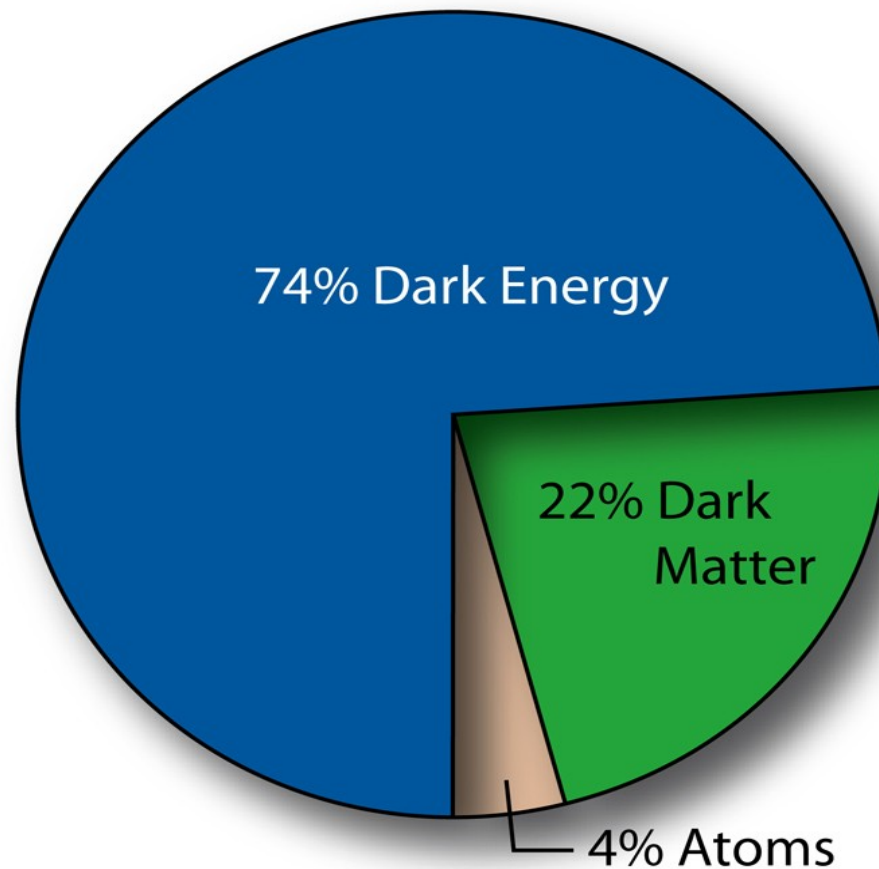


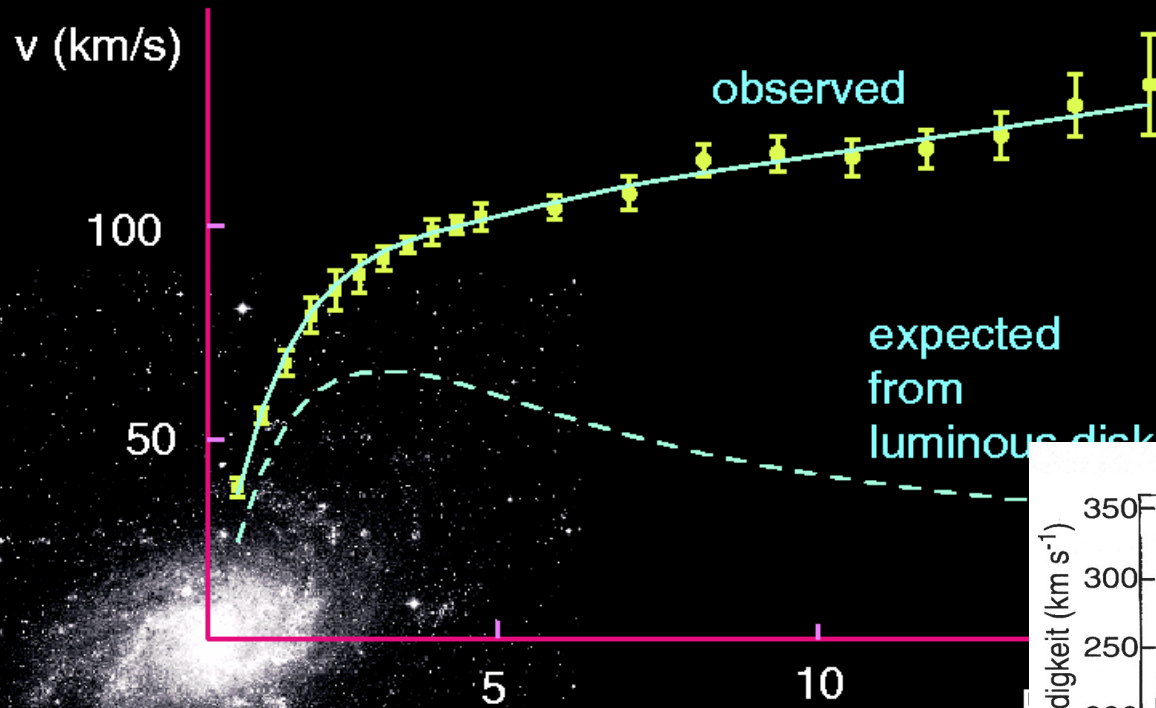
11.4 Dunkle Materie und Dunkle Energie



Astrophysikalische Hinweise auf die Existenz von Dunkler Materie

- 1) Rotationskurven von Galaxien
- 2) Galaxienhaufen
- 3) Gravitationslinsen
- 4) Strukturbildung
- 5) Nukleosynthese

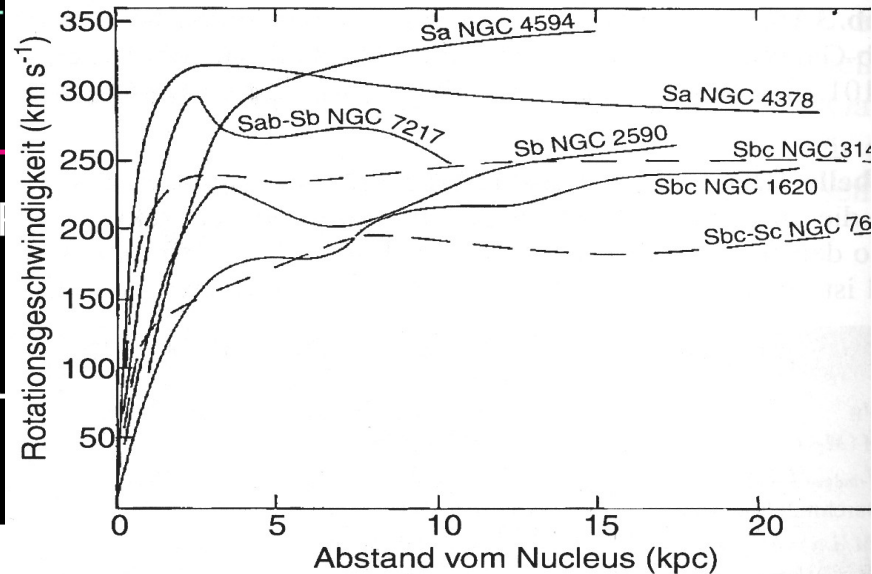
Rotationskurven von Galaxien



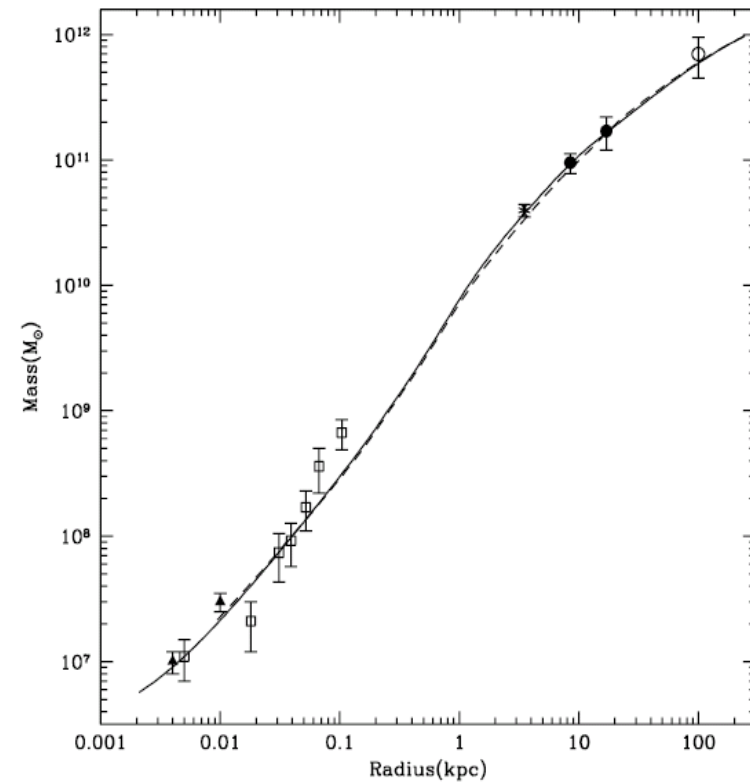
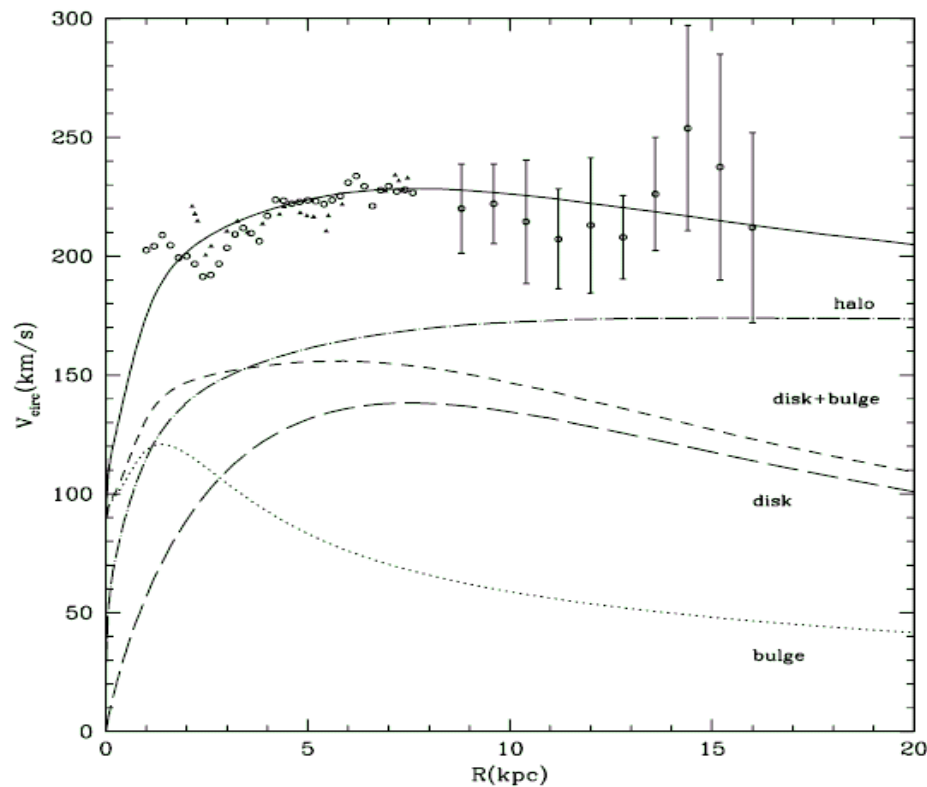
M33 rotation curve

$$v^2(R) = \frac{G M(R)}{R}$$

$$M_{\text{dark}} = \frac{R}{G} [v^2(R) - v_{\text{lum}}^2(R)]$$



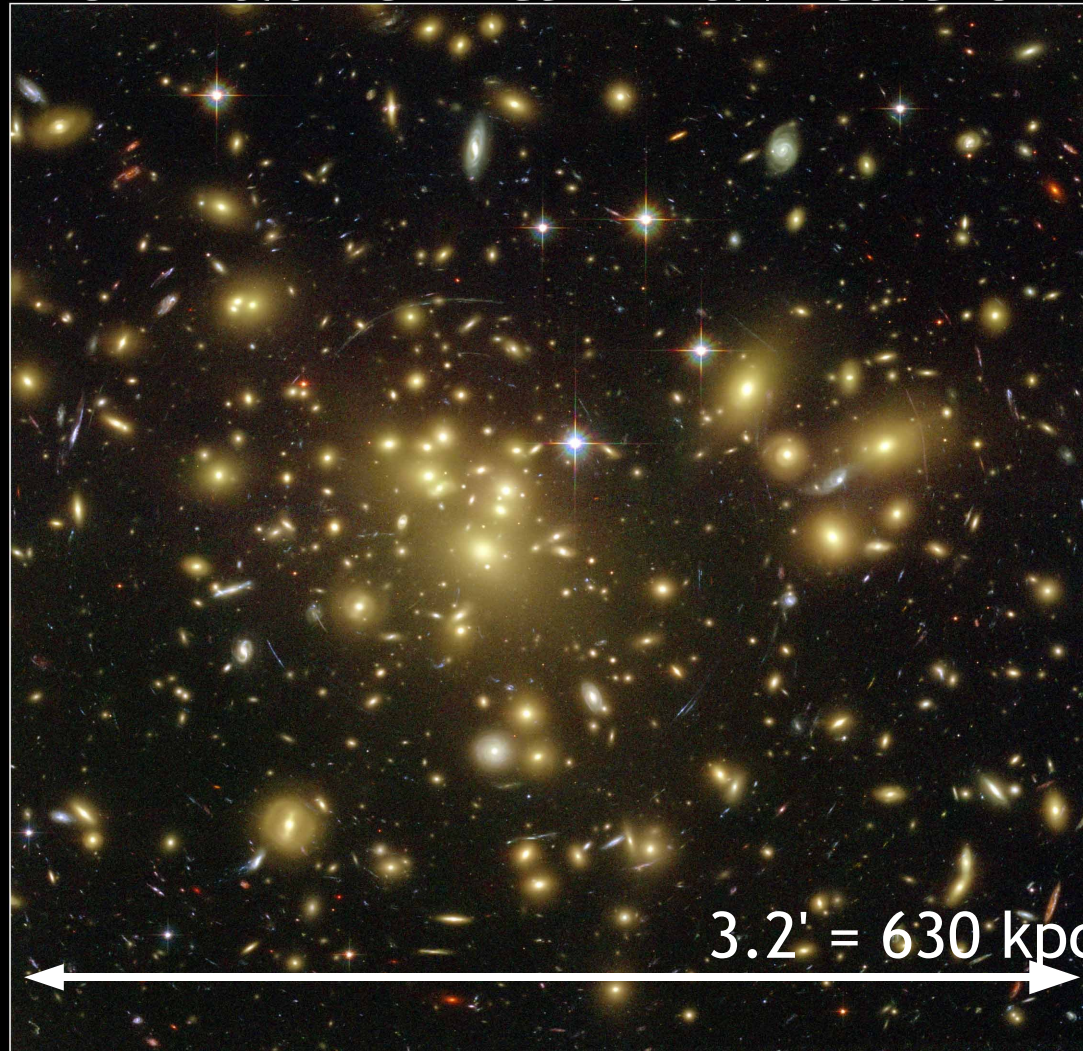
Rotationskurve der Milchstraße



- Leuchtende Materie, Gas, Staub: $10^{11} M_{\odot}$
- Dunkle Materie / Halo: $10^{12} M_{\odot}$

Abell 1689 (Hubble Space Telescope): Galaxienhaufen & Gravitationslinse

Distanz:
675 Mpc



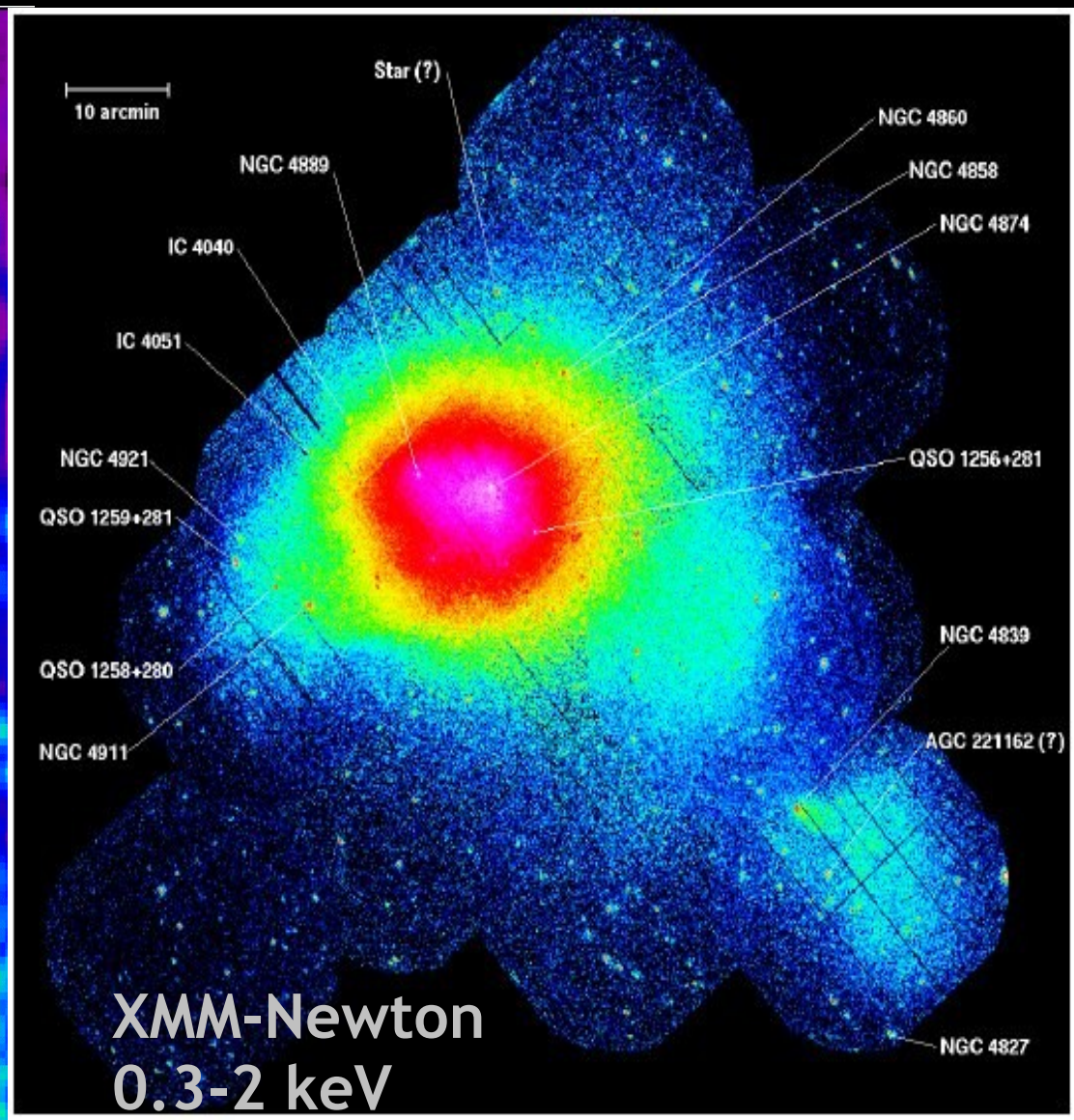
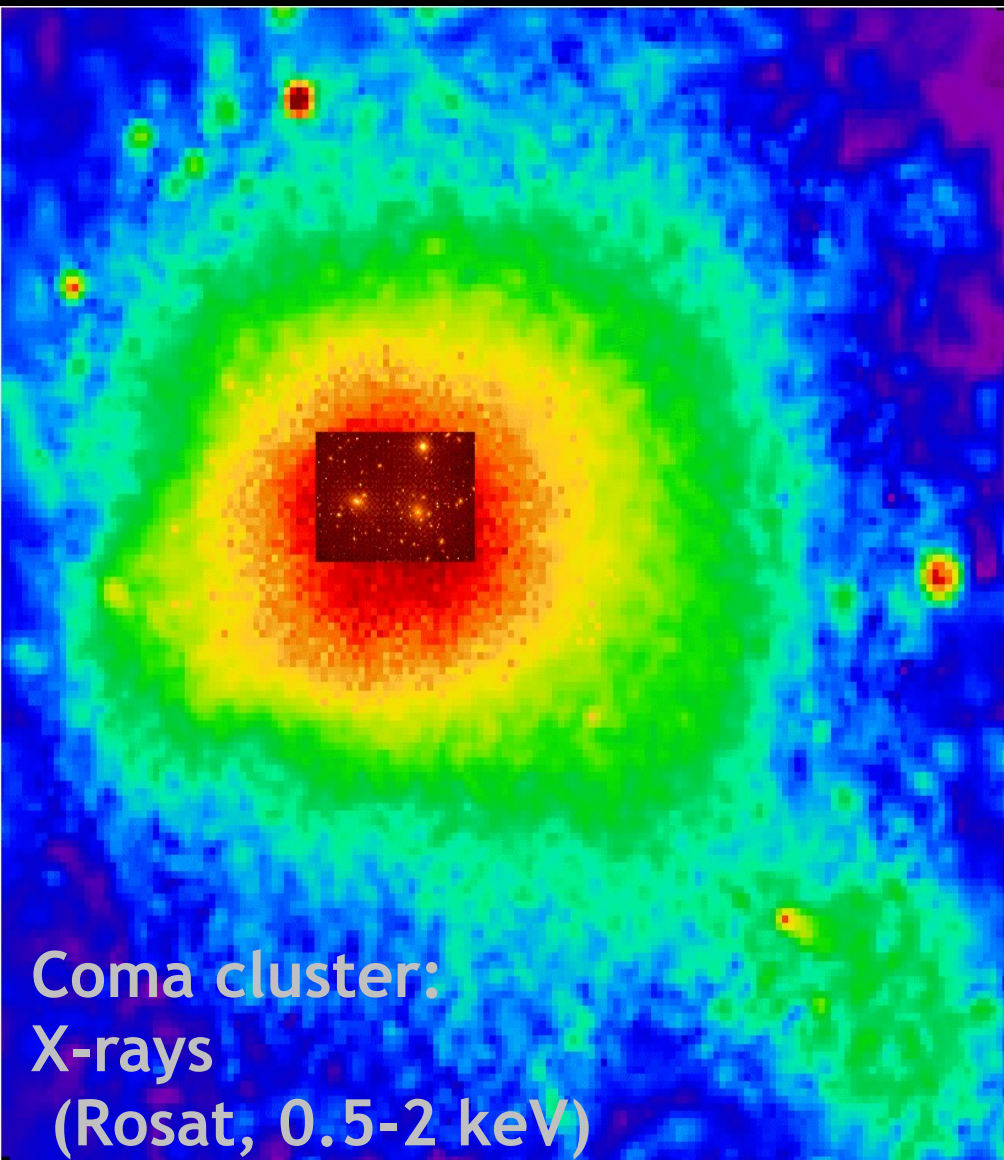
Galaxy Cluster Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

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

Dunkle Materie: Galaxienhaufen

- Galaxienhaufen sind die massivsten, gravitativ gebundenen Objekte des Universums
- Ausdehnung: 2-10 Mpc
- Galaxien bewegen sich mit $|v| \sim 1000 \text{ km/s}$
- Massenabschätzung:
 - Virialtheorem ($2\langle T \rangle = \langle V \rangle$): $M \sim 10^{15} M_{\odot}$
 - Röntgenemission von heißem Gas: $10^{15} M_{\odot}$
- Massen/Leuchtkraftverhältniss ~ 100 !
- Sichtbare (leuchtende) Materie $\sim 1\%$ der gravitativen Materie

Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen

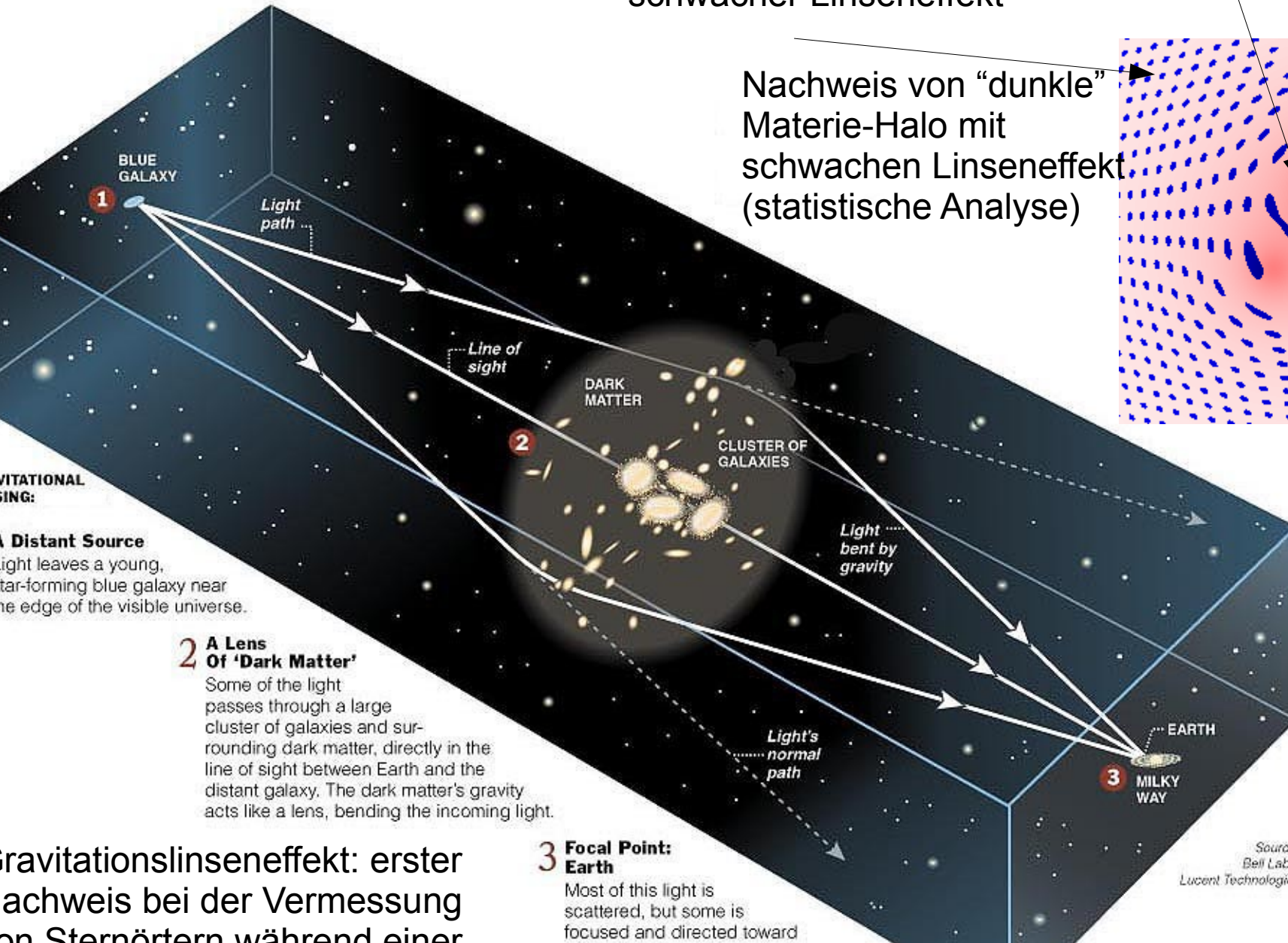
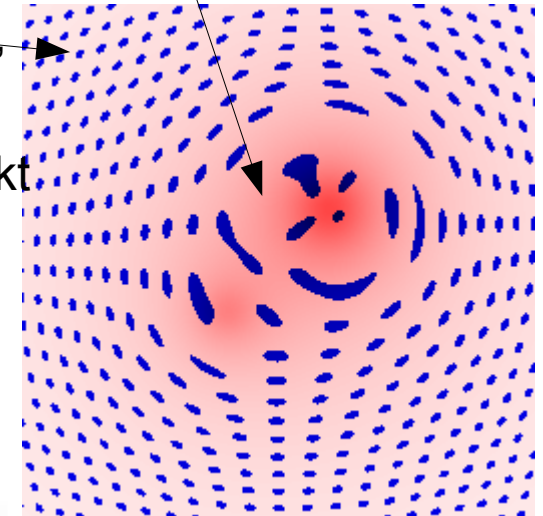


Dunkle Materie: Gravitationslinsen

starker Linseneffekt

schwacher Linseneffekt

Nachweis von "dunkle" Materie-Halo mit schwachen Linseneffekt (statistische Analyse)



GRAVITATIONAL LENSING:
1 Distant Source
 Light leaves a young, star-forming blue galaxy near the edge of the visible universe.

2 A Lens Of 'Dark Matter'
 Some of the light passes through a large cluster of galaxies and surrounding dark matter, directly in the line of sight between Earth and the distant galaxy. The dark matter's gravity acts like a lens, bending the incoming light.

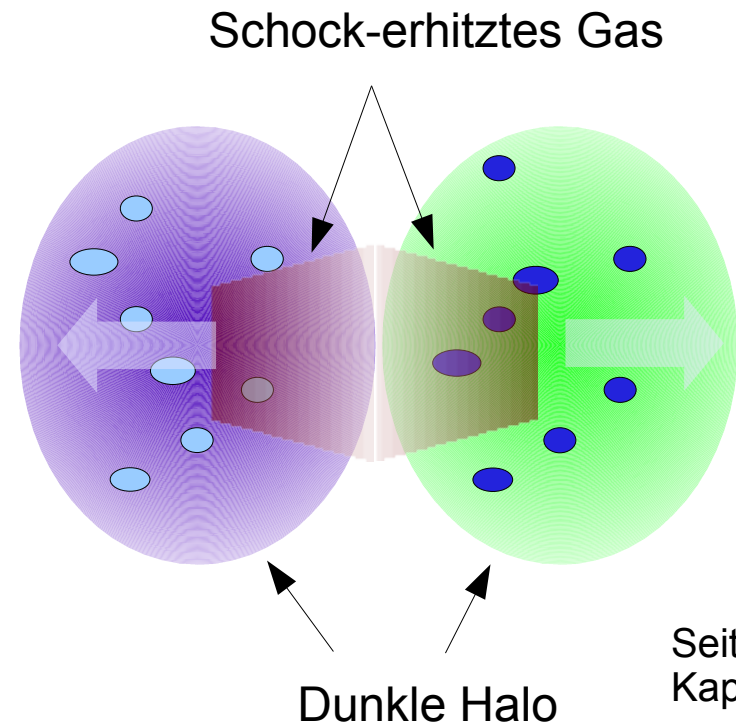
3 Focal Point: Earth
 Most of this light is scattered, but some is focused and directed toward

Source: Bell Labs, Lucent Technologies

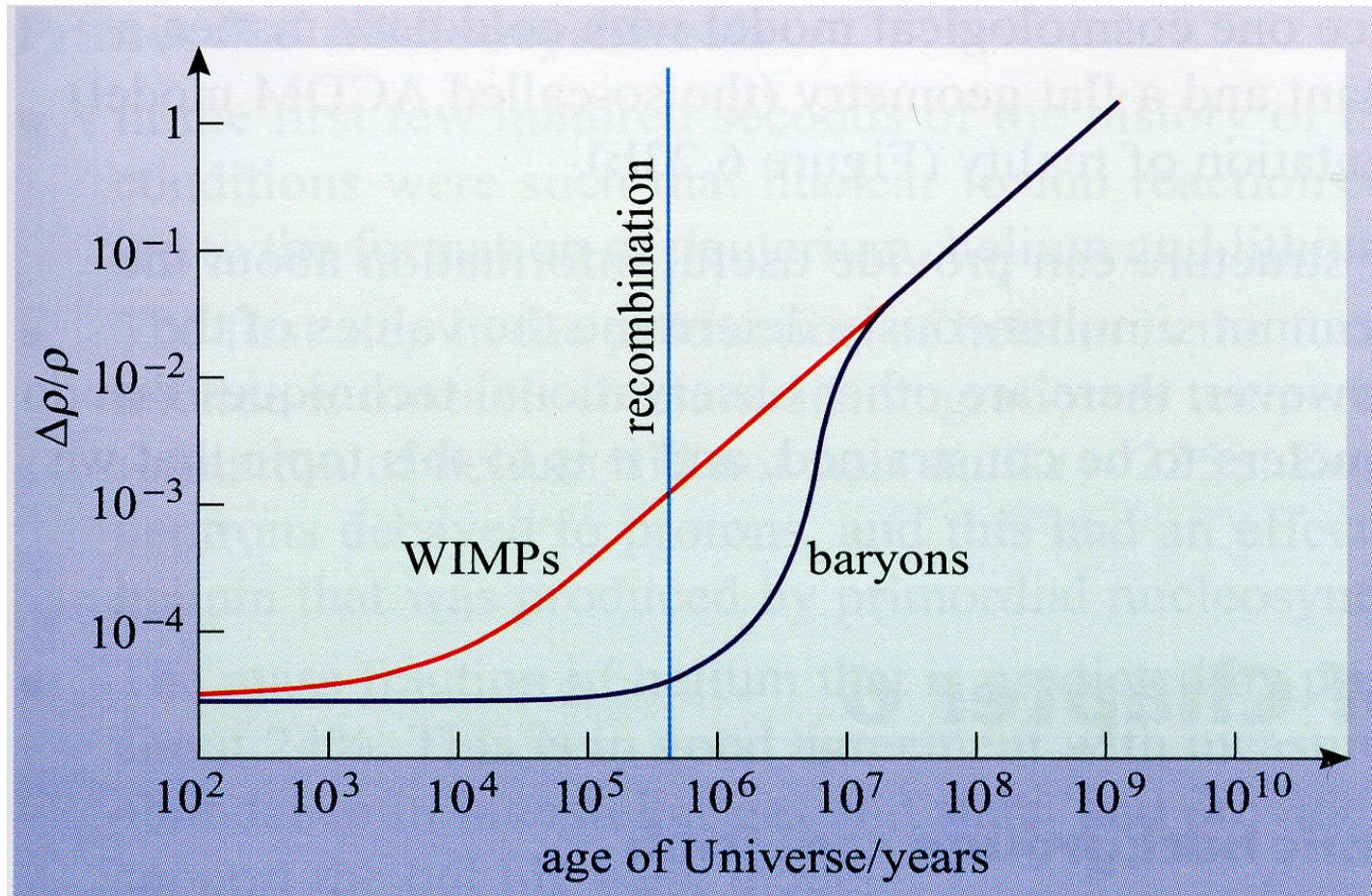
Gravitationslinseneffekt: erster Nachweis bei der Vermessung von Sternröttern während einer

Dunkle Materie: Gravitationslinsen

- Kollidierende Galaxienhaufen ("Bullet"-Cluster)
 - Gravitationslinsen: Verteilung der grav. Materie
 - Röntgenemission: Heißes, barionisches Gas
 - Optisches Bild: Verteilung der Galaxien
- **Nachweis von nicht-barionischer, dunkler Materie-Halo**



Dunkle Materie: Strukturbildung



- CMB-Fluktuationen sind **zu schwach** (~ 2 Größenordnungen), um heutige Strukturen zu erklären
- **Nicht-barionische dunkle Materie (WIMPS?) nötig!**

WIMP: Weakly Interacting Massive Particle

Dunkle Materie: Nukleosynthese

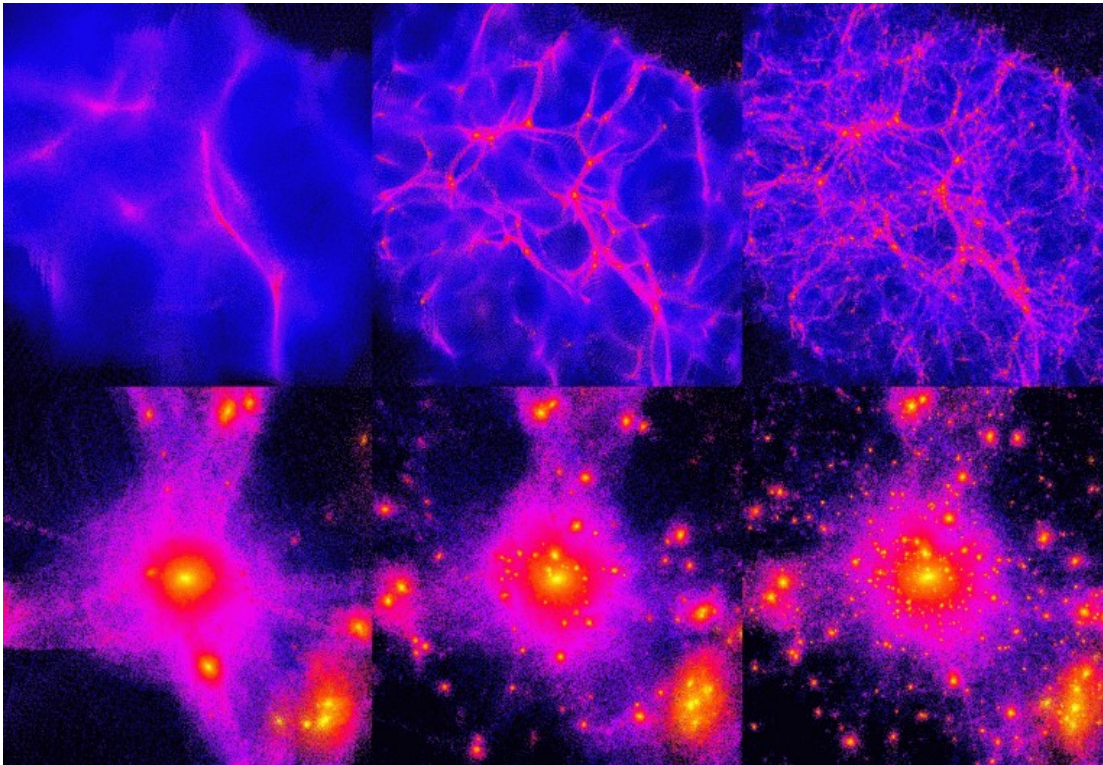
- Erzeugung von leichten Elementen (Deuterium, He, Li) in den ersten drei Minuten (-> Primordiale Nukleosynthese)
 - Primordiale Deuterium-Häufigkeit im Universum konsistent mit ca. $\Omega_{\text{bar}} \sim 0,03$
 - Unabhängige und konsistente Bestätigung aus CMB-Fluktuationen
 - Gesamtmasse $\Omega_m \sim 0,25 \rightarrow \Omega_{\text{nichtbarion}} \sim 0,22$
- Nukleosynthesemodelle -> Nur wenig barionische Materie!

Eigenschaften der dunklen Materie

- Stabil (auf Zeitskalen des Alters des Universums)
- Elektrisch neutral
- "Schwach" wechselwirkend (Wechselwirkungsquerschnitt in etwa gleich der schwachen Wechselwirkung, aber nur elastische Streuung)
- "kalt" ($\hat{=}$ nicht-relativistisch bei der Entkopplung, Strukturbildung)
- Nicht barionisch (Nukleosynthese, CMB)
- Dichte der dunklen Materie $\sim 0,25 \rho_{\text{crit}}$
- Konsistent mit Primordialer Nukleosynthese

Heiße oder kalte dunkle Materie?

- Strukturbildung dominiert durch dunkle Materie
- Strukturbildung: Gravitationskollaps
- Relativistische Teilchen entkommen aus Potentialtopf, nicht-relativistische "verklumpen"



Kosmologische Simulationsrechnungen mit **heißer**, dunkler Materie (gezeigt ist die Dichte als Farbskala)

Kosmologische Simulation mit **kalter**, dunkler Materie

Beide Simulationen bei verschiedenen kosmologischem Alter

Kosmologische Masseneinschränkung von Neutrinos

- Einschränkungen ergeben sich aus den Messungen der großskaligen Strukturen und Vergleich mit kosmologischen (N-Body) Simulationen
- Zusätzliche Einschränkungen aus "Pencil-Beam" Ly- α Beobachtungen (Skalen ~ 1 Mpc, nichtlineare Strukturbildung führt aber zu systematischen Unsicherheiten)

WMAP:

$$\Omega_\nu h^2 < 0.0076$$

$$m_\nu < 0.71 \text{eV}$$

$$m_\nu < 0.24 \text{eV}$$

1 massives
Neutrino, 2
ohne Masse

Degenerierte
Neutrinomassen

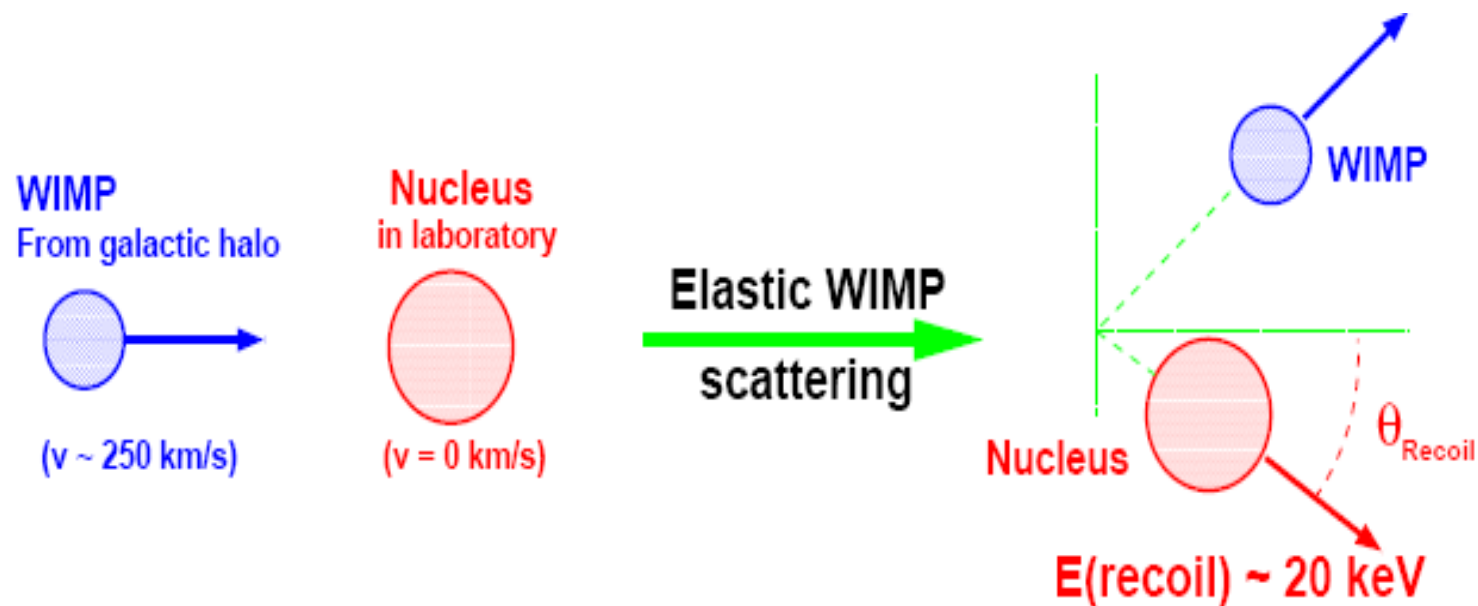
- Neutrinos tragen nur einen kleinen Teil zur dunklen Materie bei
- Dunkle Materie ist "kalt" (nicht-relativistisch)

Kandidaten für Dunkle Materie aus der Teilchenphysik: Physik jenseits des Standard-Modells!

<i>DM candidate</i>	I. Ωh^2	II. Cold	III. Neutral	IV. BBN	V. Stars	VI. Self	VII. Direct	VIII. γ -rays	IX. Astro	X. Probed	Result
SM Neutrinos	×	×	✓	×	×	×	×	–	–	✓	×
Sterile Neutrinos	~	~	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	✓	~
Neutralino	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	✓!	✓!	✓	✓
Gravitino	✓	✓	✓	~	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~
Gravitino (broken R-parity)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sneutrino $\tilde{\nu}_L$	~	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓!	✓!	✓	×
Sneutrino $\tilde{\nu}_R$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	✓!	✓!	✓	✓
Axino	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SUSY Q-balls	✓	✓	✓	✓	~	–	✓!	✓	✓	✓	~
B^1 UED	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	✓!	✓!	✓	✓
First level graviton UED	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	× ^a
Axion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	✓	✓	✓	✓
Heavy photon (Little Higgs)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	✓!	✓	✓
Inert Higgs model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓!	–	✓	✓
Champs	✓	✓	×	✓	×	–	–	–	–	✓	×
Wimpzillas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~	~

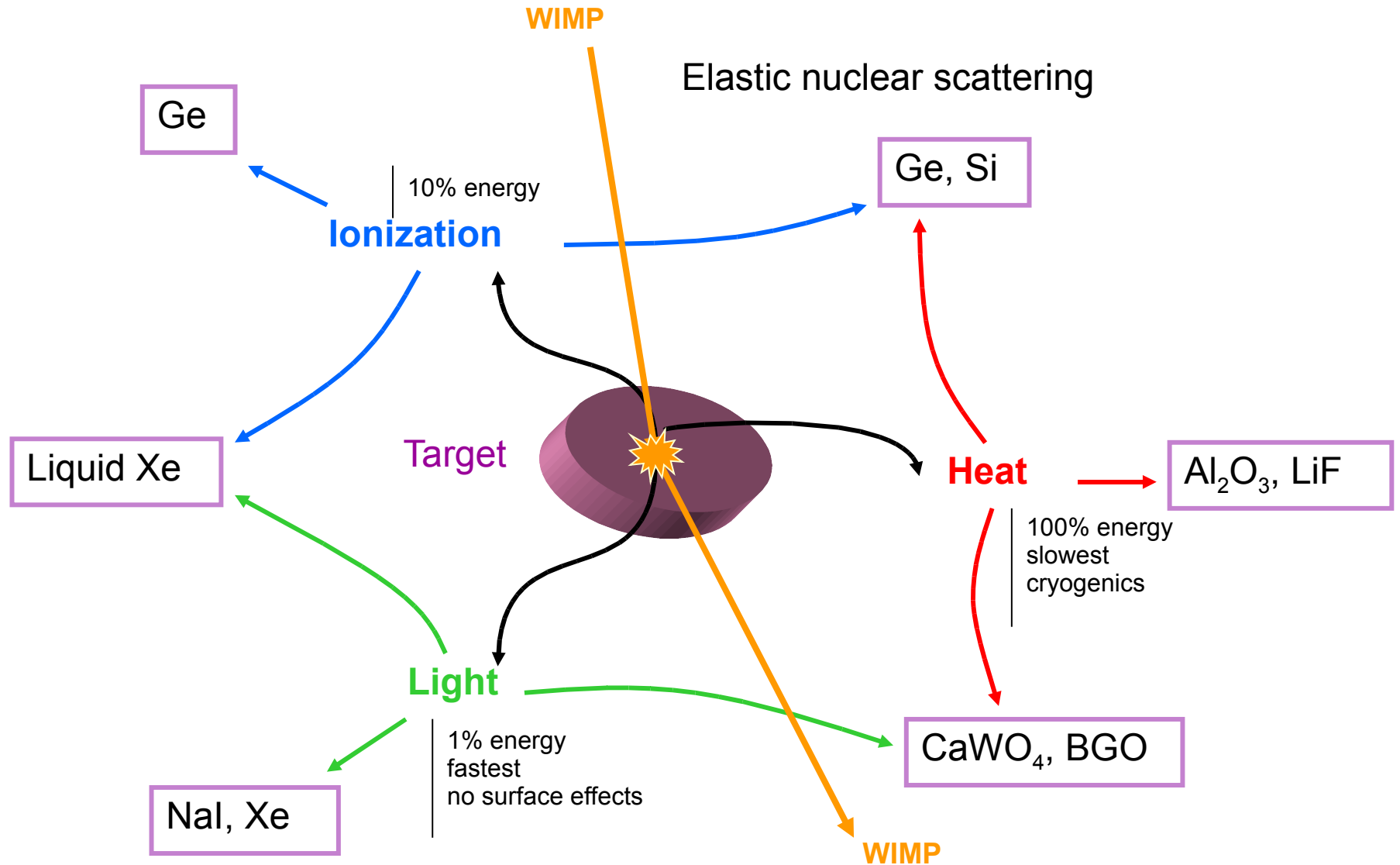
Experimentelle Suche nach Dunkler Materie: Direkte Suche

- Nachweisprinzip



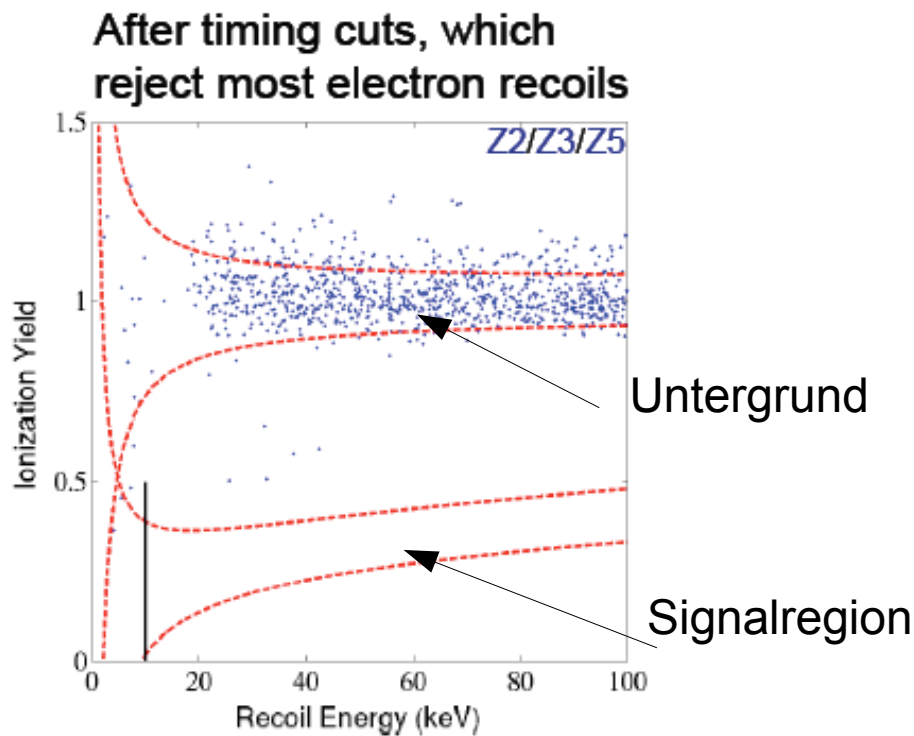
- Erwartete Streurrate: 1 Ereignis/kg/Jahr

Nachweismethoden



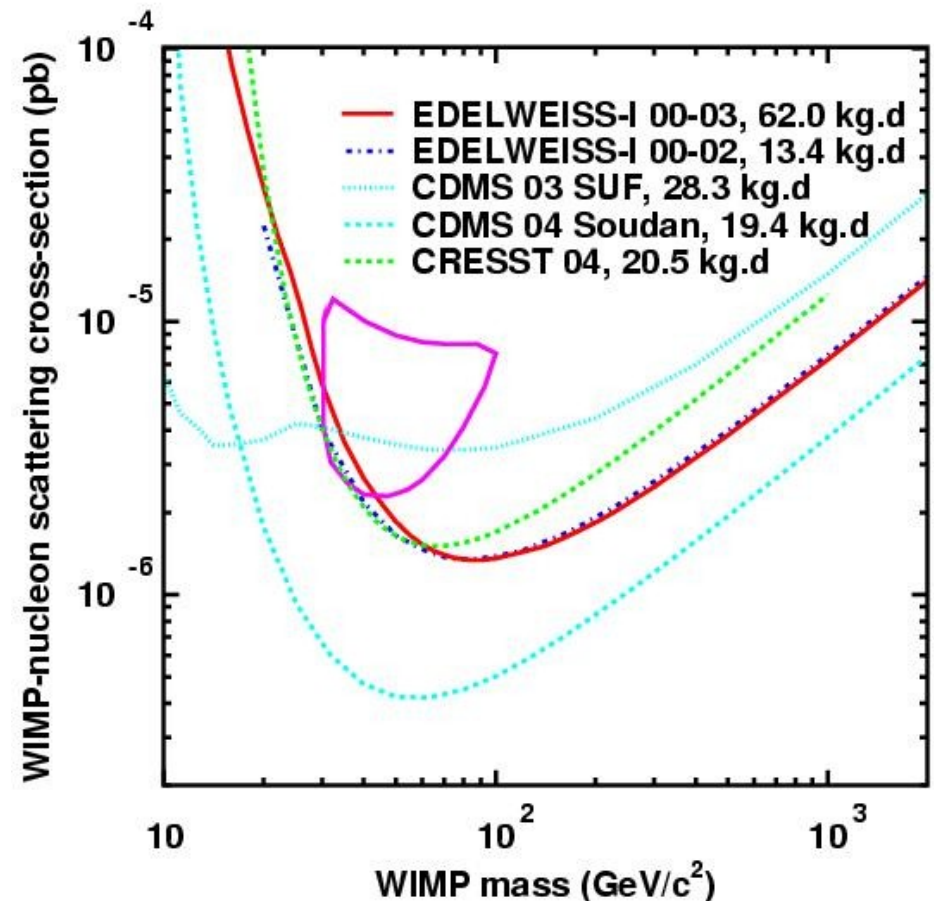
Resultate direkte Suche nach Dunkler Materie

- Bislang noch kein Nachweis -> Grenzen für den Querschnitt



Beispiel: CDMS-II Detektor

Verbesserung um 2 Größenordnung geplant!



Experimentelle Suche nach dunkler Materie: Indirekte Suche

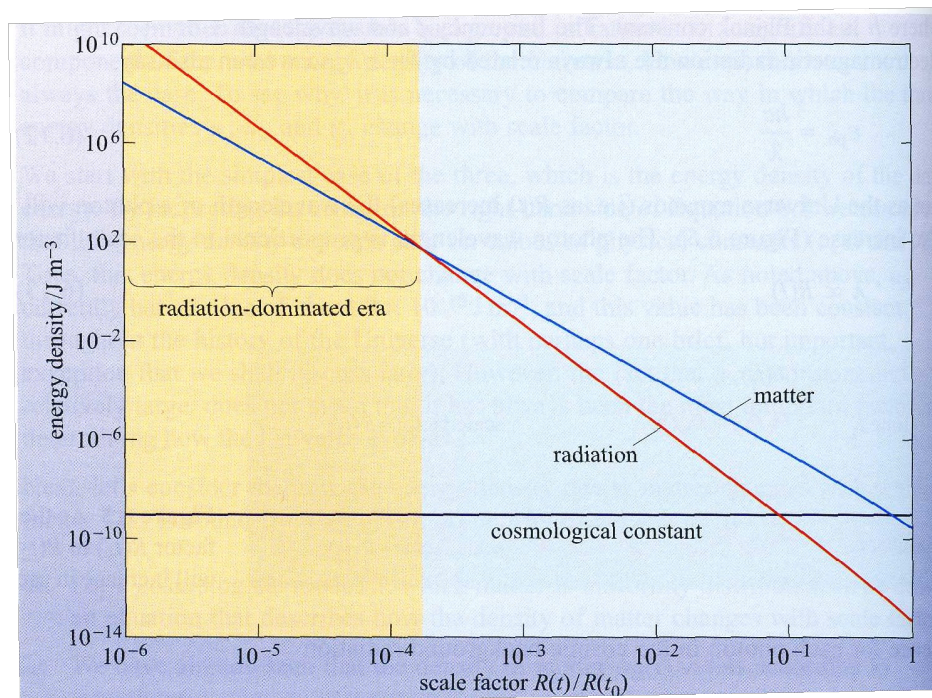
- Nachweis der Sekundärteilchen in Selbst-Annihilation
- Annihilationsrate $\sim \text{Dichte}^2$
- Nachweismethoden
 - Suche nach Antimaterie in der kosmischen Strahlung
 - Suche nach Neutrinos aus der Sonne und Erde
 - Suche nach Gamma-Strahlung von Zwerggalaxien, galaktisches Zentrum
- Bisher noch kein eindeutiger Nachweis \rightarrow Grenzen an Dichte und Annihilationsquerschnitt

Zusammenfassung: Dunkle Materie

- Materie im Universum überwiegend dunkel (nicht-barionisch)
- Neutrinos sind keine guten Kandidaten für dunkle Materie
- Viele Kandidaten aus Teilchenphysik jenseits des Standardmodells
- Direkte und indirekte Suche nach astrophysikalischen Dunkle-Materie-Kandidaten
- Zukunft: Suche nach Physik jenseits des Standard-Modells mit LHC

Dunkle Energie

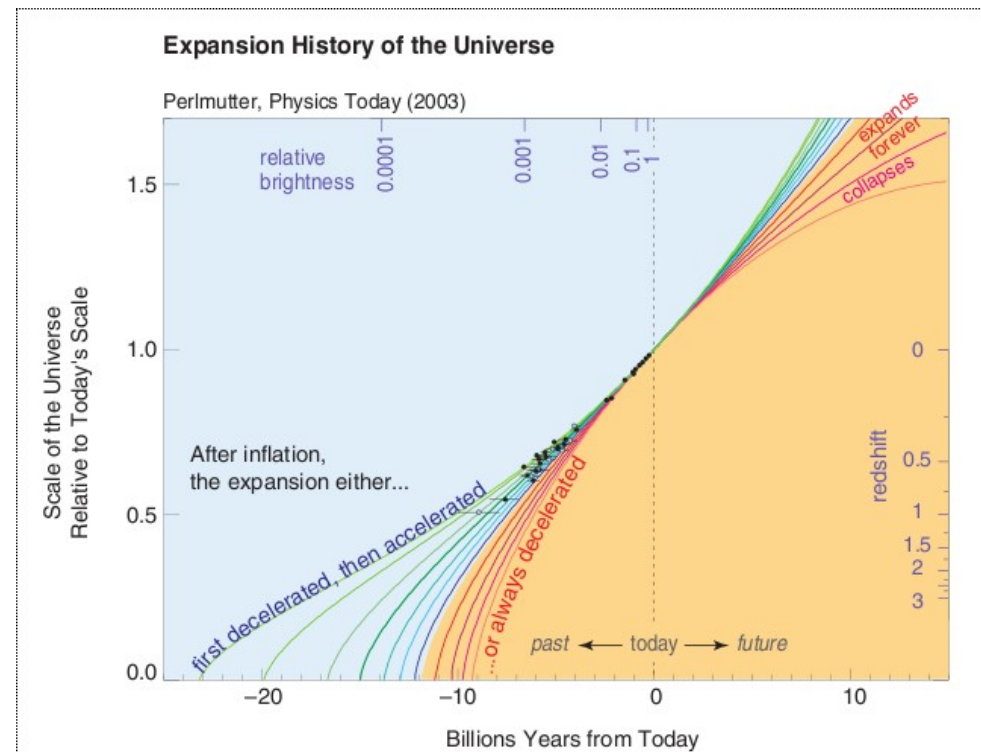
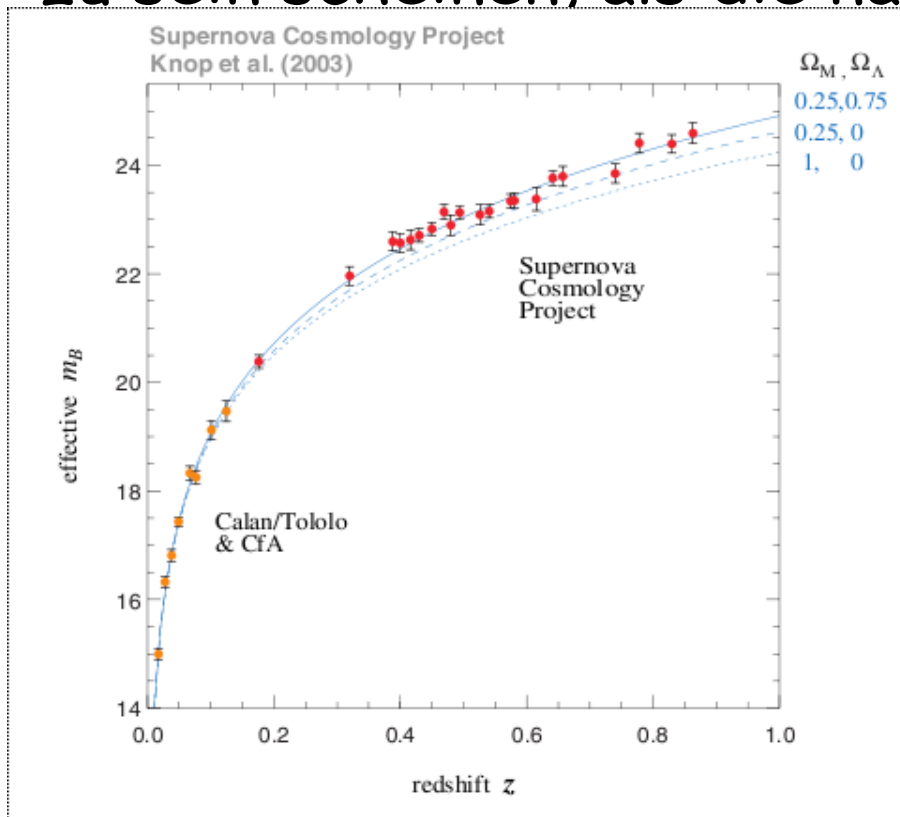
- Aus WMAP-Messungen (jeweils 1-2% relative Unsicherheiten):
 - $\Omega_0=1$ -> Universum ist euklidisch
 - $\Omega_m=0,26$
 - Also: $\Omega_\Lambda=0,74$ -> Es gibt eine "kosmologische Konstante"



- Die Expansion des Universums wird durch die kosmologische Konstante getrieben
- Die Energiedichte der Materie wird mit $a^{-3}(t)$ abfallen

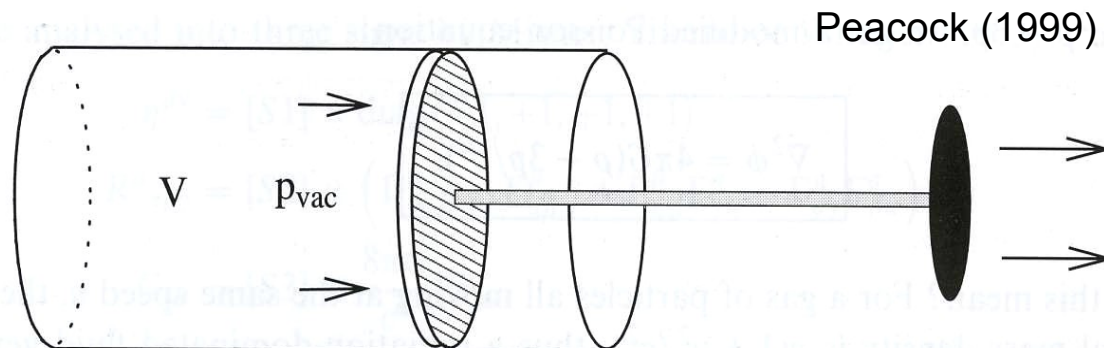
Unabhängige Beobachtungen zeigen beschleunigte Expansion

- Schon vor der WMAP-Messung zeigte sich bei der Messung von Supernovae vom Typ Ia, dass die Objekte systematisch schwächer bei großen Rotverschiebungen zu sein scheinen, als die näheren SNe.



Dunkle Energie: Kosmologische Konstante

- Allgemeine Relativitätstheorie: Gravitationsdruck $P_v = -\rho_v c^2$ (kein Analogon in klassischer Newton-Theorie)
- In einem expandierenden Vakuum mit konstanter Energiedichte wächst die interne Energie des Systems mit der Expansion!
- Die kosmologische Konstante ist ein Maß für die Vakuumenergiedichte



Erklärungsversuche für Dunkle Energie

- Generell:
 - Feldtheorien haben eine Vakuumenergie, die sich aus der Energie ableitet, bei der die Symmetriebrechung verläuft z.B.:
 - Elektroschwache Theorie $\Lambda_{EW} \sim (100 \text{ GeV})^4$
 - GUT: $\Lambda_{GUT} \sim (10^{16} \text{ GeV})^4$
 - Gravitation: $\Lambda_{pl} \sim (10^{19} \text{ GeV})^4$
 - Beobachtete Konstante: $\Lambda_{cos} \sim (10^{-12} \text{ GeV})^4$
- Größter bekannter Fehler...56...124 Größenordnung daneben...