

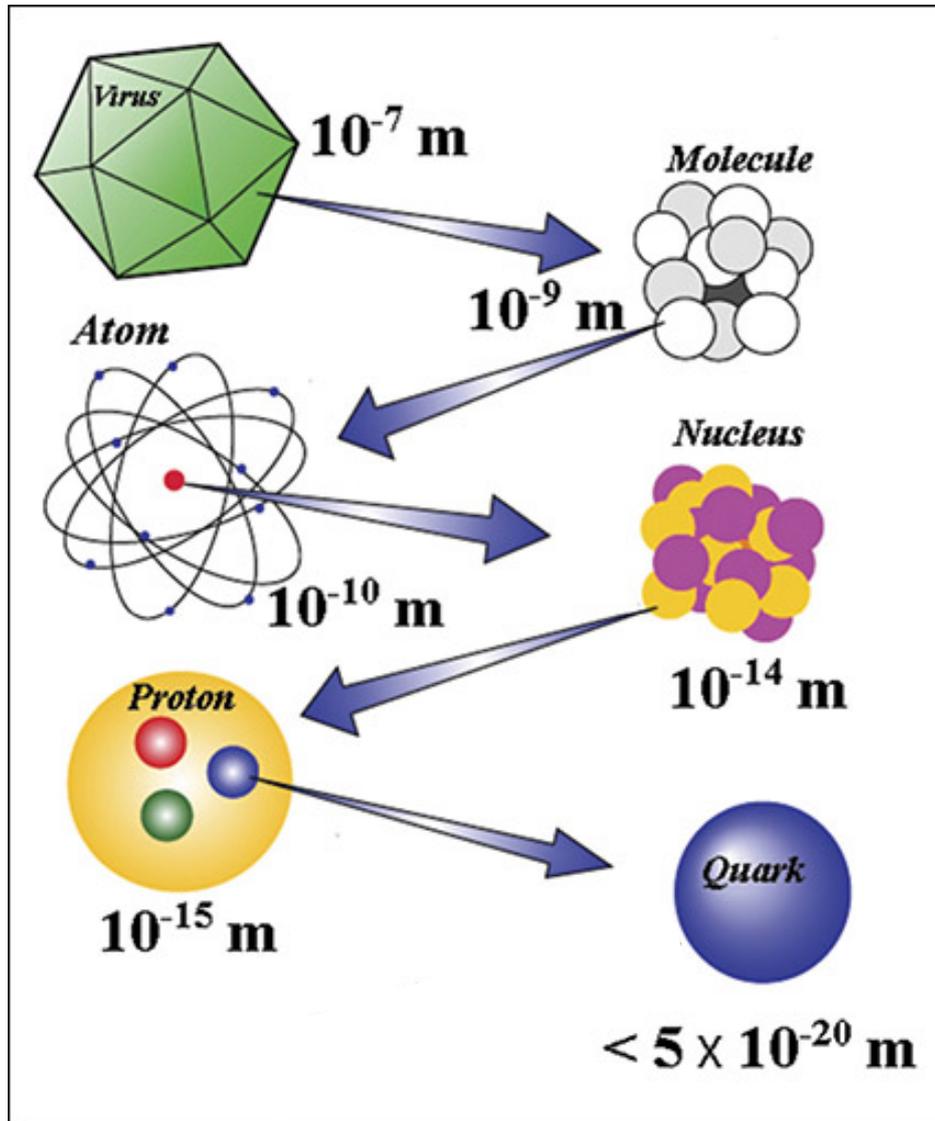


# **Elementarteilchenphysik und Kosmologie**

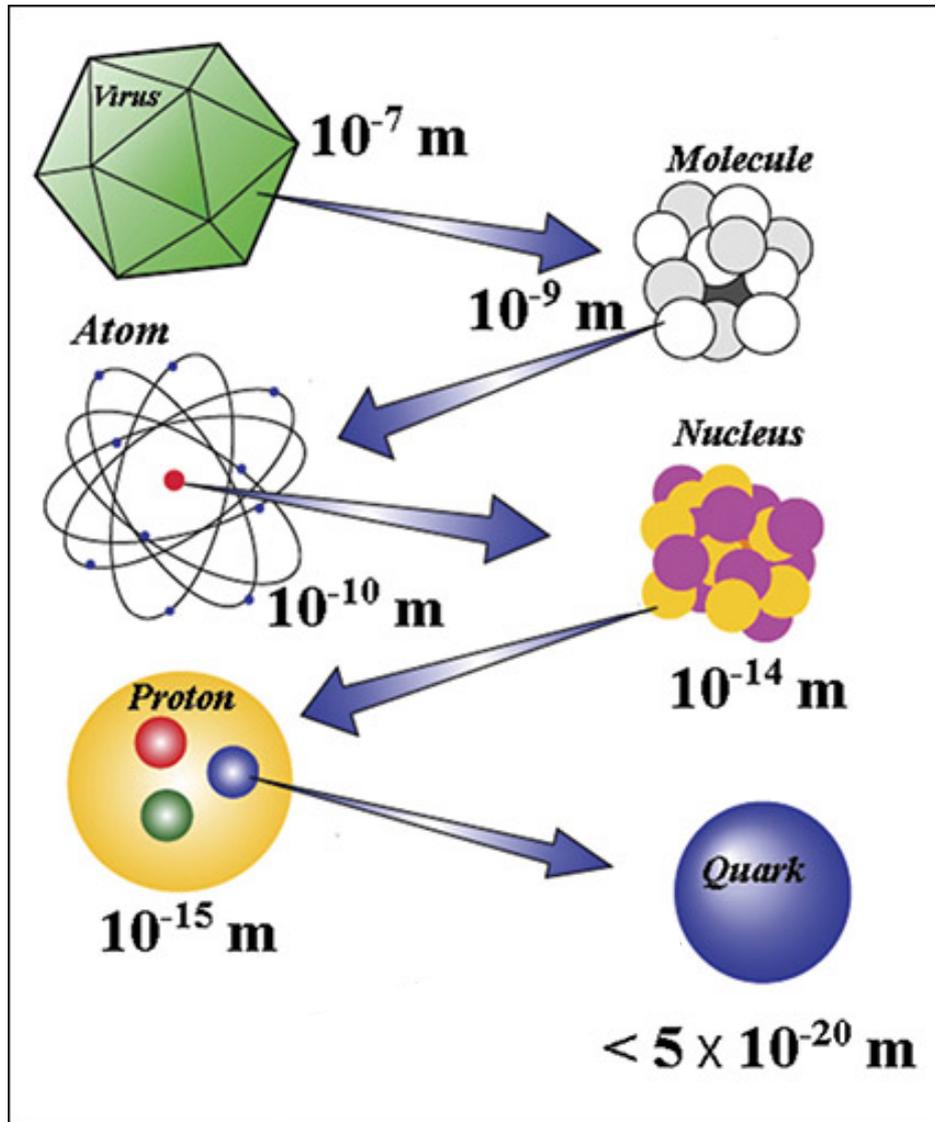
**Dr. Valerie Domcke**

Europäisches Forschungszentrum CERN

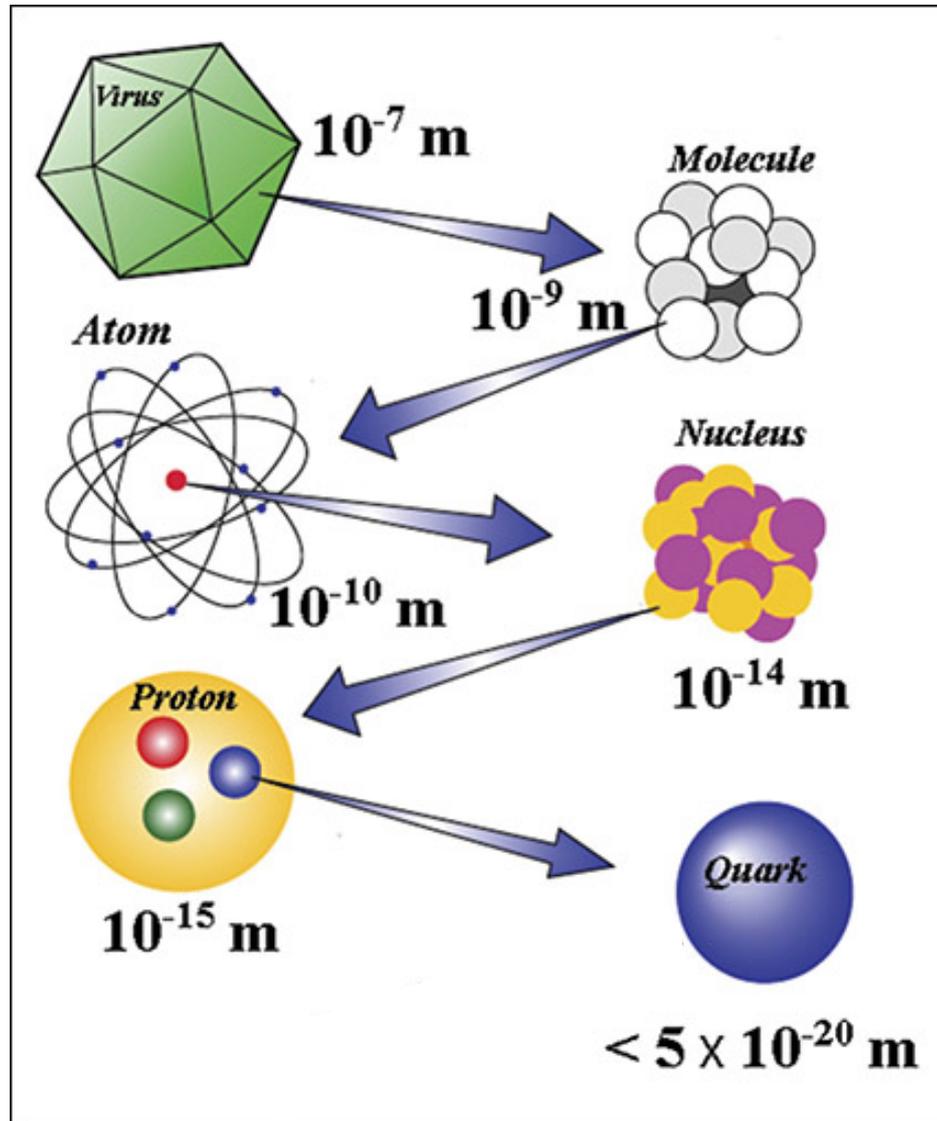
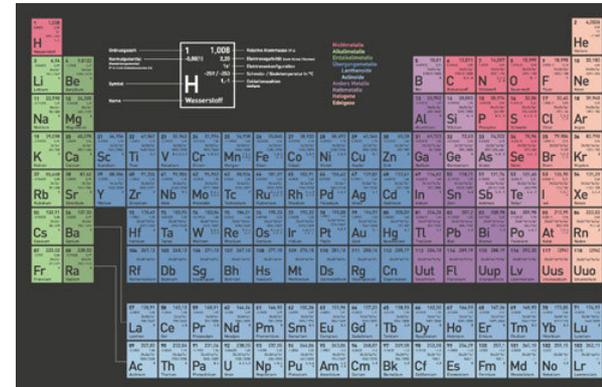
# Von den kleinsten Skalen...



# Von den kleinsten Skalen...

A standard periodic table of elements, color-coded by groups. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names visible. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og).

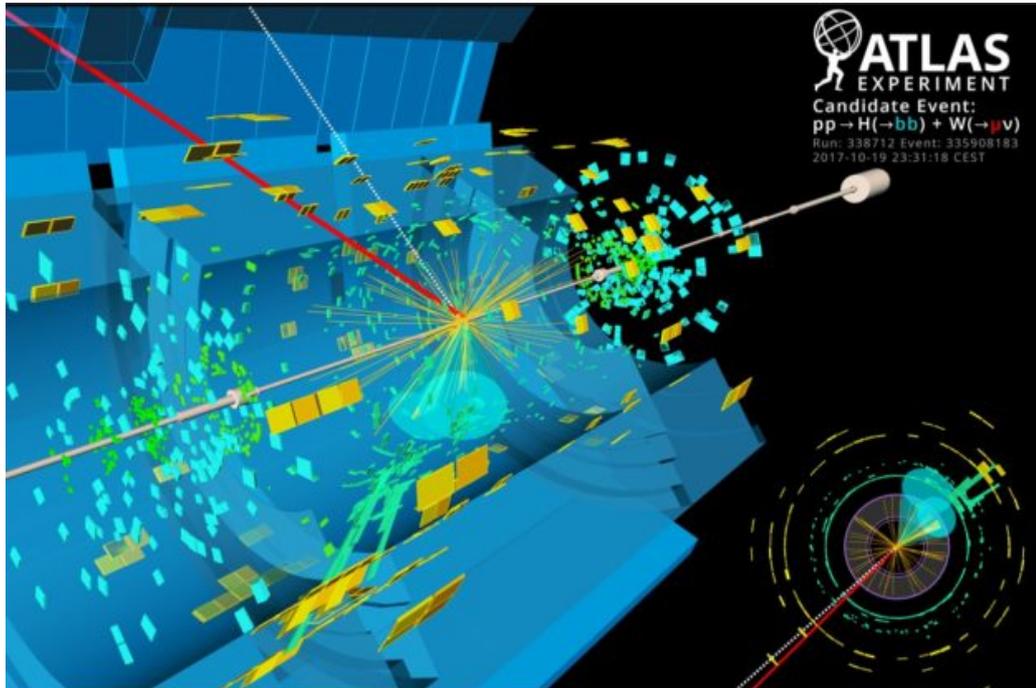
# Von den kleinsten Skalen...



## Standard-Modell der Elementarteilchen

		Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
		I	II	III		
Masse		-2.2 MeV/c <sup>2</sup>	+1.28 GeV/c <sup>2</sup>	+173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	+124.97 GeV/c <sup>2</sup>
Ladung		2/3	2/3	2/3	0	0
Spin		1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>UPPER QUARKS</b>	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	<b>LOWER QUARKS</b>	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b>γ</b> Photon	
	<b>LEPTONS</b>	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Muon	<b>τ</b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
		<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Muon-Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	
						<b>VEKTORBOSONEN</b>
						<b>SKALARBOSONEN</b>

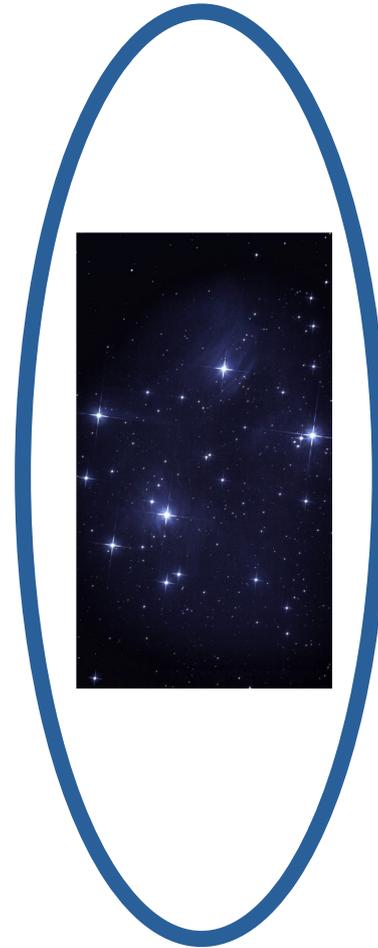
# ... zu den höchsten Energien...



- Bei 'normalen' Temperaturen sind Quarks stark gebunden, Protonen sind stabil
- Durch Kollisionsenergie werden Quarks zu freien Elementarteilchen
- Massivere virtuelle (kurzlebige) Elementarteilchen können gebildet werden

$$10^{-20} \text{ m} = \hbar c / 10 \text{ TeV} \quad \rightarrow \quad \frac{L}{10^{-20} \text{ m}} \hat{=} \frac{10 \text{ TeV}}{E}$$

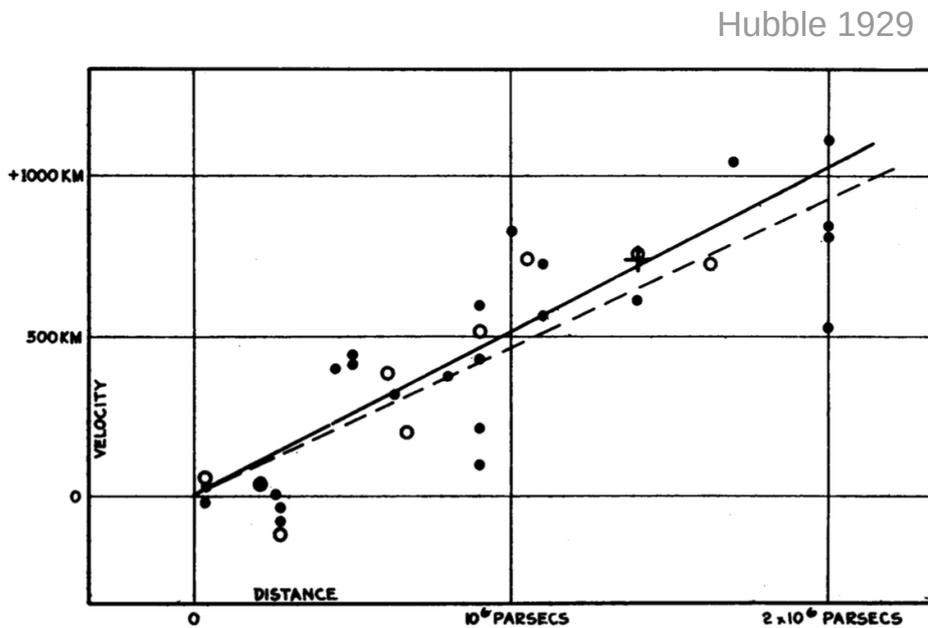
# ...zu den frühesten Zeiten



Universum heute:

- kalt:  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2.7 K)
- ziemlich leer
- inhomogen
- Materie besteht aus Atomen, Molekülen,...
- expandiert

# ...zu den frühesten Zeiten



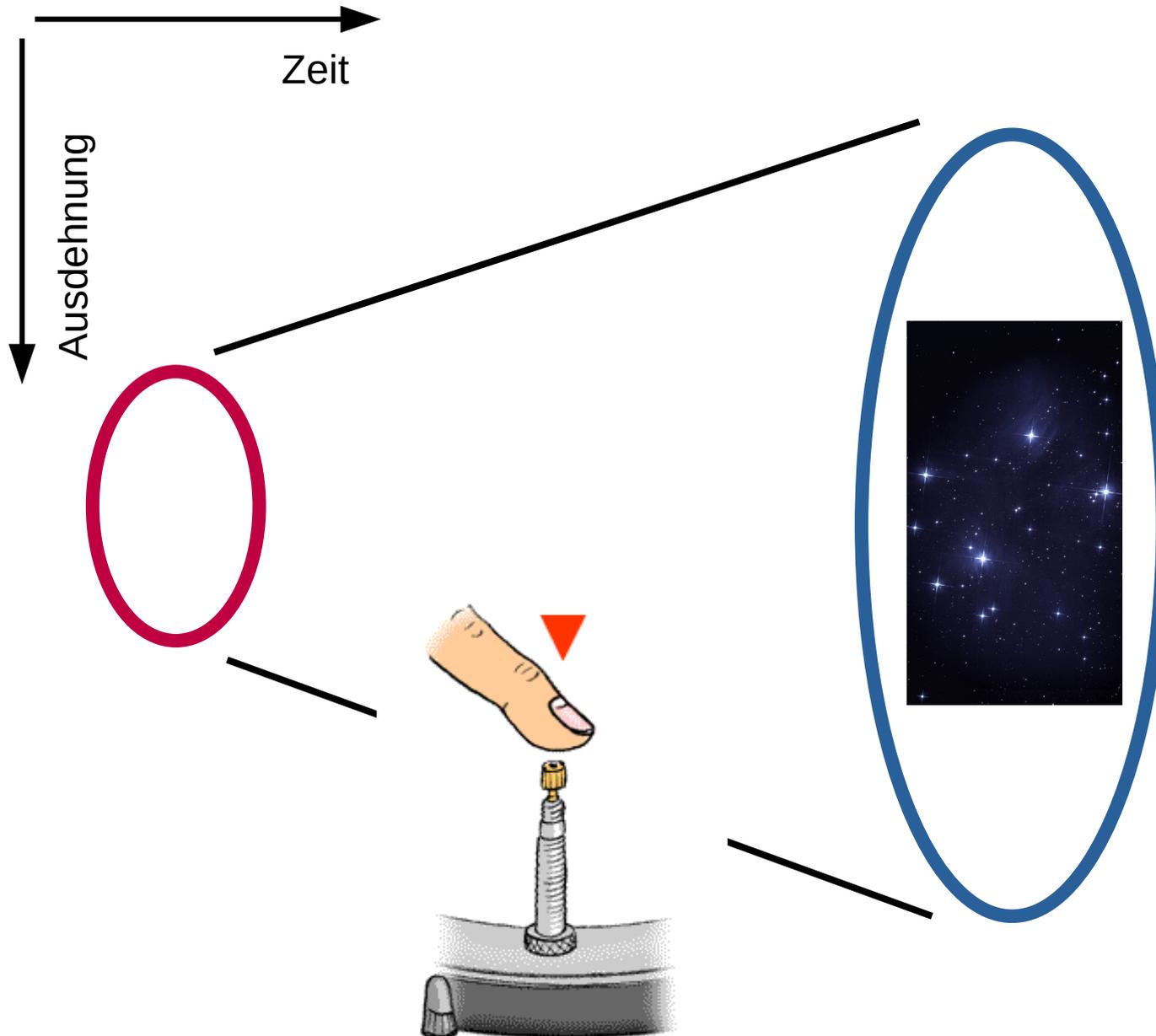
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.



Universum heute:

- kalt:  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2.7 K)
- ziemlich leer
- inhomogen
- Materie besteht aus Atomen, Molekülen,...
- expandiert

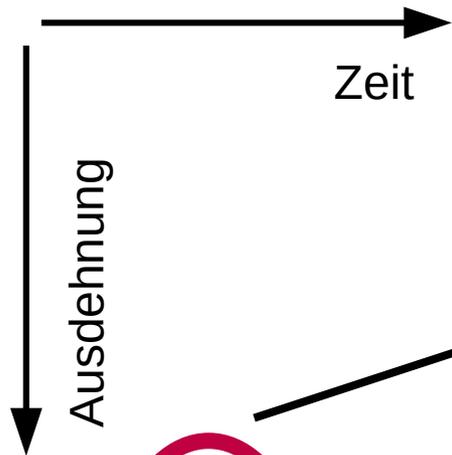
# ...zu den frühesten Zeiten



## Universum heute:

- kalt:  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2.7 K)
- ziemlich leer
- inhomogen
- Materie besteht aus Atomen, Molekülen,...
- expandiert

# ...zu den frühesten Zeiten



vor 13 Milliarden Jahren:

- heiß:  $\sim 10^{20} \text{ }^\circ\text{C}$
- homogenes Plasma
- alle Bausteine der Materie existieren als freie Teilchen

Universum heute:

- kalt:  $-270 \text{ }^\circ\text{C}$  (2.7 K)
- ziemlich leer
- inhomogen
- Materie besteht aus Atomen, Molekülen,...
- expandiert

Standard-Modell der Elementarteilchen

	Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
	I	II	III		
Masse	$\sim 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\sim 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\sim 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	$-4.7 \text{ MeV}/c^2$	$-96 \text{ MeV}/c^2$	$-4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b><math>\gamma</math></b> Photon	
<b>LEPTONEN</b>	$+0.511 \text{ MeV}/c^2$	$+105.66 \text{ MeV}/c^2$	$+1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$-91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	0	0	0	1	
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$-80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	

# Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

**Standard-Modell der Elementarteilchen**

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)		
	I	II	III		
Masse	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b><math>\gamma</math></b> Photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
<b>LEPTONEN</b>	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	
					<b>EICHBOSONEN</b> <b>VEKTORBOSONEN</b>
					<b>SKALARBOSONEN</b>

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\
 & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\
 & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\
 & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)
 \end{aligned}$$

Elementar-'Bausteine' in Rahmen der Quantenfeldtheorie

# Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

## Standard-Modell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)		
	I	II	III		
Masse	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b><math>\gamma</math></b> Photon	
<b>LEPTONEN</b>	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	
					<b>EICHBOSONEN</b> VEKTORBOSONEN
					<b>SKALARBOSONEN</b>

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Elementar-'Bausteine' in Rahmen der Quantenfeldtheorie

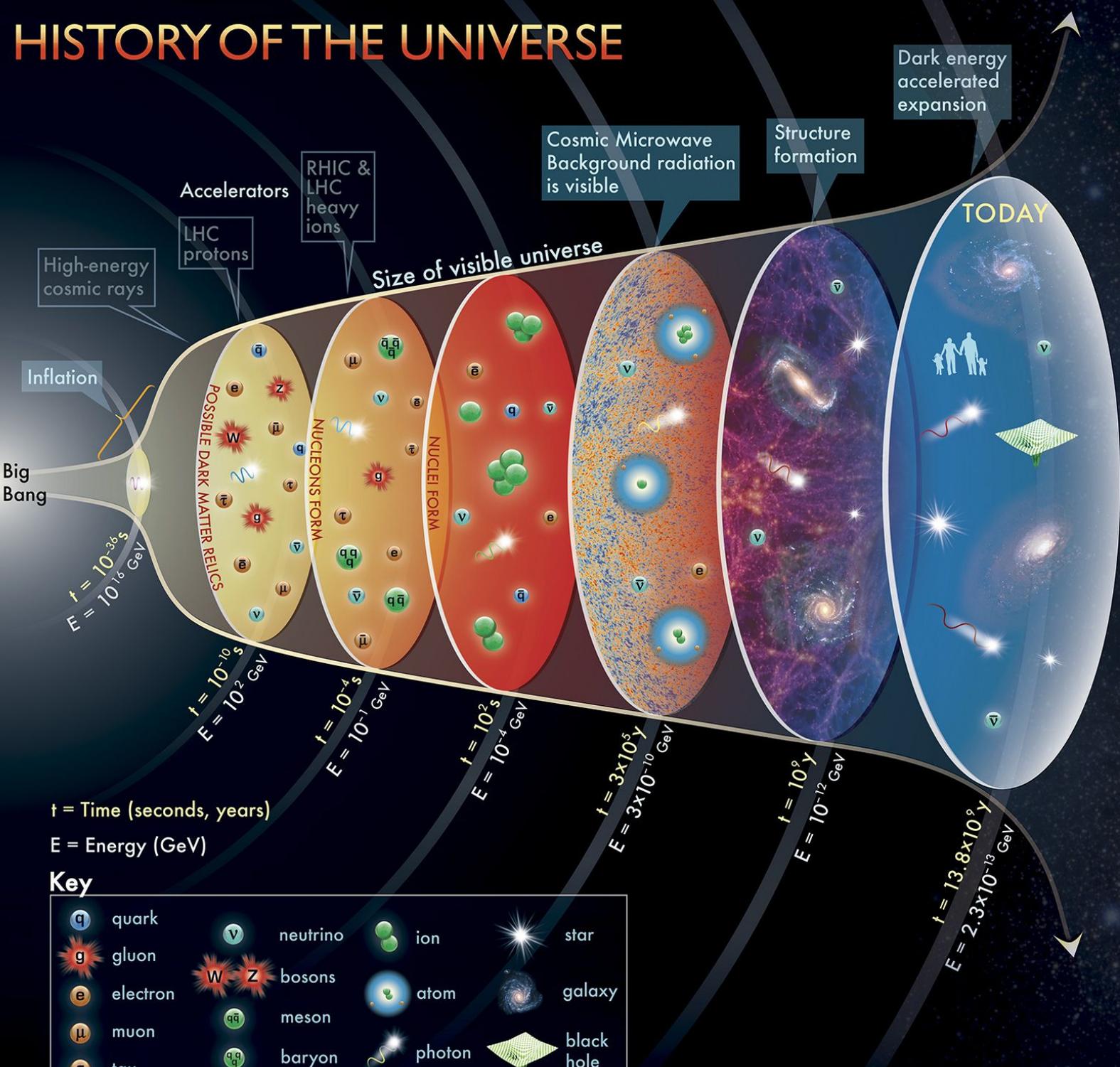
High Energy Frontier:

- Weitere Elementarteilchen?
- Sind die Teilchen des SM wirklich Elementarteilchen?

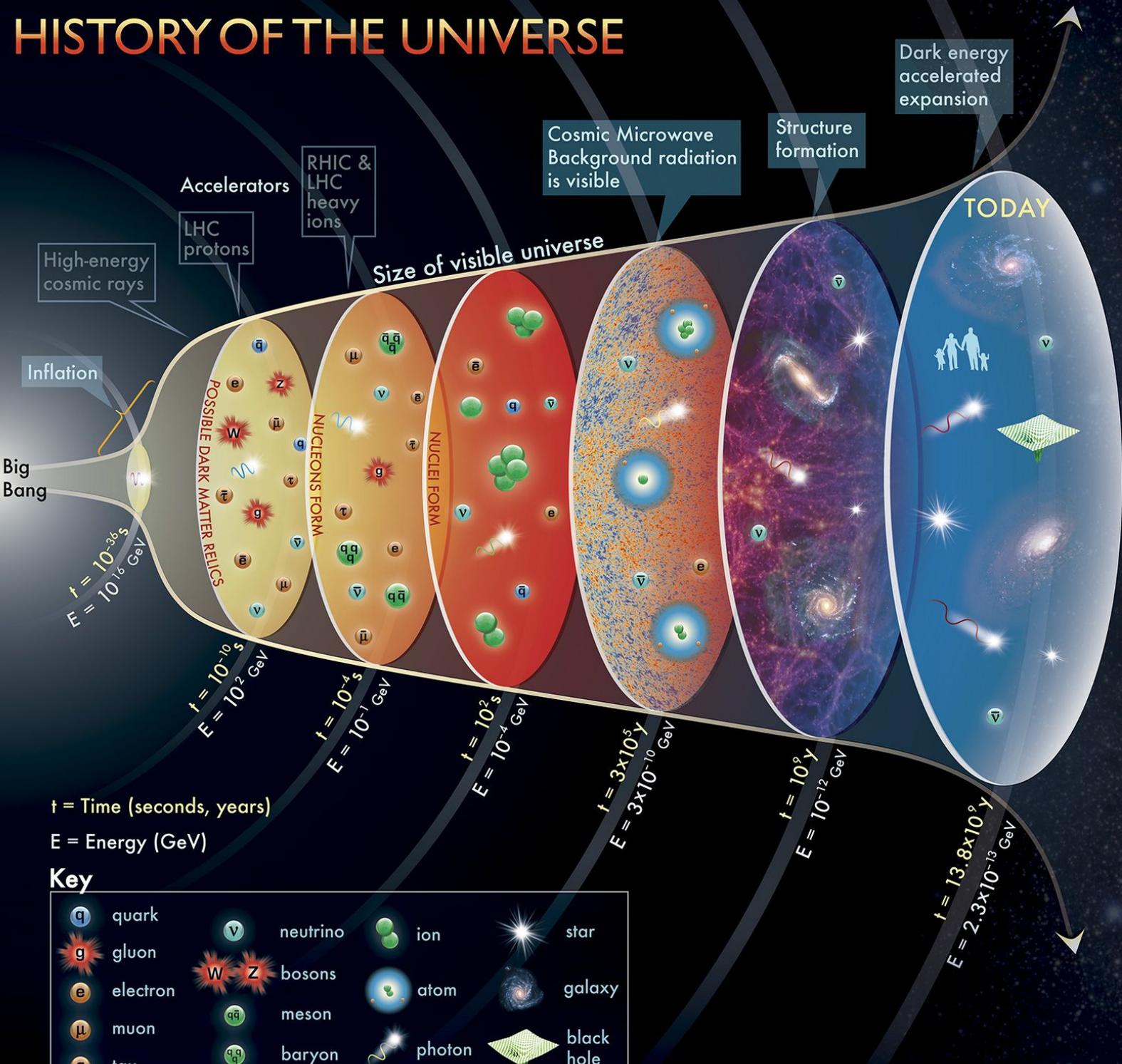
Early Universe Frontier:

- Erklärt das SM alle bisherigen Beobachtungen?
- Mögliche Relikte von noch früheren Zeiten / höheren Energien?

# HISTORY OF THE UNIVERSE



# HISTORY OF THE UNIVERSE



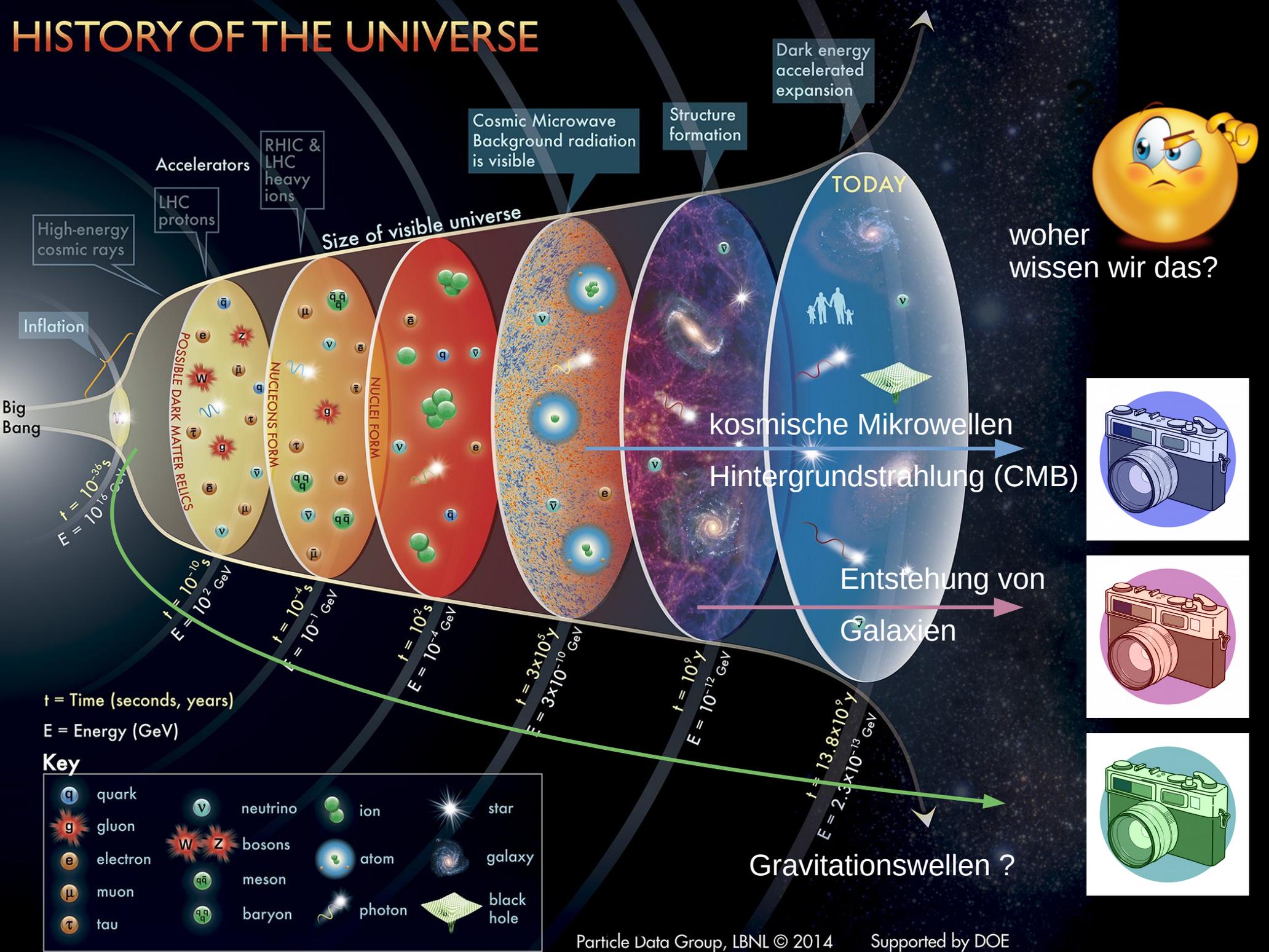
woher wissen wir das?

t = Time (seconds, years)  
E = Energy (GeV)

**Key**

quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

# HISTORY OF THE UNIVERSE



$t = 10^{-36} s$   
 $E = 10^{16} GeV$

$t = 10^{-10} s$   
 $E = 10^2 GeV$

$t = 10^{-4} s$   
 $E = 10^{-1} GeV$

$t = 10^2 s$   
 $E = 10^{-4} GeV$

$t = 3 \times 10^5 y$   
 $E = 3 \times 10^{-10} GeV$

$t = 10^9 y$   
 $E = 10^{-12} GeV$

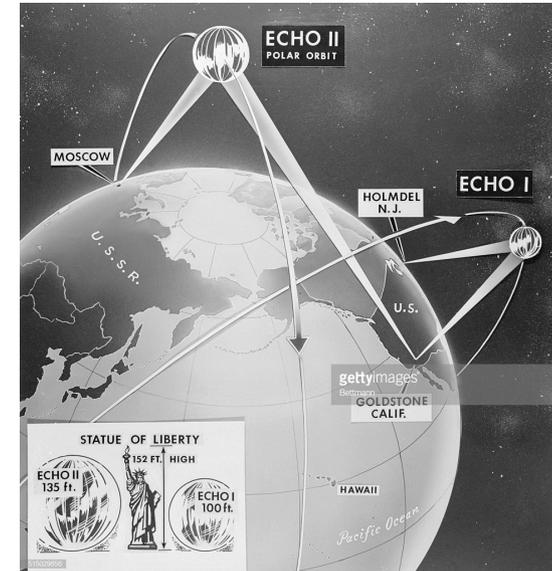
$t = 13.8 \times 10^9 y$   
 $E = 2.3 \times 10^{-13} GeV$

$t =$  Time (seconds, years)  
 $E =$  Energy (GeV)

# In den 60ern an der US Ostküste...



Arno Penzias, Robert Wilson 1964



Project Echo, 1960

- Bell Lab's Horn Antenna: das 6m Radioteleskop verspricht bislang unerreichte Sensitivität
- aber ein Hintergrundrauschen stört die Messungen...

# Die Suche nach der Ursache beginnt...

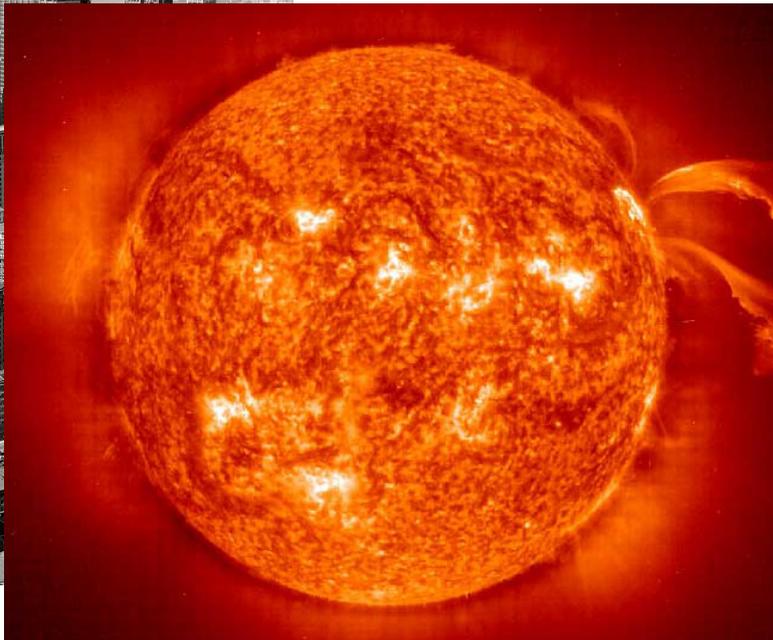


New York?

# Die Suche nach der Ursache beginnt...



New York?



Die Sonne?

# Die Suche nach der Ursache beginnt...



New York?



Die Sonne?



Die Galaxie?

# Die Suche nach der Ursache beginnt...



New York?



Die Sonne?



Die Galaxie?



Tauben?

# Eine kühne These

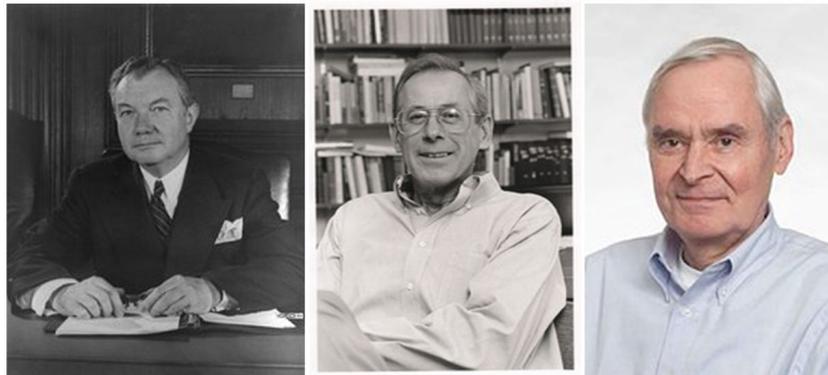
Zur gleichen Zeit in Princeton, 60 km entfernt

- Theoretische Physiker diskutieren die Natur unseres Universums:

”Steady State” oder ”Big Bang” ?

- Robert Dicke, Jim Peebles und David Wilkinson’

Big Bang Theorie → kosmische Hintergrundstrahlung als Relikt  
des primordialen Universums



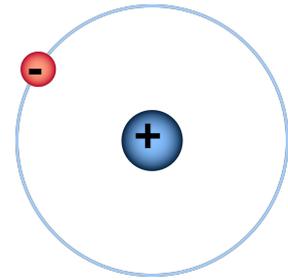
# Entkopplung der kosmischen Hintergrundstrahlung

Bindungsenergie des Wasserstoffatoms:  $T \sim 3000^\circ C$

$T > 3000^\circ C$

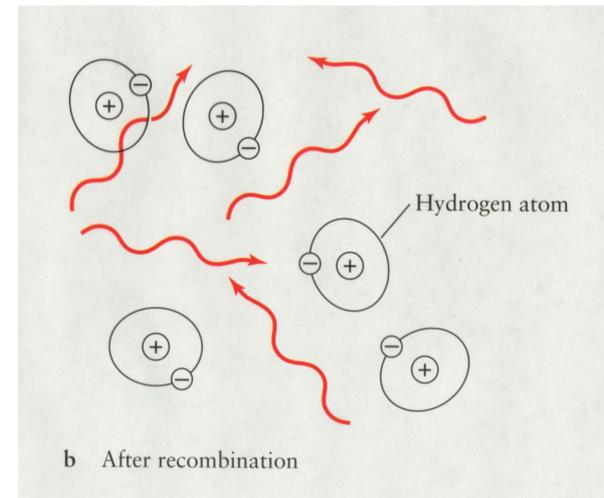
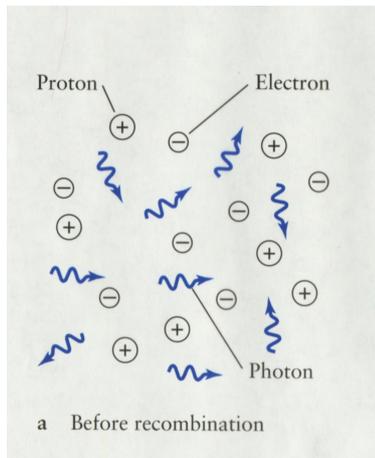
Zeit

$T < 3000^\circ C$



- viele freie, geladene Teilchen (Elektronen & Protonen)
- Photonen werden oft gestreut, Universum ist nicht transparent

- Elektronen & Protonen bilden elektrisch neutrale Wasserstoffatome
- Universum wird transparent



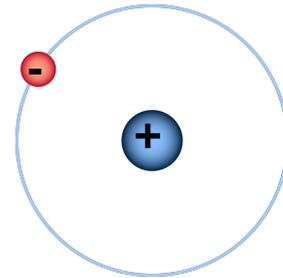
# Entkopplung der kosmischen Hintergrundstrahlung

Bindungsenergie des Wasserstoffatoms:  $T \sim 3000^\circ C$

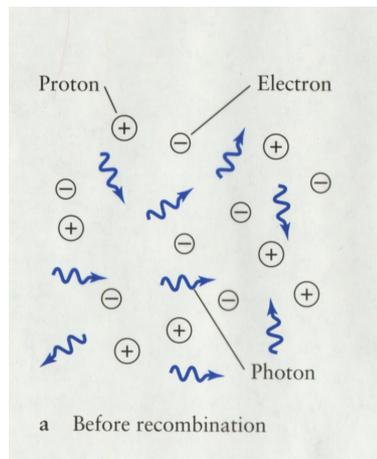
$T > 3000^\circ C$



$T < 3000^\circ C$

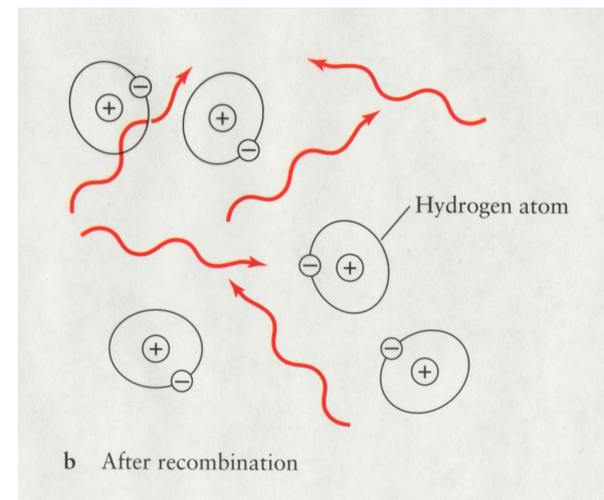


- viele freie, geladene Teilchen (Elektronen & Protonen)
- Elektronen & Protonen bilden elektrisch neutrale Wasserstoffatome
- Photonen werden oft gestreut, Universum ist nicht transparent
- Universum wird transparent



- thermische Strahlung mit  $T \sim 3000\text{ C}$  als kosmische Hintergrundstrahlung
- Abkühlung im expandierendem Universum auf  $T \ll 3000\text{ C}$

= 'Rauschen' von Penzias & Wilson !

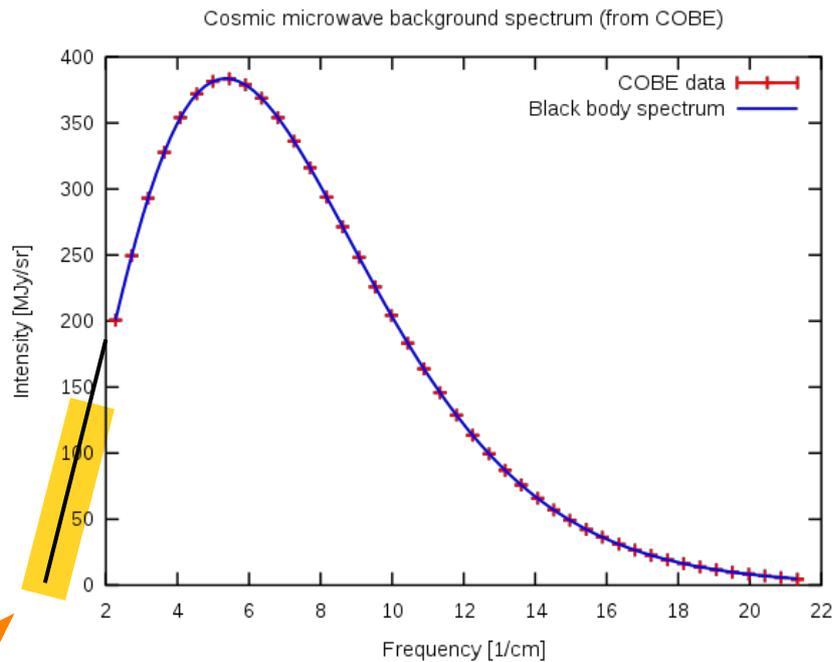


# CMB Schwarzkörperstrahlung



COBE Satellit,  
1989-93

- kosmische Hintergrundstrahlung heute sehr gut vermessen
- Schwarzkörperstrahlung mit  $T = 2.7 \text{ K}$  ( $-270 \text{ C}$ ) (Mikrowellen)



Zentrale Vorhersage der Urknall Theorie bestätigt



2019 Nobelpreis Peebles für seine Beiträge zur theoretischen Kosmologie

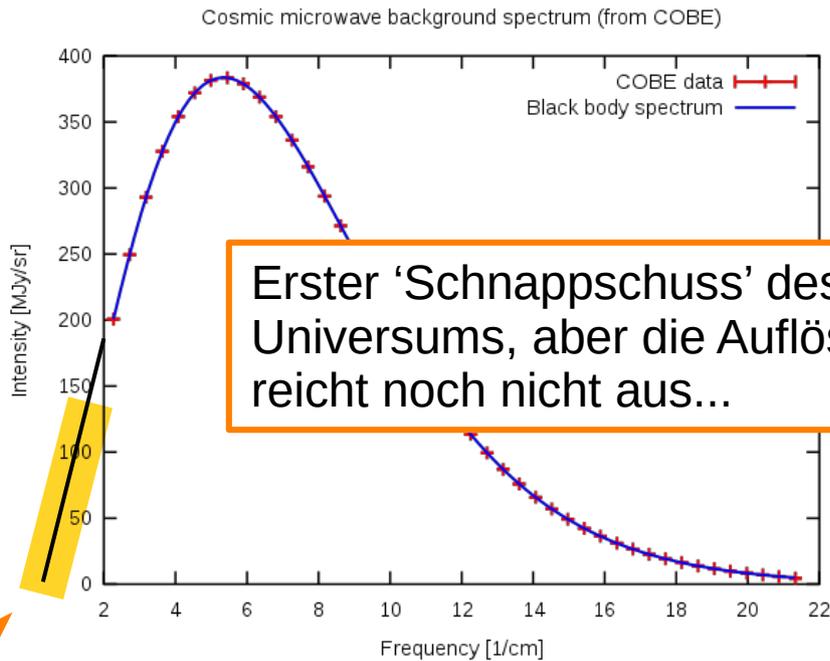
Penzias, Wilson (Nobelpreis 1978)

# CMB Schwarzkörperstrahlung



COBE Satellit,  
1989-93

- kosmische Hintergrundstrahlung heute sehr gut vermessen
- Schwarzkörperstrahlung mit  $T = 2.7 \text{ K}$  ( $-270 \text{ C}$ ) (Mikrowellen)



Erster 'Schnappschuss' des frühen Universums, aber die Auflösung reicht noch nicht aus...

Zentrale Vorhersage der Urknall Theorie bestätigt



2019 Nobelpreis Peebles für seine Beiträge zur theoretischen Kosmologie

Penzias, Wilson (Nobelpreis 1978)

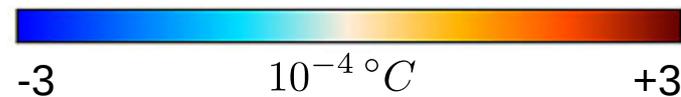
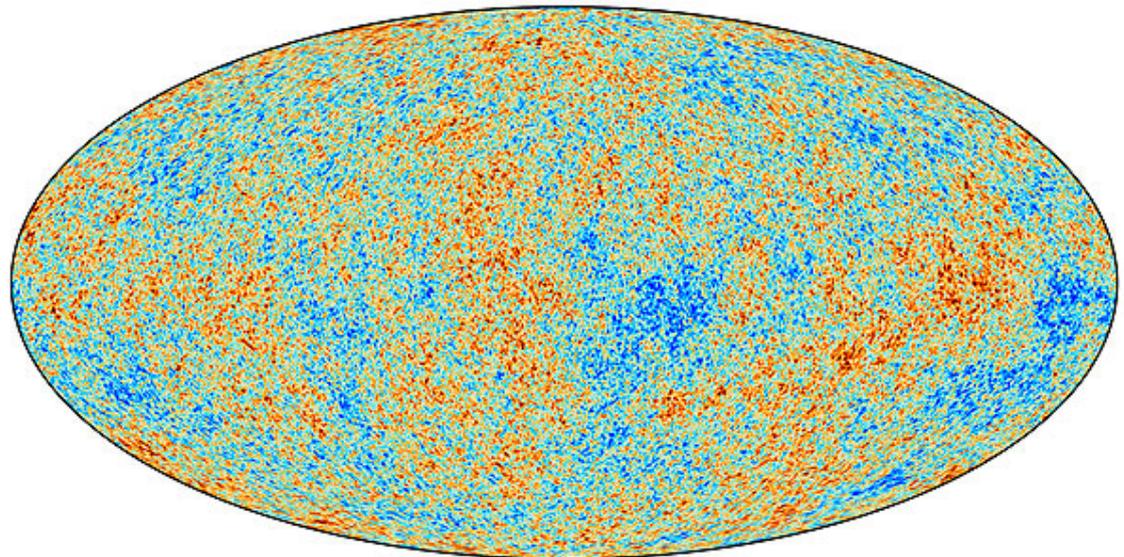
# Anisotropien im CMB

Vollständig homogenes primordiales Plasma → homogenes Universum nach Abkühlung

- kleine Störungen notwendig als Kristallisationspunkte für die Entstehung von Galaxien durch gravitativen Kollaps
- Anisotropien im CMB, Abweichung von Schwarzkörperstrahlung  $1:10^4$

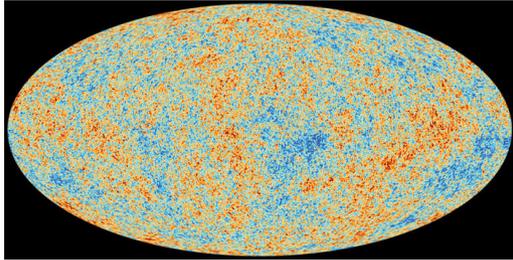


PLANCK Satellit,  
2009 - 2013

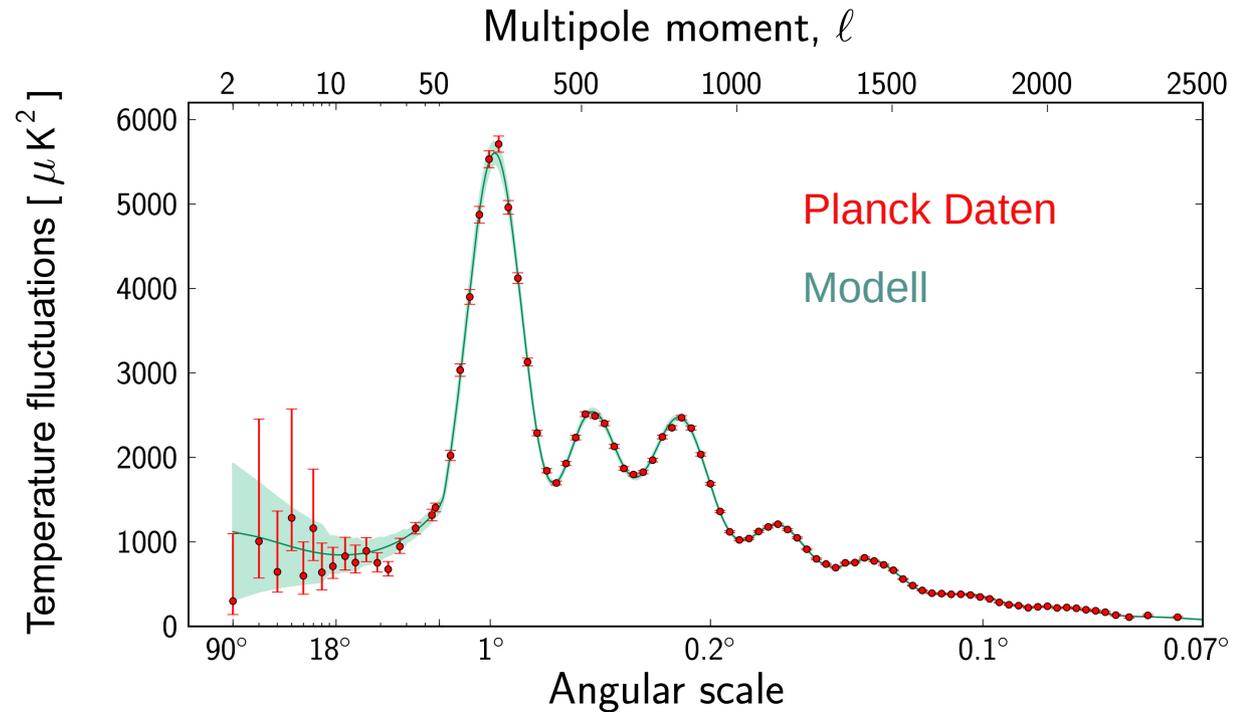


PLANCK 2018 data release

# Anisotropien im CMB



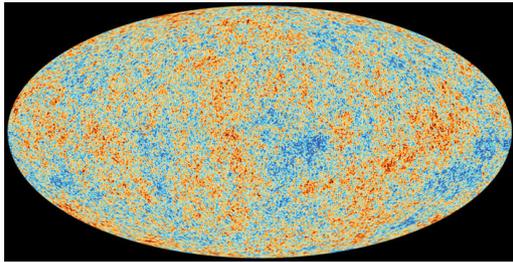
Statistische Analyse



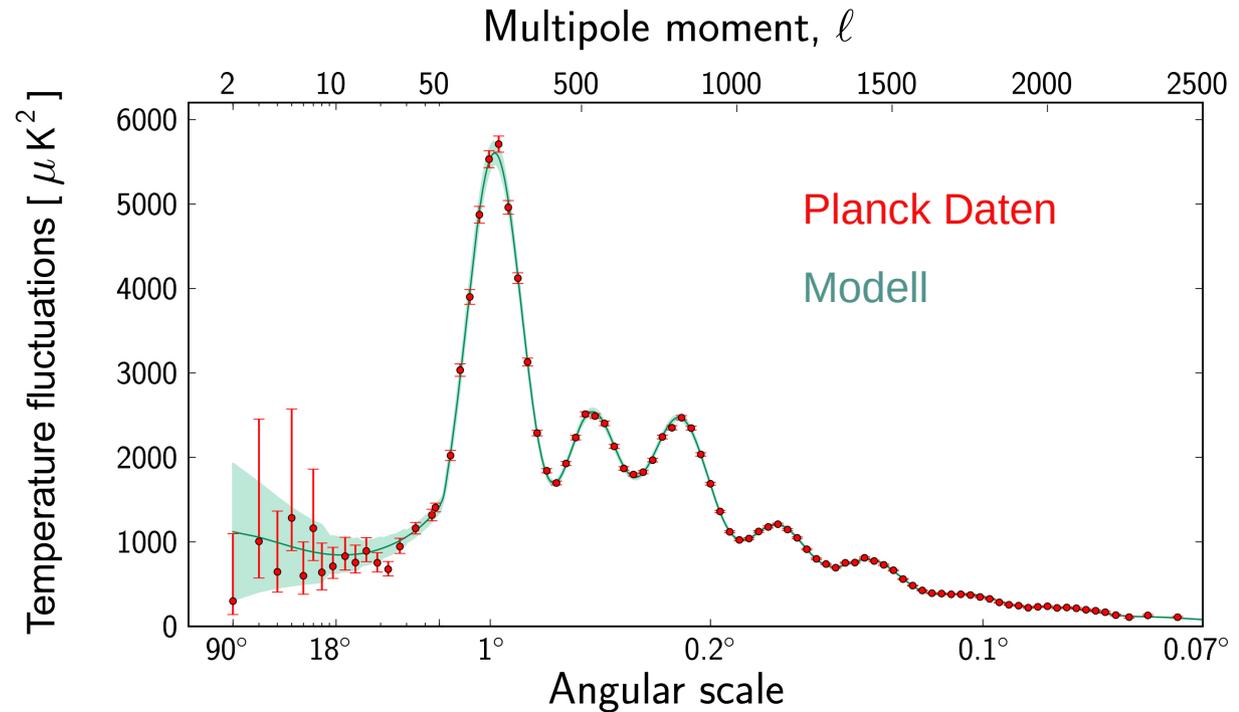
Vorhersage (Modell) abhängig von

- Eigenschaften des Plasmas
- Anfangsbedingungen der Fluktuationen
- Expansion seit CMB Entkopplung
- Streuung von CMB Licht seit Entkopplung

# Anisotropien im CMB



Statistische Analyse



Vorhersage (Modell) abhängig von

Eigenschaften des Plasmas  
Anfangsbedingungen der Fluktuationen  
Expansion seit CMB Entkopplung  
Streuung von CMB Licht seit Entkopplung

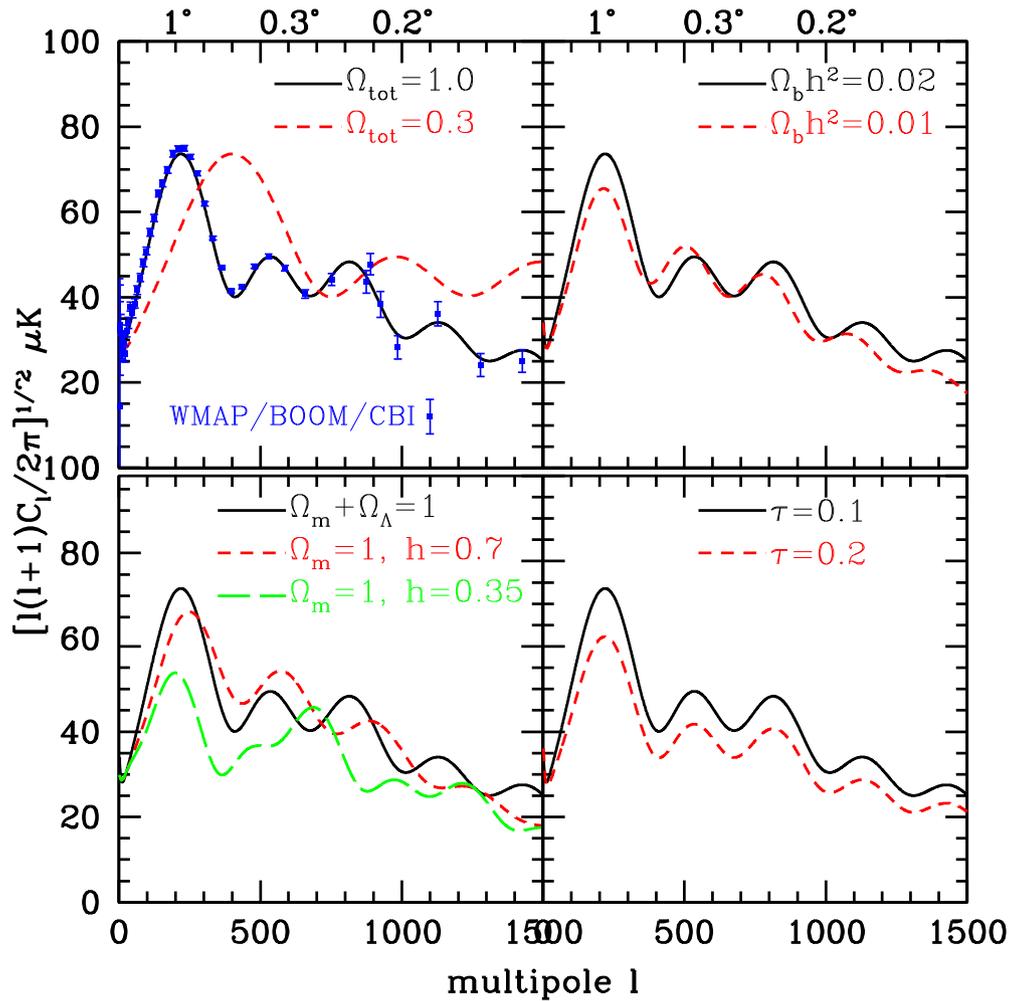
→ Protonen- und Photonendichte  
→ Kosmische Inflation  
→ Gesamtenergie des Universums  
→ Re-ionisation von H durch Sterne

→ insgesamt nur 6 Parameter

# Anisotropien im CMB

Gesamt-  
energie

Anteil der  
dunklen  
Energie



Anteil der  
Baryonen

Zeitpunkt der  
Re-ionisation

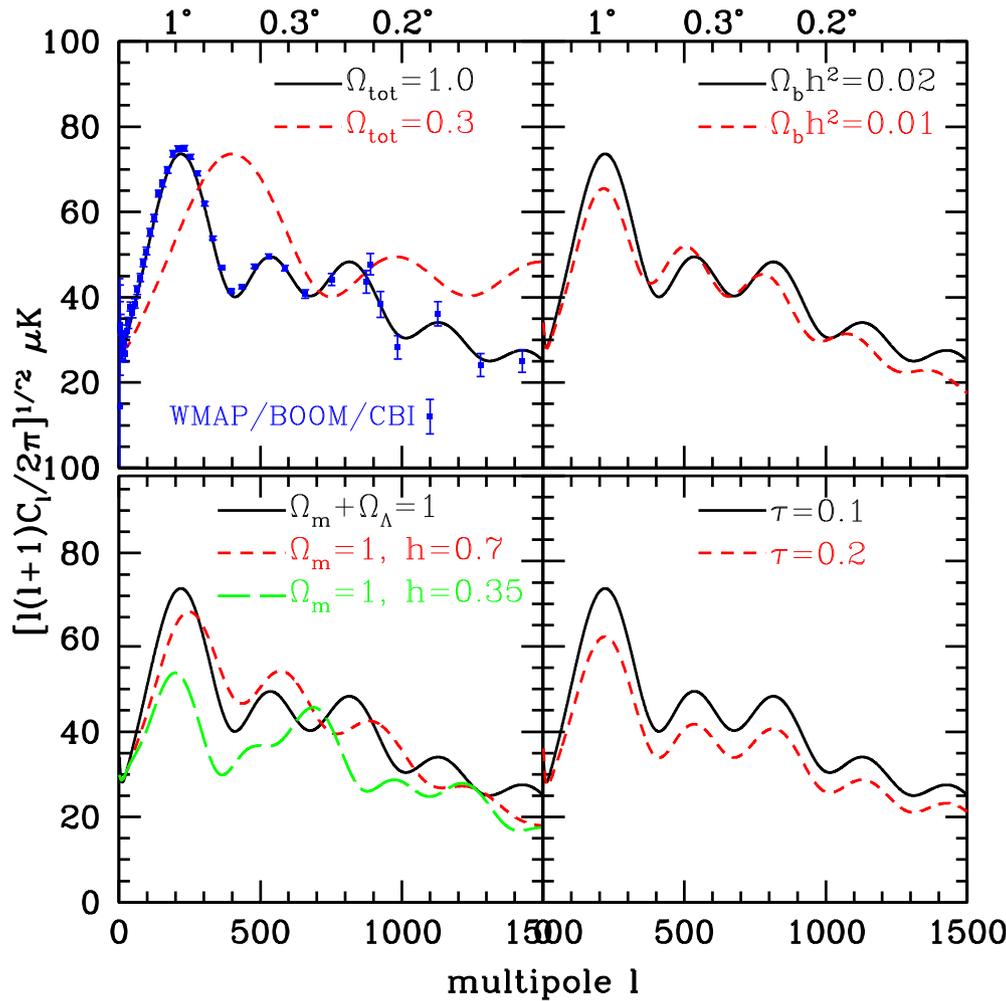
Ermittlung der  
6 Parameter durch  
Fit an die Daten

Kamionkowski '07

# Anisotropien im CMB

Gesamtenergie

Anteil der dunklen Energie

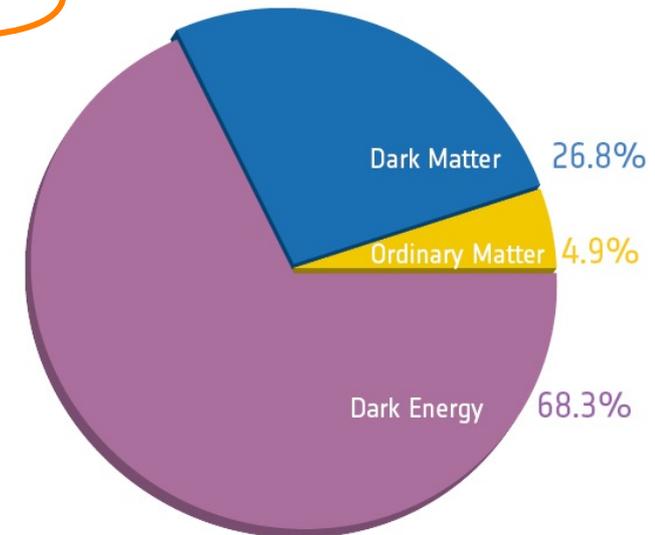


Anteil der Baryonen

Zeitpunkt der Re-ionisation

Ermittlung der 6 Parameter durch Fit an die Daten

Standardmodell der Kosmologie



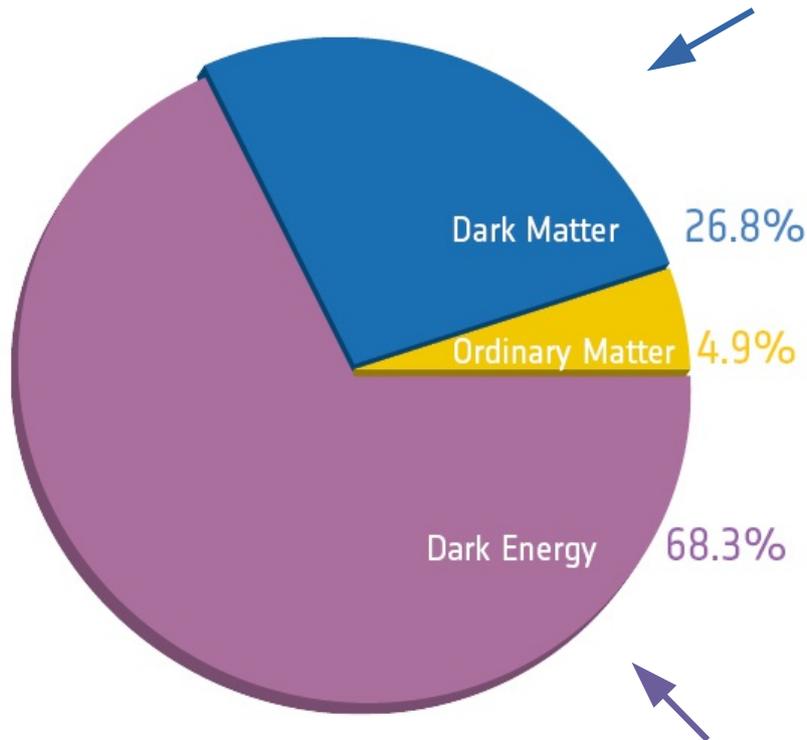
Kamionkowski '07

Momentaufnahme mit einigen Überraschungen !

# Standardmodell der Kosmologie

??

Neue(s) Elementarteilchen? Viele mögliche Theorien.  
Verbindung zum SM der Teilchenphysik ?



Standard-Modell der Elementarteilchen

	Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
	I	II	III		
Masse	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b><math>\gamma</math></b> Photon	
<b>LEPTONEN</b>	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	1
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	

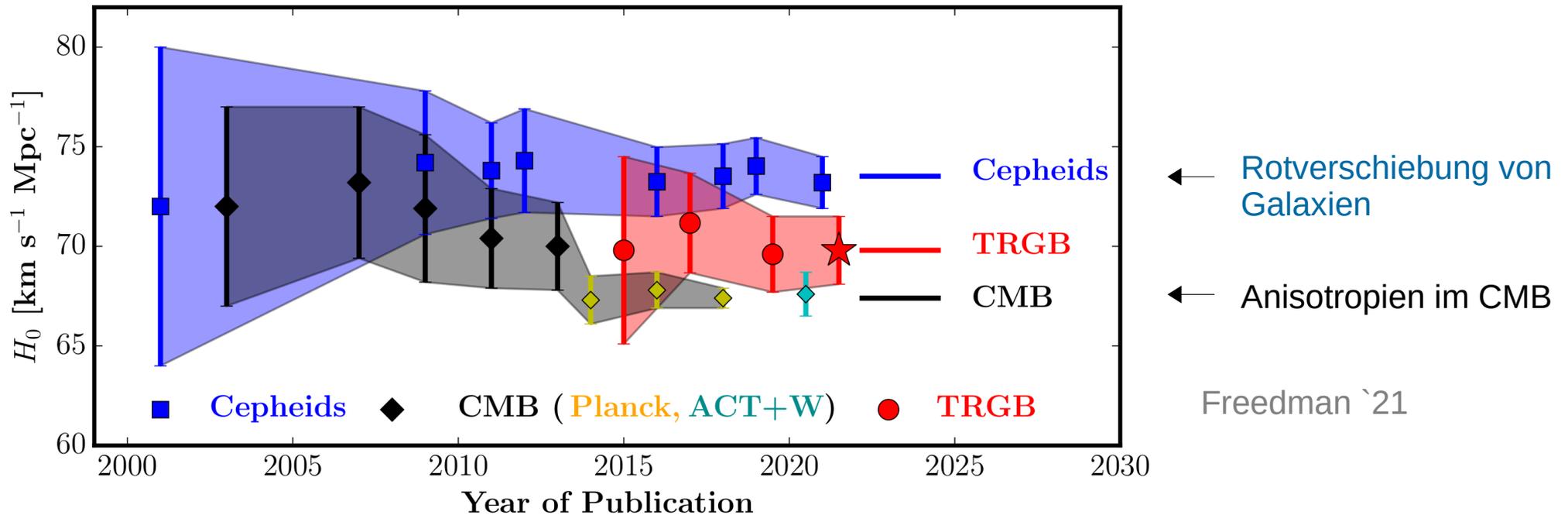
???

QFT Vakuum Energie (Casimir Effekt)? Viel zu groß !  
Freier Parameter in ART? Extremes fine tuning nötig !  
Hinweis auf Multiversum / anthropologische Selektion?  
Eine der größten offenen Fragen der Hochenergiephysik

# Ein neues Rätsel

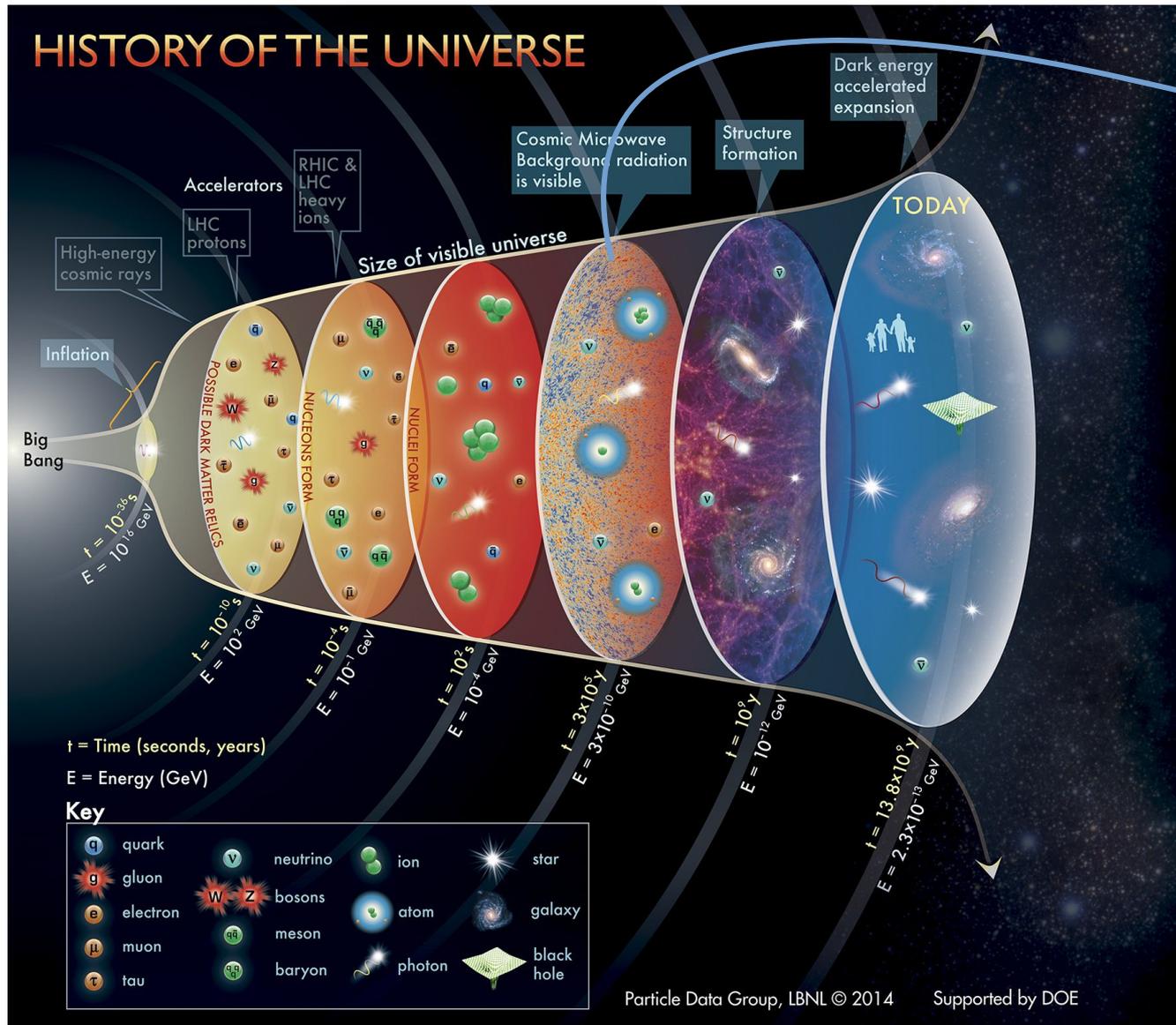
genauere Messungen weisen eine Diskrepanz bei der Bestimmung der Expansionsrate des Universums  $H_0$  auf:

Hubble Constant Over Time



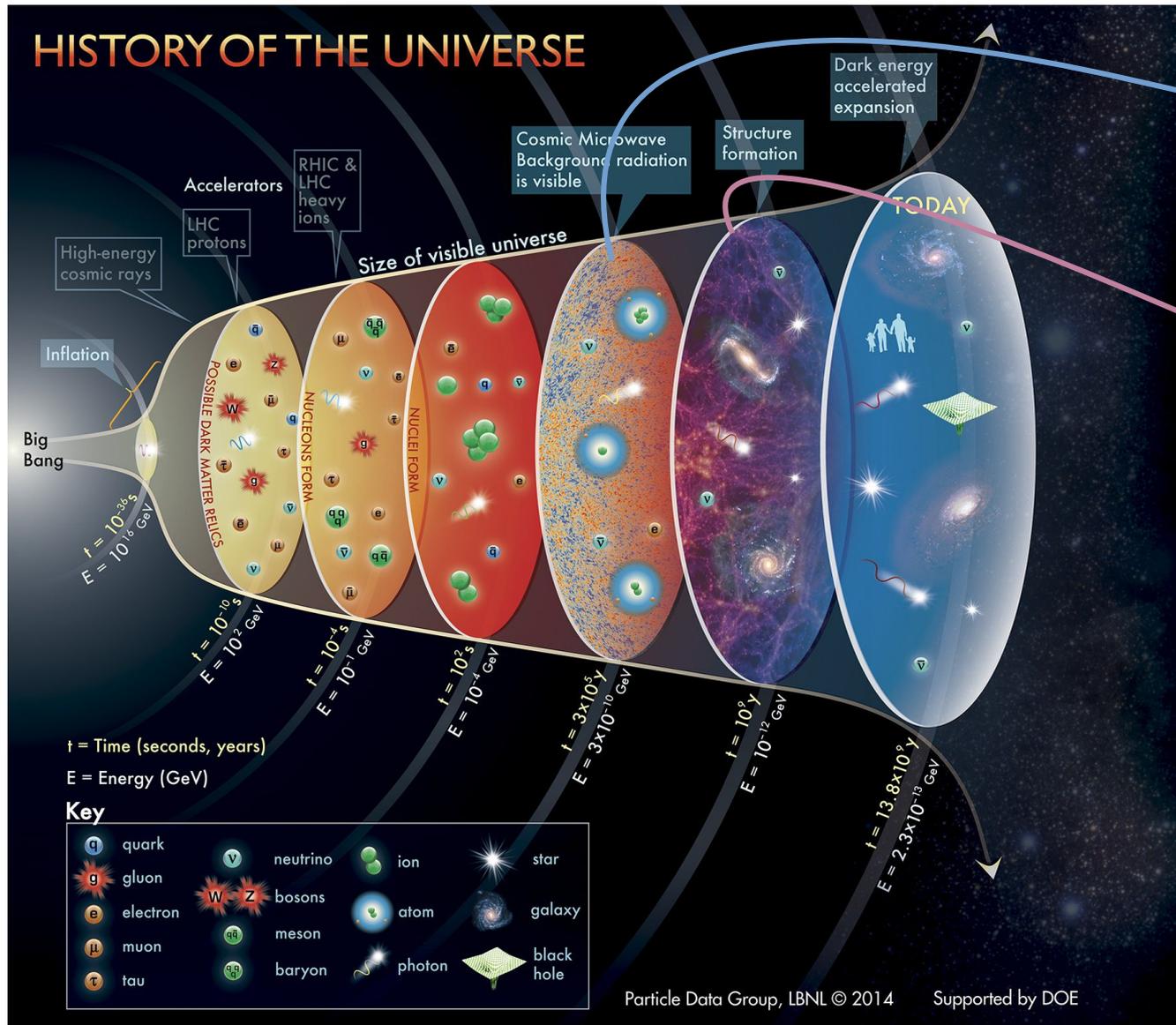
Unbekannte, systematische Ungenauigkeiten in den Messmethoden?  
Oder ein Hinweis auf eine nötige Erweiterung der Standardmodels der Kosmologie?

# Momentaufnahmen unseres Universums



CMB als thermische Strahlung des primordialen Plasmas, entkoppelt im neutralen Universum

# Momentaufnahmen unseres Universums



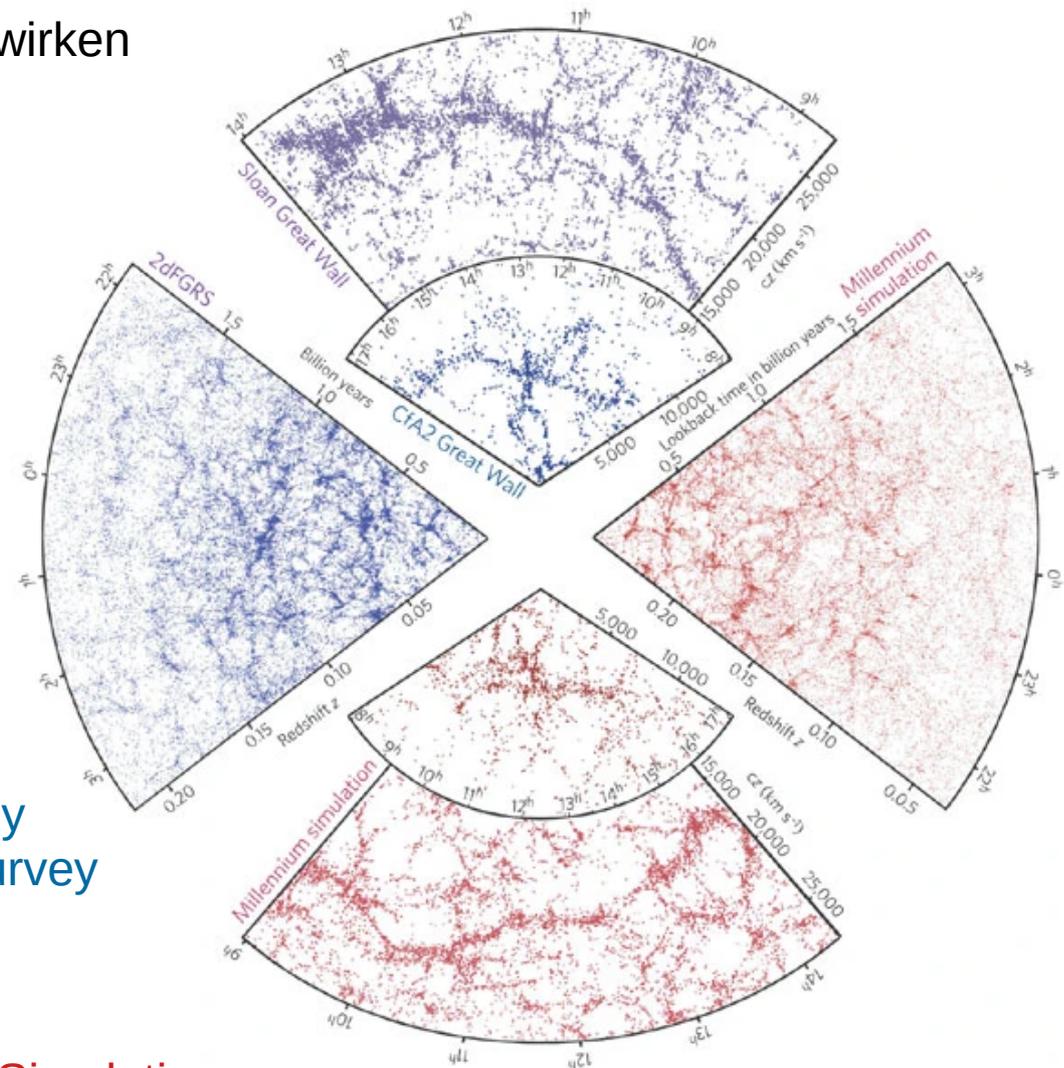
CMB als thermische Strahlung des primordialen Plasmas, entkoppelt im neutralen Universum

CMB Anisotropien als Kristallisationskerne für Galaxien

# Entstehung von Galaxien

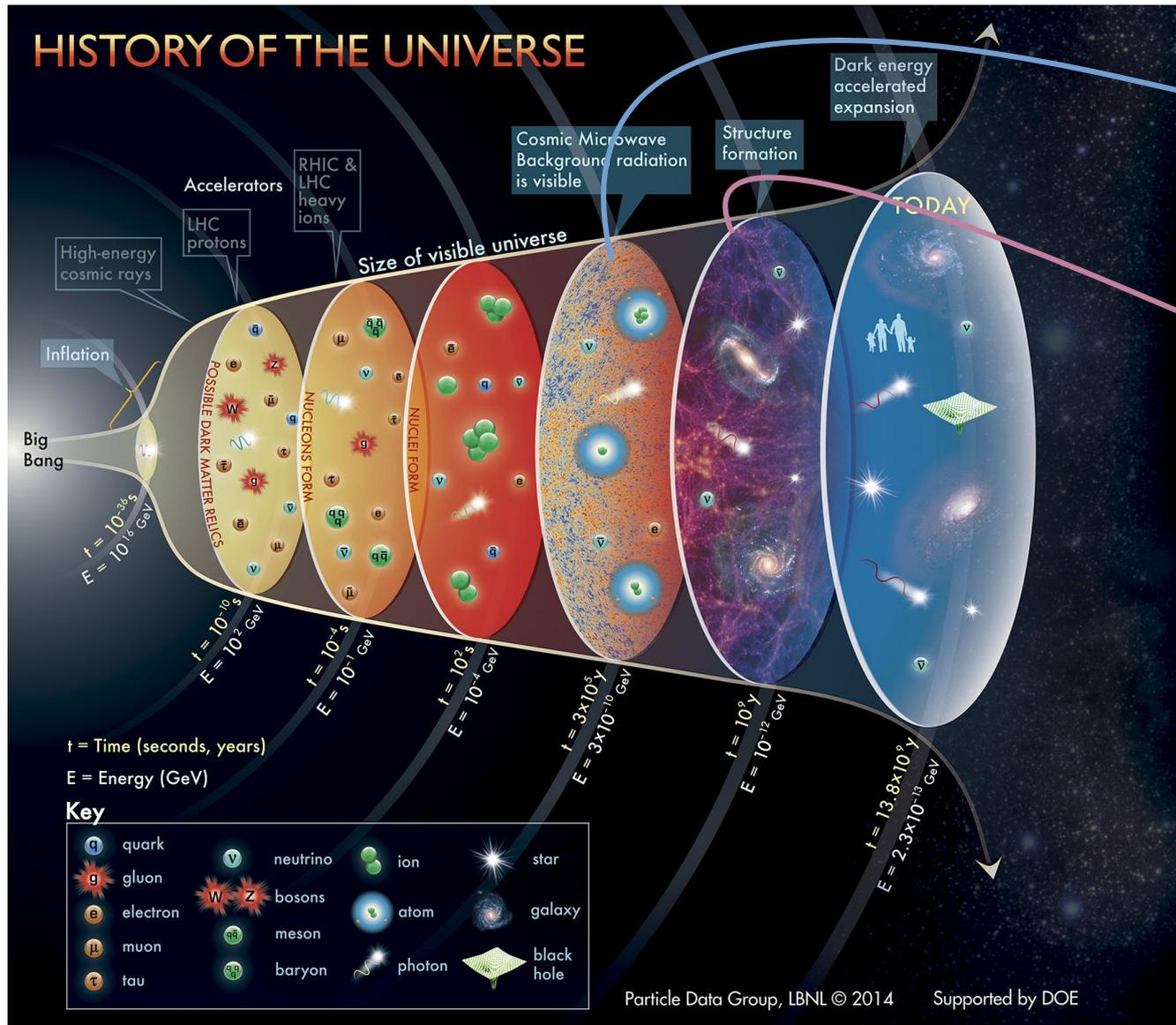
- Anisotropien im primordialen Plasma wirken als Kristallaktionskerne, Regionen mit höherer Dichte ziehen mehr Materie an (Gravitationskraft)
- Bildung von Sternen, Galaxien und Filamenten
- Statistische Eigenschaften der CMB Anisotropien als Erklärung für die Verteilung von Galaxien

Sloan Digital Sky Survey  
2dF Galaxy Redshift Survey



Millennium Simulation

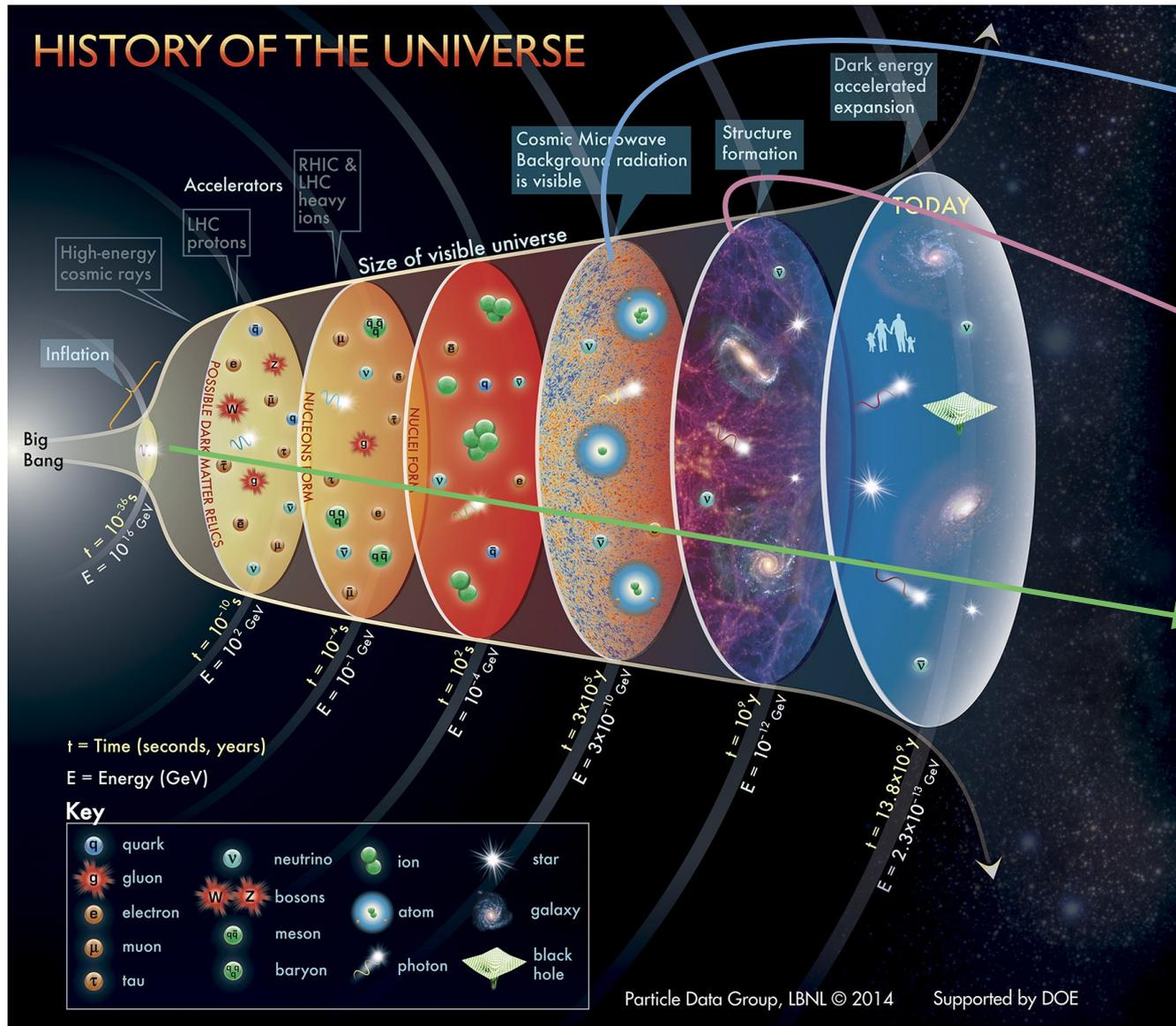
# Momentaufnahmen unseres Universums



CMB als thermische Strahlung des primordialen Plasmas, entkoppelt im neutralen Universum

CMB Anisotropien als Kristallisationskerne für Galaxien

# Momentaufnahmen unseres Universums

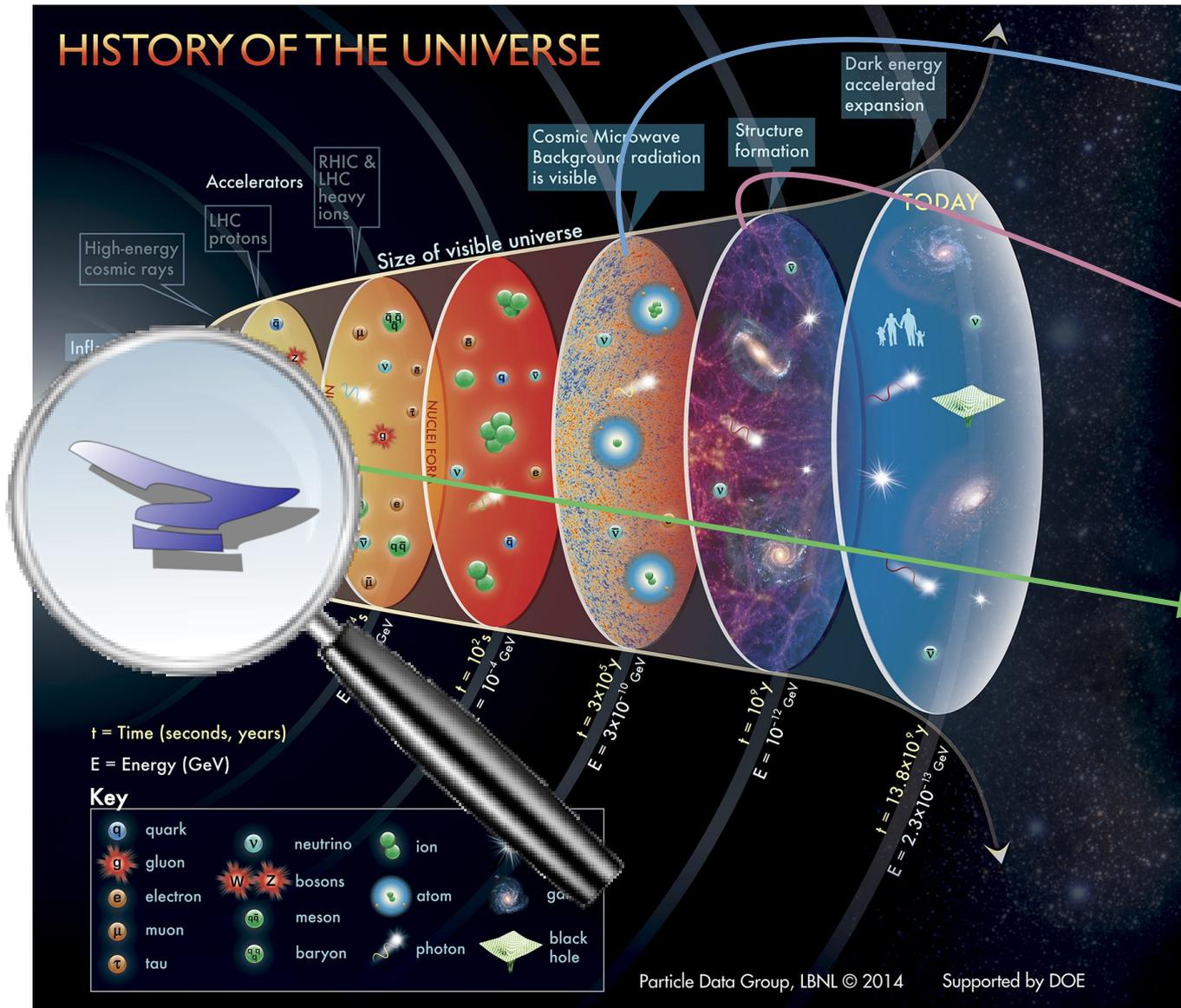


CMB als thermische Strahlung des primordialen Plasmas, entkoppelt im neutralen Universum

CMB Anisotropien als Kristallisationskerne für Galaxien

Gravitationswellen als neues Fenster ins frühe Universum

# Momentaufnahmen unseres Universums

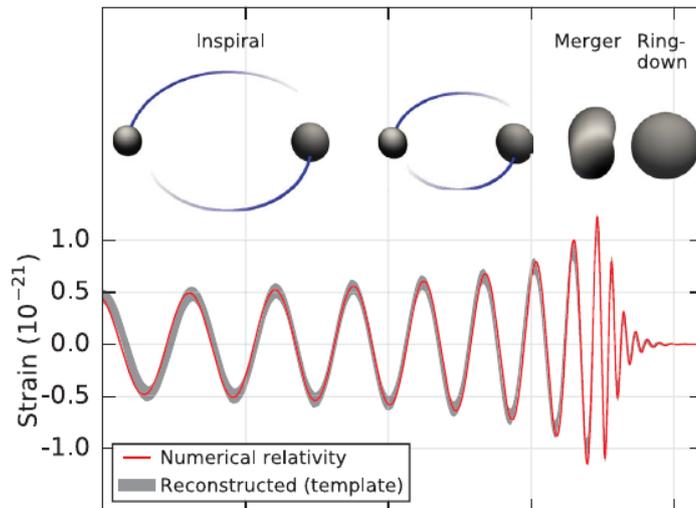


CMB als thermische Strahlung des primordialen Plasmas, entkoppelt im neutralen Universum

CMB Anisotropien als Kristallisationskerne für Galaxien

Gravitationswellen als neues Fenster ins frühe Universum

# Gravitationswellen

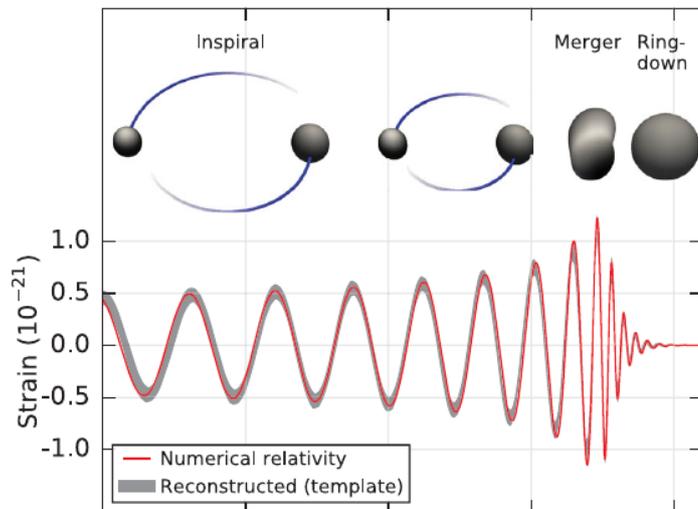


LIGO Livingston, USA



2015: Erste Beobachtung eines GW Signals, Kollision schwarzer Löcher vor ca. 1 Milliarde Jahren

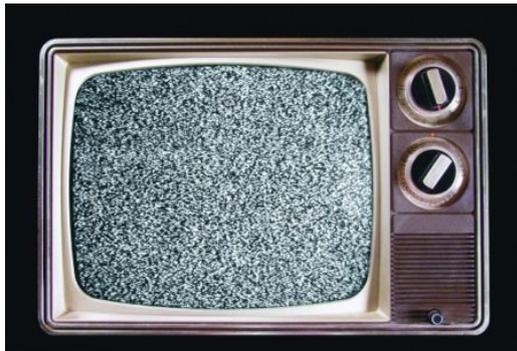
# Gravitationswellen



LIGO Livingston, USA

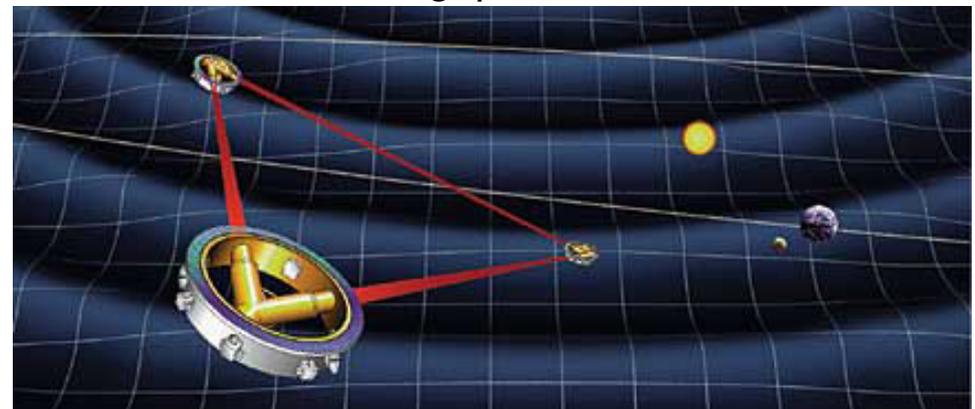


2015: Erste Beobachtung eines GW Signals, Kollision schwarzer Löcher vor ca. 1 Milliarde Jahren



Nächste Herausforderung: Stochastischer Gravitationswellen Hintergrund

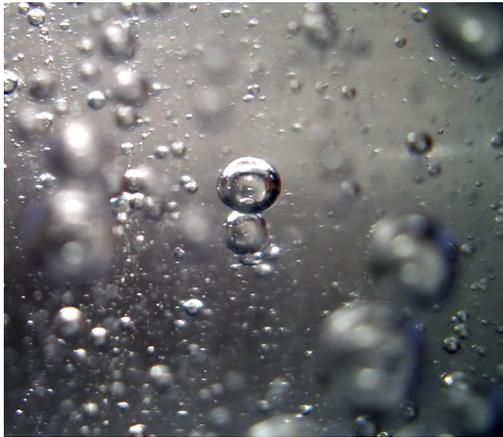
geplante ESA Mission LISA



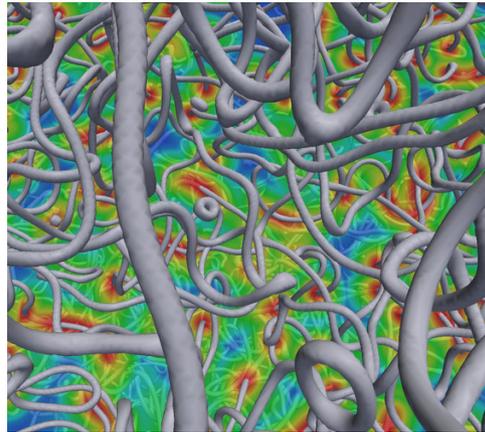
# Gravitationswellen aus dem frühen Universum

Viele offene Fragen der Elementarteilchenphysik bei Temperaturen  $> \text{TeV}$  ( $10^{15} \text{ }^\circ\text{C}$ )

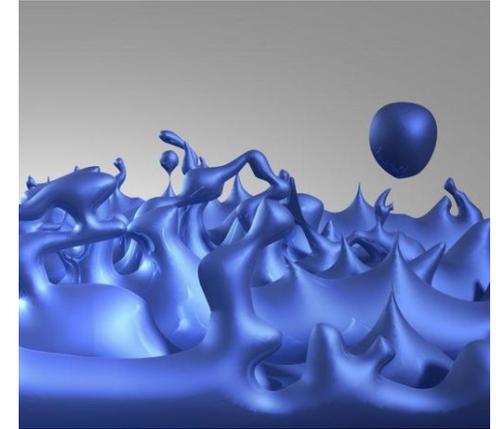
→ manche Modelle sagen starke Produktion von Gravitationswellen im frühen Universum voraus:



Phasenübergänge durch spontane Symmetriebrechung



topologische Defekte nach spontaner Symmetriebrechung

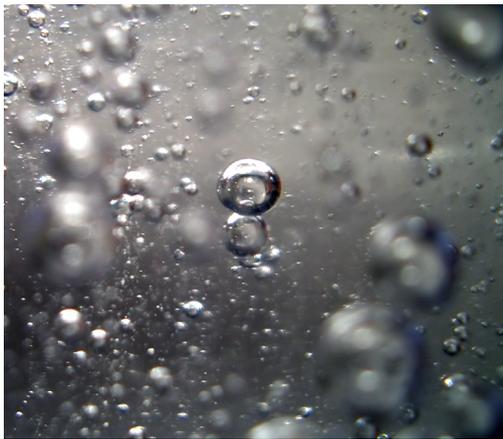


Quantenfluktuationen während kosmischer Inflation

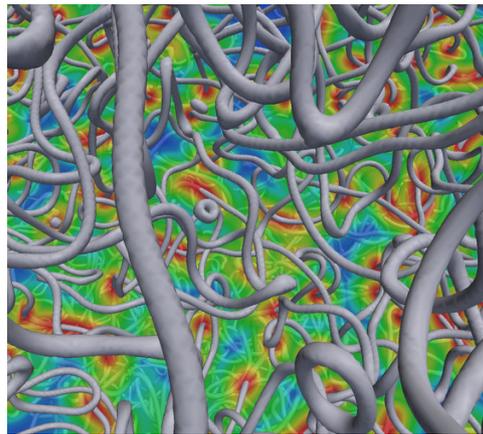
# Gravitationswellen aus dem frühen Universum

Viele offene Fragen der Elementarteilchenphysik bei Temperaturen  $> \text{TeV}$  ( $10^{15} \text{ }^\circ\text{C}$ )

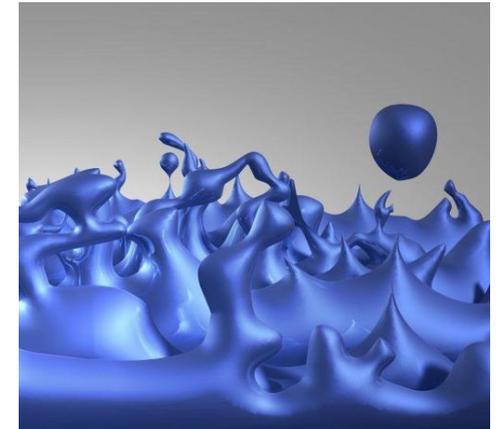
→ manche Modelle sagen starke Produktion von Gravitationswellen im frühen Universum voraus:



Phasenübergänge durch spontane Symmetriebrechung



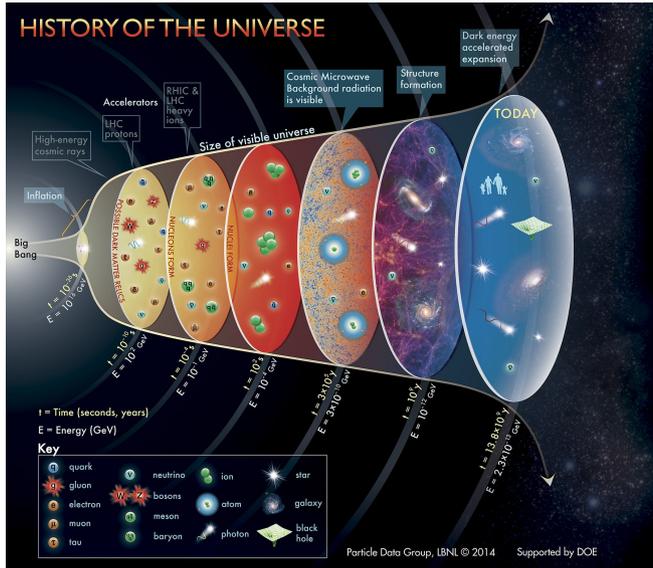
topologische Defekte nach spontaner Symmetriebrechung



Quantenfluktuationen während kosmischer Inflation

Ist die Zeit reif für das nächste mysteriöse Hintergrundrauschen?

# Von den kleinsten Teilchen zu den größten Skalen



Die Entdeckung des CMB hat unser Verständnis des Universums revolutioniert

Welche Überraschung birgt die nächste Momentaufnahme?

## Standard-Modell der Elementarteilchen

	Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
	I	II	III		
Masse	~2.2 MeV/c <sup>2</sup>	~1.28 GeV/c <sup>2</sup>	~173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	~124.97 GeV/c <sup>2</sup>
Ladung	2/3	2/3	2/3	0	0
Spin	1/2	1/2	1/2	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Higgs
	~4.7 MeV/c <sup>2</sup>	~96 MeV/c <sup>2</sup>	~4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom	<b>γ</b> Photon	
	~0.511 MeV/c <sup>2</sup>	~105.66 MeV/c <sup>2</sup>	~1.7768 GeV/c <sup>2</sup>	~91.19 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
<b>LEPTONEN</b>	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Muon	<b>τ</b> Tau	<b>Z</b> Z-Boson	
	<1.0 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<18.2 MeV/c <sup>2</sup>	~80.39 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Muon-Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	<b>W</b> W-Boson	

Das Standardmodell der Teilchenphysik erklärt sehr viel und ist doch unvollständig

Suche nach der Erweiterung läuft durch Suche nach neuer Physik in extremen Umgebungen (Beschleuniger, Kosmologie & Astrophysik,..)

und nach schwachen Wechselwirkungen (Neutrino Experimente, Suche nach dunkler Materie,...)

