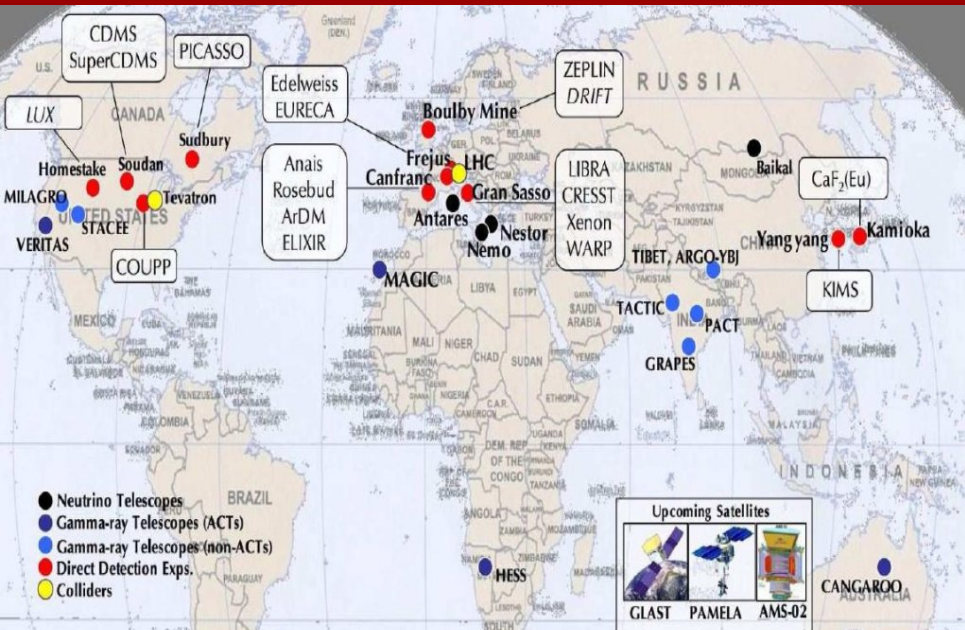
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Force Carriers			
	e electron	μ muon	τ tau				
	u up	d down	s strange		c charm	b bottom	t top
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon			
				Z Z boson			
				W W boson			

I II III
Three Generations of Matter



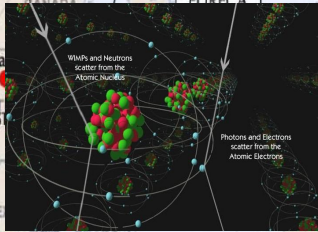


Alternative Nachweismethoden

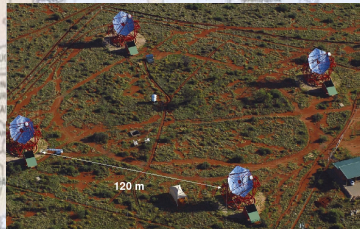
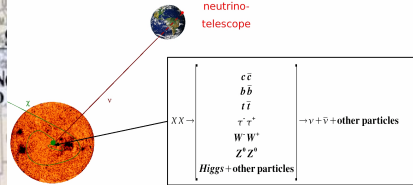


Alternative Nachweismethoden

Direkter Nachweis



Indirekter Nachweis



- Neut
- Gam
- Gam
- Dire
- Colli

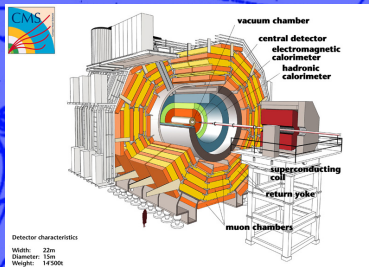
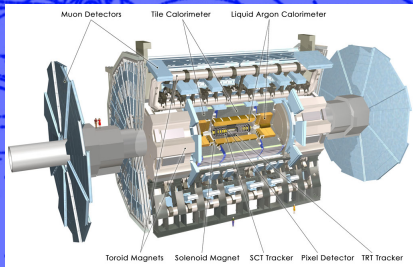
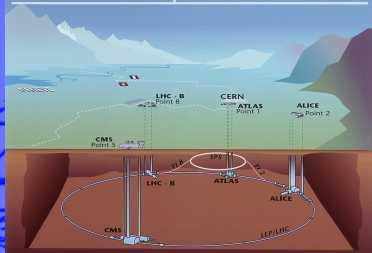
Produktion dunkler Materie: Der LHC

- Der größte Teilchenbeschleuniger der Welt.
- Protonen kollidieren mit praktisch Lichtgeschwindigkeit.
- Der Tunnel in der Nähe von Genf hat einen Umfang von 27 km.
- Mehr als 10000 Forscher und Ingenieure arbeiten an dem 5 Milliarden Euro Projekt.
- Eines der Ziele ist zur Aufklärung des Rätsels dunkler Materie beizutragen.

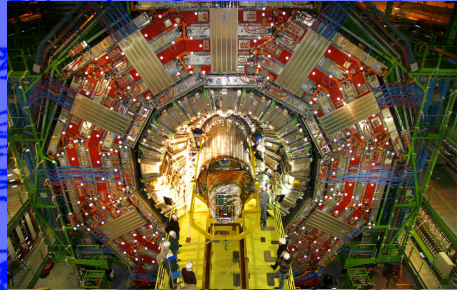
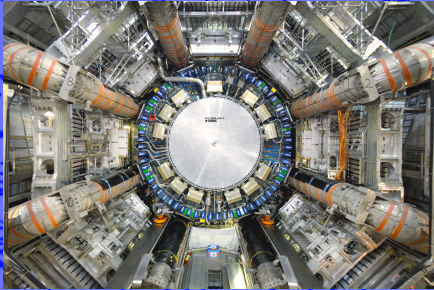


Produktion dunkler Materie: Der LHC

Overall view of the LHC experiments.

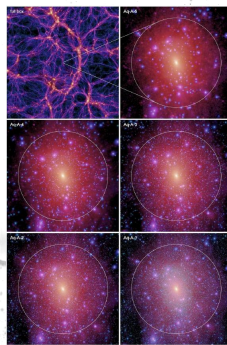
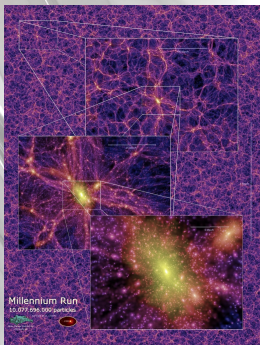


Produktion dunkler Materie: Der LHC



In diesen Detektoren würde dunkle Materie durch ein Defizit in der Energiebilanz nachgewiesen werden.

Eine ganz andere Art des Experiments: Simulationen

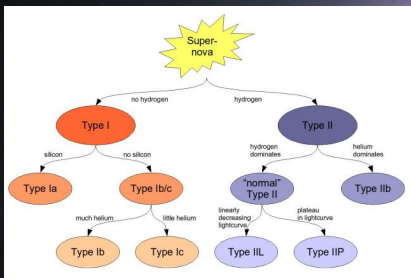
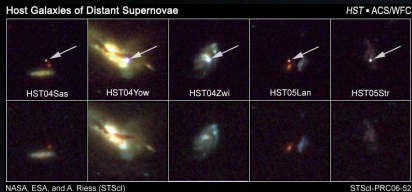


Warum dunkle Energie?

Supernovae

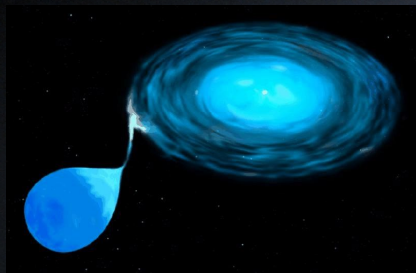


Supernovae



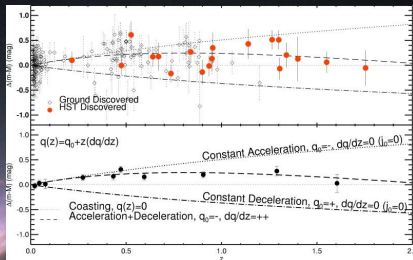
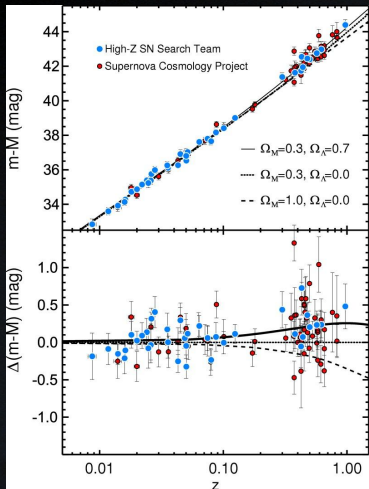
- Supernovae sind gigantische Sternexplosionen.
- Ihre Helligkeit kann kurzzeitig die einer ganzen Galaxie übersteigen.
- Nur ein Bruchteil der Energie wird in Form von Licht ausgestrahlt.
- Es gibt verschiedene Arten von Supernovae.

Supernovae vom Typ Ia: Standardkerzen

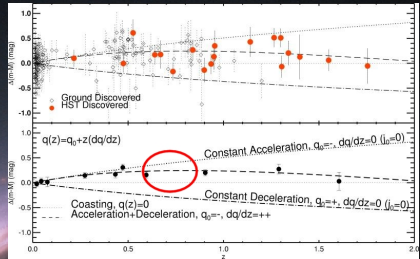
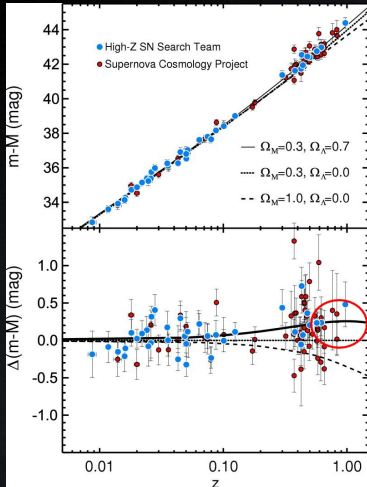


- Ein weißer Zwerg umrundet einen anderen Stern.
- Mit der Zeit nimmt der weiße Zwerg immer mehr Masse auf.
- Er ist lediglich bis zu einer Masse von 1,44 Sonnenmassen stabil und explodiert, falls er diese Grenze überschreitet.
- Aufgrund dieser Tatsache geht man davon aus, dass bei einer SNIa immer die gleiche Menge Energie freigesetzt wird.

Und wieder eine wichtige Entdeckung

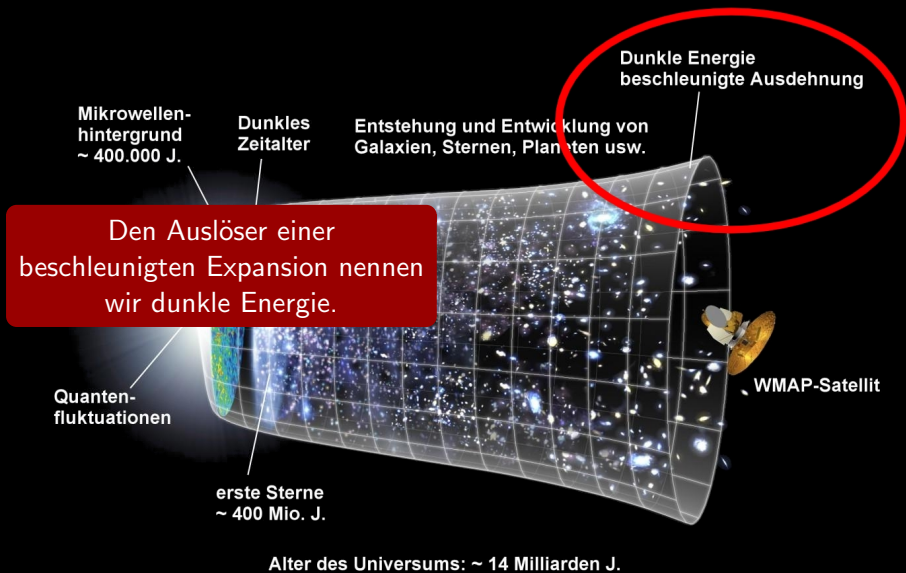


Und wieder eine wichtige Entdeckung



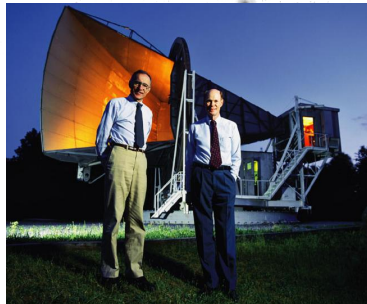
Die "jüngeren" Standardkerzen
erscheinen dunkler als sie sein
sollten.

Beschleunigte Expansion: Dunkle Energie

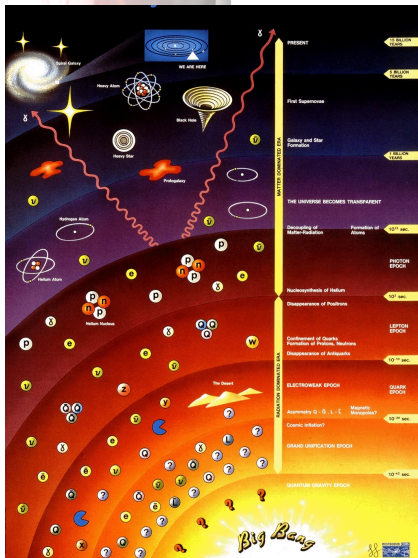


Natürlich ist das nicht alles: Eine kleine Geschichte

- 1965 Arno Penzias und Robert Wilson (Bell Telephone Labs).
- Richtungsunabhängiger Mikrowellenuntergrund.
- Alle möglichen Quellen in der Umgebung (inkl. Taubennester in der Antenne) wurden ausgeschlossen.
- Als Wissenschaftler im nahen Princeton davon hörten, wussten sie sofort, was entdeckt wurde.
- 1978 teilten sich Penzias und Wilson den Nobelpreis für Physik.

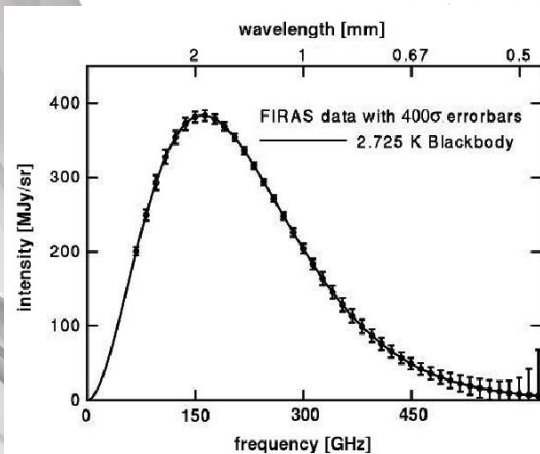


Was hatten sie entdeckt

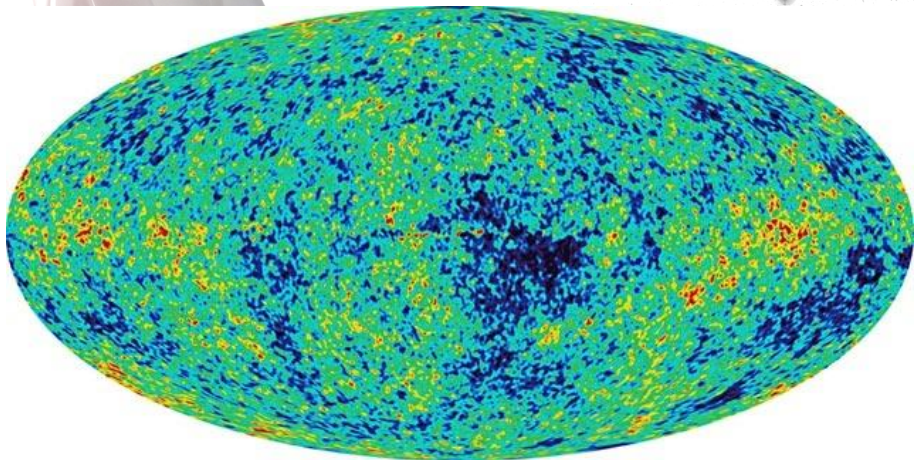
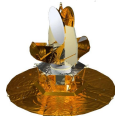


Fakten:
360 000 Jahre nach dem Urknall.
 $z = 1100$
„Ältestes astronomisches Objekt.“
Temperatur damals: 3000 K
Temperatur heute: 2,725 K

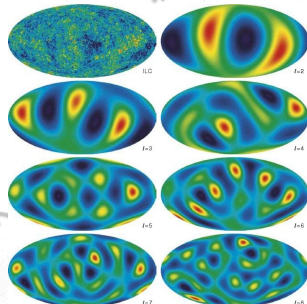
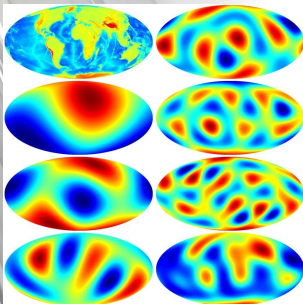
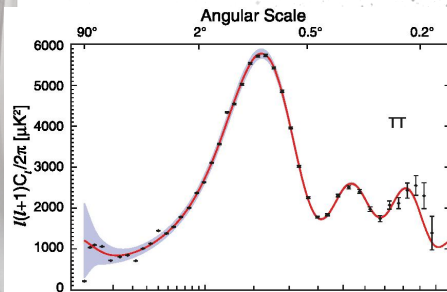
Der erste Satellit: COBE



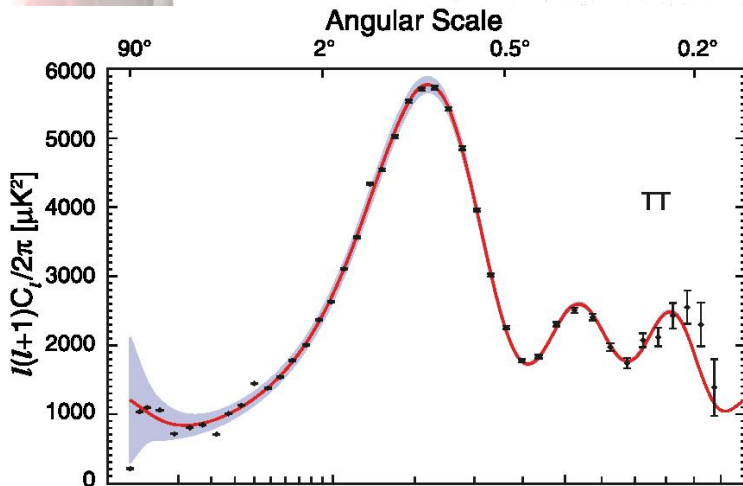
Strukturen am Himmel: WMAP



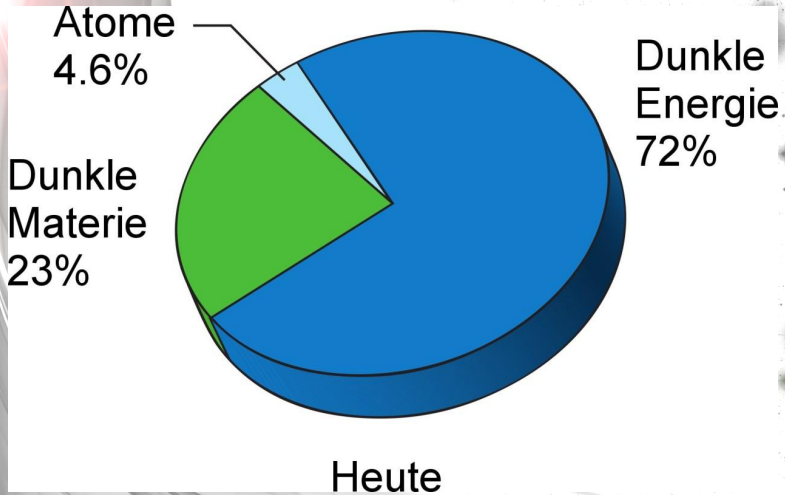
Strukturen am Himmel



Können wir das verstehen?



Können wir das verstehen?



Was ist dunkle Energie?

1. Möglichkeit:
Grundannahmen richtig

- Zusätzliche Komponente.
- Spezielle Eigenschaften um die Expansion zu erklären.
- Kandidaten:
 - Vakuumenergie
 - Dynamisches skalares Feld.

2. Möglichkeit:
Grundannahmen falsch

Ein modernes Weltmodell

Allgemeine Relativitätstheorie

Symmetrieanahmen

Die Dynamik des Universums

Eine Beschreibung des Universums

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}$$
$$H_0, \Omega_b, \Omega_m, \Omega_r, \Omega_\Lambda, K, \sigma_8, n_s$$

Julian Merten (ZAH/ITA) Das Dunkle Universum astronomia Ravensburg 5 / 33

Was ist dunkle Energie?

1. Möglichkeit:
Grundannahmen richtig

- Zusätzliche Komponente.
- Spezielle Eigenschaften um die Expansion zu erklären.
- Kandidaten:
 - Vakuumenergie
 - Dynamisches skalares Feld.

2. Möglichkeit:
Grundannahmen falsch

Ein modernes Weltmodell

Allgemeine Relativitätstheorie

Symmetrieanahmen

Die Dynamik des Universums

Eine Beschreibung des Universums

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}$$
$$H_0, \Omega_b, \Omega_m, \Omega_r, \Omega_\Lambda, K, \sigma_8, n_s$$

Julian Merten (ZAH/ITA) Das Dunkle Universum astronomia Ravensburg 5 / 33

Was ist dunkle Energie?

1. Möglichkeit:
Grundannahmen richtig

- Zusätzliche Komponente.
- Spezielle Eigenschaften um die Expansion zu erklären.
- Kandidaten:
 - Vakuumenergie
 - Dynamisches skalares Feld.

2. Möglichkeit:
Grundannahmen falsch

Ein modernes Weltmodell

Allgemeine Relativitätstheorie

Symmetrieannahme

Die Dynamik des Universums

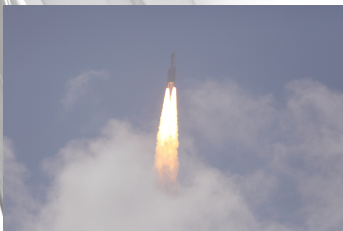
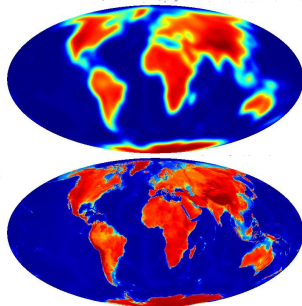
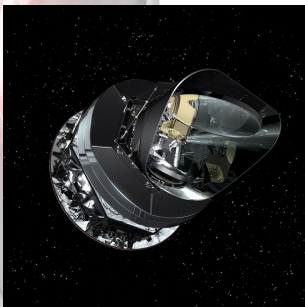
Eine Beschreibung des Universums

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}$$
$$H_0, \Omega_b, \Omega_m, \Omega_r, \Omega_\Lambda, K, \sigma_8, n_s$$

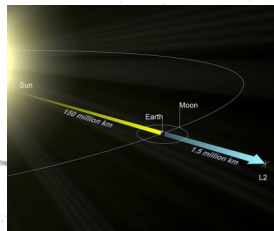
Julian Merten (ZAH/ITA) Das Dunkle Universum astronomia Ravensburg 5 / 33

Zukünftige Experimente

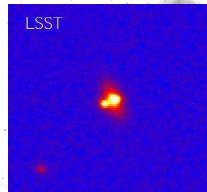
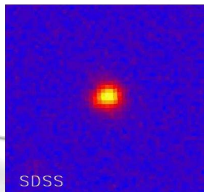
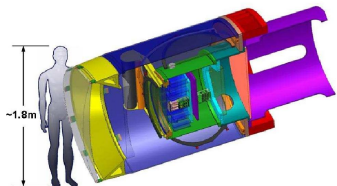
Planck



Kourou, 14. Mai 2009



LSST (Das große synoptische Himmelsdurchmusterungsteleskop)



- 1 Die moderne Kosmologie versucht ein möglichst einfaches Weltmodell zu erstellen, muss sich aber nach den Beobachtungen richten.
- 2 Rotationskurven in Galaxien und der Gravitationslinseneffekt legen die Existenz dunkler Materie nahe, ihre wirkliche Natur ist aber noch unklar.
- 3 Noch weniger verstanden ist dunkle Energie, sie ist aber notwendig um die beschleunigte Expansion des Universums zu erklären
- 4 Verschiedene Experimente werden in Zukunft dazu beitragen einige dieser Rätsel aufzuklären.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

