

Dunkle Materie

und *angewandte*
hardwarenahe Programmierung

Prof. Dr. rer. nat. Peter Gerwinski

4. Januar 2024

Dunkle Materie und angewandte hardwarenahe Programmierung

1 Was ist dunkle Materie?

<https://gitlab.cvh-server.de/pgerwinski/hp>

- 1.1 Rotationskurven
- 1.2 Virialsatz
- 1.3 Gravitationslinsen
- 1.4 Strukturbildung von Materie

2 Erklärungsansätze

- 2.1 MACHOs
- 2.2 WIMPs
- 2.3 Modifizierte Gravitation

3 Das Bullet-Cluster

4 Neue Erkenntnisse

- 4.1 Nichtkommutative Geometrie
- 4.2 Konforme Gravitation
- 4.3 Verfügbare Daten
- 4.4 Hardwarenahe Programmierung

5 Fazit und Ausblick

1 Was ist dunkle Materie?

Materie im Weltraum, die wir nicht sehen können

1 Was ist dunkle Materie?

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

1 Was ist 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

1 Was ist 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:

- Rotationskurven
- Virialsatz
- Gravitationslinsen
- Strukturbildung von Materie

1.1 Rotationskurven

Kapteyn (1904):

- Sterne bewegen sich.



Kapteyns Stern



1894



1904

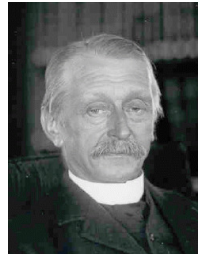


2024

1.1 Rotationskurven

Kapteyn (1904):

- Die Sterne in den Galaxien rotieren um ein gemeinsames Zentrum.



Kapteyns Stern



1894



1904



2024

1.1 Rotationskurven

Kapteyn (1904):

- Die Sterne in den Galaxien rotieren um ein gemeinsames Zentrum.
- Über das Newtonsche Schwerkraftgesetz können wir auf die Masse dessen schließen, was sich innerhalb der Bahn des Sterns befindet.

„We therefore have the means of estimating the mass of the dark matter in the universe.“



Kapteyns Stern



1894



1904

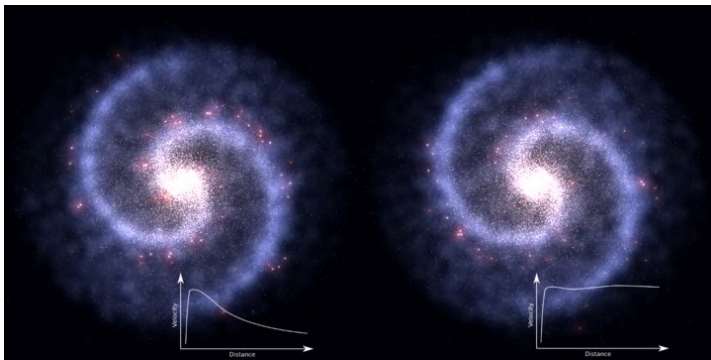


2024

1.1 Rotationskurven

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.



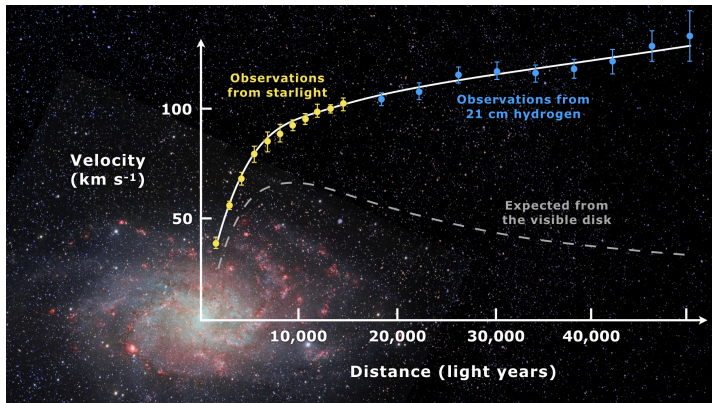
berechnet

beobachtet

1.1 Rotationskurven

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.



1.2 Virialsatz

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.



1.3 Gravitationslinsen

Galaxienhaufen
Abell 1689

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



1.3 Gravitationslinsen

Galaxienhaufen Abell 1689

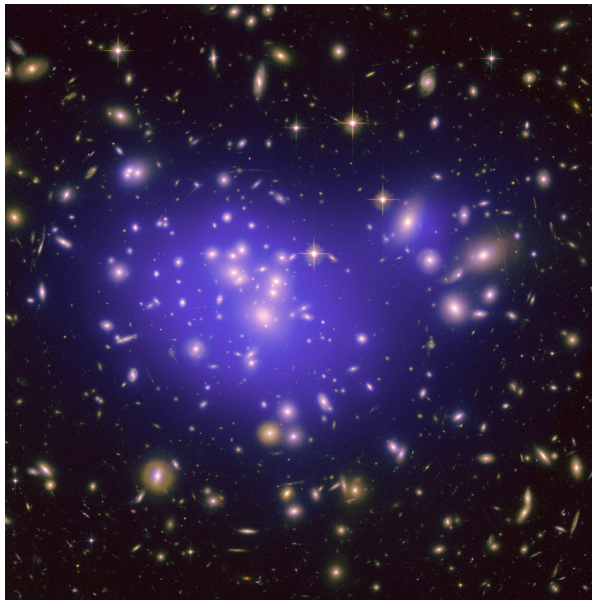
- Sterne:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- Intergalaktisches Gas:
ca. $3,6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$



1.3 Gravitationslinsen

Galaxienhaufen Abell 1689

- Sterne:
ca. $4,7 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- Intergalaktisches Gas:
ca. $3,6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$
- Gesamtmasse,
ermittelt über Gravitationslinseneffekt:
ca. $6,4 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

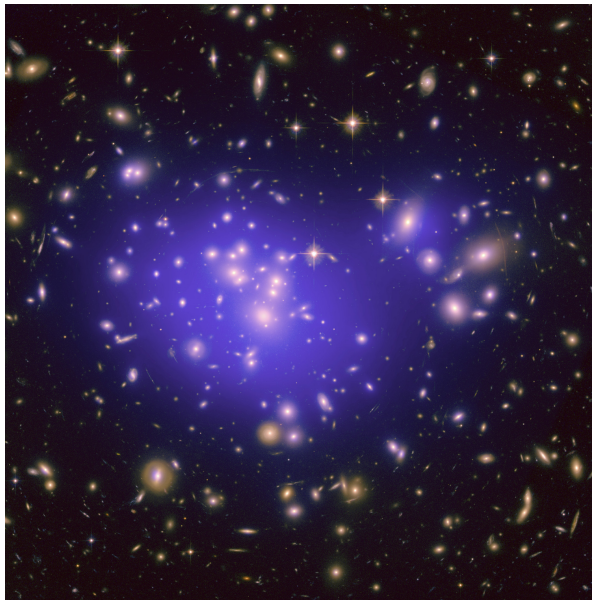


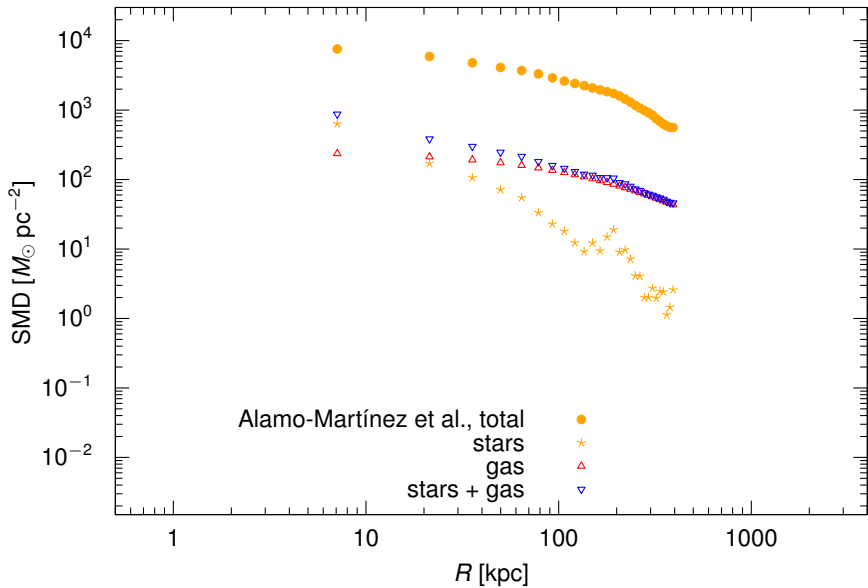
1.3 Gravitationslinsen

Galaxienhaufen Abell 1689

- Sterne:
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 % Sterne
5,6 % Gas
93,7 % dunkle Materie

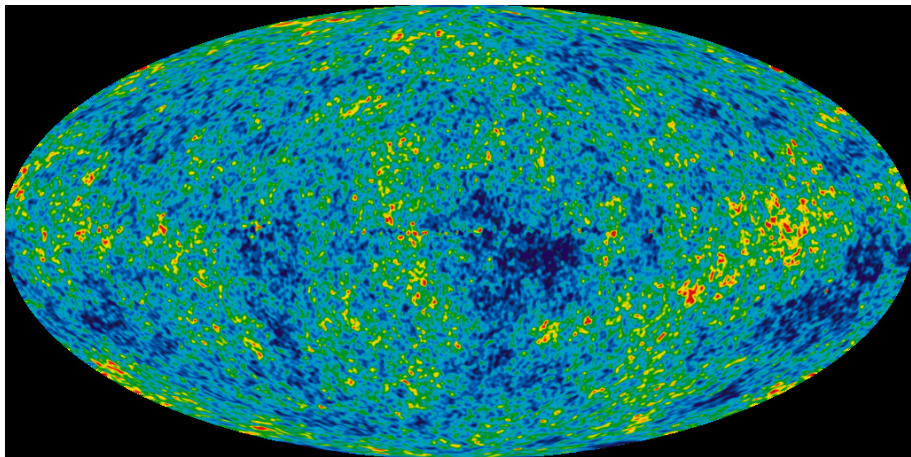




1.4 Strukturbildung von Materie

Kosmische Hintergrundstrahlung

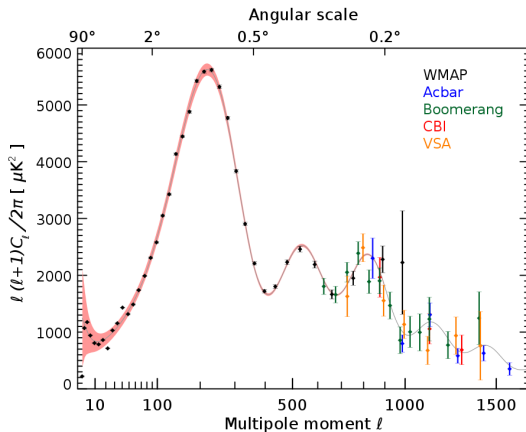
- Erstes Licht nach dem Urknall
- Schwarzkörperstrahlung mit Farbtemperatur $2,7\text{ K} \pm 0,1\%$



1.4 Strukturbildung von Materie

Kosmische Hintergrundstrahlung

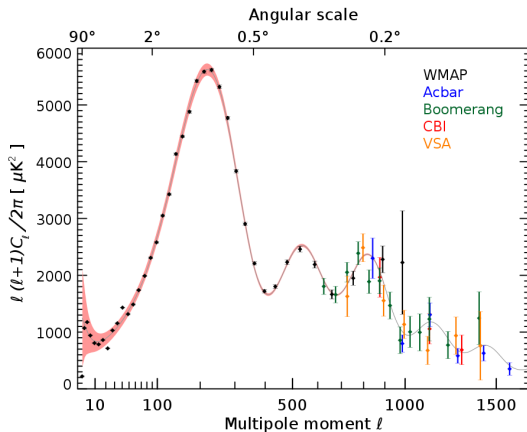
- Erstes Licht nach dem Urknall
- Schwarzkörperstrahlung mit Farbtemperatur $2,7\text{ K} \pm 0,1\%$
- Fouriertransformation
→ Wellenlängen
der Schwankungen
- Daraus sind kosmische
Strukturen entstanden.



1.4 Strukturbildung von Materie

Kosmische Hintergrundstrahlung

- Erstes Licht nach dem Urknall
 - Schwarzkörperstrahlung mit Farbtemperatur $2,7\text{ K} \pm 0,1\%$
 - Fouriertransformation
→ Wellenlängen
der Schwankungen
 - Daraus sind kosmische
Strukturen entstanden.
 - Vergleich mit realen
kosmischen Strukturen
→ zusätzliche Masse
erforderlich
- ca. fünfmal so viel dunkle
wie sichtbare Materie



2 Erklärungsansätze

2.1 MACHOs

Dunkle Materie = „normale“, nicht selbst leuchtende Materie

MACHO = *Massive Astrophysical Compact Halo Object*

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

2 Erklärungsansätze

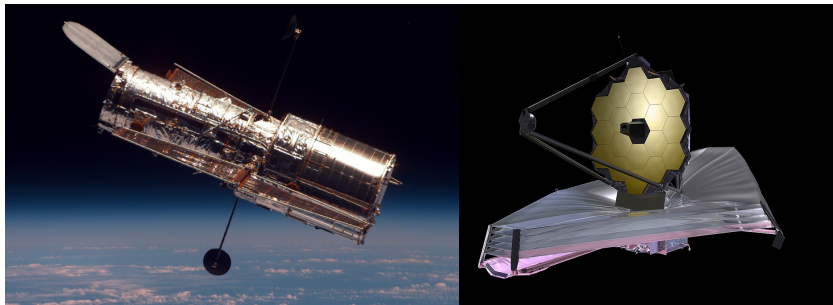
2.1 MACHOs

Dunkle Materie = „normale“, nicht selbst leuchtende Materie

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.



2 Erklärungsansätze

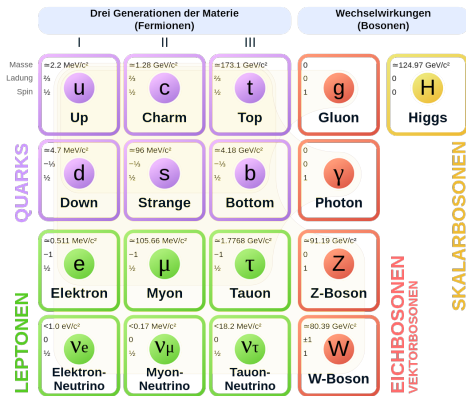
2.2 WIMPs

Dunkle Materie = neue Teilchen

WIMP = *Weakly Interacting Massive Particle*

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

Standardmodell der Elementarteilchen



2 Erklärungsansätze

2.2 WIMPs

Dunkle Materie = neue Teilchen

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.



2 Erklärungsansätze

2.3 Modifizierte Gravitation

Es gibt keine dunkle Materie.
Die Gravitation verhält sich anders.

- Newton: $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$
- Einstein: leichte Abweichungen nahe der Sonne
→ Periheldrehung des Merkur

2 Erklärungsansätze

2.3 Modifizierte Gravitation

Es gibt keine dunkle Materie.
Die Gravitation verhält sich anders.

- Newton: $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$
- Einstein: leichte Abweichungen nahe der Sonne
→ Periheldrehung des Merkur
- Modifizierte Gravitation (verschiedene Theorien):
leichte Abweichungen in sehr großen Entfernungen
→ Wir benötigen keine dunkle Materie.
 - Rotationskurven
 - Virialsatz
 - Gravitationslinsen
 - Strukturbildung von Materie

2 Erklärungsansätze

2.3 Modifizierte Gravitation

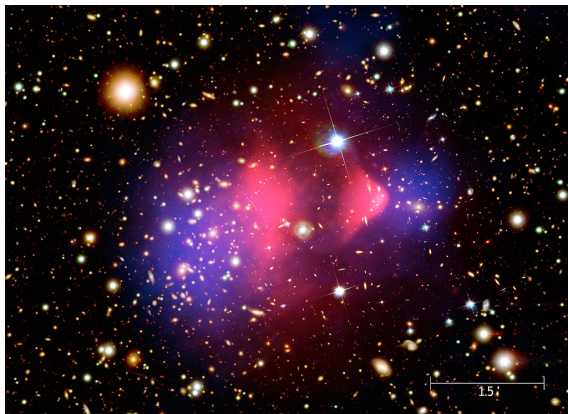
Es gibt keine dunkle Materie.
Die Gravitation verhält sich anders.

- Newton: $F = \frac{m \cdot M \cdot G}{r^2}$
- Einstein: leichte Abweichungen nahe der Sonne
→ Periheldrehung des Merkur
- Modifizierte Gravitation (verschiedene Theorien):
leichte Abweichungen in sehr großen Entfernungen
→ Wir benötigen keine dunkle Materie.
 - ✓ Rotationskurven
 - ✓ Virialsatz
 - ✗ Gravitationslinsen
 - ✓ Strukturbildung von Materie

3 Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

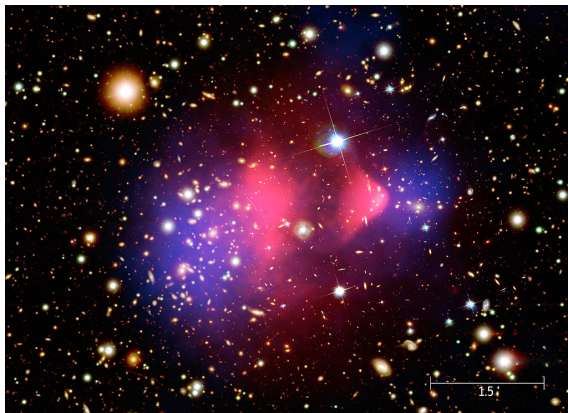
- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Masse: ca. 10 % Galaxien, 90 % Gas



3 Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Masse: ca. 10 % Galaxien, 90 % Gas
- Galaxien: durchdringen sich kollisionsfrei
- Gas: kollidiert, bremst, heizt sich auf

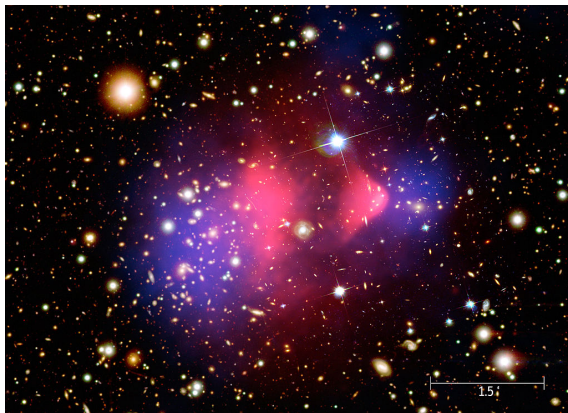


3 Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
 - Masse: ca. 10 % Galaxien, 90 % Gas
 - 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

Quelle: arXiv:astro-ph/0608407



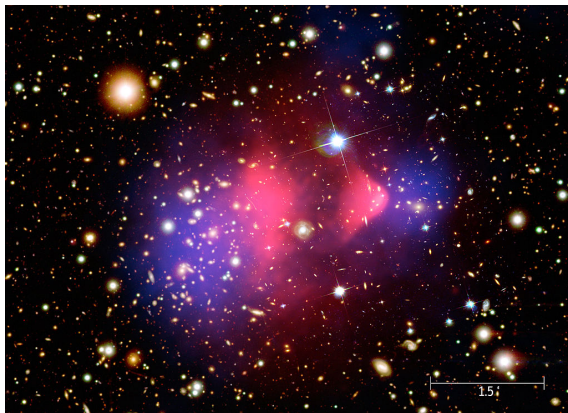
3 Das Bullet-Cluster

Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Masse: ca. 10 % Galaxien, 90 % Gas
- Relativgeschwindigkeit der Galaxien

Quelle: arXiv:0704.0381

- nicht erklärbar durch dunkle Materie (zu hoch)
- erklärbar durch modifizierte Gravitation



3 Das Bullet-Cluster

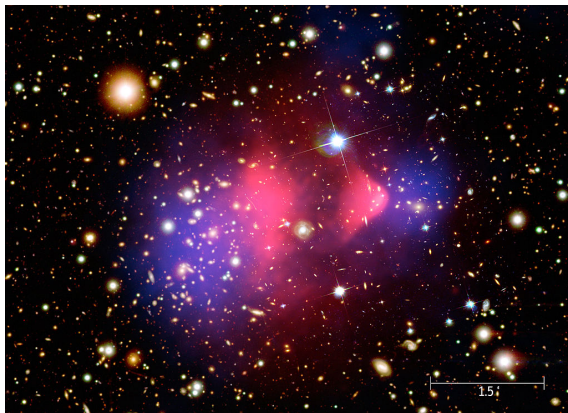
Galaxienhaufen 1E 0657–56 „Bullet Cluster“

- Tatsächlich: 2 Galaxienhaufen, Kollision vor ca. 100 Millionen Jahren
- Masse: ca. 10 % Galaxien, 90 % Gas
- Relativgeschwindigkeit der Galaxien

Quelle: arXiv:0704.0381

- nicht erklärbar durch dunkle Materie (zu hoch)
- erklärbar durch modifizierte Gravitation

→ ???



4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative Geometrie

Connes (1996): „Weltformel“

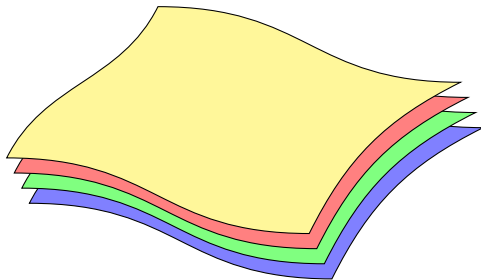


4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative Geometrie

Connes (1996): „Weltformel“

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



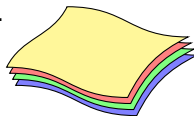
4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative Geometrie

Connes (1996): „Weltformel“

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

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

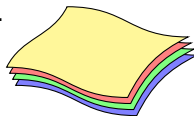


4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative 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:

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

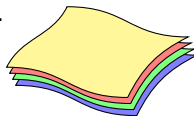
4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative 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

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

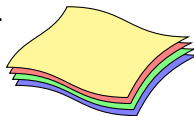
Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative 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?

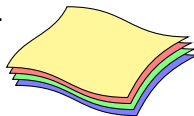
Standardmodell der
Quantenfeldtheorie

4 Neue Erkenntnisse

4.1 Nichtkommutative 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

4 Neue Erkenntnisse

4.2 Konforme Gravitation

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

$$\Rightarrow V(r) \approx -\frac{GM}{r} \quad (\text{Newton})$$

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

$$\Rightarrow V_{\text{CC}}(r) \approx -\frac{c^2\beta}{r} + \frac{1}{2}c^2\gamma r \quad (\text{Newton} + \text{konstante Kraft})$$

4 Neue Erkenntnisse

4.2 Konforme Gravitation

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

$$\Rightarrow V(r) \approx -\frac{GM}{r} \quad (\text{Newton})$$

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

$$\Rightarrow V_{\text{CC}}(r) \approx -\frac{c^2\beta}{r} + \frac{1}{2}c^2\gamma r \quad (\text{Newton} + \text{winzige konstante Kraft})$$

Für unsere Sonne: $\gamma \approx 5.42 \cdot 10^{-39} \text{ m}^{-1}$

4 Neue Erkenntnisse

4.2 Konforme Gravitation

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

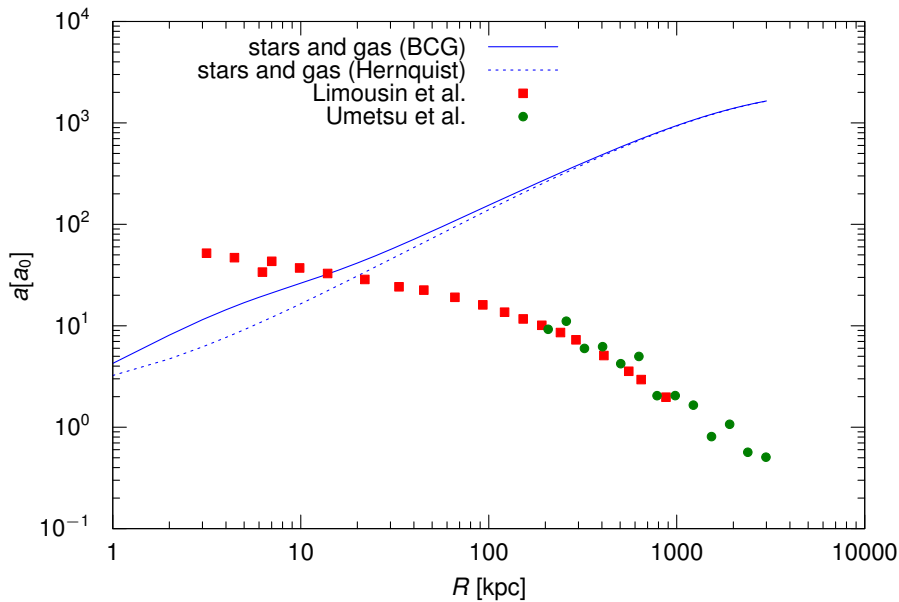
$$\Rightarrow V(r) \approx -\frac{GM}{r} \quad (\text{Newton})$$

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

$$\Rightarrow V_{\text{CC}}(r) \approx -\frac{c^2\beta}{r} + \frac{1}{2}c^2\gamma r \quad (\text{Newton} + \text{winzige konstante Kraft})$$

Für unsere Sonne: $\gamma \approx 5.42 \cdot 10^{-39} \text{ m}^{-1}$

- ✓ Rotationskurven
- ✓ Virialsatz
- ✗ Gravitationslinsen → Was geht schief?
- ✓ Strukturbildung von Materie



4 Neue Erkenntnisse

4.2 Konforme Gravitation

Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

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

- Konforme Gravitation:

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

→ Konforme Gravitation ist nur bei sehr starker Gravitation relevant.

4 Neue Erkenntnisse

4.2 Konforme Gravitation

Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

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

- Konforme Gravitation:

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

- Konforme Gravitation ist nur bei sehr starker Gravitation relevant.
- Konforme Gravitation ist nur bei schwarzen Löchern relevant, nicht jedoch bei Sternen und Gaswolken.

4 Neue Erkenntnisse

4.2 Konforme Gravitation

Mein Ansatz:

- Allgemeine Relativitätstheorie:

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

- Konforme Gravitation:

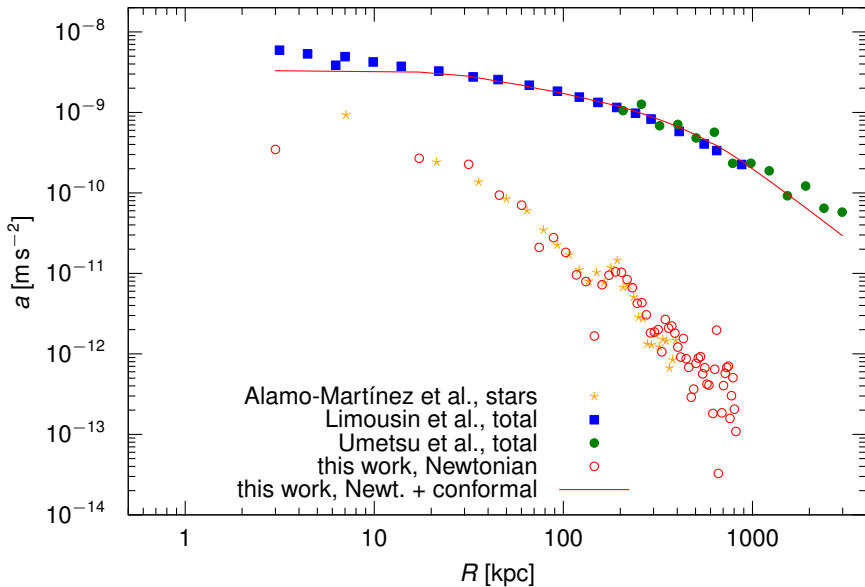
$$\mathcal{L} = a(5R^2 - 8R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - 7R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}) \quad \longleftarrow \text{enthält } R^2$$

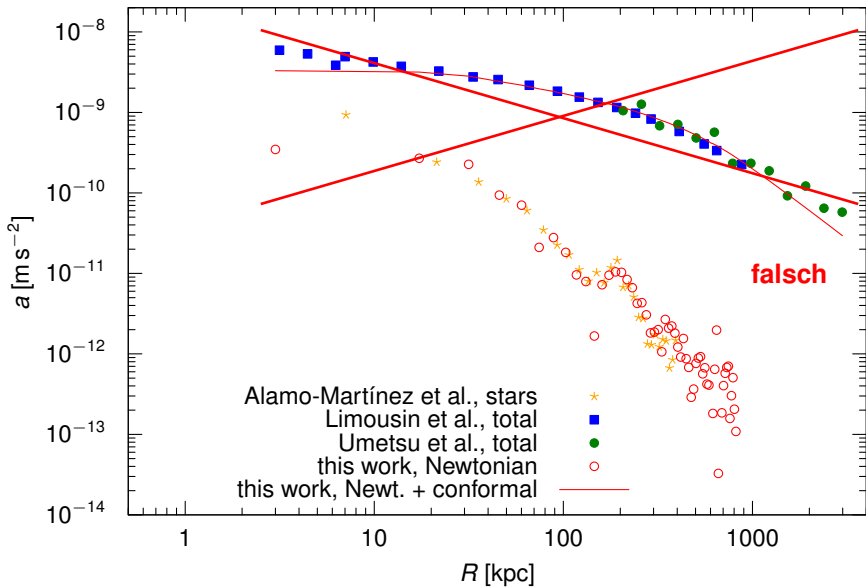
→ Konforme Gravitation ist nur bei sehr starker Gravitation relevant.

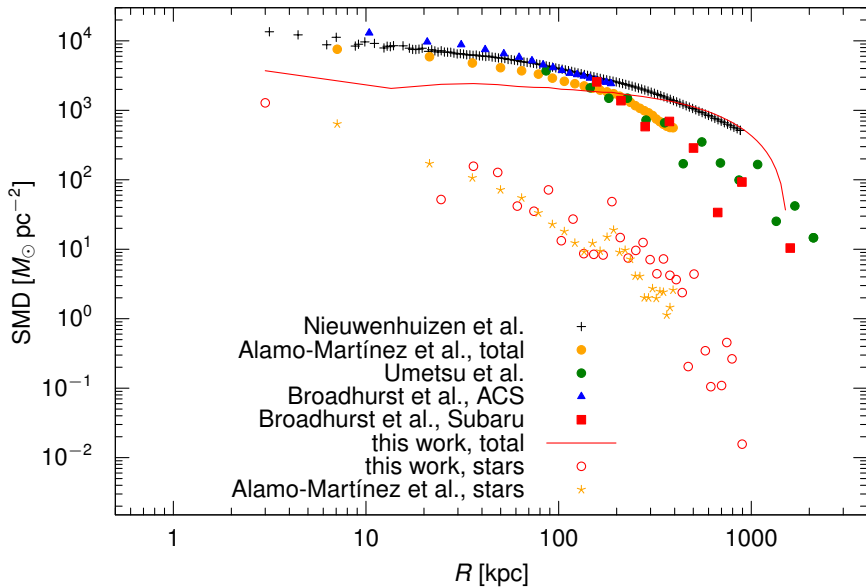
~~→ Konforme Gravitation ist nur bei schwarzen Löchern relevant,
nicht jedoch bei Sternen und Gaswolken.~~ falsch

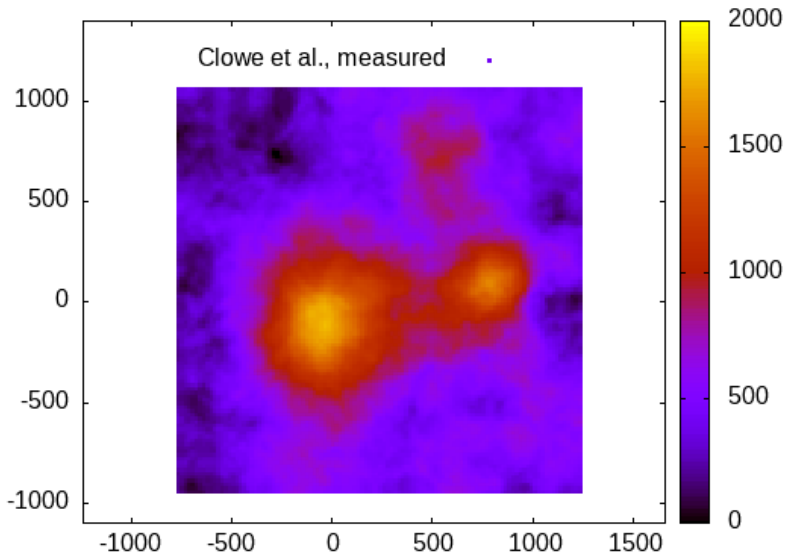
→ Konforme Gravitation ist nur bei Sternen relevant,
nicht jedoch bei (sehr viel schwereren) Gaswolken.

→ Bullet-Cluster erklärbar



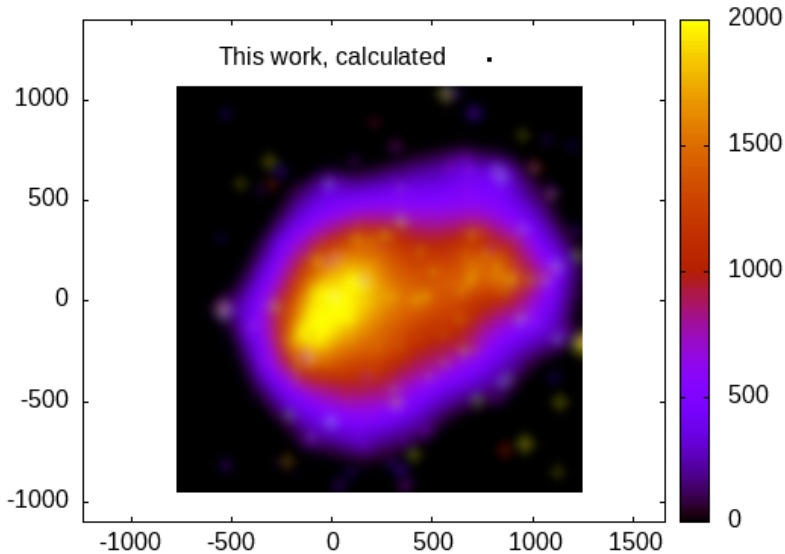






Quelle: [arXiv:astro-ph/0608407](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0608407)

Bullet Cluster



4 Neue Erkenntnisse

4.3 Verfügbare Daten

Web-Suche

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen:
Meßkurven aus Abbildungen extrahieren
- VizieR: veröffentlichte Meßwerte
- sonstige veröffentlichte Meßwerte (z. B. zum Bullet-Cluster)

Astronomische Daten: Position und Leuchtkraft von Galaxien

- Gehören die Galaxien überhaupt zum Galaxienhaufen?
→ Leuchtkraft in verschiedenen Farben („Bändern“) vergleichen
→ tatsächlich: möglicherweise nicht so wichtig
- Welche Masse haben die Galaxien?
→ Leuchtkraft mit sinnvoller Konstanten multiplizieren
→ schwerste Galaxie ungefähr so schwer wie M87
- Position: nur zweidimensional
→ plausible dritte Koordinate (pseudo-)zufällig generieren

4 Neue Erkenntnisse

4.4 Hardwarenahe Programmierung

- `adl2xsm.c`
astronomische in kartesische Koordinaten
und Leuchtkraft in Masse umrechnen
- `xym2xyzm.cpp`
plausible dritte Koordinate (pseudo-)zufällig generieren
- `xyzm2aca2smd.cpp`
aus den Koordinaten und Massen der Galaxien
zunächst dreidimensionale Gravitationsbeschleunigung berechnen,
davon die Divergenz berechnen, als Massendichte interpretieren,
daraus dann eine Oberflächenmassendichte (*surface mass density*, SMD)
berechnen
- `run-smd.sh`
alles compilieren und in einer Pipe aufrufen
- parallelisiertes Rechnen mit OpenMP:
`#pragma omp parallel for reduction (+: result_x, result_y, result_z)`

5 Fazit und Ausblick

Konforme Gravitation

- quantitativ richtige Ergebnisse für Abell 1689, $R \approx 100\text{--}1000\text{ kpc}$
- qualitativ richtige Ergebnisse für das Bullet Cluster

→ dunkle Materie = Divergenz des konformen Gravitationsfeldes

- ✓ Rotationskurven
- ✓ Virialsatz
- ✓ Gravitationslinsen
- ✓ Strukturbildung von Materie

Ausblick

- Abell 1689: 2d-Betrachtungen
- Vergleich mit Messungen über das hydrostatische Gleichgewicht der Gaswolken
- Optimierung der Ergebnisse für das Bullet Cluster
- Überprüfung für weitere Galaxienhaufen

→ alles aufschreiben und veröffentlichen