

# Die dunkle Seite des Universums

Schwarze Löcher, dunkle Materie, dunkle Energie – Fakten oder Fiktion?

Daniel Grumiller

Institute for Theoretical Physics  
Vienna University of Technology

University meets public, Vienna, Austria, October 2012



# Outline

Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

# Outline

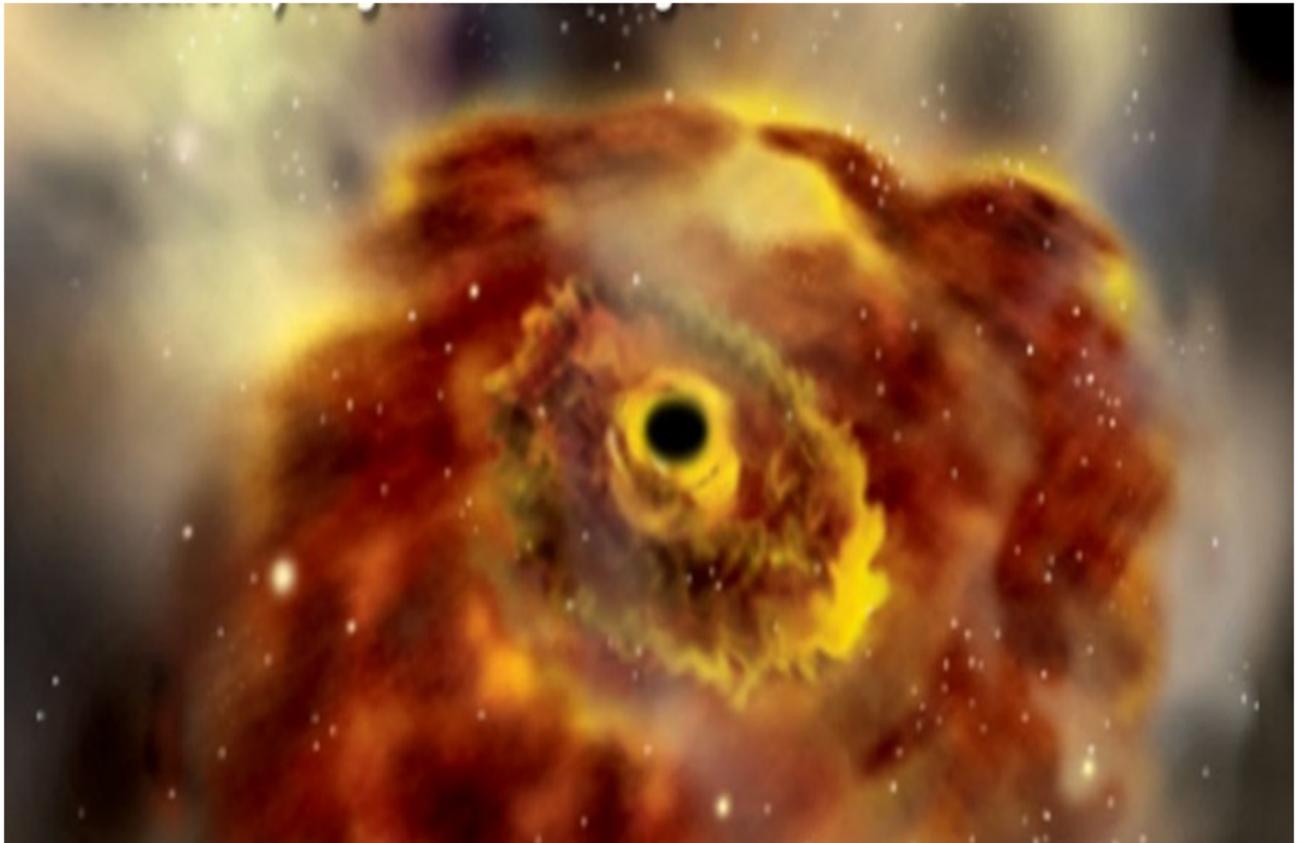
Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

# Einleitung

Das derzeit grösste Schwarze Loch: OJ287 (18 Milliarden Sonnenmassen)



## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- ▶ K. Schwarzschild (1916): Erste exakte ART Lösung: Schwarzes Loch!

## Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- ▶ K. Schwarzschild (1916): Erste exakte ART Lösung: Schwarzes Loch!

Schwarze Löcher sind die einfachsten *und* kompliziertesten Objekte im Universum!

# Schwarze Löcher — Wirklichkeit und Phantasie

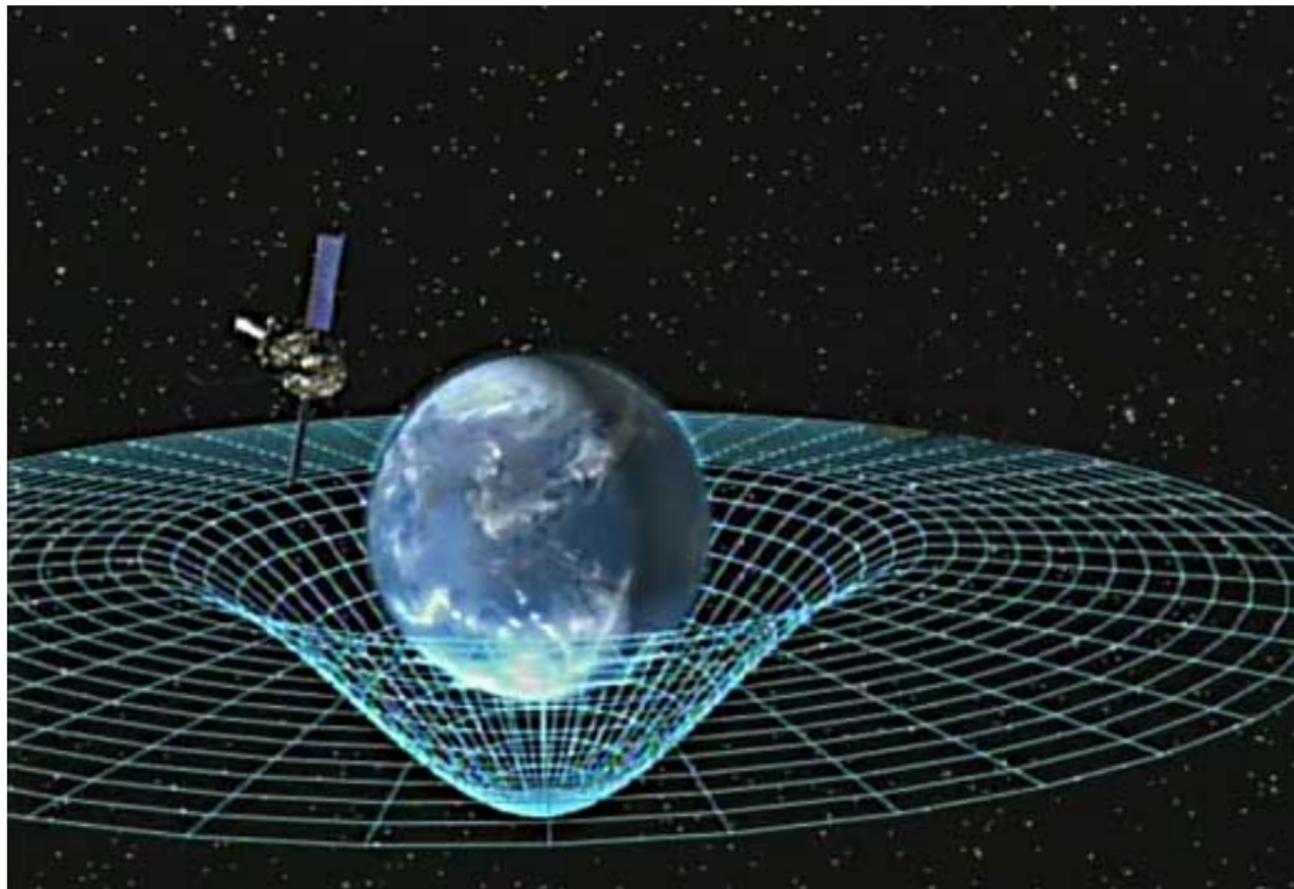
## Astrophysikalisches Schwarzes Loch



## Erfundene Yu-Gi-Oh! Karte

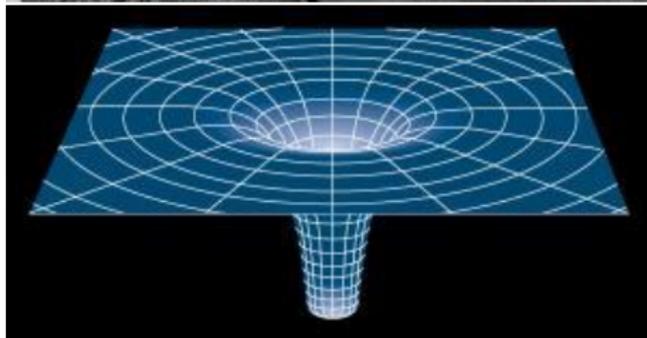
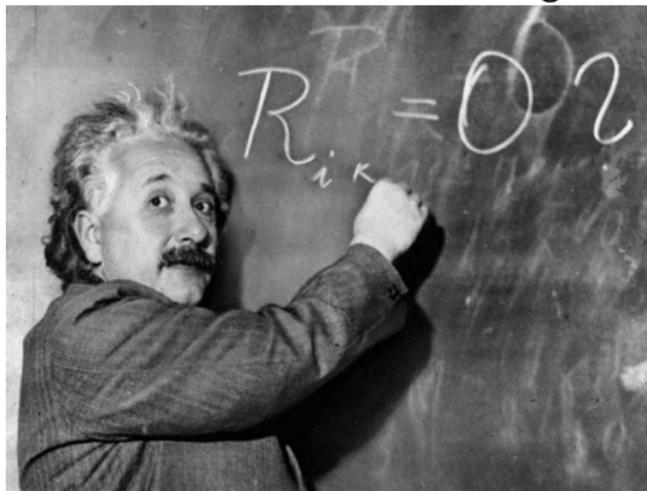


## Gravitation als Raumkrümmung



# Schwarzes Loch: Raumkrümmung wird stark!

## Schwarze Loch Raumkrümmung



## “Schwarzes Loch”: Wasserstrudel



Wie beobachtet man ein Schwarzes Loch?  
Müssen die Physik von dem Bild unten verstehen...



# Schwarze Loch Beobachtungen

## Bestätigte Beobachtungen Schwarzer Löcher in X-ray binaries

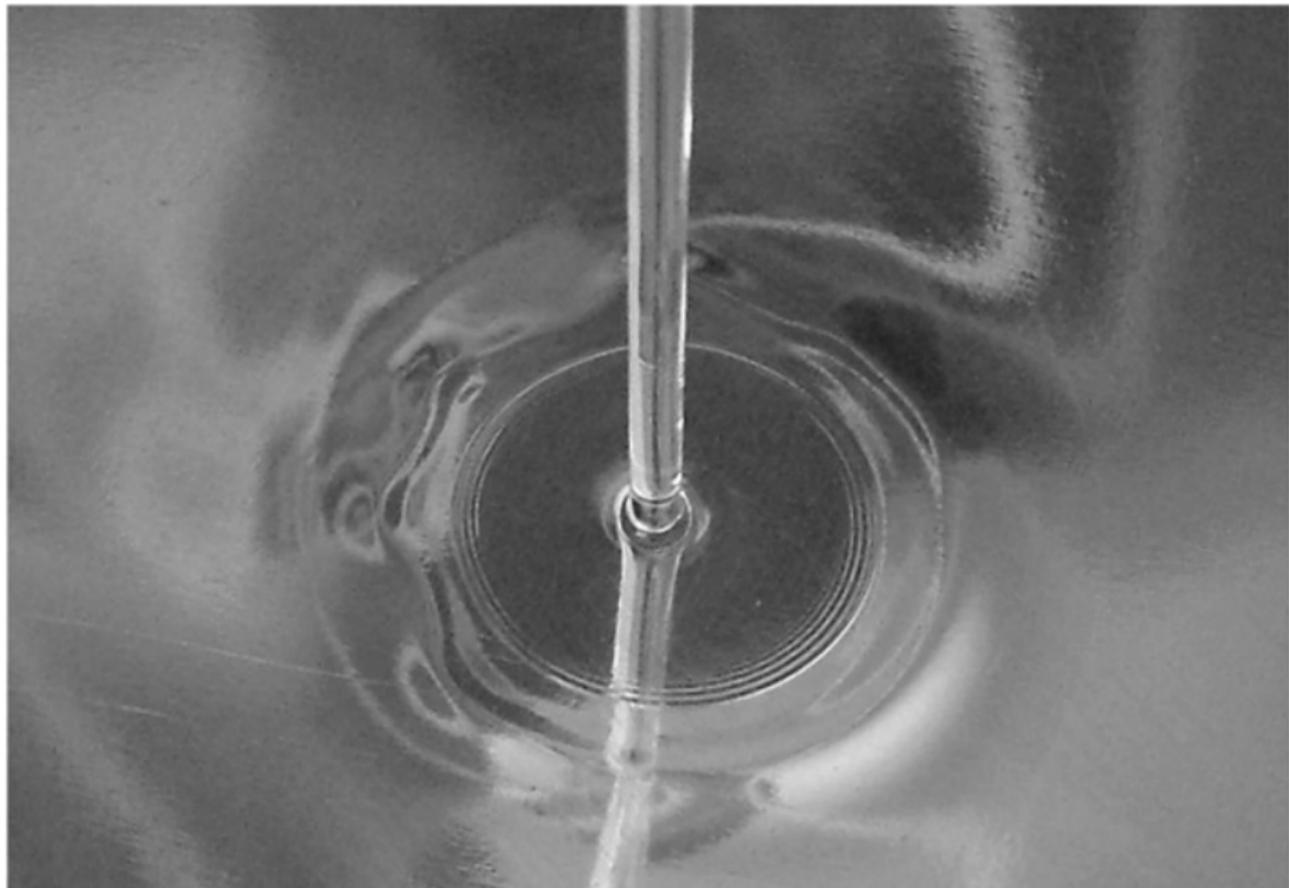
Objects whose mass is clearly beyond TOV limit  $M > 3M_{\odot}$ :

System	$P_{\text{orb}}$ [days]	$f(M)$ [ $M_{\odot}$ ]	Donor Spect. Type	Classification	$M_x$ † [ $M_{\odot}$ ]
GRS 1915+105 <sup>a</sup>	33.5	$9.5 \pm 3.0$	K/M III	LMXB/Transient	$14 \pm 4$
V404 Cyg	6.471	$6.09 \pm 0.04$	K0 IV	„	$12 \pm 2$
Cyg X-1	5.600	$0.244 \pm 0.005$	09.7 Iab	HMXB/Persistent	$10 \pm 3$
LMC X-1	4.229	$0.14 \pm 0.05$	07 III	„	$> 4$
XTE J1819-254	2.816	$3.13 \pm 0.13$	B9 III	IMXB/Transient	$7.1 \pm 0.3$
GRO J1655-40	2.620	$2.73 \pm 0.09$	F3/5 IV	„	$6.3 \pm 0.3$
BW Cir <sup>b</sup>	2.545	$5.74 \pm 0.29$	G5 IV	LMXB/Transient	$> 7.8$
GX 339-4	1.754	$5.8 \pm 0.5$	–	„	–
LMC X-3	1.704	$2.3 \pm 0.3$	B3 V	HMXB/Persistent	$7.6 \pm 1.3$
XTE J1550-564	1.542	$6.86 \pm 0.71$	G8/K8 IV	LMXB/Transient	$9.6 \pm 1.2$
4U 1543-475	1.125	$0.25 \pm 0.01$	A2 V	IMXB/Transient	$9.4 \pm 1.0$
H1705-250	0.520	$4.86 \pm 0.13$	K3/7 V	LMXB/Transient	$6 \pm 2$
GS 1124-684	0.433	$3.01 \pm 0.15$	K3/5 V	„	$7.0 \pm 0.6$
XTE J1859+226 <sup>c</sup>	0.382	$7.4 \pm 1.1$	–	„	–
GS2000+250	0.345	$5.01 \pm 0.12$	K3/7 V	„	$7.5 \pm 0.3$
A0620-003	0.325	$2.72 \pm 0.06$	K4 V	„	$11 \pm 2$
XTE J1650-500	0.321	$2.73 \pm 0.56$	K4 V	„	–
GRS 1009-45	0.283	$3.17 \pm 0.12$	K7/M0 V	„	$5.2 \pm 0.6$
GRO J0422+32	0.212	$1.19 \pm 0.02$	M2 V	„	$4 \pm 1$
XTE J1118+480	0.171	$6.3 \pm 0.2$	K5/M0 V	„	$6.8 \pm 0.4$

Source: J. Casares, astro-ph/0612312

Schwarze Löcher in X-ray binaries besonders “einfach” detektierbar

## Weisses Loch im Spülbecken



# Outline

Schwarze Löcher

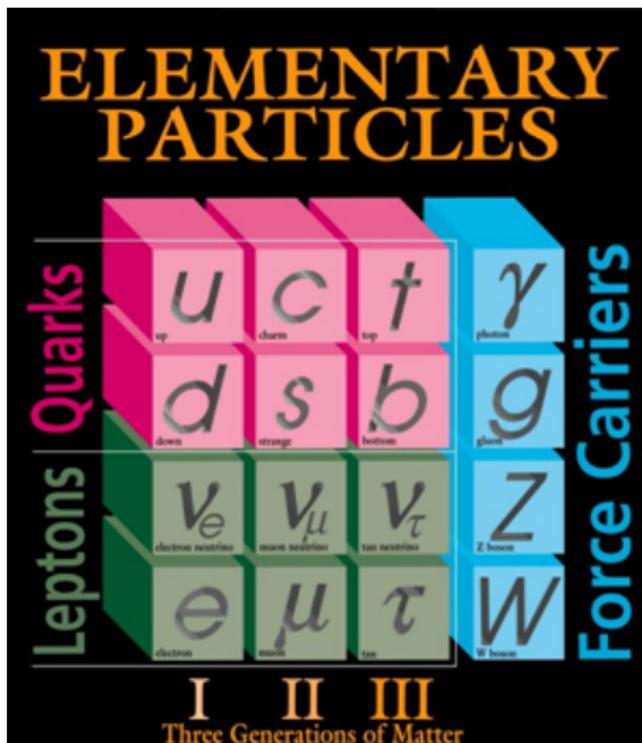
Dunkle Materie

Dunkle Energie

# Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

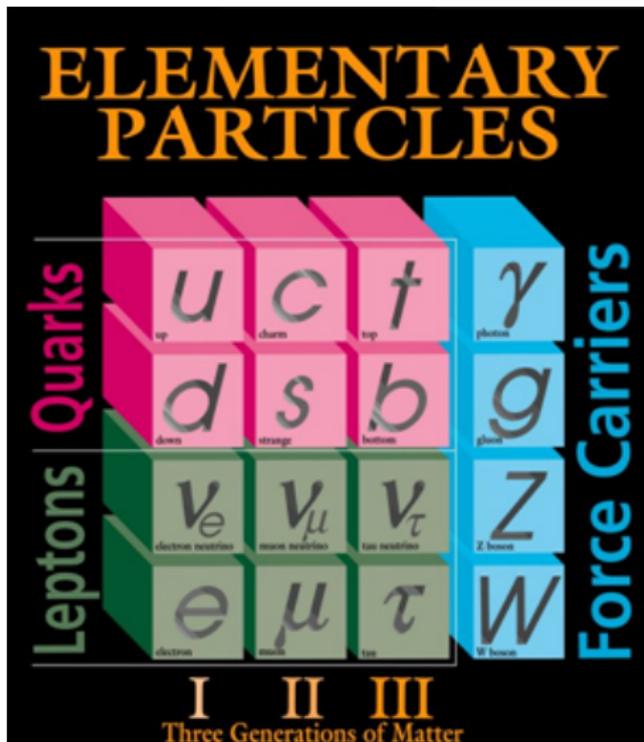
- ▶ Drei leichte Generationen



## Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks



## Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen

ELEMENTARY PARTICLES				
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	Force Carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z$ Z boson
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W$ W boson
I      II      III				
Three Generations of Matter				

## Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen

	I	II	III	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z$ Z boson
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	
	I	II	III	
	Three Generations of Matter			

## Periodensystem der Elementarteilchen

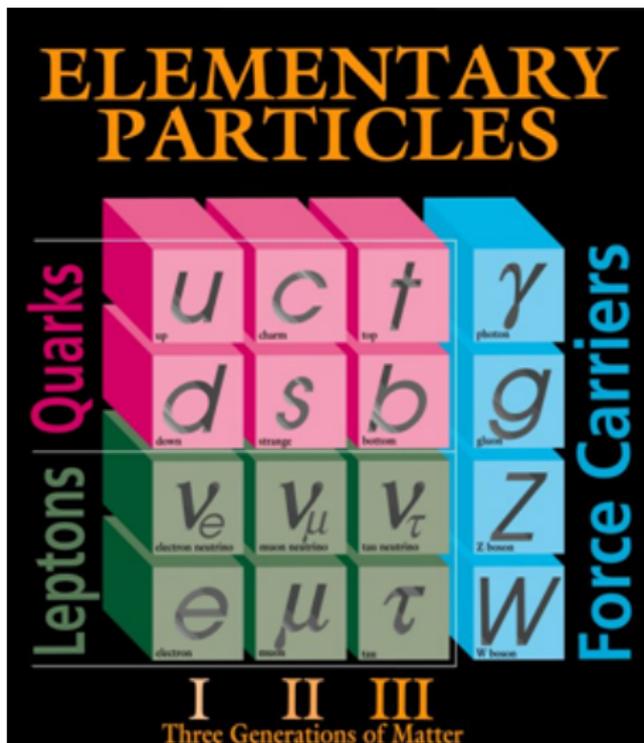
Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

	I	II	III	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z$ Z boson
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	
	I	II	III	
	Three Generations of Matter			

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!

## Periodensystem der Elementarteilchen

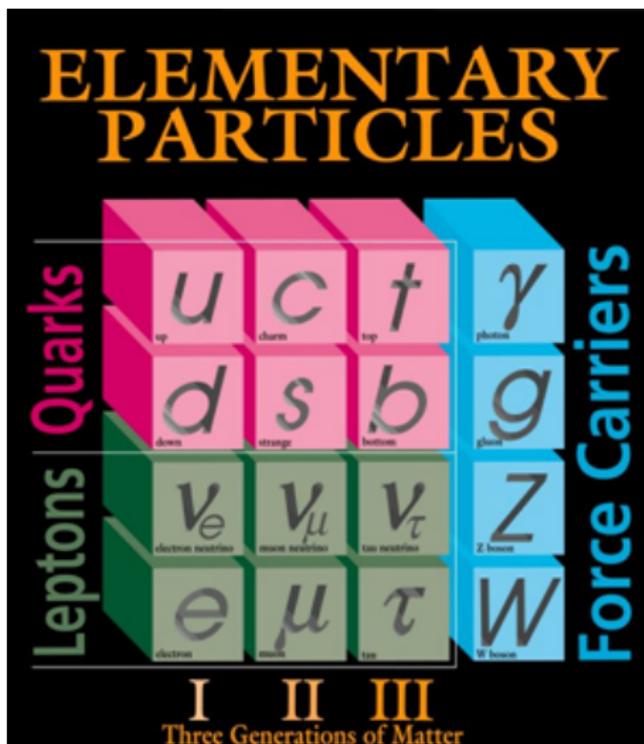
Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:



- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen

## Periodensystem der Elementarteilchen

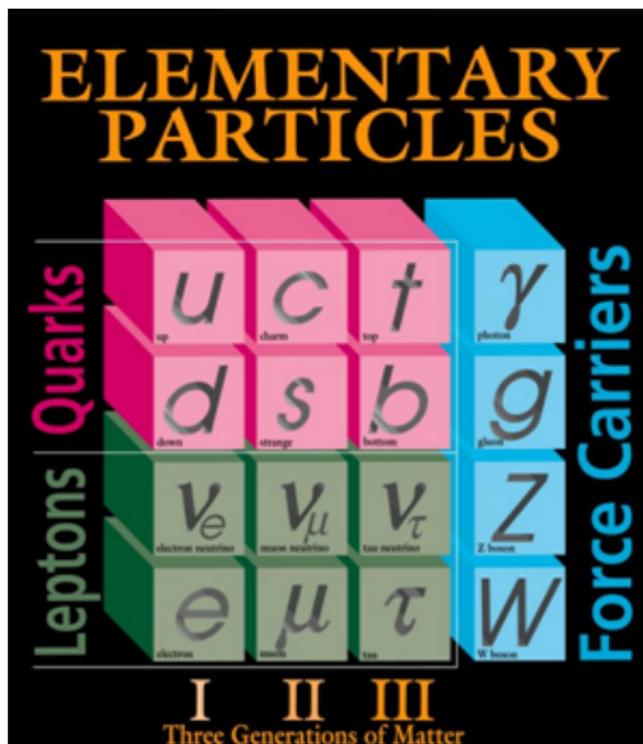
Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:



- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon  $\gamma$

## Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:



- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon  $\gamma$
- ▶ Schwache Kraft: Vektorbosonen  $W^\pm, Z$

## Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

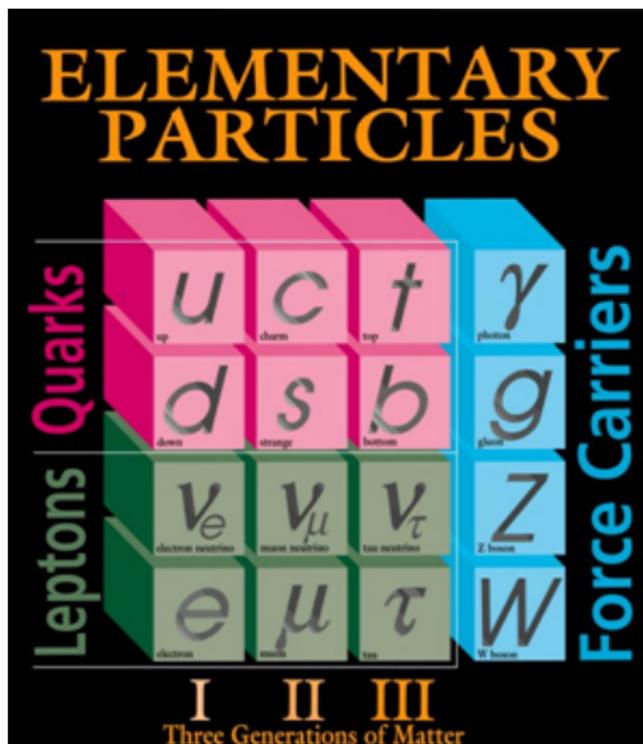
ELEMENTARY PARTICLES				
	I	II	III	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	Force Carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	
			$\gamma$ photon	
			$g$ gluon	
			$Z$ Z boson	
			$W$ W boson	

I II III  
Three Generations of Matter

- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon  $\gamma$
- ▶ Schwache Kraft: Vektorbosonen  $W^\pm, Z$
- ▶ Starke Kraft: Gluonen  $g$

## Periodensystem der Elementarteilchen

Teilchen die wir kennen und beobachtet haben:

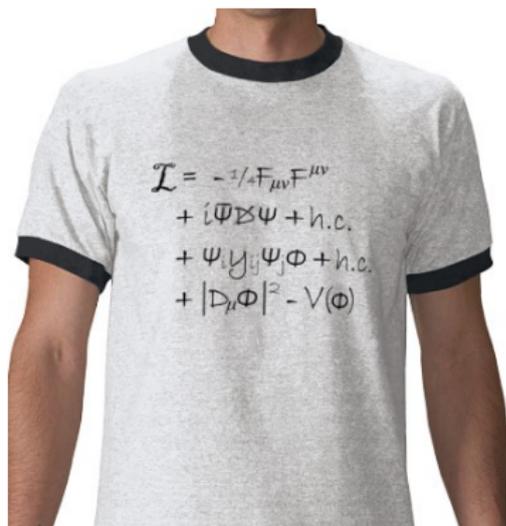


- ▶ Drei leichte Generationen
- ▶ Je zwei Leptonen und Quarks
- ▶ Alle Materieteilchen Fermionen
- ▶ Charakterisiert durch Massen und Ladungen
- ▶ Einziger Unterschied zwischen Generationen: Massen!
- ▶ Kräfte durch Bosonen übertragen
- ▶ Electromagnetische Kraft: Photon  $\gamma$
- ▶ Schwache Kraft: Vektorbosonen  $W^{\pm}, Z$
- ▶ Starke Kraft: Gluonen  $g$
- ▶ Das ist alles! (naja, fast...)

## Standard Model der Teilchenphysik

Eine Theorie von (fast) allem:

- ▶ Alle Experimente bisher im Einklang mit SM!

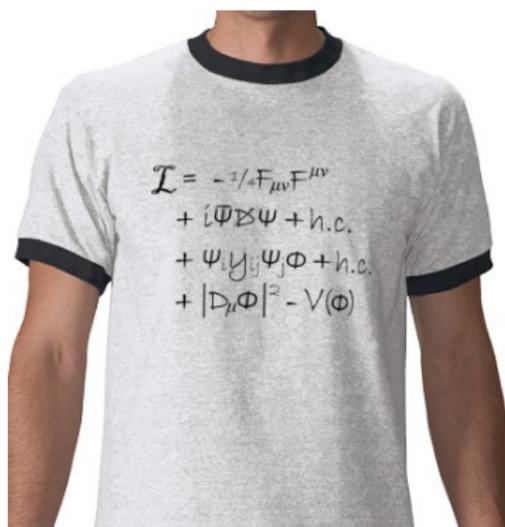


Standard Model (SM) Lagrange density

$F_{\mu\nu}$ : bosons,  $\Psi$ : fermions,  $\Phi$ : Higgs

## Standard Model der Teilchenphysik

Eine Theorie von (fast) allem:



Standard Model (SM) Lagrange density

$F_{\mu\nu}$ : bosons,  $\Psi$ : fermions,  $\Phi$ : Higgs

- ▶ Alle Experimente bisher im Einklang mit SM!
- ▶ Unglaublich präzise  
z.B. gyromagnetischer Faktor Experiment (2008):

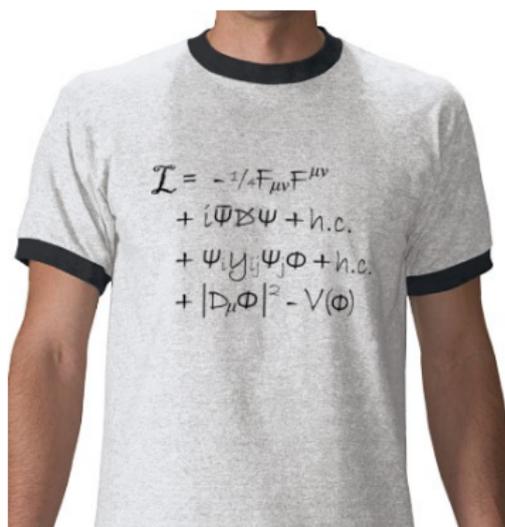
$$\frac{g_e^{\text{exp}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.00000000000028$$

Theorie (2012):

$$\frac{g_e^{\text{the}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.00000000000077$$

# Standard Model der Teilchenphysik

Eine Theorie von (fast) allem:



Standard Model (SM) Lagrange density

$F_{\mu\nu}$ : bosons,  $\Psi$ : fermions,  $\Phi$ : Higgs

- ▶ Alle Experimente bisher im Einklang mit SM!
- ▶ Unglaublich präzise  
z.B. gyromagnetischer Faktor Experiment (2008):

$$\frac{g_e^{\text{exp}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.00000000000028$$

Theorie (2012):

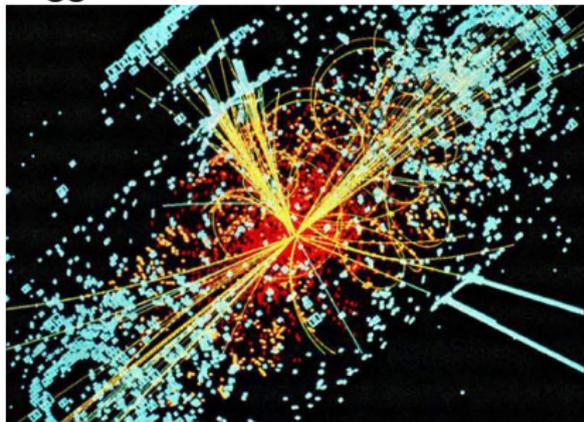
$$\frac{g_e^{\text{the}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.00000000000077$$

- ▶ SM derzeit verbessert am LHC



## Fehlende Einträge in dem “Periodensystem”

Higgs!

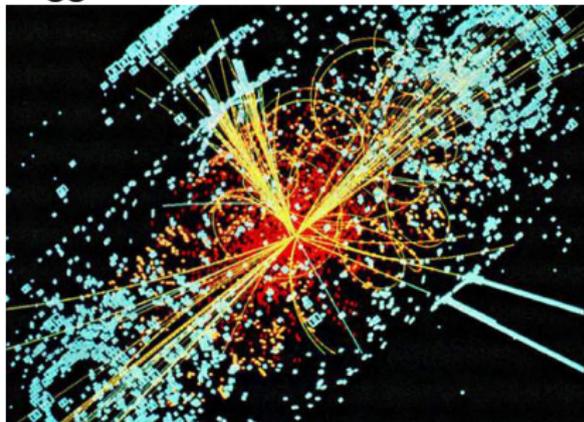


**LHC wird es dieses Jahrzehnt  
finden hat es im Wesentlichen  
entdeckt im Juli 2012!**

$$m_H \sim 125\text{GeV}$$

## Fehlende Einträge in dem "Periodensystem"

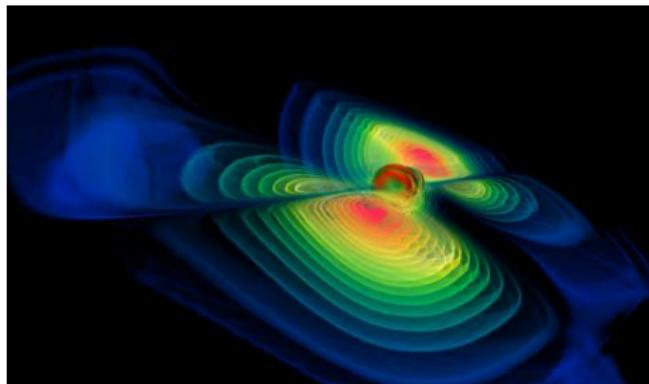
Higgs!



**LHC wird es dieses Jahrzehnt finden hat es im Wesentlichen entdeckt im Juli 2012!**

$$m_H \sim 125 \text{ GeV}$$

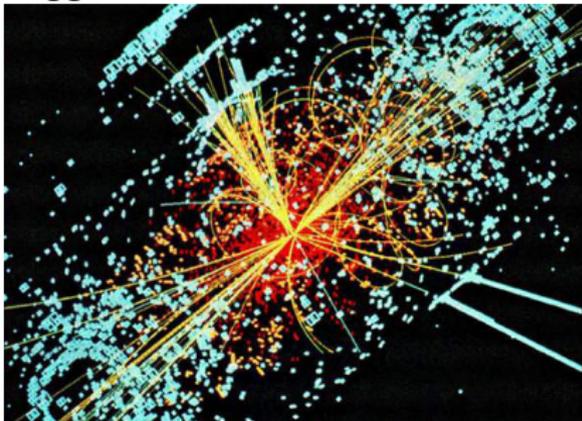
Gemäss ART:



**Gravitonen (Gravitationswellen)  
LIGO findet sie diese Dekade!**

## Fehlende Einträge in dem “Periodensystem”

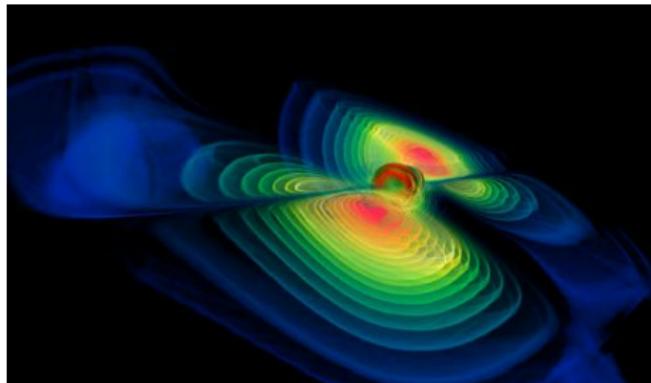
Higgs!



**LHC wird es dieses Jahrzehnt finden hat es im Wesentlichen entdeckt im Juli 2012!**

$$m_H \sim 125 GeV$$

Gemäss ART:



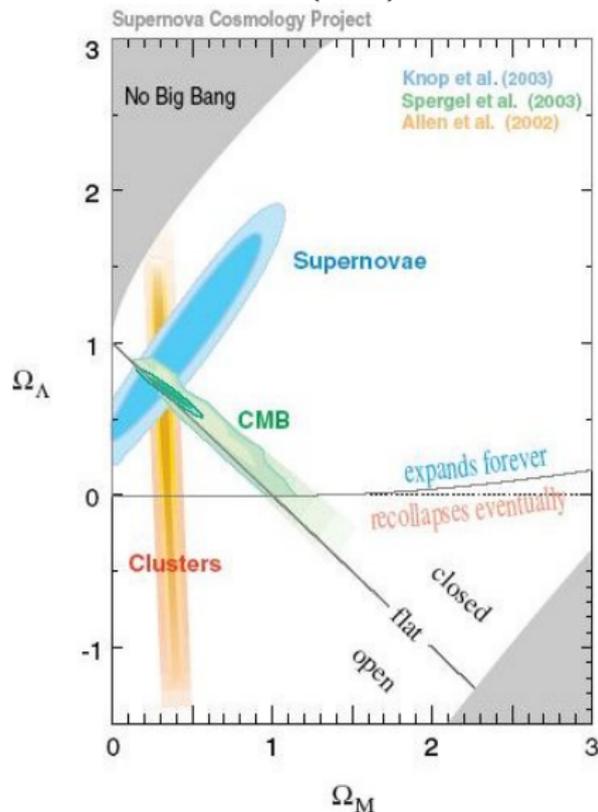
Gravitonen (Gravitationswellen)  
**LIGO findet sie diese Dekade!**

Weitere Teilchen jenseits des SM?  
Inflaton?, SUSY?, Axionen?, Dunkle Spinoren?, Kaluza-Kleins?, ...

**LHC und Astro/Astroteilchen-physik könnten Hinweise finden!**

# Standard Model der Kosmologie

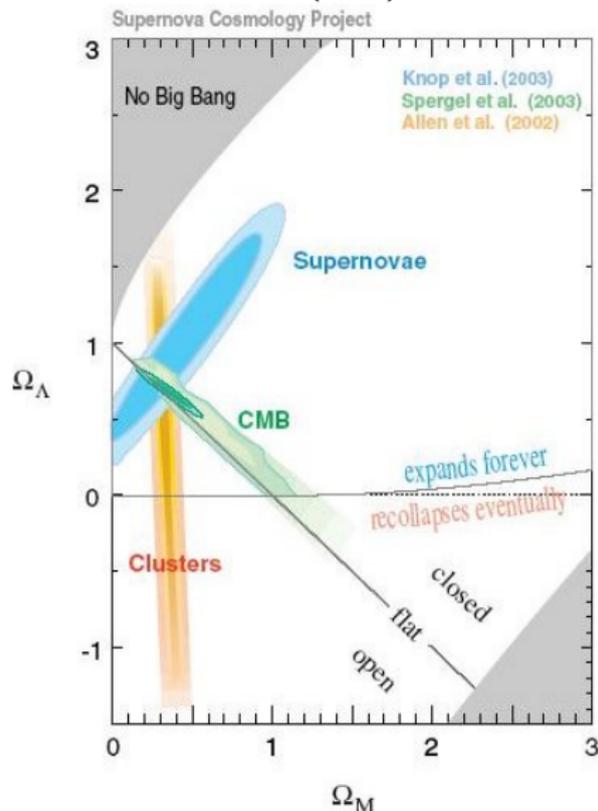
Eine Theorie von (fast) Allem:



- Kosmologie ist nun eine Präzisionswissenschaft!

# Standard Model der Kosmologie

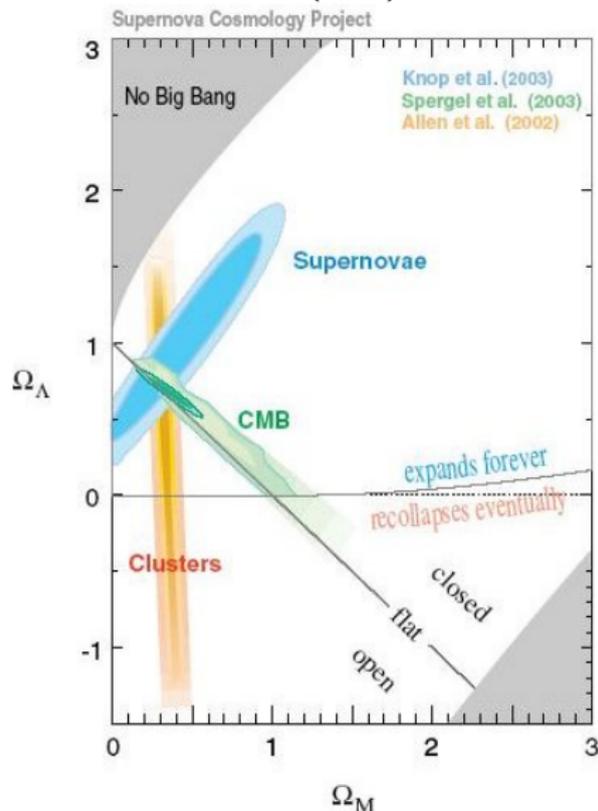
Eine Theorie von (fast) Allem:



- ▶ Kosmologie ist nun eine Präzisionswissenschaft!
- ▶ Z.B. Energiedichten bekannt im %-Bereich:  
 $\Omega_b, \Omega_\nu, \Omega_\gamma, \Omega_m, \Omega_\Lambda, \dots$   
(Baryonen, Neutrinos, Strahlung, Materie, kosmologische Konstante)

# Standard Model der Kosmologie

Eine Theorie von (fast) Allem:



- ▶ Kosmologie ist nun eine Präzisionswissenschaft!
- ▶ Z.B. Energiedichten bekannt im %-Bereich:  
 $\Omega_b, \Omega_\nu, \Omega_\gamma, \Omega_m, \Omega_\Lambda, \dots$   
(Baryonen, Neutrinos, Strahlung, Materie, kosmologische Konstante)
- ▶ Derzeit viele neue Experimente!



## Zusammenfassung von dem was wir wissen

- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten

## Zusammenfassung von dem was wir wissen

- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten
- ▶ Fehlende Puzzlesteine: Higgs und Graviton

## Zusammenfassung von dem was wir wissen

- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten
- ▶ Fehlende Puzzlesteine: Higgs und Graviton
- ▶ Wenn sie existieren: werden diese Dekade entdeckt!

## Zusammenfassung von dem was wir wissen

- ▶ Standard Modelle der Teilchenphysik und Kosmologie (inkl. ART) konsistent mit fast Allem was wir in der Natur beobachten
- ▶ Fehlende Puzzlesteine: Higgs und Graviton
- ▶ Wenn sie existieren: werden diese Dekade entdeckt!

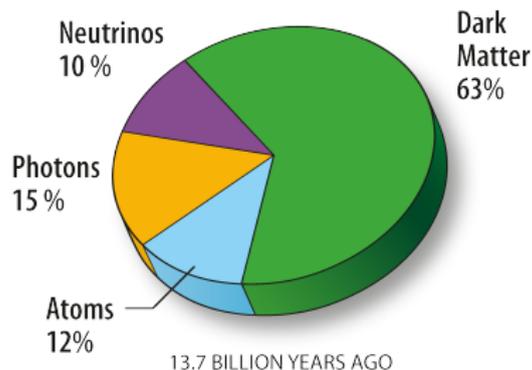
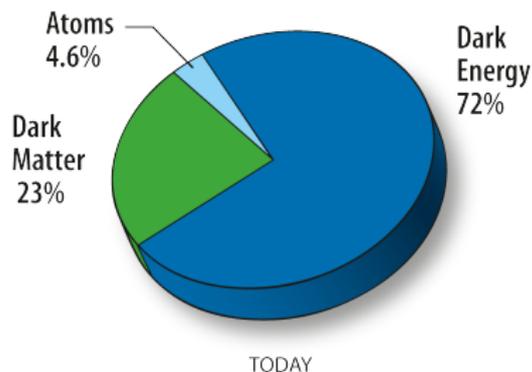
Fehlt noch etwas?



## Woraus besteht das Universum?

Sammeln alle Daten:

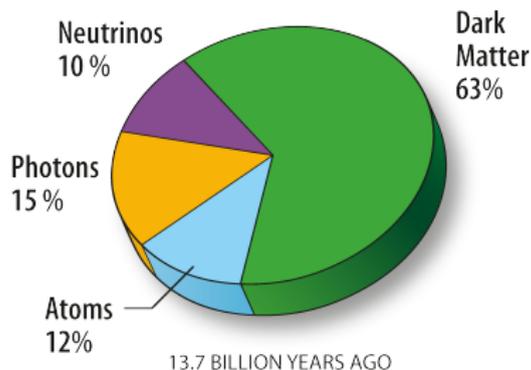
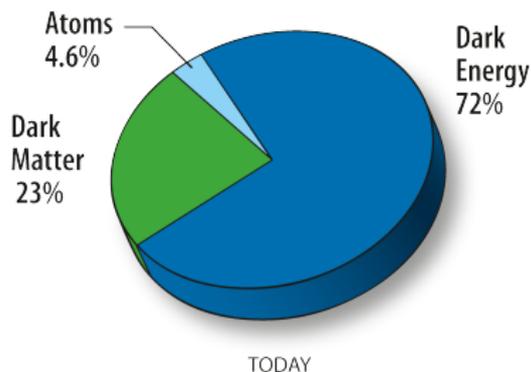
- Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!



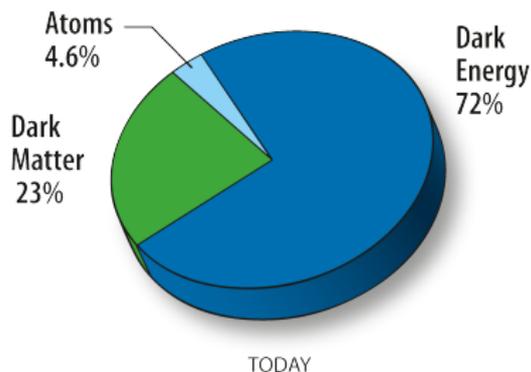
# Woraus besteht das Universum?

## Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten

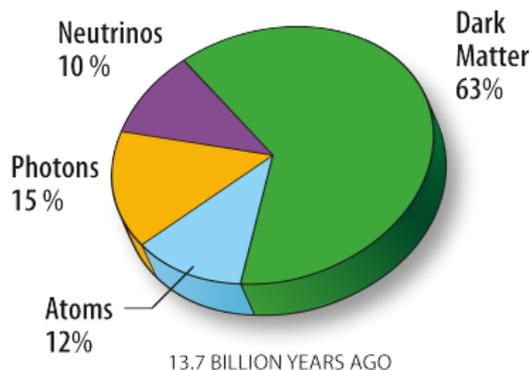


# Woraus besteht das Universum?

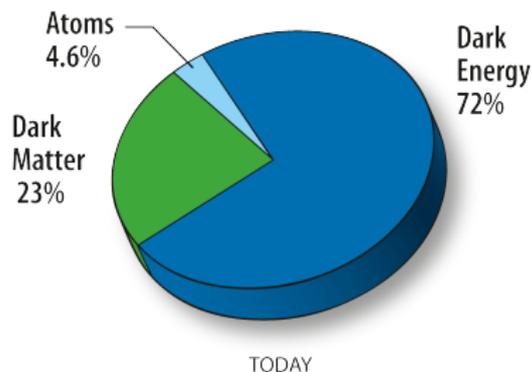


## Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Plausibler Kandidat: SUSY

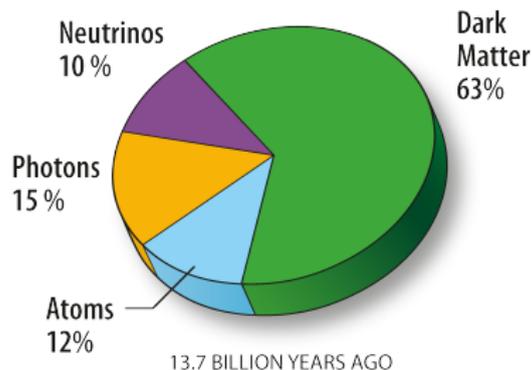


## Woraus besteht das Universum?

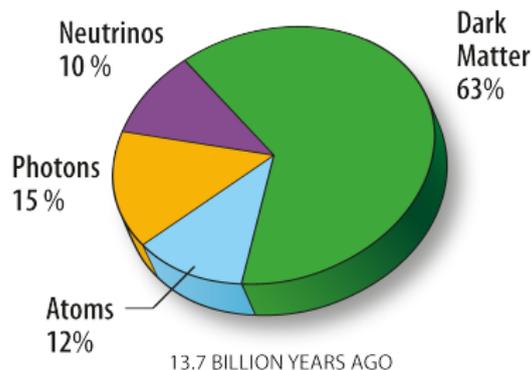
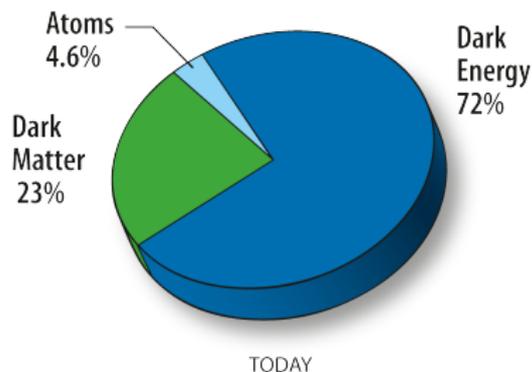


### Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Plausibler Kandidat: SUSY
- ▶ Könnte am LHC entdeckt werden



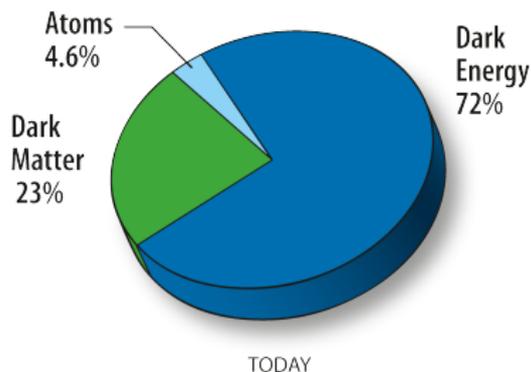
# Woraus besteht das Universum?



## Sammeln alle Daten:

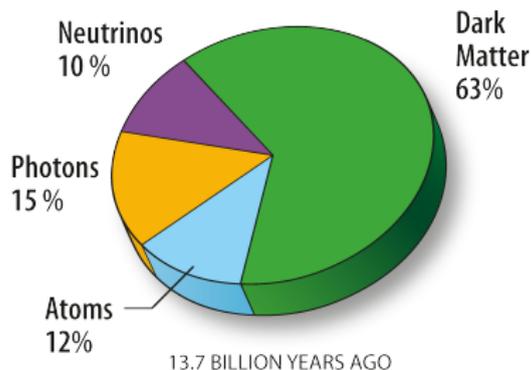
- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Plausibler Kandidat: SUSY
- ▶ Könnte am LHC entdeckt werden
- ▶ Weniger plausibel, aber logisch möglich: dunkle Materie ist Gravitationseffekt

# Woraus besteht das Universum?

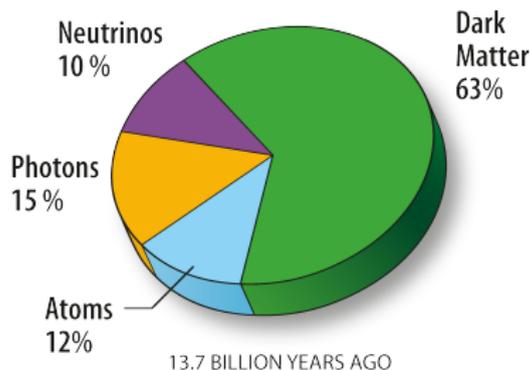
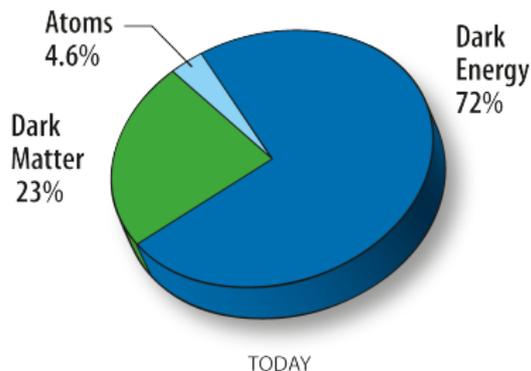


## Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Mehr als 70% "Dunkle Energie"



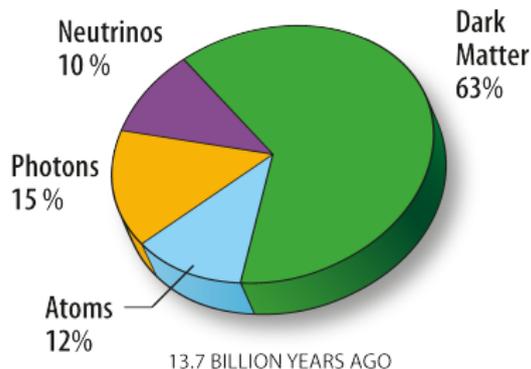
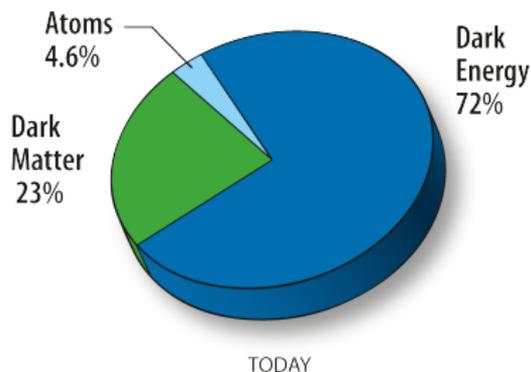
# Woraus besteht das Universum?



## Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Mehr als 70% "Dunkle Energie"
- ▶ Einfachste korrekte Erklärung: kosmologische Konstante

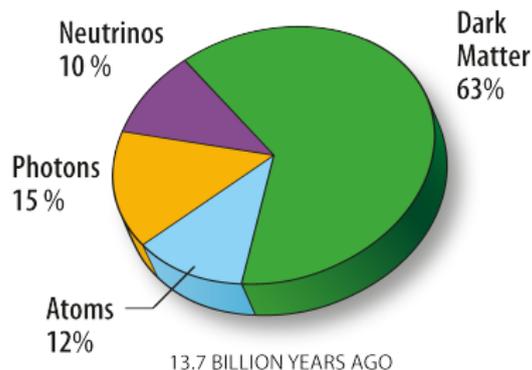
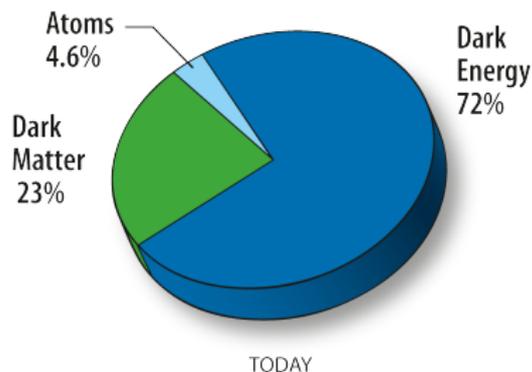
# Woraus besteht das Universum?



## Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Mehr als 70% "Dunkle Energie"
- ▶ Einfachste korrekte Erklärung: kosmologische Konstante
- ▶ ABER: warum so klein???  $10^{-123}$

## Woraus besteht das Universum?

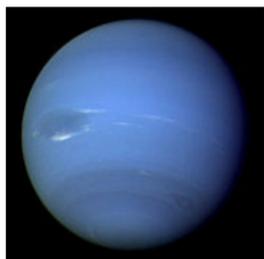


### Sammeln alle Daten:

- ▶ Fortschritt der letzten 2 Dekaden: wir kennen weniger als 5% des Universums und wissen es!
- ▶ Dunkle Materie: viele Indikationen, viele Kandidaten
- ▶ Mehr als 70% "Dunkle Energie"
- ▶ Einfachste korrekte Erklärung: kosmologische Konstante
- ▶ ABER: warum so klein???  $10^{-123}$
- ▶ Nobelpreis 2011 an Perlmutter, Riess und Schmidt für Entdeckung der kosmischen Beschleunigung!

## Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

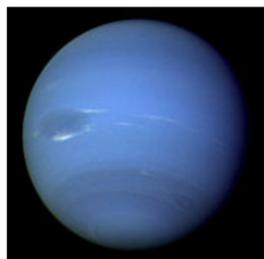


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits

## Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

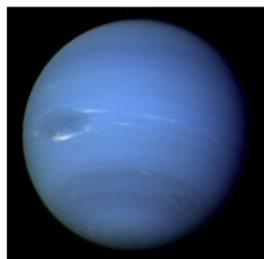


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!

## Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:

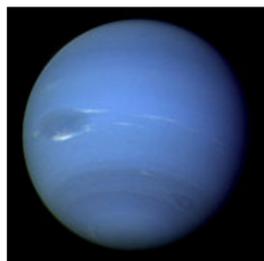


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher

## Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

### Neptun:

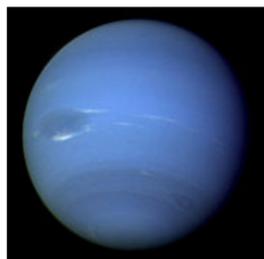


(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1845: John Couch Adams und Urbain Le Verrier sagen neuen Planeten vorher und berechnen seine Position

## Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:



(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1845: John Couch Adams und Urbain Le Verrier sagen neuen Planeten vorher und berechnen seine Position
- ▶ 1846: Bestätigung durch Beobachtung durch Johann Gottfried Galle und Heinrich Louis d'Arrest

## Dunkle Materie Hypothese: Früher Erfolg...

Neptun:



(picture by NASA)

- ▶ 1821: Alexis Bouvard veröffentlicht Tabellen des Uranus-Orbits
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1845: John Couch Adams und Urbain Le Verrier sagen neuen Planeten vorher und berechnen seine Position
- ▶ 1846: Bestätigung durch Beobachtung durch Johann Gottfried Galle und Heinrich Louis d'Arrest

Entdeckung Neptuns erster Erfolg des Dunkle-Materie-Konzeptes!

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position
- ▶ 1860: “Bestätigung” durch Beobachtung durch Lescarbault

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position
- ▶ 1860: “Bestätigung” durch Beobachtung durch Lescarbault
- ▶ 1915: Einstein erklärt Merkurs Periheldrehung mit ART

## Dunkle Materie Hypothese: ...und früher Fehlschlag

Vulcan:



(picture based on  
Star Trek)

- ▶ 1840: François Arago schlägt Urbain Le Verrier Problem des Merkur-Orbits vor
- ▶ Beobachtungen weichen von Tabellen ab!
- ▶ Verschiedene Erklärungen: ändern Gravitationsgesetz oder sagen Dunkle Materie vorher
- ▶ 1859: Urbain Le Verrier sagt neuen Planeten vorher und berechnet seine Position
- ▶ 1860: “Bestätigung” durch Beobachtung durch Lescarbault
- ▶ 1915: Einstein erklärt Merkurs Periheldrehung mit ART

Nicht-Entdeckung von Vulcan erster Fehlschlag des Dunkle-Materie-Konzeptes!

# Astrophysik

Eine moderne Variante des Neptun–Vulcan Dilemmas...

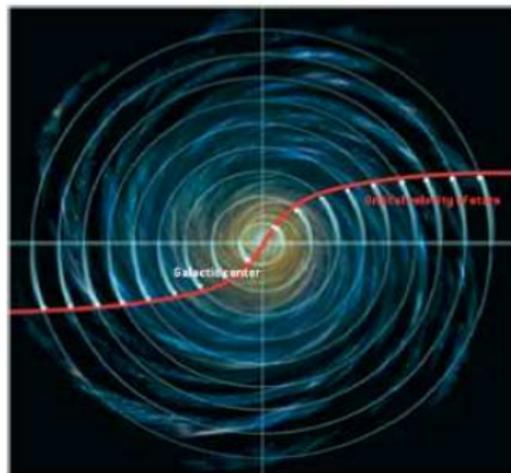
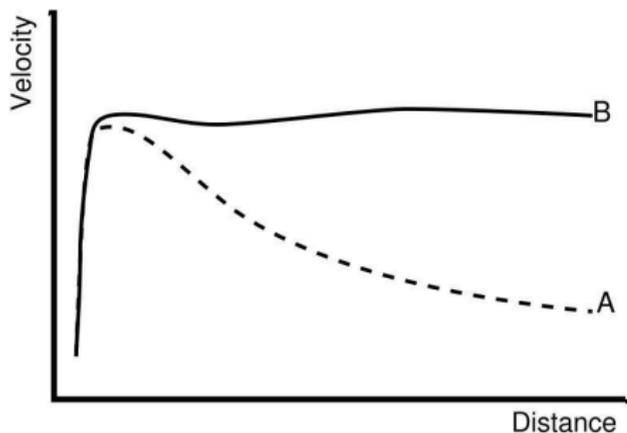
Prominentes Beispiel für Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung:

# Astrophysik

## Eine moderne Variante des Neptun–Vulcan Dilemmas...

Prominentes Beispiel für Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung:

- ▶ Galaktische Rotationskurven (pictures by Wikipedia)



A = Theorie, B = Beobachtung

## Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

### Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden



MOND, TeVeS, modifizierte Gravitationstheorien, ...

## Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

### Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden
- ▶ Neptun-Szenario erscheint wahrscheinlich, aber Dunkle Materie ist noch nicht direkt beobachtet worden



LSP, axion, WIMP, MACHO, ELKO, ...

## Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

### Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden
- ▶ Neptun-Szenario erscheint wahrscheinlich, aber Dunkle Materie ist noch nicht direkt beobachtet worden
- ▶ Disput, welches Szenario in der Natur tatsächlich auftritt



vs.



## Sind wir in einem Neptun- oder einem Vulcan-Szenario?

### Was ist Dunkle Materie?

Wesentliche Tatsachen über die Dunkle Seite des Lebens:

- ▶ Vulcan-Szenario erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden
- ▶ Neptun-Szenario erscheint wahrscheinlich, aber Dunkle Materie ist noch nicht direkt beobachtet worden
- ▶ Disput, welches Szenario in der Natur tatsächlich auftritt



Mögliche Strategien um weiterzukommen:

- ▶ Zeige dass Vulcan-Szenario stimmt (z.B. mit überzeugender Theorie)
- ▶ Zeige dass Neptun-Szenario stimmt (z.B. mit LHC)

Beide Strategien sind derzeit noch ausser Reichweite!

# Outline

Schwarze Löcher

Dunkle Materie

Dunkle Energie

## Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante  $\Lambda$  für statisches Universum

## Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante  $\Lambda$  für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien

## Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante  $\Lambda$  für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB,  $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB

## Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante  $\Lambda$  für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB,  $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB
- ▶ Dicke 1969: Warum ist das Universum so flach?
- ▶ Erklärung durch Guth 1980: Inflation!

## Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante  $\Lambda$  für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB,  $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB
- ▶ Dicke 1969: Warum ist das Universum so flach?
- ▶ Erklärung durch Guth 1980: Inflation!

Vorhersage von Inflation: Universum hat kritische Dichte

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{Materie}} + \Omega_{\text{Dunkle Materie}} + \Omega_{\Lambda} = 100\% \Omega_{\text{kritisch}}$$

# Kosmologie im letzten Jahrhundert

Etwas fehlt!

- ▶ Einstein 1915: ART bedeutet Raumzeit = Geometrie
- ▶ Einstein 1917: kosmologische Konstante  $\Lambda$  für statisches Universum
- ▶ Friedmann 1922: ausdehnendes Universum mögliche Lösung der ART
- ▶ Bestätigung durch Hubble 1929: Rotverschiebung von Galaxien
- ▶ Gamow, Alpher, Herman 1948: Vorhersage des CMB,  $T \approx 5K$
- ▶ Bestätigung durch Penzias, Wilson 1965: Messung des CMB
- ▶ Dicke 1969: Warum ist das Universum so flach?
- ▶ Erklärung durch Guth 1980: Inflation!

Vorhersage von Inflation: Universum hat kritische Dichte

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{Materie}} + \Omega_{\text{Dunkle Materie}} + \Omega_{\Lambda} = 100\% \Omega_{\text{kritisch}}$$

Unabhängige Messungen (Galaxien, Cluster, Strukturformation, ...):

$$\Omega_{\text{Materie}} \approx 5\% \quad \Omega_{\text{Dunkle Materie}} < 35\%$$

Preisfrage: Wo sind die restlichen 60-70% im Budget???



S. Perlmutter



B. Schmidt

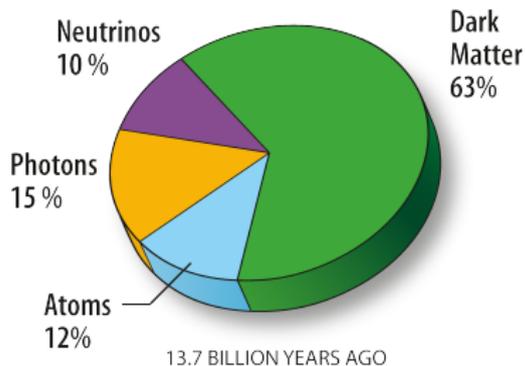
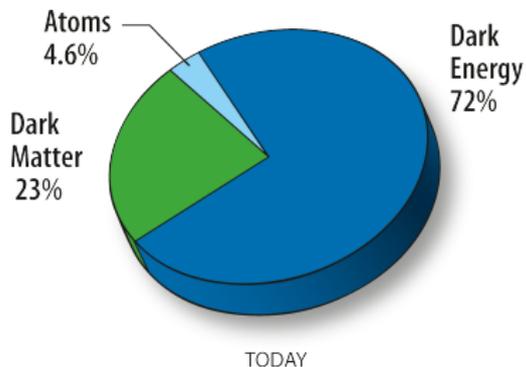


A. Riess

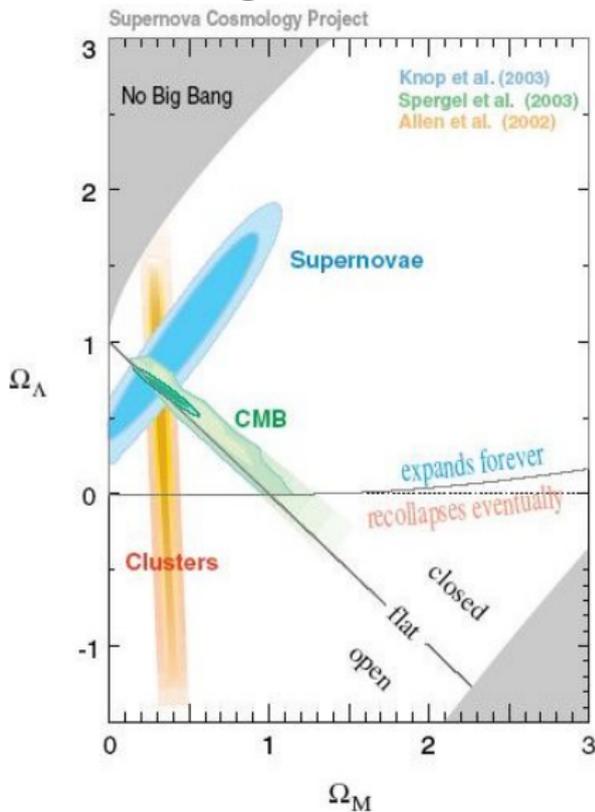
Für die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums

# Standard Model der Kosmologie

## Zur Erinnerung, Teil I:



## Zur Erinnerung, Teil II:



## Beschleunigte Expansion des Universums

Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein
- ▶ Alle experimentellen Daten im Einklang mit der Tatsache, dass etwa 70% der Energie des heutigen Universums “Dunkle Energie” sind

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein
- ▶ Alle experimentellen Daten im Einklang mit der Tatsache, dass etwa 70% der Energie des heutigen Universums “Dunkle Energie” sind
- ▶ Zum ersten Mal in Geschichte der Kosmologie ergeben alle Daten Sinn

## Beschleunigte Expansion des Universums

### Fakten:

- ▶ Sterne klein wie Erde aber schwer wie Sonne explodieren: Typ Ia Supernova
- ▶ Typ Ia Supernovae sind “Standardkerzen”, hell wie Galaxien
- ▶ Können mit Teleskopen beobachtet werden
- ▶ Beobachtung von über 50 Supernovae hat gezeigt dass weit entfernte Typ Ia Supernovae schwächer leuchten als erwartet
- ▶ Plausibelste Erklärung: beschleunigte Expansion des Universums
- ▶ Beschleunigte Expansion erzeugt durch “Dunkle Energie”
- ▶ Einfachste Erklärung Dunkler Energie: kosmologische Konstante, eingeführt von Einstein
- ▶ Alle experimentellen Daten im Einklang mit der Tatsache, dass etwa 70% der Energie des heutigen Universums “Dunkle Energie” sind
- ▶ Zum ersten Mal in Geschichte der Kosmologie ergeben alle Daten Sinn
- ▶ Alles geklärt?

## Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus

## Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich “Dunkler Energie”

## Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich “Dunkler Energie”
- ▶ Universum ist instabil und wird irgendwann zerfallen

## Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

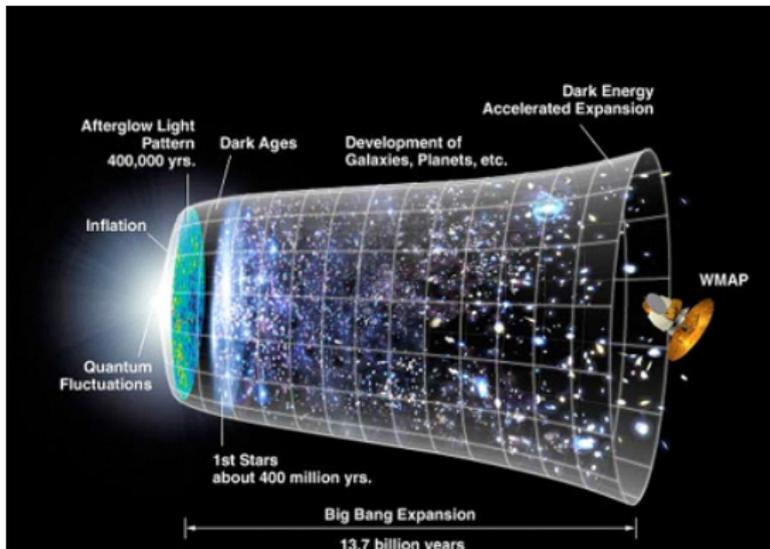
Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich “Dunkler Energie”
- ▶ Universum ist instabil und wird irgendwann zerfallen
- ▶ Kosmologische Konstante unglaublich klein:  $10^{-123}$

## Mögliche Auswirkungen der kosmologischen Konstante

Positive kosmologische Konstante hat überraschende Konsequenzen:

- ▶ Universum dünnt sich immer mehr aus
- ▶ In ferner Zukunft fast gesamte Energie gleich "Dunkler Energie"
- ▶ Universum ist instabil und wird irgendwann zerfallen
- ▶ Kosmologische Konstante unglaublich klein:  $10^{-123}$
- ▶ Bisher einzige Erklärung der kosmologischen Konstante: Multiversum



# Weinberg's anthropisches Argument

Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

## Weinberg's anthropisches Argument

### Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viel Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante

## Weinberg's anthropisches Argument

### Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viel Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist

## Weinberg's anthropisches Argument

### Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viel Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist
- ▶ Deshalb kann die kosmologische Konstante nicht zu gross sein

## Weinberg's anthropisches Argument

### Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viel Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist
- ▶ Deshalb kann die kosmologische Konstante nicht zu gross sein

Mit diesen Argumenten hat Weinberg die richtige Grössenordnung der kosmologischen Konstante vorhergesagt vor ihrer Entdeckung durch Perlmutter, Riess und Schmidt im Jahr 1998

Keine andere (“echte”) Erklärung ist davor oder seither gefunden worden, trotz vieler beherzter Versuche

## Weinberg's anthropisches Argument

### Die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts

Warum ist die kosmologische Konstante so klein?

- ▶ Nehmen wir an es gäbe viel Universen mit verschiedenen Werten der kosmologischen Konstante
- ▶ Wir sind auf jeden Fall in einem der Universen das kompatibel mit der Existenz von Beobachtern ist
- ▶ Deshalb kann die kosmologische Konstante nicht zu gross sein

Mit diesen Argumenten hat Weinberg die richtige Grössenordnung der kosmologischen Konstante vorhergesagt vor ihrer Entdeckung durch Perlmutter, Riess und Schmidt im Jahr 1998

Keine andere ("echte") Erklärung ist davor oder seither gefunden worden, trotz vieler beherzter Versuche

Vielleicht können wir nicht alle Konstanten vorhersagen...

Tatsachen des Lebens:

Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt

Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt
- ▶ Stringtheorie benötigt Extra-Dimensionen

### Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt
- ▶ Stringtheorie benötigt Extra-Dimensionen
- ▶ Stringtheorie hat viele Lösungen (“Landscape” = “Landschaft”)

### Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt
- ▶ Stringtheorie benötigt Extra-Dimensionen
- ▶ Stringtheorie hat viele Lösungen (“Landscape” = “Landschaft”)
- ▶ Vom 4-dimensionalen Standpunkt ist jede Lösung eine eigene Theorie, also ist Stringtheorie eine “Theorie der Theorien”

### Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt
- ▶ Stringtheorie benötigt Extra-Dimensionen
- ▶ Stringtheorie hat viele Lösungen (“Landscape” = “Landschaft”)
- ▶ Vom 4-dimensionalen Standpunkt ist jede Lösung eine eigene Theorie, also ist Stringtheorie eine “Theorie der Theorien”
- ▶ Möglicherweise gibt es eine “bevorzugte” Lösung die mit unserem Universum übereinstimmt — keine Lösung dieser Art ist bisher gefunden worden

### Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt
- ▶ Stringtheorie benötigt Extra-Dimensionen
- ▶ Stringtheorie hat viele Lösungen (“Landscape” = “Landschaft”)
- ▶ Vom 4-dimensionalen Standpunkt ist jede Lösung eine eigene Theorie, also ist Stringtheorie eine “Theorie der Theorien”
- ▶ Möglicherweise gibt es eine “bevorzugte” Lösung die mit unserem Universum übereinstimmt — keine Lösung dieser Art ist bisher gefunden worden
- ▶ Möglicherweise gibt es keine “bevorzugte” Lösung, und unser Universum ist ein zufälliger Punkt in der Landschaft (konsistent mit unserer Existenz)

### Tatsachen des Lebens:

- ▶ Stringtheorie ist die einzige bekannte Theorie die alle Wechselwirkungen beschreibt
- ▶ Stringtheorie benötigt Extra-Dimensionen
- ▶ Stringtheorie hat viele Lösungen (“Landscape” = “Landschaft”)
- ▶ Vom 4-dimensionalen Standpunkt ist jede Lösung eine eigene Theorie, also ist Stringtheorie eine “Theorie der Theorien”
- ▶ Möglicherweise gibt es eine “bevorzugte” Lösung die mit unserem Universum übereinstimmt — keine Lösung dieser Art ist bisher gefunden worden
- ▶ Möglicherweise gibt es keine “bevorzugte” Lösung, und unser Universum ist ein zufälliger Punkt in der Landschaft (konsistent mit unserer Existenz)

Stringtheorie legitimiert anthropische Argumente a la Weinberg

## Multiversum Idee führte zu stark emotionalen Reaktionen und “Landskepticism”

Christoph Schönborn, Erzbischof von Wien:

“Now, at the beginning of the 21st century, faced with scientific claims like neo-Darwinism and the multiverse hypothesis in cosmology invented to avoid the overwhelming evidence for purpose and design found in modern science, the Catholic Church will again defend human nature by proclaiming that the immanent design evident in nature is real. Scientific theories that try to explain away the appearance of design as the result of chance and necessity are not scientific at all, but, as John Paul put it, an abdication of human intelligence.”

Multiversum Idee führte zu stark emotionalen Reaktionen und  
“Landskepticism”

Bekannter Physiker über anthropische Argumente, vor mehr als 10 Jahren:

“I hate it and it doesn't make sense.”

## Multiversum Idee führte zu stark emotionalen Reaktionen und “Landskepticism”

Bekannter Physiker über anthropische Argumente, vor mehr als 10 Jahren:

“I hate it and it doesn't make sense.”

Derselbe Physiker vor weniger als 5 Jahren:

“I hate it.”

Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach
- ▶ Ich bin ein Mensch, daher ist der Mensch die Krone der Schöpfung

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach
- ▶ Ich bin ein Mensch, daher ist der Mensch die Krone der Schöpfung
- ▶ Wir leben auf der Erde, daher ist die Erde das Zentrum des Sonnensystems

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach
- ▶ Ich bin ein Mensch, daher ist der Mensch die Krone der Schöpfung
- ▶ Wir leben auf der Erde, daher ist die Erde das Zentrum des Sonnensystems
- ▶ Sonne ist wichtig, daher ist die Sonne Zentrum des Universums

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach
- ▶ Ich bin ein Mensch, daher ist der Mensch die Krone der Schöpfung
- ▶ Wir leben auf der Erde, daher ist die Erde das Zentrum des Sonnensystems
- ▶ Sonne ist wichtig, daher ist die Sonne Zentrum des Universums
- ▶ Wir leben in der Milchstrasse, daher ist die Milchstrasse das Zentrum des Universums

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach
- ▶ Ich bin ein Mensch, daher ist der Mensch die Krone der Schöpfung
- ▶ Wir leben auf der Erde, daher ist die Erde das Zentrum des Sonnensystems
- ▶ Sonne ist wichtig, daher ist die Sonne Zentrum des Universums
- ▶ Wir leben in der Milchstrasse, daher ist die Milchstrasse das Zentrum des Universums

Vergleiche mit folgenden Statement:

Unser Universum ist durch die Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie beschrieben.  
Daher muss jedes Universum durch die Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie beschrieben werden.

## Ist “Landskepticism” eine Wiederholung des anthropozentrischen Fehlers?

Einige bekannte anthropozentrische Fehler:

- ▶ Meine Umgebung ist flach, daher ist die Erde flach
- ▶ Ich bin ein Mensch, daher ist der Mensch die Krone der Schöpfung
- ▶ Wir leben auf der Erde, daher ist die Erde das Zentrum des Sonnensystems
- ▶ Sonne ist wichtig, daher ist die Sonne Zentrum des Universums
- ▶ Wir leben in der Milchstrasse, daher ist die Milchstrasse das Zentrum des Universums

Vergleiche mit folgenden Statement:

Unser Universum ist durch die Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie beschrieben.  
Daher muss jedes Universum durch die Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie beschrieben werden.

Es wäre schön wenn das wahr wäre.

Aber vielleicht sollten wir nicht enttäuscht sein, wenn es nicht wahr ist.

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts,  $\Lambda \approx 10^{-123}$

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts,  $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts,  $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts,  $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung
- ▶ Vermutlich wäre jeder glücklich über eine nicht-anthropische Erklärung der kosmologischen Konstante und einer eindeutigen Herleitung der Standardmodelle aus Stringtheorie

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts,  $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung
- ▶ Vermutlich wäre jeder glücklich über eine nicht-anthropische Erklärung der kosmologischen Konstante und einer eindeutigen Herleitung der Standardmodelle aus Stringtheorie
- ▶ Wenn aber keine Erklärung dieser Art existiert müssen wir die Realität der “Landscape” akzeptieren

## Zusammenfassung

- ▶ Kosmologie ist während der letzten 2 Jahrzehnte eine Präzisionswissenschaft geworden
- ▶ Einige Aspekte der Kosmologie bleiben rätselhaft, z.B. die unerträgliche Leichtigkeit des Nichts,  $\Lambda \approx 10^{-123}$
- ▶ Die einzige Erklärung dafür verwendet anthropische Argumente
- ▶ Stringtheorie führt auf natürliche Weise zu einem Multiversum (“Landscape”) und stellt die Basis für anthropische Argumente zur Verfügung
- ▶ Vermutlich wäre jeder glücklich über eine nicht-anthropische Erklärung der kosmologischen Konstante und einer eindeutigen Herleitung der Standardmodelle aus Stringtheorie
- ▶ Wenn aber keine Erklärung dieser Art existiert müssen wir die Realität der “Landscape” akzeptieren

Anzeichen sprechen dafür, dass wir gerade einen Paradigmenwechsel erleben

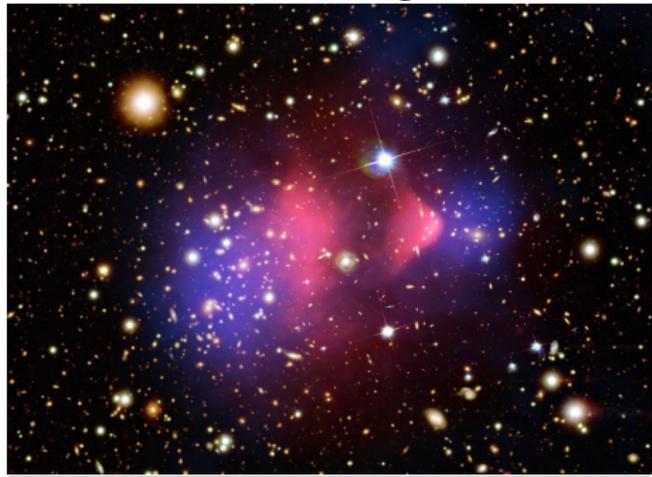
## Schlusswort von Steven Weinberg

‘About the multiverse, it is appropriate to keep an open mind, and opinions among scientists differ widely. In the Austin airport on the way to this meeting I noticed for sale the October issue of a magazine called Astronomy, having on the cover the headline “Why You Live in Multiple Universes.” Inside I found a report of a discussion at a conference at Stanford, at which Martin Rees said that he was sufficiently confident about the multiverse to bet his dog’s life on it, while Andrei Linde said he would bet his own life.’

‘About the multiverse, it is appropriate to keep an open mind, and opinions among scientists differ widely. In the Austin airport on the way to this meeting I noticed for sale the October issue of a magazine called Astronomy, having on the cover the headline “Why You Live in Multiple Universes.” Inside I found a report of a discussion at a conference at Stanford, at which Martin Rees said that he was sufficiently confident about the multiverse to bet his dog’s life on it, while Andrei Linde said he would bet his own life.’

‘As for me, I have just enough confidence about the multiverse to bet the lives of both Andrei Linde and Martin Rees’s dog.’

Ich hoffe es hat Ihnen gefallen...



...noch Fragen?

