

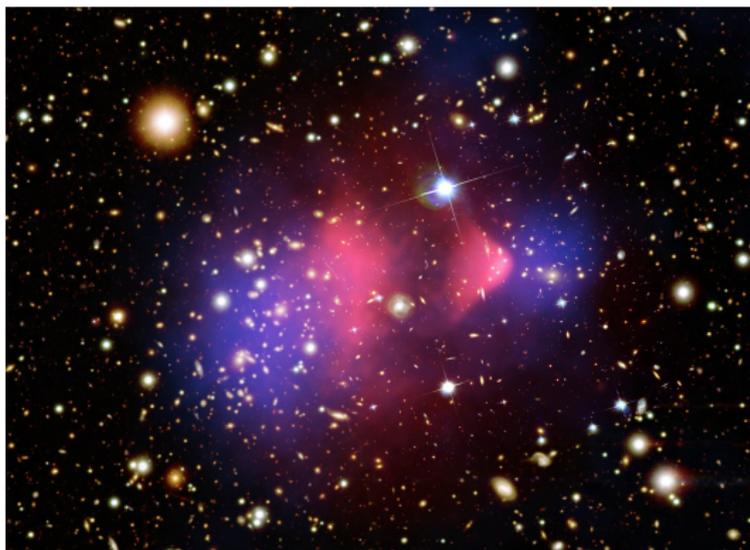
Prof. Dr. rer. nat. Peter Gerwinski
Hochschule Bochum, CVH

Was ist dunkle Materie?

16. Mai 2024

Was ist dunkle Materie?

- **Das Rätsel**
- **Erklärungsansätze**
- **Das Bullet-Cluster**
- **Neue Erkenntnisse**
- **Wie geht es weiter?**



Das Rätsel

Dunkle Materie = Materie im Weltraum, die wir nicht sehen können

Das Rätsel

Dunkle Materie = Materie im Weltraum, die wir nicht sehen können, auch nicht im IR-, UV-, Radar-, Röntgen-, Radio- oder Gamma-Bereich

Das Rätsel

Dunkle Materie = Materie im Weltraum, die wir nicht sehen können, auch nicht im IR-, UV-, Radar-, Röntgen-, Radio- oder Gamma-Bereich, die wir aber indirekt über ihre Schwerkraft nachweisen können

Das Rätsel

Dunkle Materie = Materie im Weltraum, die wir nicht sehen können, auch nicht im IR-, UV-, Radar-, Röntgen-, Radio- oder Gamma-Bereich, die wir aber indirekt über ihre Schwerkraft nachweisen können:

- **Virialsatz**
Galaxien bewegen sich zu schnell!
- **Rotationskurven**
Galaxien rotieren zu schnell!
- **Gravitationslinsen**
... sind zu stark!

Virialsatz

Galaxien bewegen sich zu schnell!

Zwicky (1933):

- Die Galaxien im Coma-Galaxienhaufen bewegen sich zu schnell, als daß sie zusammenbleiben könnten.
- Die Masse in den Galaxien ist mindestens 400mal größer als die Masse der sichtbaren Materie.



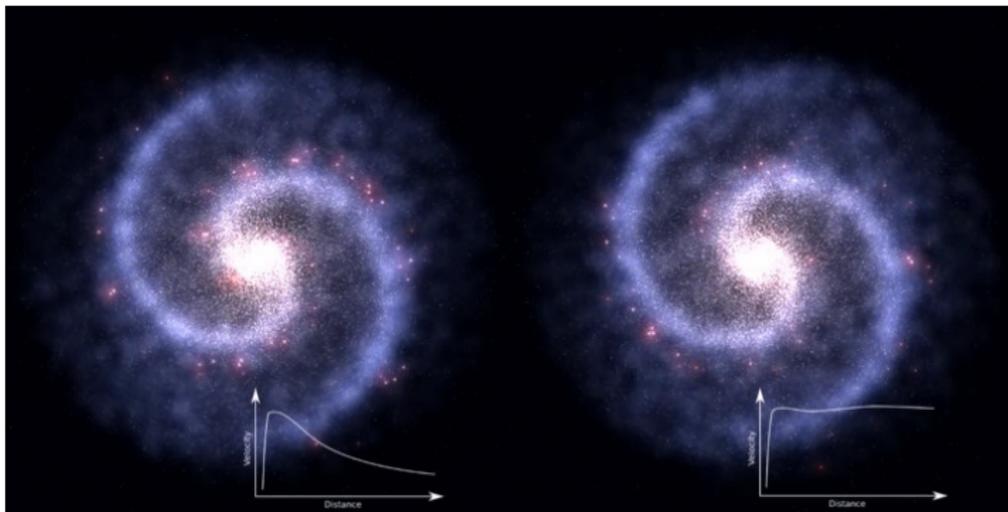
Rotationskurven

Galaxien rotieren zu schnell!!

Rubin (1970):

- Galaxien rotieren außen wesentlich schneller, als es das Newtonsche Schwerkraftgesetz vorhersagt.

→ Die Masse in den Galaxien ist deutlich größer als die Masse der sichtbaren Materie.



berechnet

beobachtet

Gravitationslinsen

... sind zu stark!

Galaxienhaufen
Abell 1689

- Sterne in Galaxien:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$



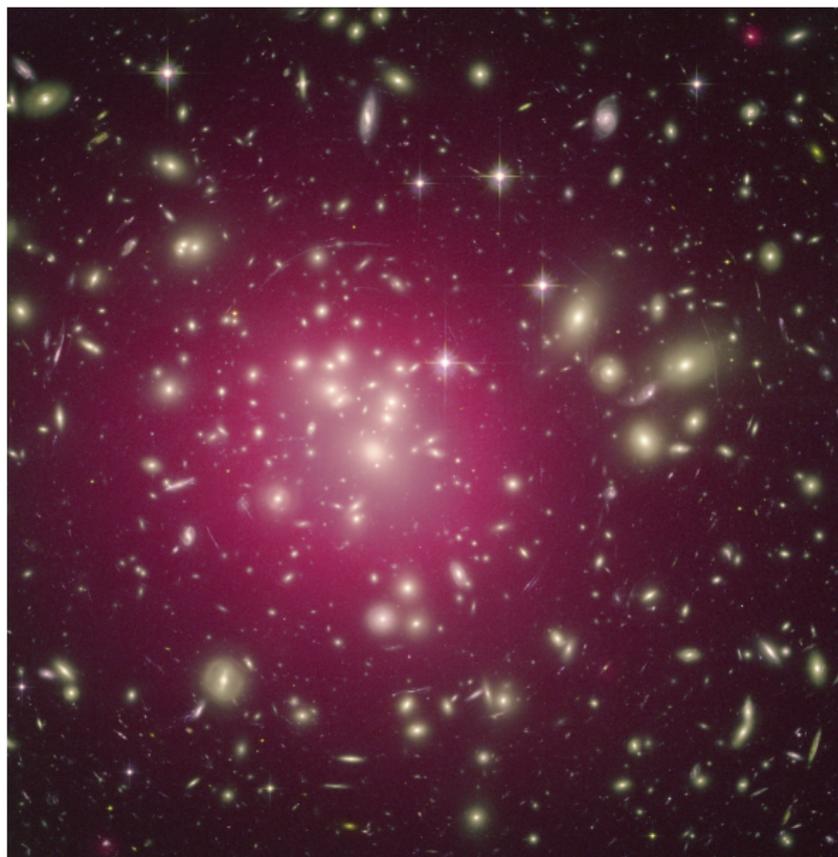
Gravitationslinsen

... sind zu stark!

Galaxienhaufen

Abell 1689

- Sterne in Galaxien:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- intergalaktisches Gas:
ca. $3,6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$



Gravitationslinsen

... sind zu stark!

Galaxienhaufen Abell 1689

- Sterne in Galaxien:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- intergalaktisches Gas:
ca. $3,6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$
- Gesamtmasse,
ermittelt über Gravi-
tationslinseneffekt:
ca. $6,4 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

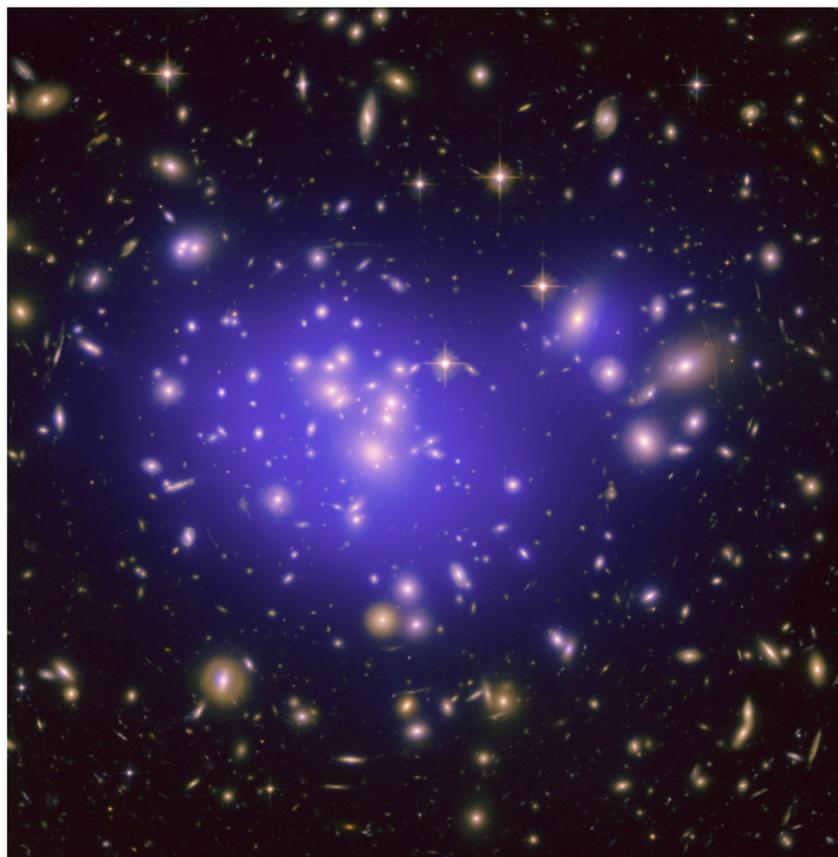


Gravitationslinsen

... sind zu stark!

Galaxienhaufen Abell 1689

- Sterne in Galaxien:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- intergalaktisches Gas:
ca. $3,6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$
- Gesamtmasse,
ermittelt über Gravi-
tationslinseneffekt:
ca. $6,4 \cdot 10^{14} M_{\odot}$



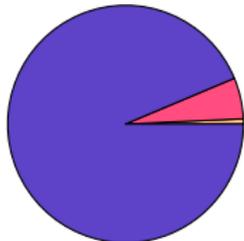
Gravitationslinsen

... sind zu stark!

Galaxienhaufen Abell 1689

- Sterne in Galaxien:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- intergalaktisches Gas:
ca. $3,6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$
- Gesamtmasse,
ermittelt über Gravi-
tationslinseneffekt:
ca. $6,4 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

- 0,7 %  Galaxien
5,6 %  Gas
93,7 %  dunkle Materie



Erklärungsansätze

- **MACHOs**
normale Materie, die nur halt nicht leuchtet
- **WIMPs**
neue Elementarteilchen
- **Modifizierte Gravitation**
keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz

MACHOs

normale Materie, die nur halt nicht leuchtet

Dunkle Materie = „normale“ Materie,
die aber keine elektromagnetische Strahlung abgibt

MACHO = *Massive Astrophysical Compact Halo Object*

- Planeten ohne Sonne
- Gas- und Staubwolken
- Schwarze Löcher

MACHOs

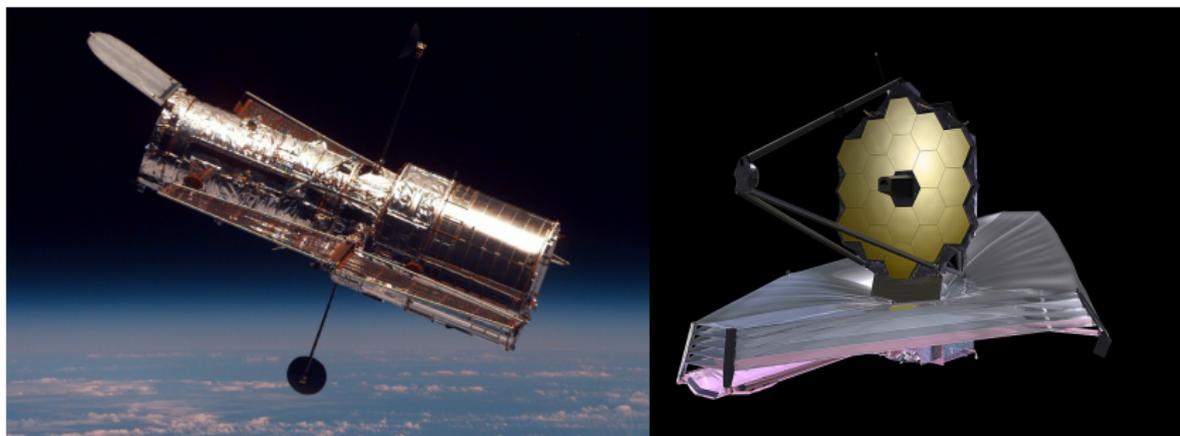
normale Materie, die nur halt nicht leuchtet

Dunkle Materie = „normale“ Materie,
die aber keine elektromagnetische Strahlung abgibt

MACHO = *Massive Astrophysical Compact Halo Object*

- Planeten ohne Sonne
- Gas- und Staubwolken
- Schwarze Löcher

Problem: Davon müßte es sehr viel geben.
Bis heute (2024) hat man jedoch nichts entdeckt.



Dunkle Materie = neue, unsichtbare Elementarteilchen

WIMP = *Weakly Interacting Massive Particle*

- sterile Neutrinos
- Axionen
- *Little Higgs*-Teilchen
- supersymmetrische Partnerteilchen

Standardmodell 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
	QUARKS	u Up	c Charm	t Top	g Gluon	H Higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d Down	s Strange	b Bottom	γ Photon	
	LEPTONEN	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e Elektron	μ Myon	τ Tauon	Z 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	+1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tauon-Neutrino	W W-Boson	
						EICHBOSONEN VEKTORBOSONEN
						SKALARBOSONEN

WIMPs

neue Elementarteilchen

Dunkle Materie = neue, unsichtbare Elementarteilchen

WIMP = *Weakly Interacting Massive Particle*

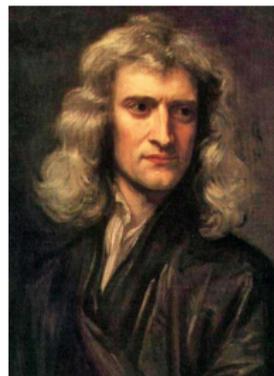
- sterile Neutrinos
- Axionen
- *Little Higgs*-Teilchen
- supersymmetrische Partnerteilchen

Problem: Man hatte erwartet, diese Teilchen am LHC zu finden. Bis heute (2024) hat man jedoch nichts entdeckt.



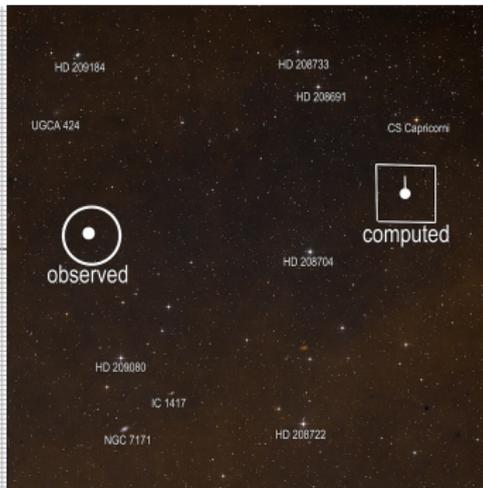
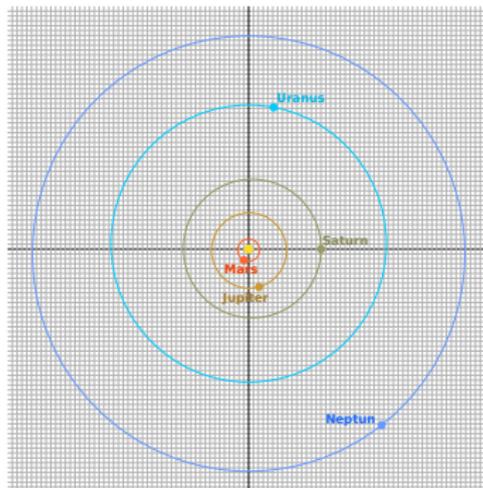
Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)



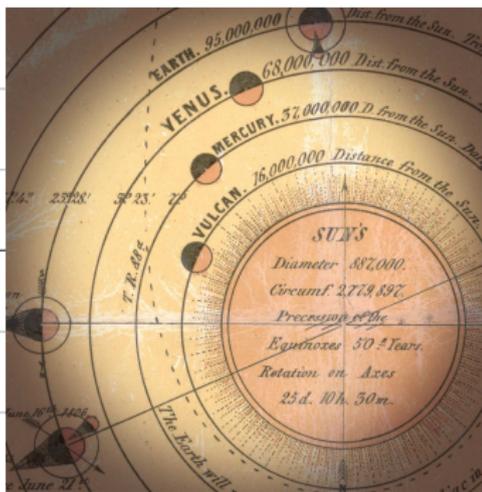
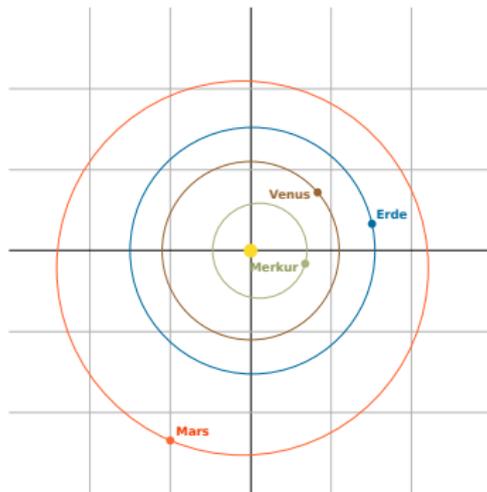
Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)
- Le Verrier (1846): Abweichungen in der Bahn des Uranus
→ neuer Planet: Neptun ✓ (Galle, 1846)



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)
- Le Verrier (1846): Abweichungen in der Bahn des Uranus
→ neuer Planet: Neptun ✓ (Galle, 1846)
- Le Verrier (1859): Abweichungen in der Bahn des Merkur
→ neuer Planet: Vulkan ✗



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)
- Le Verrier (1846): Abweichungen in der Bahn des Uranus
→ neuer Planet: Neptun ✓ (Galle, 1846)
- Le Verrier (1859): Abweichungen in der Bahn des Merkur
→ neuer Planet: Vulkan ✗
- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn
ohne zusätzlichen Planeten ✓



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)
- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien
ohne dunkle Materie?



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)

- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien
ohne dunkle Materie?

- Virialsatz
- Rotationskurven
- Gravitationslinsen



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)

- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien ohne dunkle Materie!

- ✓ Virialsatz
 - Rotationskurven
 - Gravitationslinsen



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)

- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien
ohne dunkle Materie!!

- ✓ Virialsatz
- ✓ Rotationskurven
- Gravitationslinsen



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)

- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien
ohne dunkle Materie???

- ✓ Virialsatz
- ✓ Rotationskurven
- ✗ Gravitationslinsen



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)

- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien
ohne dunkle Materie???

- ✓ Virialsatz
- ✓ Rotationskurven
- ✗ Gravitationslinsen
 - Modifizierte Gravitation ist zu stark



Modifizierte Gravitation *keine Materie, sondern ein neues Naturgesetz*

- Newton (1686): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$ (Gravitationsgesetz)
- Einstein (1915): $F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$

Modifiziertes Gravitationsgesetz nahe der Sonne

→ Erklärung der Merkurbahn ohne zusätzlichen Planeten ✓

- Milgrom (1983): $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2 \cdot \mu \left(\frac{M \cdot G}{r^2 a_0} \right)}$ (und Varianten)

Modifiziertes Gravitationsgesetz in sehr großen Entfernungen

→ Erklärung des Verhaltens von Galaxien
ohne dunkle Materie???

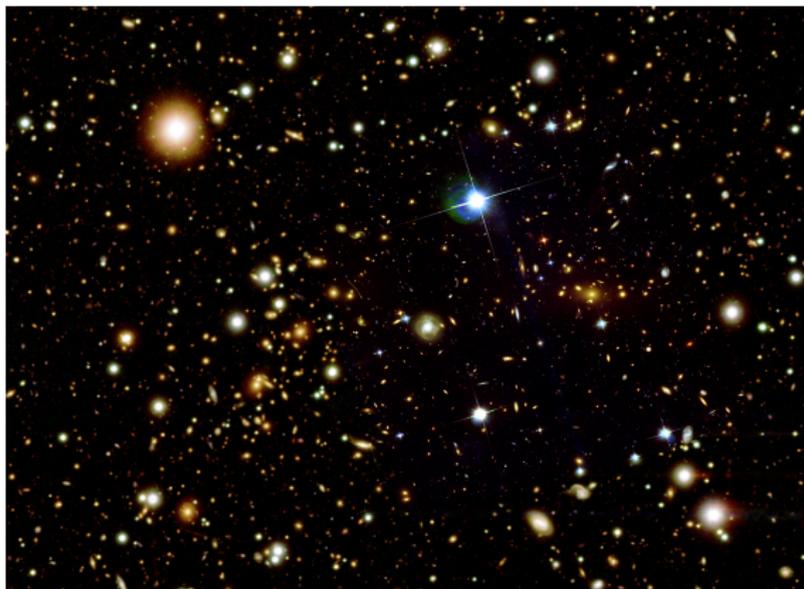
- ✓ Virialsatz
- ✓ Rotationskurven
- ✗ Gravitationslinsen
 - Modifizierte Gravitation ist zu stark
 - ... und am falschen Ort → Bullet Cluster



Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

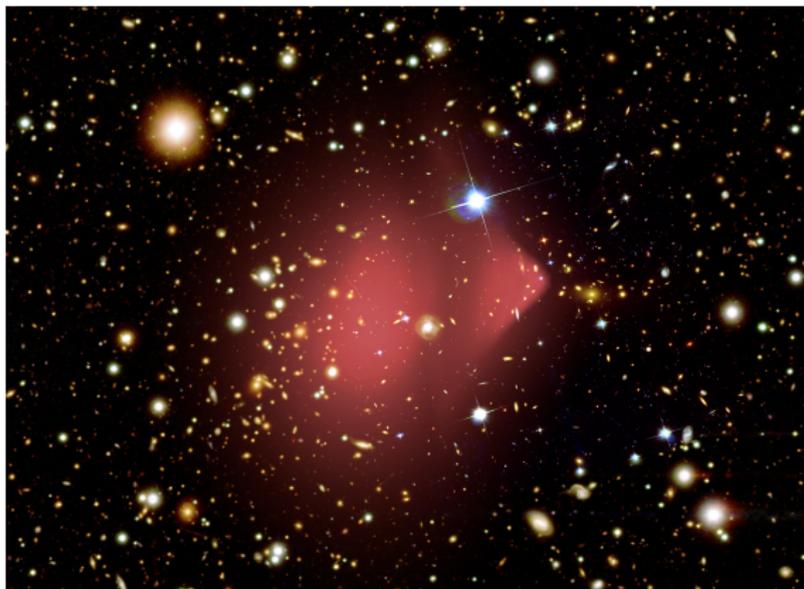
- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$



Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, Gas: $2,2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$



Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

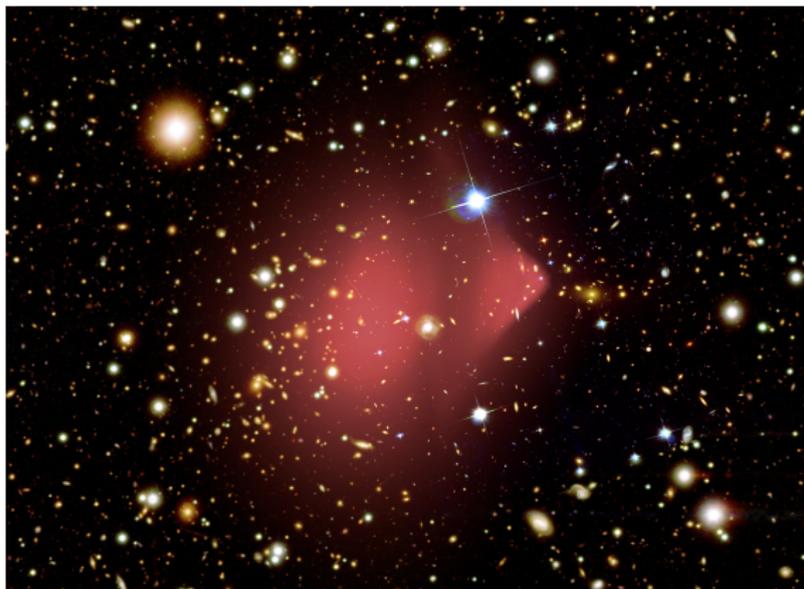
- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, Gas: $2,2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$
- Galaxien: durchdringen sich kollisionsfrei
- Gas: kollidiert, bremst, heizt sich auf



Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, Gas: $2,2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$
- Galaxien: durchdringen sich kollisionsfrei
- Gas: kollidiert, bremst, heizt sich auf



Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, Gas: $2,2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$, Gesamtmasse: $9,38 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

- Galaxien: durchdringen sich kollisionsfrei

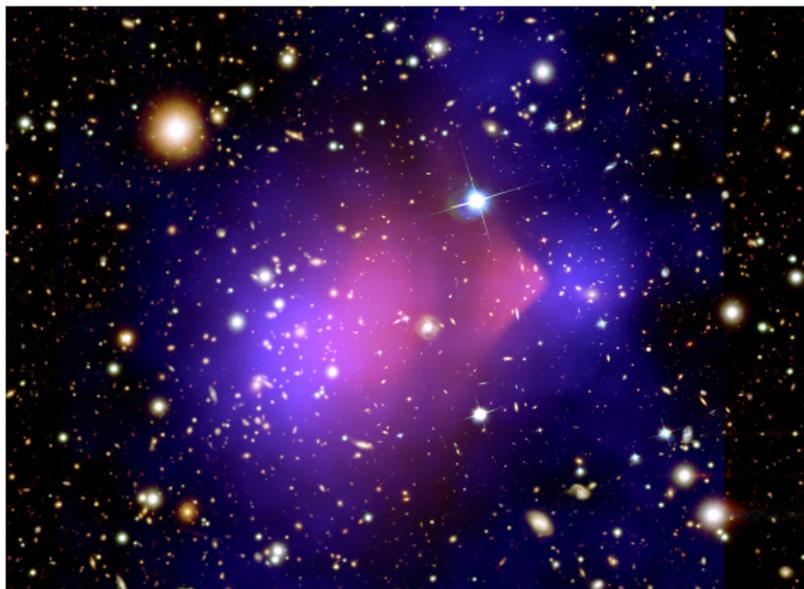
- Gas: kollidiert, bremst, heizt sich auf

- Gravitationslinseneffekt: Schwerkraft maximal bei den Galaxien, nicht beim Gas

→ Es gibt dunkle Materie, bei den Galaxien, kollisionsfrei.

→ nicht erklärbar durch modifizierte Gravitation

Clowe et al., arXiv:astro-ph/0608407 (2006)



Das Bullet-Cluster

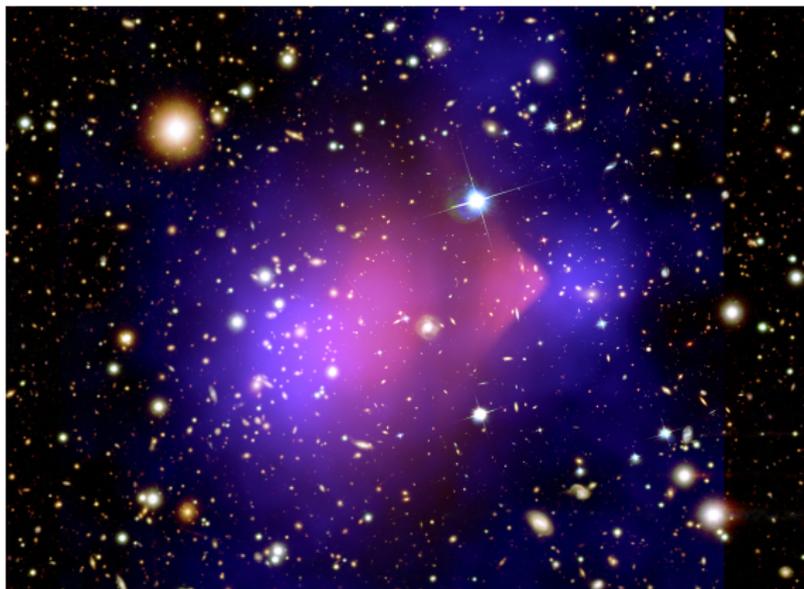
Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, Gas: $2,2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$, Gesamtmasse: $9,38 \cdot 10^{14} M_{\odot}$
- Relativgeschwindigkeit der Galaxienhaufen:
ca. $4700 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Angus, McGaugh, arXiv:0704.0381 (2007)

→ nicht erklärbar durch dunkle Materie:
maximal ca. $2900 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

→ erklärbar durch modifizierte Gravitation:
maximal ca. $4800 \frac{\text{km}}{\text{s}}$



Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Galaxien: $3,8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, Gas: $2,2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$, Gesamtmasse: $9,38 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

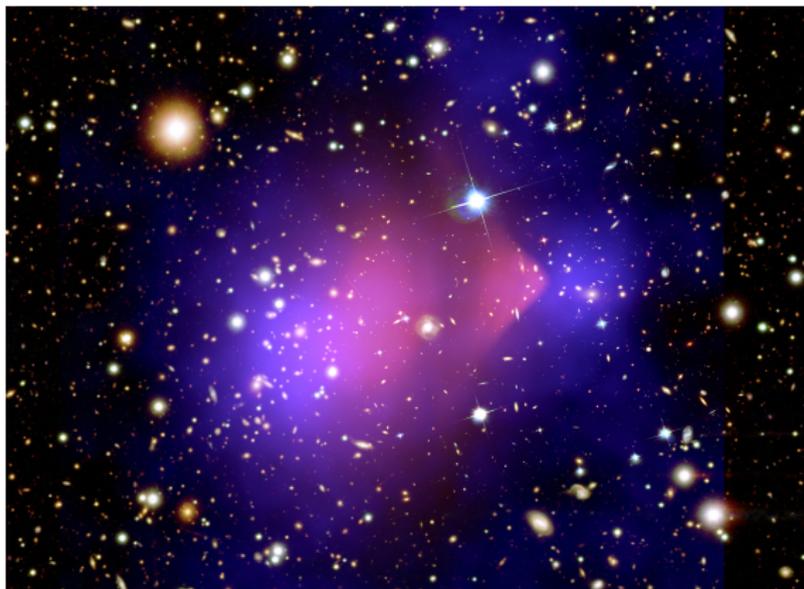
- Relativgeschwindigkeit der Galaxienhaufen:
ca. $4700 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Angus, McGaugh, arXiv:0704.0381 (2007)

→ nicht erklärbar durch dunkle Materie:
maximal ca. $2900 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

→ erklärbar durch modifizierte Gravitation:
maximal ca. $4800 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

→ ???

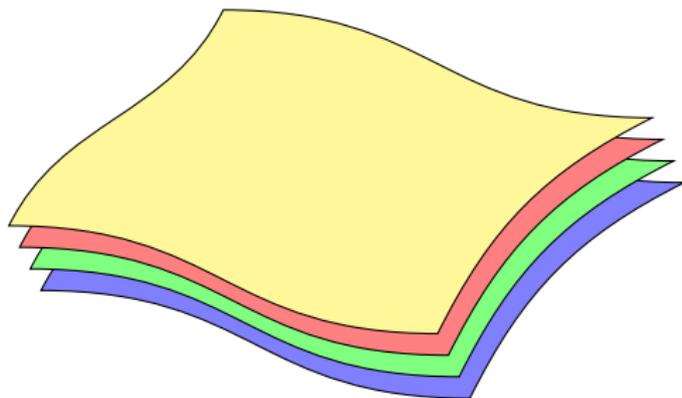


Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Connes (1996):

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.



Alle Kräfte sind Geometrie.



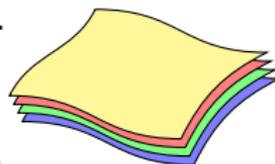
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996):

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$



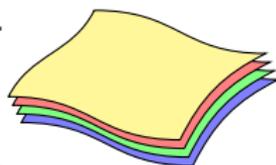
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996):

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$



folgt:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + i\bar{u}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu u_L^n + i\bar{u}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu u_R^n + i\bar{d}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu d_L^n + i\bar{d}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu d_R^n \\ & - \Upsilon (\lambda_e^n \varphi \bar{e}_L^n e_R^n + \lambda_u^n \varphi \bar{u}_L^n u_R^n + \lambda_d^n \varphi \bar{d}_L^n d_R^n \\ & \quad + \bar{\lambda}_e^n \varphi e_L^n \bar{e}_R^n + \bar{\lambda}_u^n \varphi u_L^n \bar{u}_R^n + \bar{\lambda}_d^n \varphi d_L^n \bar{d}_R^n) \\ & - q_1 B_\mu (-\bar{e}^n \gamma^\mu e^n + \frac{2}{5} \bar{u}^n \gamma^\mu u^n - \frac{1}{5} \bar{d}^n \gamma^\mu d^n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\
& + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\
& + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\
& + i\bar{u}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu u_L^n + i\bar{u}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu u_R^n + i\bar{d}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu d_L^n + i\bar{d}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu d_R^n \\
& - \Upsilon \left(\lambda_e^n \varphi \bar{e}_L^n e_R^n + \lambda_u^n \varphi \bar{u}_L^n u_R^n + \lambda_d^n \varphi \bar{d}_L^n d_R^n \right. \\
& \quad \left. + \bar{\lambda}_e^n \varphi e_L^n \bar{e}_R^n + \bar{\lambda}_u^n \varphi u_L^n \bar{u}_R^n + \bar{\lambda}_d^n \varphi d_L^n \bar{d}_R^n \right) \\
& - g_1 B_\mu \left(-\bar{e}^n \gamma^\mu e^n + \frac{2}{3} \bar{u}^n \gamma^\mu u^n - \frac{1}{3} \bar{d}^n \gamma^\mu d^n \right) \\
& - g_2 W_\mu^a \left(\left(\begin{array}{c} \bar{\nu}_L^n \\ \bar{e}_L^n \end{array} \right) \gamma^\mu \sigma_a \left(\begin{array}{c} \nu_L^n \\ e_L^n \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \bar{u}_L^n \\ \bar{d}_L^n \end{array} \right) \gamma^\mu \sigma_a \left(\begin{array}{c} u_L^n \\ d_L^n \end{array} \right) \right) \\
& - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W_a^{\mu\nu} \\
& - g_3 G_\mu^c \left(\bar{u}^n \gamma^\mu \lambda^c u^n + \bar{d}^n \gamma^\mu \lambda^c d^n \right) \\
& - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^c G_c^{\mu\nu} \\
& + \lambda |\varphi|^4 - \frac{1}{2} \mu^2 |\varphi|^2 \\
& + \frac{1}{2} |\partial_\mu \varphi - ig_2 W_\mu^a \varphi \sigma_a - ig_1 B_\mu \varphi|^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\
& + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\
& + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\
& + i\bar{u}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu u_L^n + i\bar{u}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu u_R^n + i\bar{d}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu d_L^n + i\bar{d}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu d_R^n \\
& - \Upsilon (\lambda_e^n \varphi \bar{e}_L^n e_R^n + \lambda_u^n \varphi \bar{u}_L^n u_R^n + \lambda_d^n \varphi \bar{d}_L^n d_R^n \\
& \quad + \bar{\lambda}_e^n \varphi e_L^n \bar{e}_R^n + \bar{\lambda}_u^n \varphi u_L^n \bar{u}_R^n + \bar{\lambda}_d^n \varphi d_L^n \bar{d}_R^n) \\
& - g_1 B_\mu (-\bar{e}^n \gamma^\mu e^n + \frac{2}{3} \bar{u}^n \gamma^\mu u^n - \frac{1}{3} \bar{d}^n \gamma^\mu d^n) \\
& - g_2 W_\mu^a \left(\begin{pmatrix} \bar{\nu}_L^n \\ \bar{e}_L^n \end{pmatrix} \gamma^\mu \sigma_a \begin{pmatrix} \nu_L^n \\ e_L^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{u}_L^n \\ \bar{d}_L^n \end{pmatrix} \gamma^\mu \sigma_a \begin{pmatrix} u_L^n \\ d_L^n \end{pmatrix} \right) \\
& - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W_a^{\mu\nu} \\
& - g_3 G_\mu^c (\bar{u}^n \gamma^\mu \lambda^c u^n + \bar{d}^n \gamma^\mu \lambda^c d^n) \\
& - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^c G_c^{\mu\nu} \\
& + \lambda |\varphi|^4 - \frac{1}{2} \mu^2 |\varphi|^2 \\
& + \frac{1}{2} |\partial_\mu \varphi - ig_2 W_\mu^a \varphi \sigma_a - ig_1 B_\mu \varphi|^2
\end{aligned}$$

Standardmodell der Elementarteilchen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)			
	I	II	III			
Masse Ladung Spin	≈2.2 MeV/c² 2/3 1/2 u Up	≈1.28 GeV/c² 2/3 1/2 c Charm	≈173.1 GeV/c² 2/3 1/2 t Top	0 0 1 g Gluon	≈124.97 GeV/c² 0 0 H Higgs	
QUARKS	≈4.7 MeV/c² -1/3 1/2 d Down	≈96 MeV/c² -1/3 1/2 s Strange	≈4.18 GeV/c² -1/3 1/2 b Bottom	0 0 1 γ Photon	SKALARBOSONEN	
	≈0.511 MeV/c² -1 1/2 e Elektron	≈105.66 MeV/c² -1 1/2 μ Myon	≈1.7768 GeV/c² -1 1/2 τ Tauon	≈91.19 GeV/c² 0 1 Z Z-Boson		EICHBOSONEN VEKTORBOSONEN
	<0.17 eV/c² 0 1/2 ν_e Myon-Neutrino	≈0.17 MeV/c² 0 1/2 ν_μ Myon-Neutrino	≈1.82 MeV/c² 0 1/2 ν_τ Tauon-Neutrino	≈80.39 GeV/c² ±1 1 W W-Boson		
LEPTONEN						

$$\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda)$$

$$+ a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma})$$

Quarks und
Leptonen

$$\left\{ \begin{aligned} &+ i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ &+ i\bar{u}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu u_L^n + i\bar{u}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu u_R^n + i\bar{d}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu d_L^n + i\bar{d}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu d_R^n \\ &- \Upsilon (\lambda_e^n \varphi \bar{e}_L^n e_R^n + \lambda_u^n \varphi \bar{u}_L^n u_R^n + \lambda_d^n \varphi \bar{d}_L^n d_R^n \\ &\quad + \bar{\lambda}_e^n \varphi e_L^n \bar{e}_R^n + \bar{\lambda}_u^n \varphi u_L^n \bar{u}_R^n + \bar{\lambda}_d^n \varphi d_L^n \bar{d}_R^n) \end{aligned} \right.$$

Elektroschwache
Wechselwirkung

$$\left\{ \begin{aligned} &- g_1 B_\mu (-\bar{e}^n \gamma^\mu e^n + \frac{2}{3} \bar{u}^n \gamma^\mu u^n - \frac{1}{3} \bar{d}^n \gamma^\mu d^n) \\ &- g_2 W_\mu^a \left(\begin{pmatrix} \bar{\nu}_L^n \\ \bar{e}_L^n \end{pmatrix} \gamma^\mu \sigma_a \begin{pmatrix} \nu_L^n \\ e_L^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{u}_L^n \\ \bar{d}_L^n \end{pmatrix} \gamma^\mu \sigma_a \begin{pmatrix} u_L^n \\ d_L^n \end{pmatrix} \right) \\ &- \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W_a^{\mu\nu} \end{aligned} \right.$$

Starke
Wechsel-
wirkung

$$\left\{ \begin{aligned} &- g_3 G_\mu^c (\bar{u}^n \gamma^\mu \lambda^c u^n + \bar{d}^n \gamma^\mu \lambda^c d^n) \\ &- \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^c G_c^{\mu\nu} \end{aligned} \right.$$

Higgs-
Mecha-
nismus

$$\left\{ \begin{aligned} &+ \lambda |\varphi|^4 - \frac{1}{2} \mu^2 |\varphi|^2 \\ &+ \frac{1}{2} |\partial_\mu \varphi - ig_2 W_\mu^a \varphi \sigma_a - ig_1 B_\mu \varphi|^2 \end{aligned} \right.$$

Standardmodell der Elementarteilchen

		Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
		I	II	III		
QUARKS	Masse Ladung Spin	≈2.2 MeV/c² 2/3 1/2 u Up	≈1.28 GeV/c² 2/3 1/2 c Charm	≈173.1 GeV/c² 2/3 1/2 t Top	0 0 1 g Gluon	≈124.97 GeV/c² 0 0 H Higgs
		≈4.7 MeV/c² -1/3 1/2 d Down	≈96 MeV/c² -1/3 1/2 s Strange	≈4.18 GeV/c² -1/3 1/2 b Bottom	0 0 1 γ Photon	
		≈0.511 MeV/c² -1 1/2 e Elektron	≈105.66 MeV/c² -1 1/2 μ Myon	≈1.7768 GeV/c² -1 1/2 τ Tauon	≈91.19 GeV/c² 0 1 Z Z-Boson	EICHBOSONIEN VEKTORBOSONIEN
LEPTONEN	<0.1 eV/c² 0 1/2 ν_e Elektron-Neutrino	≈0.17 MeV/c² 0 1/2 ν_μ Myon-Neutrino	≈1.82 MeV/c² 0 1/2 ν_τ Tauon-Neutrino	≈80.39 GeV/c² 0 1 W W-Boson		

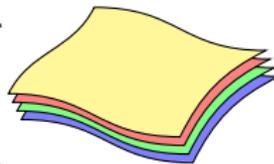
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996):

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$



folgt:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + \dots \end{aligned}$$

Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

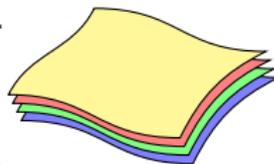
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996):

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$



folgt:

Allgemeine Relativitätstheorie

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + \dots \end{aligned}$$

Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

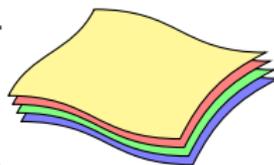
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996): „Weltformel“

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$



folgt:

Allgemeine Relativitätstheorie

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + \dots \end{aligned}$$

Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

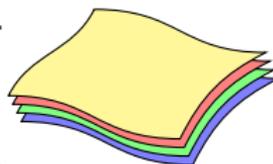
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996): „Weltformel“

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$

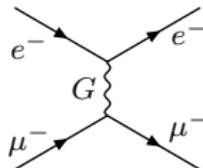


folgt:

Allgemeine Relativitätstheorie

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + \dots \end{aligned}$$

- bisher: wenig beachtet,
weil „nicht quantisierbar“



Standardmodell der Quantenfeldtheorie

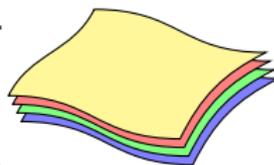
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996): „Weltformel“

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$

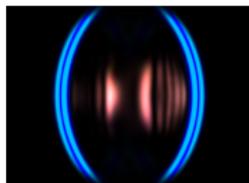


folgt:

Allgemeine Relativitätstheorie

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + \dots \end{aligned}$$

- bisher: wenig beachtet,
weil „nicht quantisierbar“
→ mit meiner Methode schon



Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

P. G. (2021)

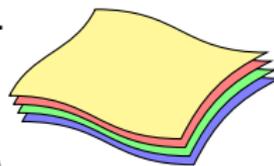
Neue Erkenntnisse

Nichtkommutative Geometrie

Alle Kräfte sind Geometrie.

Connes (1996): „Weltformel“

- diskrete Extradimensionen:
Das Universum hat mehrere „Blätter“.
- Aus



$$\mathcal{A} = C^\infty(M) \otimes (\mathbb{C} \oplus \mathbb{H} \oplus M_3(\mathbb{C}))$$



folgt:

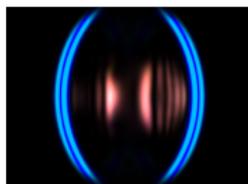
Allgemeine Relativitätstheorie

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \\ & + a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \\ & + i\bar{e}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu e_L^n + i\bar{e}_R^n \gamma^\mu \partial_\mu e_R^n + i\bar{\nu}_L^n \gamma^\mu \partial_\mu \nu_L^n \\ & + \dots \end{aligned}$$

Neu!
Dunkle Materie?

Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

- bisher: wenig beachtet,
weil „nicht quantisierbar“
→ mit meiner Methode schon



P. G. (2021)

Konforme Gravitation

Zusatzeffekt der nichtkommutativen Geometrie

Allgemeine Relativitätstheorie: $\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G}(R - 2\Lambda)$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$$

Konforme Gravitation: $\mathcal{L} = a(5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma})$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G_0}{r(r - r_s)} + m \cdot M \cdot G_1 \quad (\text{zusätzliche konstante Kraft})$$

Konforme Gravitation

Zusatzeffekt der nichtkommutativen Geometrie

Allgemeine Relativitätstheorie: $\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G}(R - 2\Lambda)$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$$

Konforme Gravitation: $\mathcal{L} = a(5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma})$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G_0}{r(r - r_s)} + m \cdot M \cdot G_1 \quad (\text{winzige zusätzliche konstante Kraft})$$

Für unsere Sonne: $M \cdot G_1 \approx 2.4 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (Fall aus 1 m Höhe: ≈ 2900 Jahre)

Konforme Gravitation

Zusatzeffekt der nichtkommutativen Geometrie

Allgemeine Relativitätstheorie: $\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda)$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$$

Konforme Gravitation: $\mathcal{L} = a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma})$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G_0}{r(r - r_s)} + m \cdot M \cdot G_1 \quad (\text{winzige zusätzliche konstante Kraft})$$

Für unsere Sonne: $M \cdot G_1 \approx 2.4 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (Fall aus 1 m Höhe: ≈ 2900 Jahre)

→ Kazanas, Mannheim, ApJ **342**, 635 (1989):
modifizierte Gravitation, mögliche Erklärung für dunkle Materie

Konforme Gravitation

Zusatzeffekt der nichtkommutativen Geometrie

Allgemeine Relativitätstheorie: $\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda)$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G}{r(r - r_s)}$$

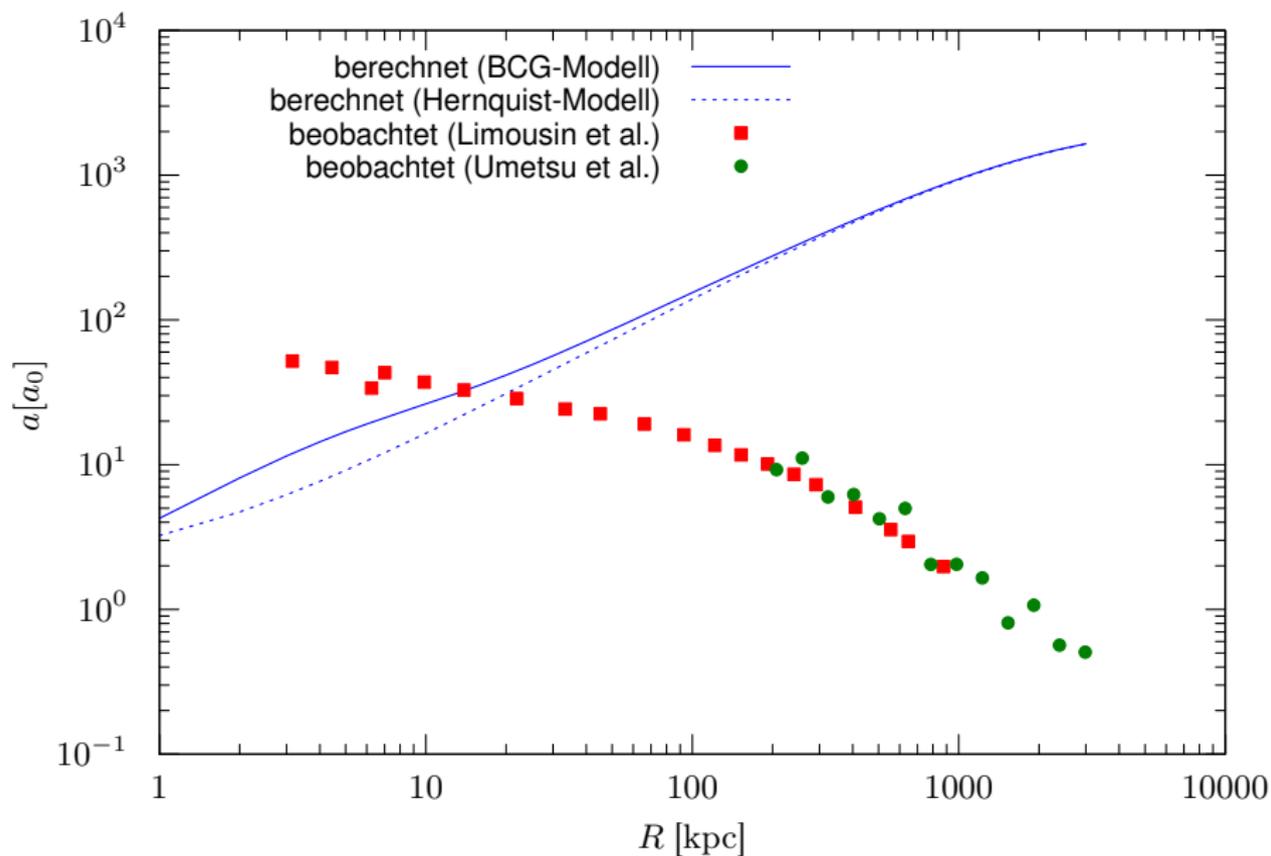
Konforme Gravitation: $\mathcal{L} = a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma})$

$$\Rightarrow F \approx \frac{m \cdot M \cdot G_0}{r(r - r_s)} + m \cdot M \cdot G_1 \quad (\text{winzige zusätzliche konstante Kraft})$$

Für unsere Sonne: $M \cdot G_1 \approx 2.4 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (Fall aus 1 m Höhe: ≈ 2900 Jahre)

→ Kazanas, Mannheim, ApJ **342**, 635 (1989):
modifizierte Gravitation, mögliche Erklärung für dunkle Materie

- ✓ Virialsatz
- ✓ Rotationskurven
- ✗ Gravitationslinsen
 - Modifizierte Gravitation ist zu stark
 - ... und am falschen Ort → Bullet Cluster



Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

$$\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \quad \leftarrow \text{enthält } R \text{ für die Gravitation}$$

- Konforme Gravitation:

$$\mathcal{L} = a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \quad \leftarrow \text{enthält } R^2$$

Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

$$\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \quad \longleftarrow \text{enthält } R \text{ für die Gravitation (klein)}$$

- Konforme Gravitation:

$$\mathcal{L} = a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \quad \longleftarrow \text{enthält } R^2$$

- R klein $\Rightarrow R^2$ noch viel kleiner

→ Konforme Gravitation ist nur bei sehr starker Gravitation relevant.

Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

$$\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \quad \leftarrow \text{enthält } R \text{ für die Gravitation (klein)}$$

- Konforme Gravitation:

$$\mathcal{L} = a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \quad \leftarrow \text{enthält } R^2$$

- R klein $\Rightarrow R^2$ noch viel kleiner

→ Konforme Gravitation ist nur bei sehr starker Gravitation relevant.

→ Konforme Gravitation ist nur bei Sternen relevant,
nicht jedoch bei Gaswolken.

Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

$$\mathcal{L} = \frac{c^4}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \quad \leftarrow \text{enthält } R \text{ für die Gravitation (klein)}$$

- Konforme Gravitation:

$$\mathcal{L} = a (5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \quad \leftarrow \text{enthält } R^2$$

- R klein $\Rightarrow R^2$ noch viel kleiner

→ Konforme Gravitation ist nur bei sehr starker Gravitation relevant.

→ Konforme Gravitation ist nur bei Sternen relevant,
nicht jedoch bei Gaswolken.

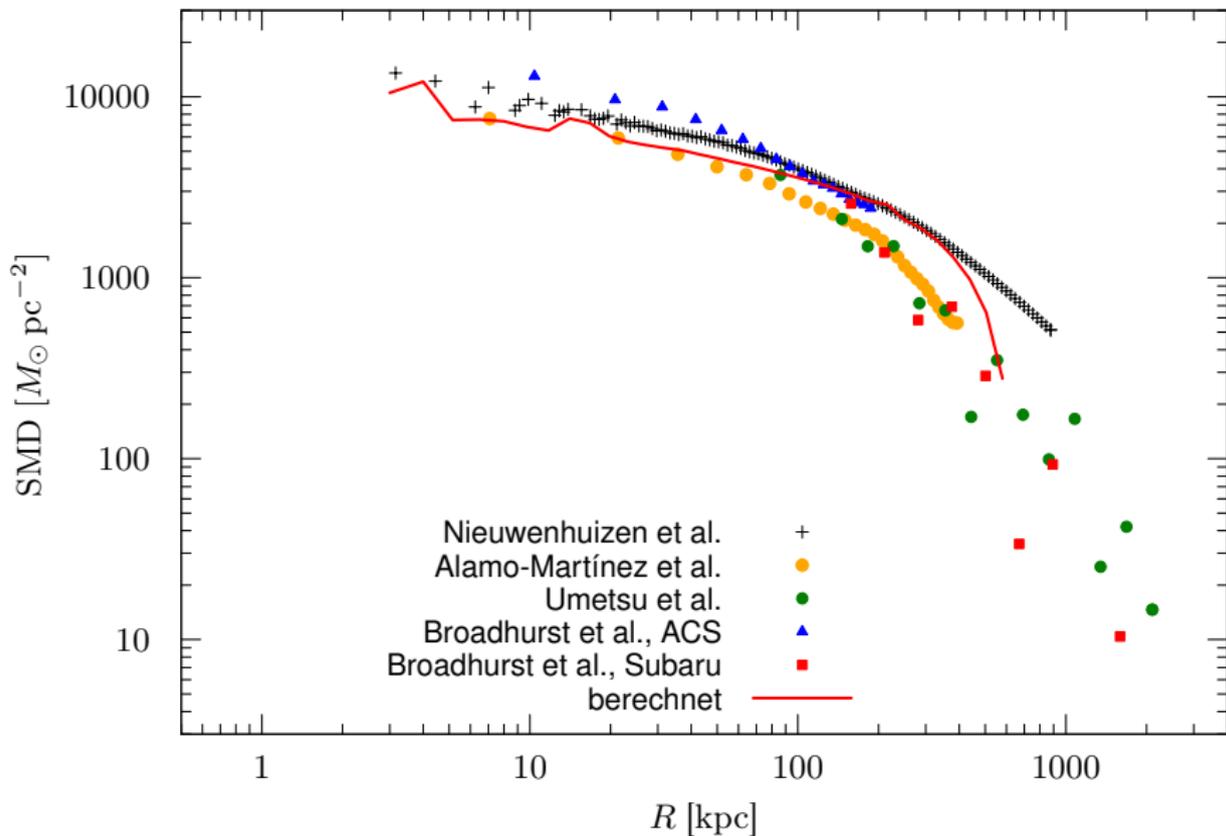
✓ Virialsatz

✓ Rotationskurven

✓ Gravitationslinsen

→ „zu starker“ Gravitationslinseneffekt erklärbar

→ Bullet-Cluster erklärbar



Bullet Cluster

Clowe et al. (2006)
arXiv:astro-ph/0608407
beobachtet



P. G. (Mai 2024)
berechnet



Neue Erkenntnisse

Konforme Gravitation

Zusatzeffekt der nichtkommutativen Geometrie

- ✓ Virialsatz
- ✓ Rotationskurven
- ✓ Gravitationslinsen

Wie geht es weiter?

- Ergebnisse weiter prüfen
- alles aufschreiben und veröffentlichen

Bildnachweis

Lizenz

PD

PD

PD

CC BY 4.0 International

CC BY-SA 3.0

PD

PD

CC BY 3.0 unported

PD

PD

PD

CC BY-SA 3.0 unported

PD

PD

CC0 1.0

CC BY-SA 4.0 International

CC0 1.0

CC0 1.0

PD

PD

CC BY-SA 4.0

CC BY-SA 2.0 Germany

Alle Bilder: <https://commons.wikimedia.org>

Dateiname bei Wikimedia Commons

1e0657_scale.jpg

(siehe auch: <https://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/more.html>)

ETH-BIB-Zwicky_Fritz_(1898-1974)-Portr_01030.tif

Coma_Cluster_Full_Mosaic_(2018-44-4268).png

Vera_Rubin_using_Kitt_Peak_National_Observatory's_36-inch_telescope.jpg

Galaxy_rotation_under_the_influence_of_dark_matter.ogv

Abell_1689_(captured_by_the_Hubble_Space_Telescope).jpg

Abell_1689-_A_Galaxy_Cluster_Makes_Its_Mark_(A_galaxy_cluster_at_a_distance_of_about_2.3_billion_light_years_from_Earth.)_(2941478428).jpg

Abell_1689.jpg

Hubble_01_Cropped.jpg

James_Webb_Space_Telescope_2009_top.jpg

Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg

CERN_Aerial_View.jpg

GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg

Urbain_Le_Verrier.jpg

Outer_Planet_Orbits_01.pdf

Discovery_(23_September_1846)_position_neptune_DSS2.jpg

Inner_Planet_Orbits_01.pdf

Planet-Vulcan_1846_003790.jpg

Einstein_patentoffice.jpg

Milgrom_Mordechai.jpg

Anim_Schlieren_Balle.gif

Alain_Connes.jpg

Diese Folien inkl. Abbildungen:
Copyright © 2024 Peter Gerwinski
<https://www.peter.gerwinski.de>
Lizenz: CC BY-SA 4.0