

# Suche nach Axionen mit CAST (**C**ERN **A**xion **S**olar **T**elescope)

Julia Vogel

Physikalisches Institut, ALU Freiburg

Astroteilchenschule 2008

Obertrubach-Bärnfels, 08.-16. Oktober 2008

- Theoretische Motivation
- Das CAST Experiment
- Neue Ergebnisse der Phase I und II





## WAS IST DUNKLE MATERIE?



**Dunkle Materie**



**Keine Dunkle Materie**



## Das starke CP-Problem

QCD sagt Verletzung der CP-Symmetrie in der starken Wechselwirkung voraus

$$L_\theta = \bar{\theta} \frac{g^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_a^{\mu\nu} \quad \text{mit} \quad \tilde{G}_a^{\mu\nu} = -\frac{1}{2} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} G_{\alpha\beta}^a$$

**ABER:** Diese CP-Verletzung bisher in keinem Experiment beobachtet!

Eine Verletzung der CP-Symmetrie würde zu einem elektrischen Dipolmoment des Neutrons führen:

$$|d_n| \approx \bar{\theta} \cdot 10^{-16} \text{ e cm}$$

Momentane experimentelle Obergrenze:

$$|d_n| < 0.6 \times 10^{-25} \text{ e cm}$$

→ Dies bedeutet für das QCD-Vakuum:  $\bar{\theta} < 10^{-10}$

**CP-Problem der starken WW: Warum ist  $\bar{\theta}$  so klein?**



## Eine mögliche Lösung

Eliminierung der CP-verletzenden Terme in der QCD-Lagrange-Funktion durch Einführung einer zusätzlichen Symmetrie

→ Neues pseudo-skalares Feld → **AXION**

→ Vorgeschlagen von Peccei & Quinn (1977)

→ Teilcheninterpretation durch Weinberg, Wilczek (1978)



## Eigenschaften des Axions


- Neutrales pseudo-skalares Goldstone-Boson
- Sehr geringe Wechselwirkung von Axionen mit Materie
- Masse (from Axion- $\pi^0$ -Mischung):  $m_a \approx 0.6 \text{ eV} \frac{10^7 \text{ GeV}}{f_a}$   
 $f_a > 10^7 \text{ GeV}$  (Astrophys. Argument)
- Kopplung an Photonen:  $L_{a\gamma} \approx g_{a\gamma} (\vec{E} \cdot \vec{B}) a$  mit  $g_{a\gamma} \approx \frac{\alpha}{2\pi f_a} < 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$
- Mittlere Lebensdauer:  $\tau_a \approx 10^{17} \text{ yr}$  für  $m_a = 1 \text{ eV}$  d.h.  $\tau_a > t_{\text{Universe}}$

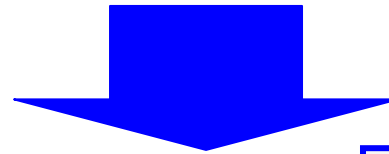


## Mögliche Erzeugung von Axionen in der Sonne

**Primakoff-Effekt:**  $\gamma + \gamma^* \rightarrow a$

Photonen der Schwarzkörperstrahlung  
(Röntgenphotonen) Starke elektrische Felder Axionen





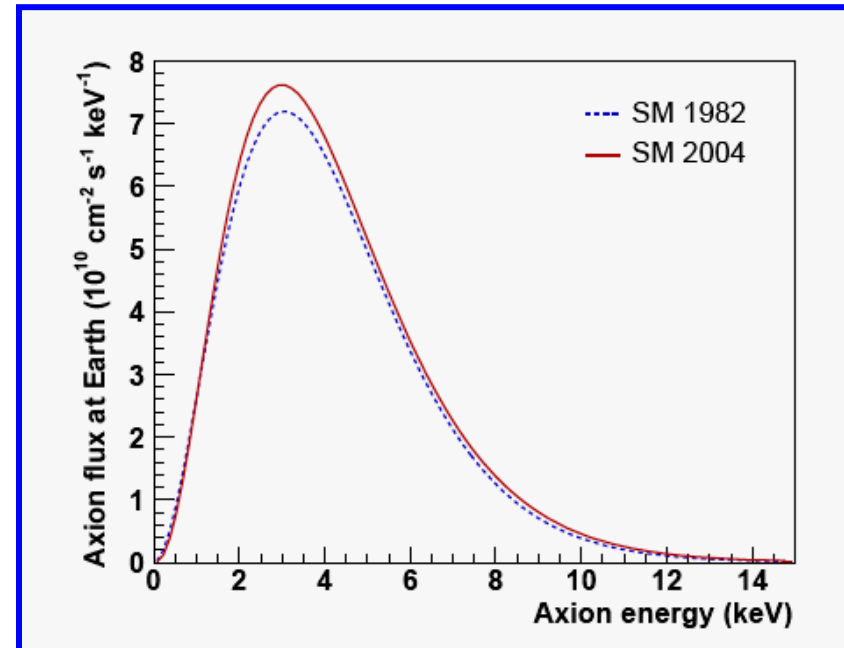
## Solarer Axionfluß auf der Erde

- Mittlere Energie der Axionen:

$$\langle E_a \rangle = 4.2 \text{ keV}$$

- Axionenfluß:  $\Phi_a \propto g_{a\gamma}^2$

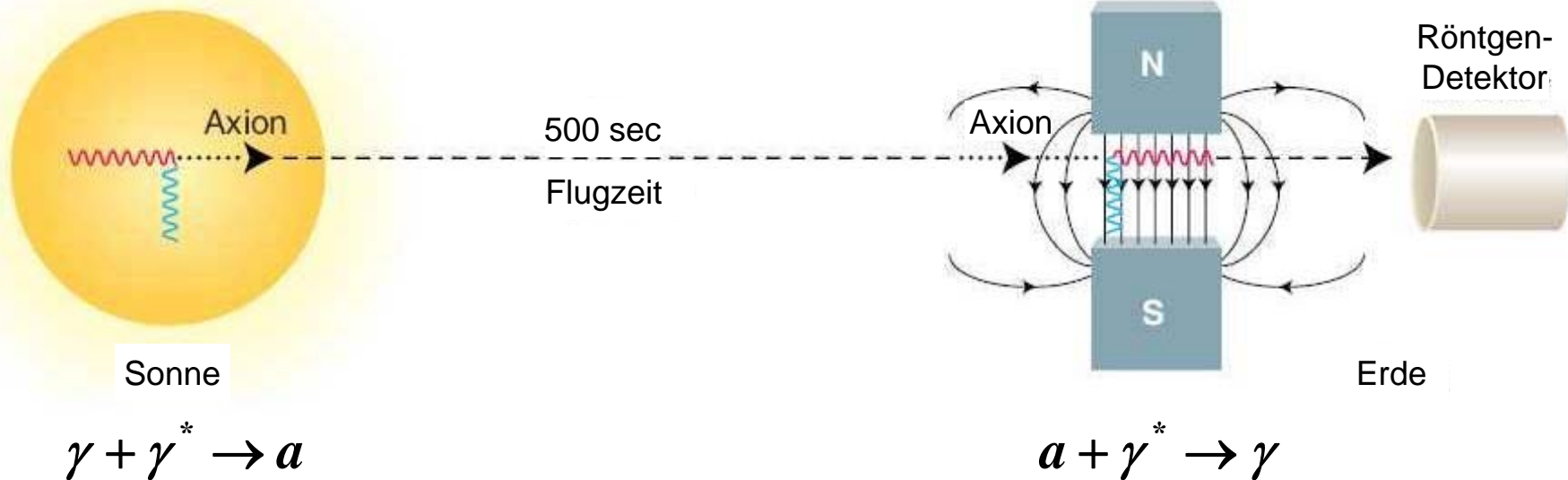
(Serpico & Raffelt, basierend auf dem Sonnenmodell BP2004 von Bahcall et al.)







## Nachweis solarer Axionen



$$N_{\gamma} = \int \frac{d\Phi(E_a)}{dE_a} P_{a \rightarrow \gamma}(E_a) A t \varepsilon dE_a \propto g_{a\gamma}^4$$

$d\Phi/dE_a$ : Differentieller Axionenfluß

$P_{a \rightarrow \gamma}$ : Umwandlungswahrscheinlichkeit

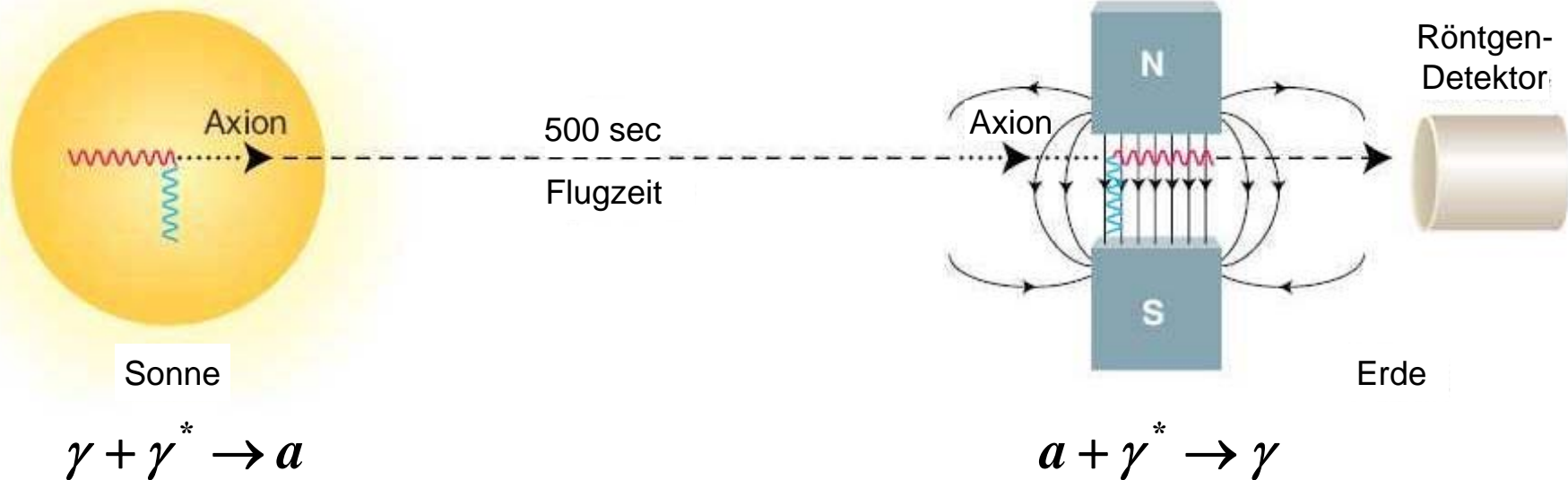
A: Detektorfläche

t: Beobachtungszeit

$\varepsilon$ : Effizienz



## Nachweis solarer Axionen



### Umwandlungswahrscheinlichkeit

$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left( \frac{B}{2} \right)^2 \left( \frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \frac{1}{q^2 + \Gamma^2/4} \left[ 1 + e^{-\Gamma L} - 2e^{-\Gamma L/2} \cos(qL) \right]$$

Mit Impulsübertrag  $q = \left| \frac{m_\gamma^2 - m_a^2}{2E_a} \right|$ , effektiver Photonenmasse  $m_\gamma [\text{eV}] \approx \sqrt{0.02 \frac{P [\text{mbar}]}{T [\text{K}]}}$   
 und Absorption  $\Gamma$





$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left( \frac{BL}{2} \right)^2 \left( \frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} \text{GeV}^{-1}} \right)^2 \frac{\sin^2\left(\frac{qL}{2}\right)}{\left(\frac{qL}{2}\right)^2} \quad (\text{für Absorption } \Gamma = 0)$$

→ Kohärenzbedingung  $qL \ll 1$

**CAST Phase I:**  
Vakuum im Magneten  
( $m_\gamma = 0, qL \ll 1$ )

Effektive Masse des Photons  $m_\gamma = 0$

$$q = \left| \frac{m_\gamma^2 - m_a^2}{2E_a} \right| = \frac{m_a^2}{2E_a}$$

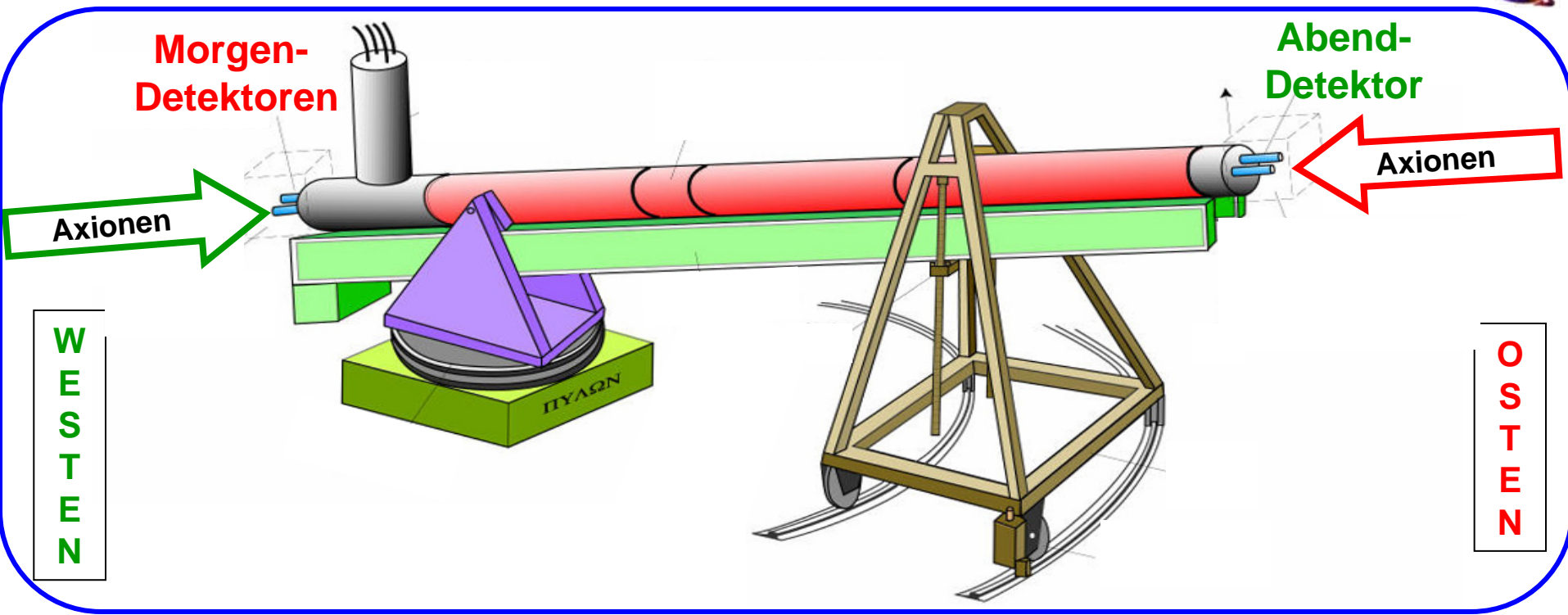
Bereich der Axionmassen:  $m_a \leq 0.02 \text{ eV}$

**CAST Phase II:**  
 $^4\text{He} / ^3\text{He}$  im Magneten  
( $m_\gamma \neq 0, qL \ll 1$ )

Effektive Masse des Photons  $m_\gamma > 0$

$$m_\gamma [\text{eV}] \approx \sqrt{0.02 \frac{P[\text{mbar}]}{T[\text{K}]}}$$

Erweiterter Bereich der Axionmassen  
 $0.02 \text{ eV} < m_a < 1.16 \text{ eV}$



- Prototyp eines supraleitenden LHC-Dipolmagneten (  $B=9.0$  Tesla,  $L=9.3$  m,  $T=1.8$  K)
- Beweglichkeitsbereich:  $80^\circ$  horizontal and  $\pm 8^\circ$  vertikal
- CAST kann der Sonne während Auf- und Untergang folgen, d.h. 2 x 1.5 h pro Tag
- Drei Röntgendetektoren:
  - **MicroMEGAS (MM)**, **Charge Coupled Device (CCD)**, **Time Projection Chamber (TPC)**
- CCD mit Röntgenteleskop



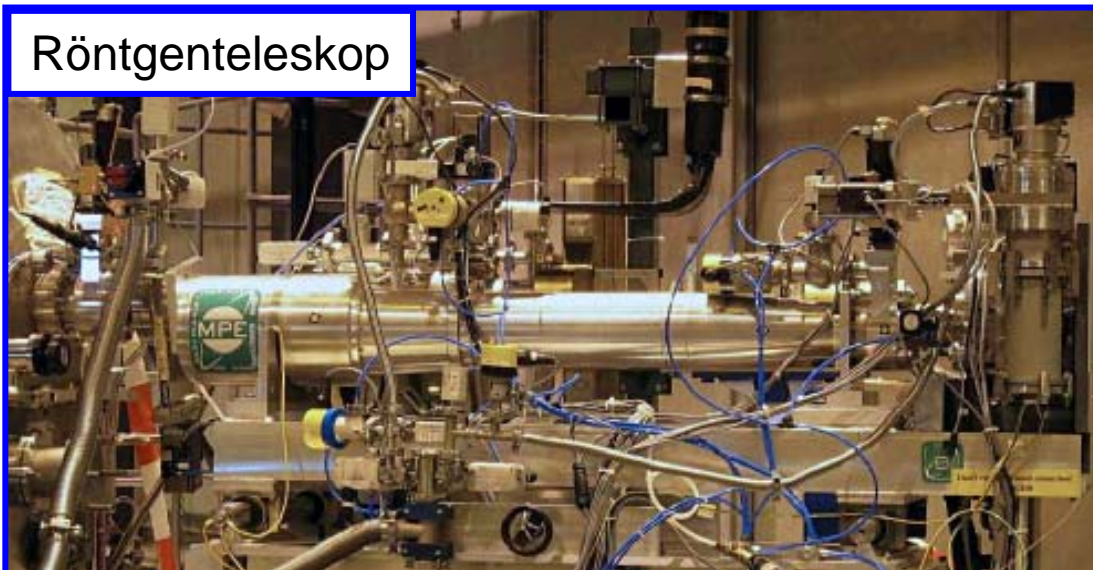
# CAST-Experiment



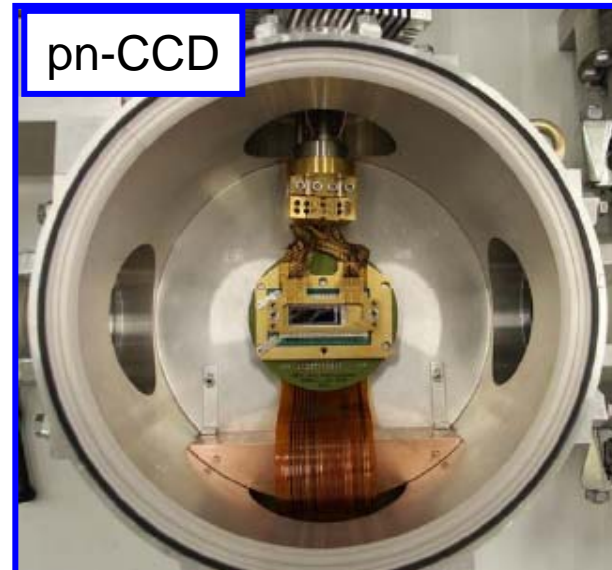




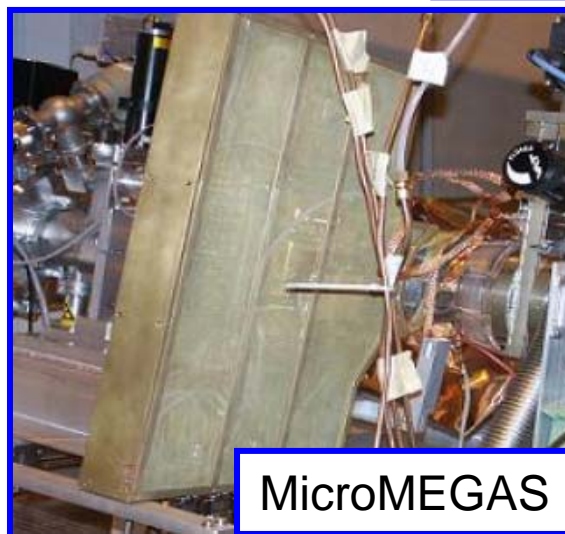
Röntgenteleskop



pn-CCD



TPC



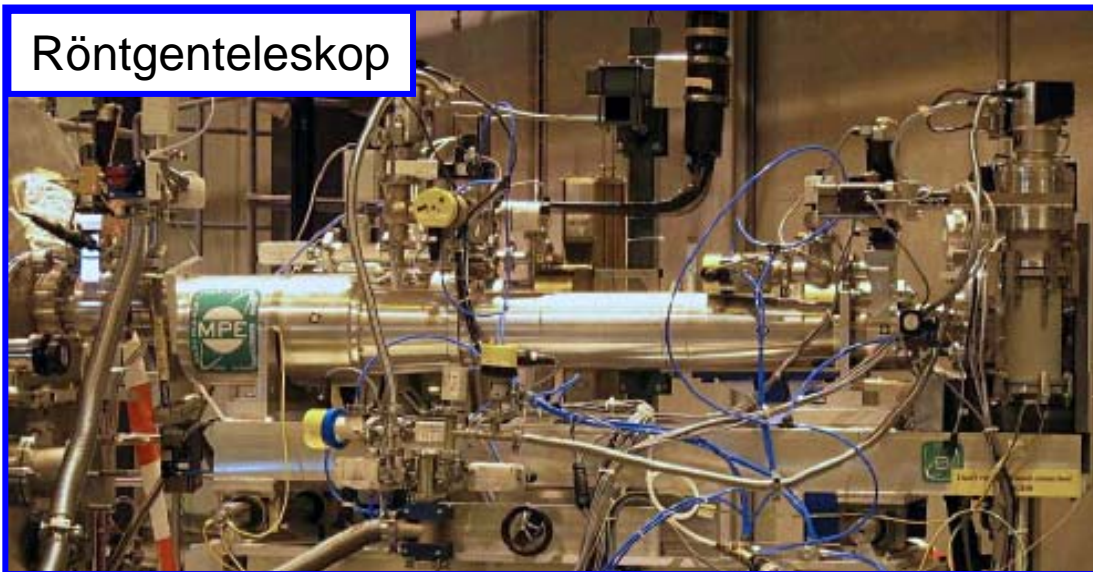
MicroMEGAS

Phase I  
(Vakuum)  
2003-2004

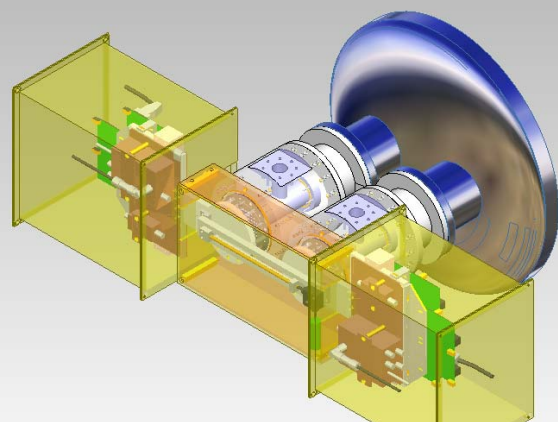
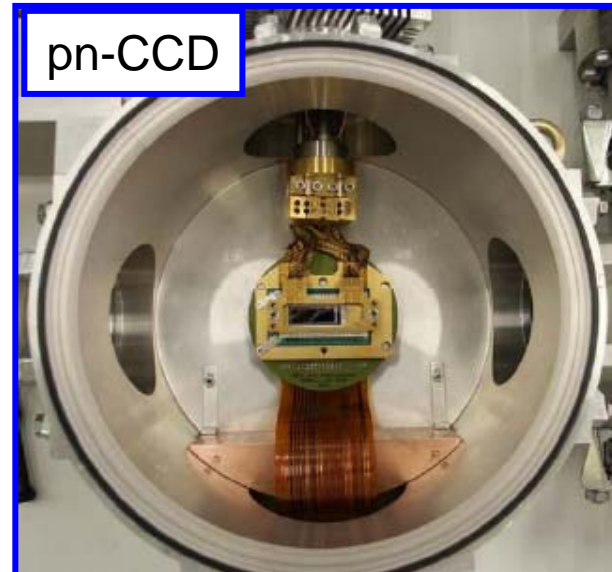
Phase II  
( $^4\text{He}$ )  
2005-2006



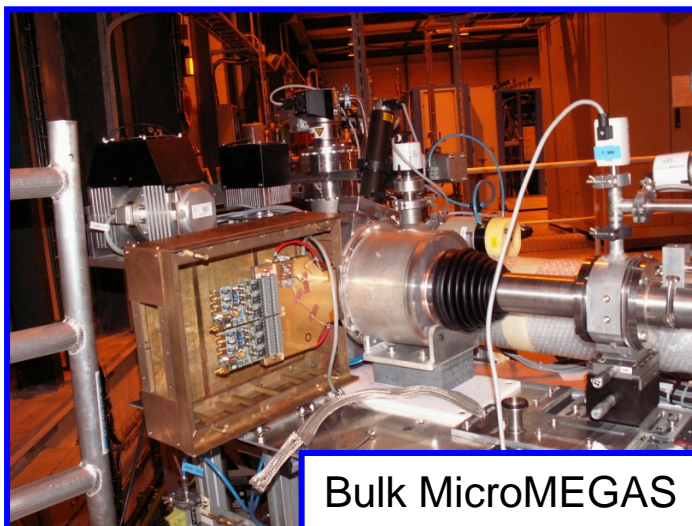
Röntgenteleskop



pn-CCD



Microbulk MicroMEGAS



Bulk MicroMEGAS

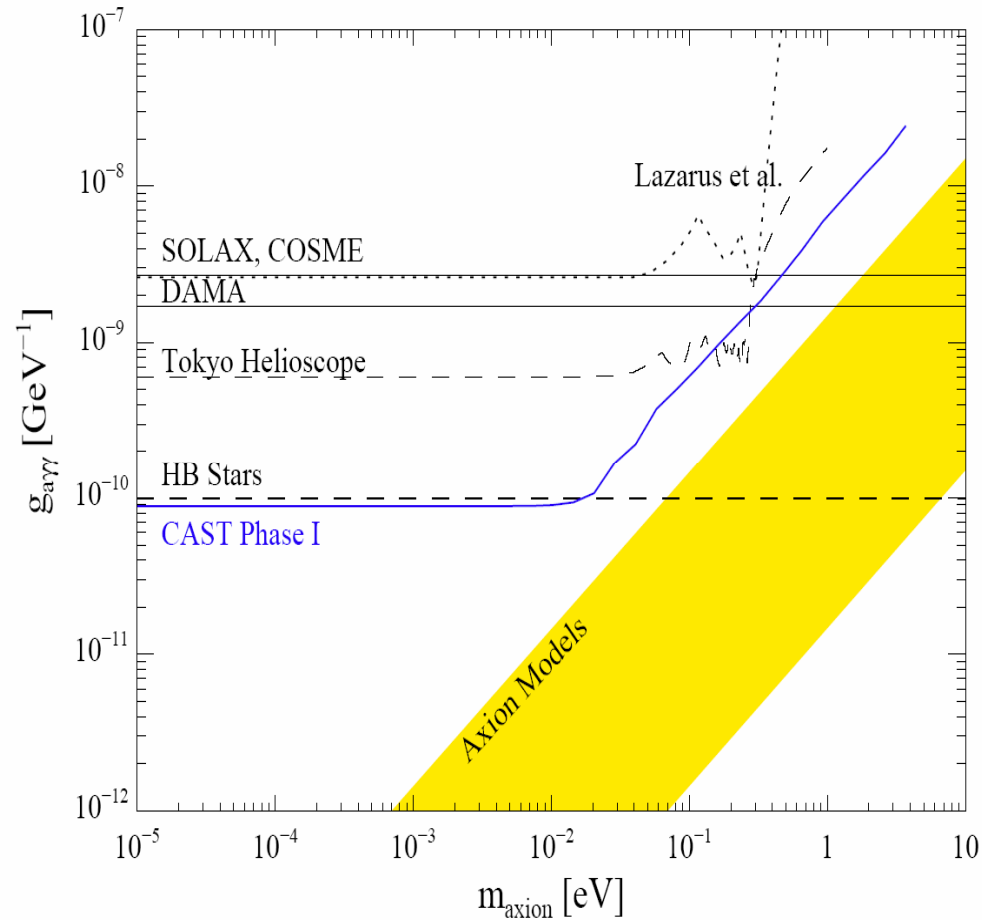
Phase II  
( $^3\text{He}$ )  
2007-2010





## Ergebnisse der Phase I

- Kein Signal über Untergrund
- CAST Phase I liefert beste experimentelle Obergrenze in weitem Massenbereich und ist sensitiver als astrophysikalisches Limit für Massen  $m_a < 0,02 \text{ eV}$
- Verbesserung der Obergrenze im Vergleich zu Vorgängerexperimenten um Faktor 7
- PRL Paper mit 2003 Ergebnissen (Phys. Rev. Letters, 94, 121301, 2005 )
- 2003+2004 Resultate in JCAP (JCAP, 4, 10, 2007 )  
und technische Paper der Detektoren ( New J. Phys. 9 (2007) 169 [CCD/Teleskop], New J. Phys. 9 (2007) 170 [MM], New J. Phys. 9 (2007) 171 [TPC])



**Upper Limit  $g_{a\gamma\gamma}$  für  $m_a < 0,02 \text{ eV}$**

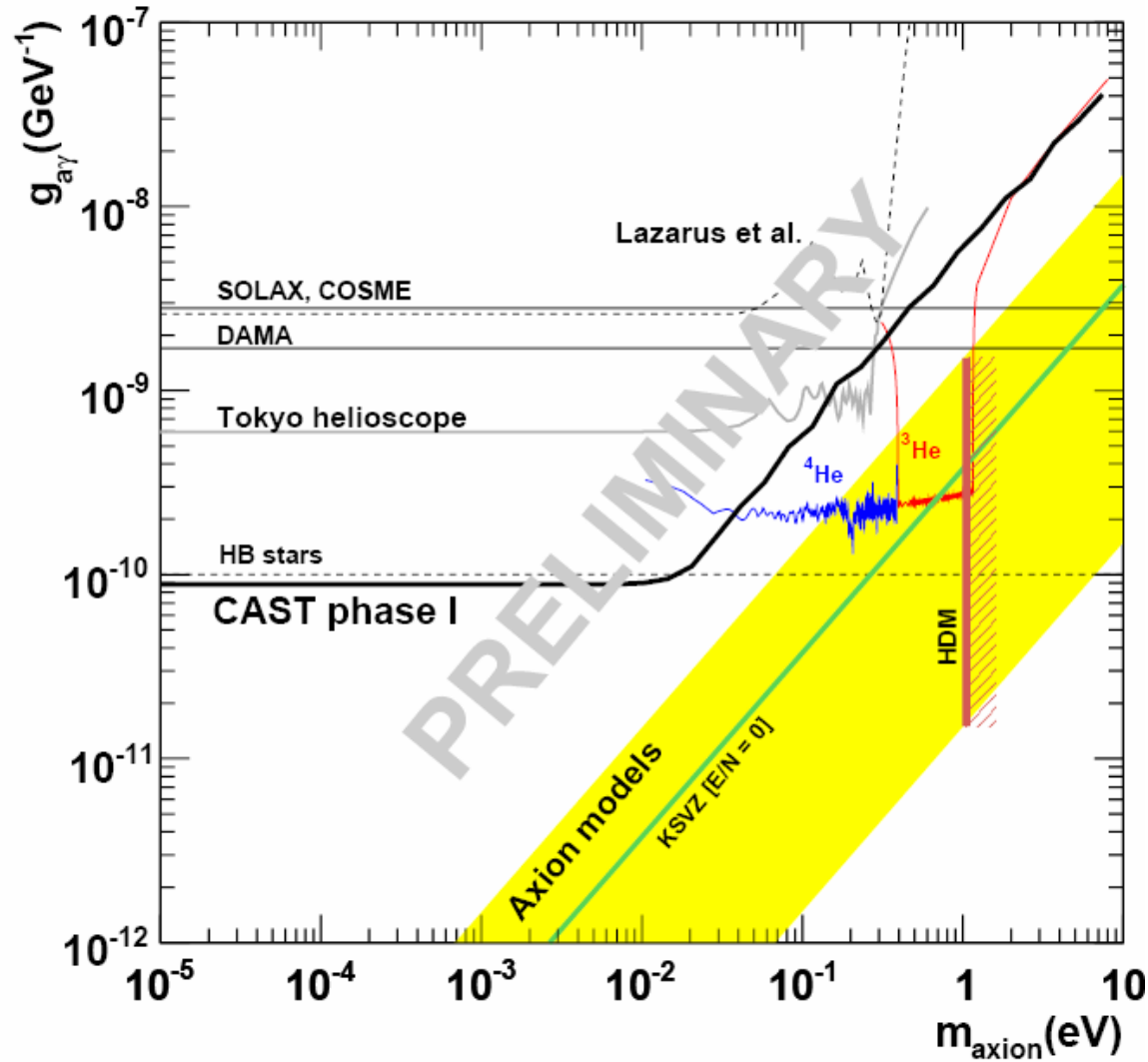
$$g_{a\gamma} (95\%) = 0,88 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$$





## Neueste Ergebnisse Phase II

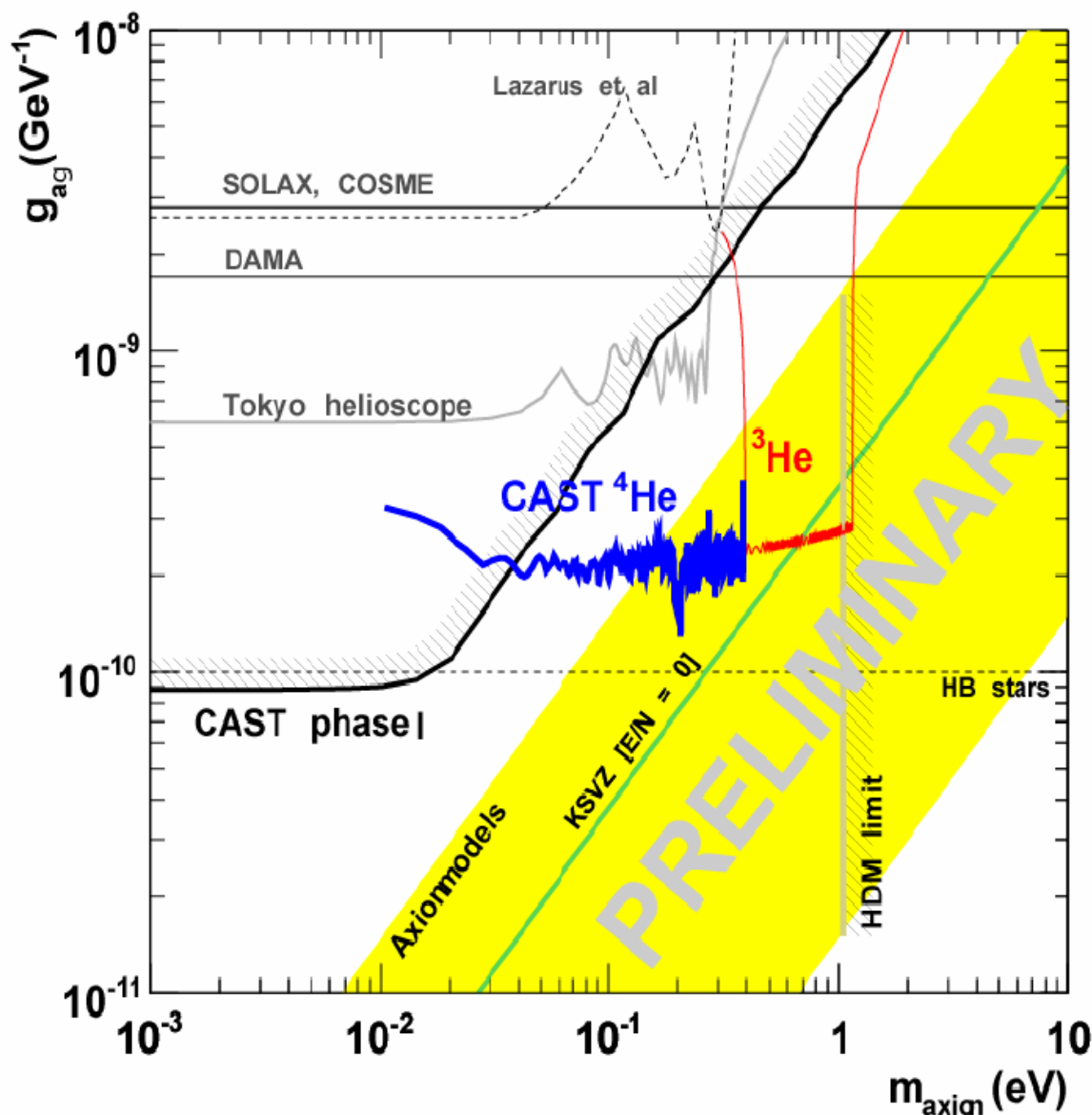
- Datennahme mit  $^4\text{He}$  von Nov 2005 bis Dez 2006  
→  $^4\text{He}$ -Run abgeschlossen
- 160 Druckeinstellungen gemessen (14 mbar →  $m_a \sim 0.4$  eV)
- **Erstes kombiniertes Ergebnis der Analyse der  $^4\text{He}$ -Daten aller Detektoren**  
→ **CAST dringt in von Modellen bevorzugte Bereiche ein**





## Neueste Ergebnisse Phase II

- Datennahme mit  $^4\text{He}$  von Nov 2005 bis Dez 2006  
→  $^4\text{He}$ -Run abgeschlossen
- 160 Druckeinstellungen gemessen (14 mbar →  $m_a \sim 0.4$  eV)
- **Erstes kombiniertes Ergebnis der Analyse der  $^4\text{He}$ -Daten aller Detektoren**  
→ **CAST dringt in von Modellen bevorzugte Bereiche ein**
- Upgrade des Gassystems für  $^3\text{He}$  abgeschlossen
- Datennahme mit  $^3\text{He}$  seit März '08 (212 Druckeinstellungen)





- Axionen könnten das starke CP-Problem lösen
- Erzeugung von Axionen in der Sonne und Nachweis in starkem Magnetfeld

- CAST sucht als Helioskop nach solaren Axionen
- Verschiedene Bereiche für Axionenmasse wegen Kohärenzbedingung  $qL \ll 1$ :
  - Vakuum im Magneten (CAST Phase I) :  $m_a < 0.02 \text{ eV}$
  - $^4\text{He}/^3\text{He}$  im Magneten (CAST Phase II) :  $0.02 \text{ eV} < m_a < 1.16 \text{ eV}$

- Ergebnisse der Phase I:
  - Kein Signal beobachtet
  - Verbessertes Limit (sensitiver als kosmologische Obergrenze):  
 $g_{a\gamma} (95\%) = 0,88 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$
- Neueste Ergebnisse der Phase II (mit  $^4\text{He}$ ):
  - Kein Signal beobachtet, neue Obergrenze für Massen bis 0.4 eV
  - CAST dringt in von Modellen bevorzugte Regionen ein



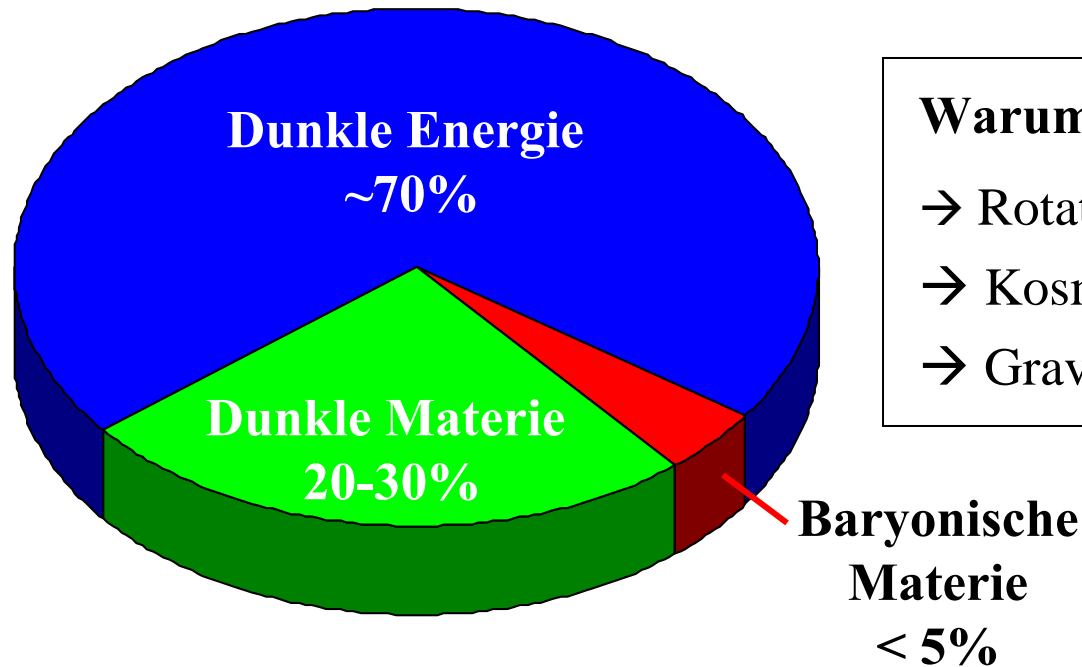
# Axions ?!? Not yet... but stay tuned...







## Zusammensetzung des Universums



### Warum dunkle Materie?

- Rotationskurven von Spiralgalaxien
- Kosmische Hintergrundstrahlung
- Gravitationslinsen

### Kandidaten für Dunkle Materie

→ Baryonische dunkle Materie:

- Braune Zwerge
- Neutronensterne
- Kleine schwarze Löcher

→ Nicht-Baryonische dunkle Materie:

- Heiße dunkle Materie (Neutrinos)
- Kalte dunkle Materie (WIMPs, Axion)





## Lagrange-Funktion

- Perturbative QCD-Lagrangian invariant under global vectorial & axial

Transformations, but QCD does not show this axial symmetry ( $U(1)_A$ ) !

→ Missing 4<sup>th</sup> boson from SSB of  $U(1)_A$ -Symmetry ( $p^-, p^0, p^+$  ok, but  $h'$  too heavy)

- Postulation of anomalous symmetry breaking of  $U(1)_A$

→ Additional term in QCD-Lagrangian

$$L_\theta = \bar{\theta} \frac{g^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

→ This term is CP-violating

- Introduction of an additional symmetry:  $U_{PQ}(1)$

→ Additional term in Lagrangian

$$L_{\text{Axion}} = L_{\text{kin}} + C_a \frac{\mathbf{a}}{f_a} \frac{g^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a \quad \text{mit } L_{\text{kin}} = -\frac{1}{2} \partial_\mu \mathbf{a} \partial^\mu \mathbf{a}$$

→ Additional axion field  $\mathbf{a}$  can eliminate  $\theta$ -Term in QCD-Lagrangian:

$$\langle \mathbf{a} \rangle = -\frac{f_a}{C_a} \bar{\theta}$$

→ Strong CP-Problem solved



## Theta-Parameter

- $L_q$  due to complicated structure of the vacuum

→ Ground state is superposition of degenerate vacua, so-called q-Vacuum

$$|\theta\rangle = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\theta} |n\rangle$$

with  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  and winding number  $n$  to distinguish the vacua

- For standard model (including electro-weak interaction):

$$\bar{\theta} = \theta + \arg(\det M)$$

with quark mass matrix  $M$

- Terms of  $\bar{\theta}$  are independent
- Fine-Tuning would be necessary in order to obtain  $\bar{\theta} \leq 10^{-10}$

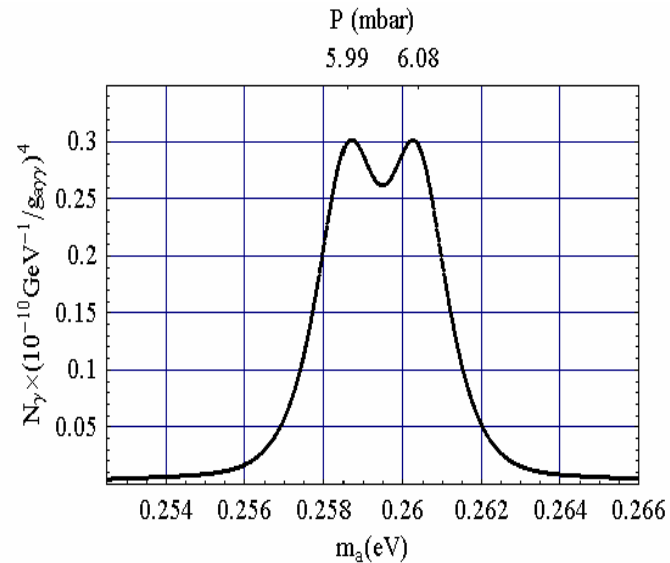
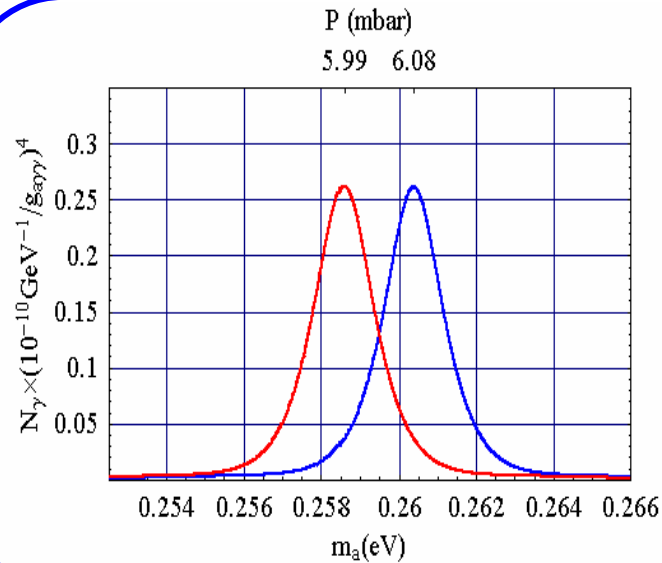
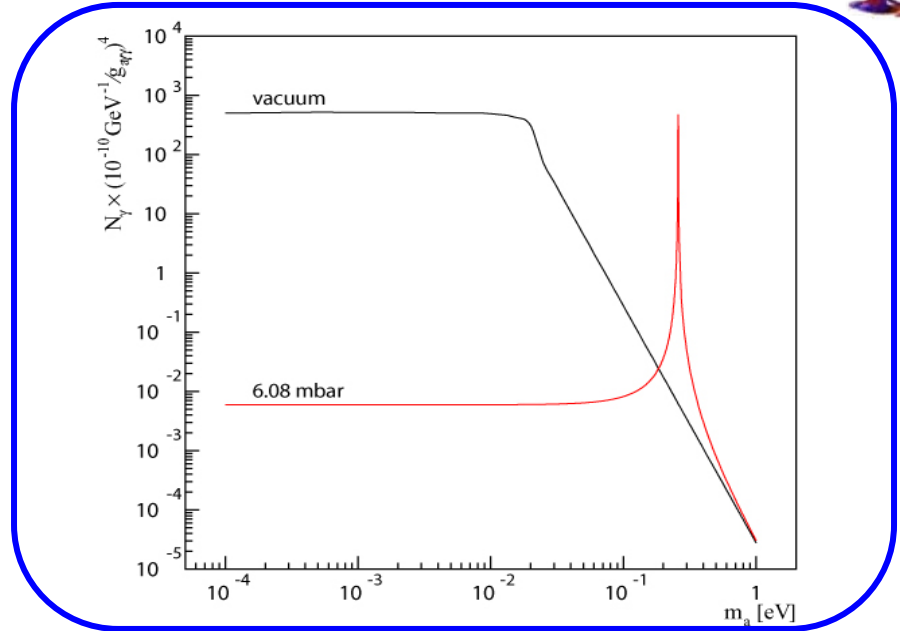


# CAST Phase II



Coherence can be restored for narrow mass range

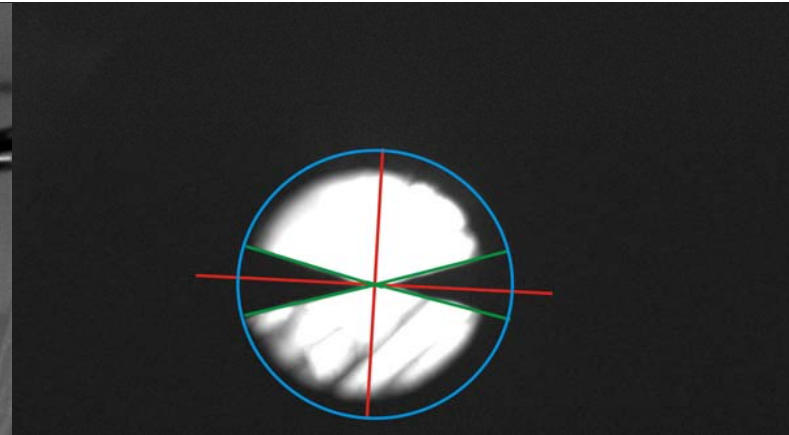
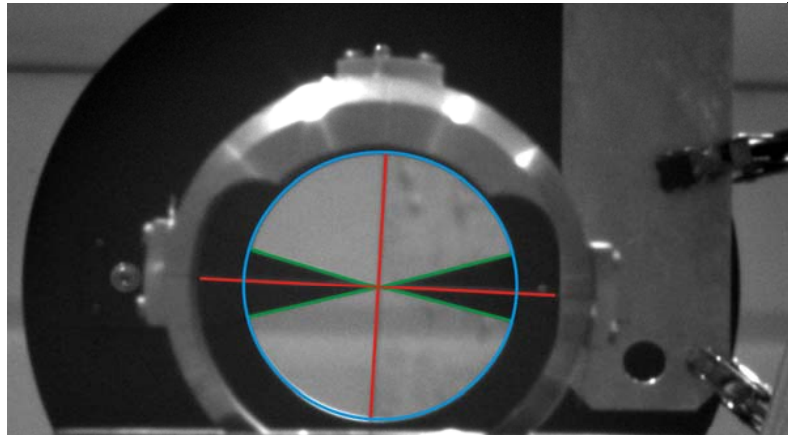
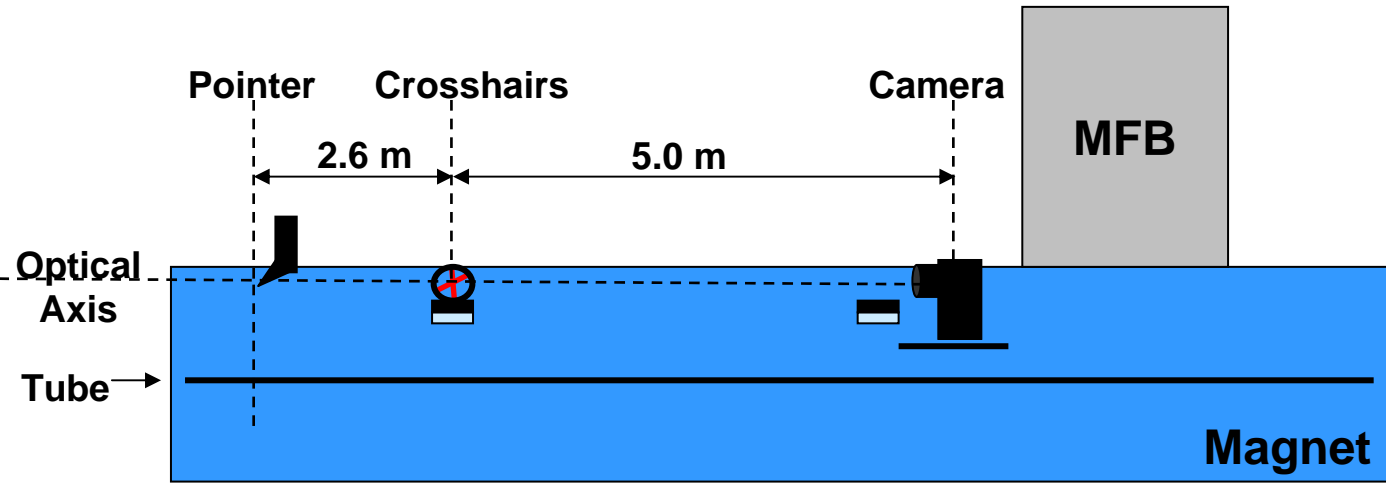
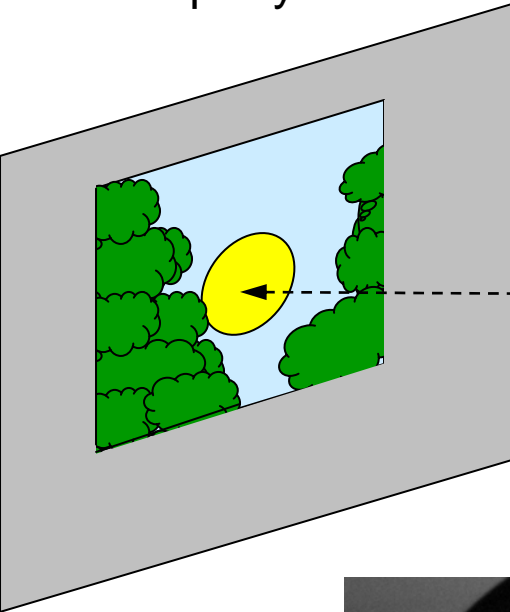
Scan of wider mass range by changing pressure





## Filming of the Sun

Twice per year the Sun can be observed directly through a window in experimental hall

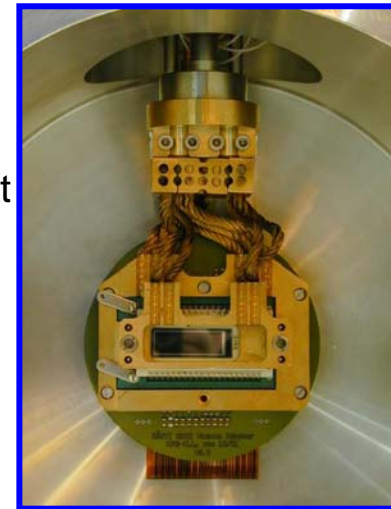
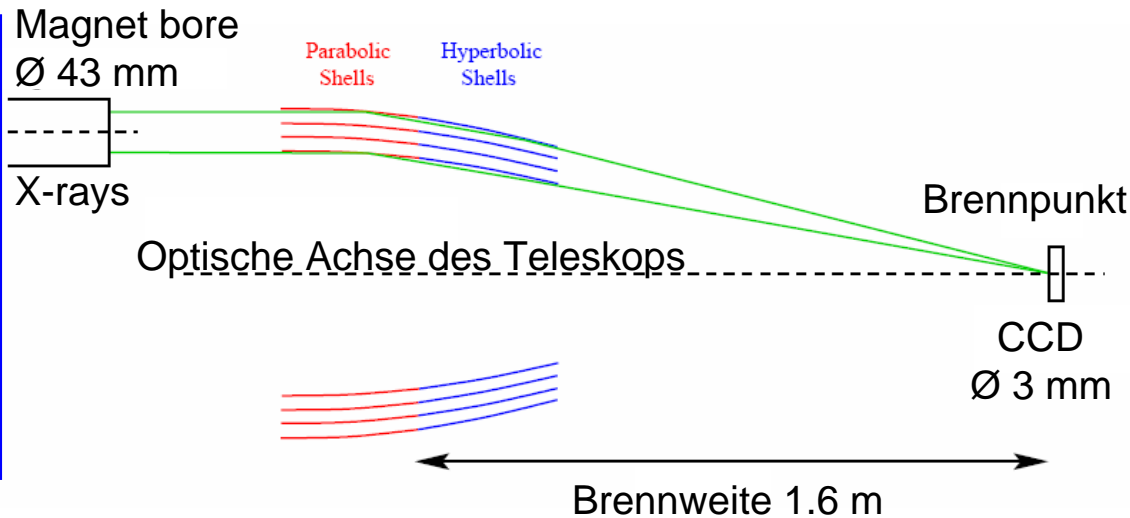
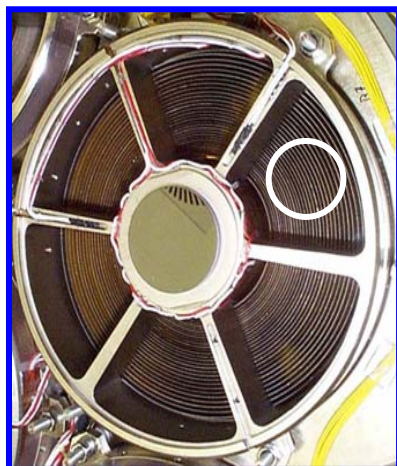


CAST-Magnet is pointing to the sun with required precision (0.02°)!



## Röntgenteleskop und CCD

- Wolter-I-Type Teleskop (Prototyp der ABRIXAS-Mission)
- 27 ineinander geschachtelte, Gold-beschichtete Spiegelschalen
- Nur ein Sektor des Teleskops bei CAST benutzt
- pn-CCD (Prototyp der XMM-Newton-Mission)
- Sehr gute Orts- und Energieauflösung
- Gleichzeitige Messung von Untergrund und Signal



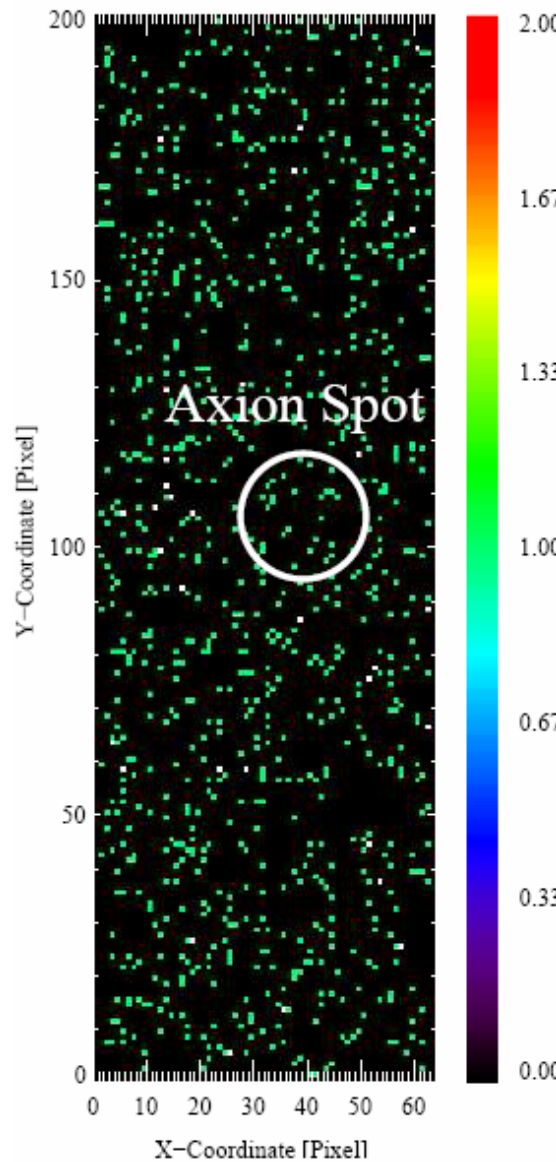
➔ Verbesserung des Signal-zu-Untergrund-Verhältnisses (Faktor  $\sim 150!$ )



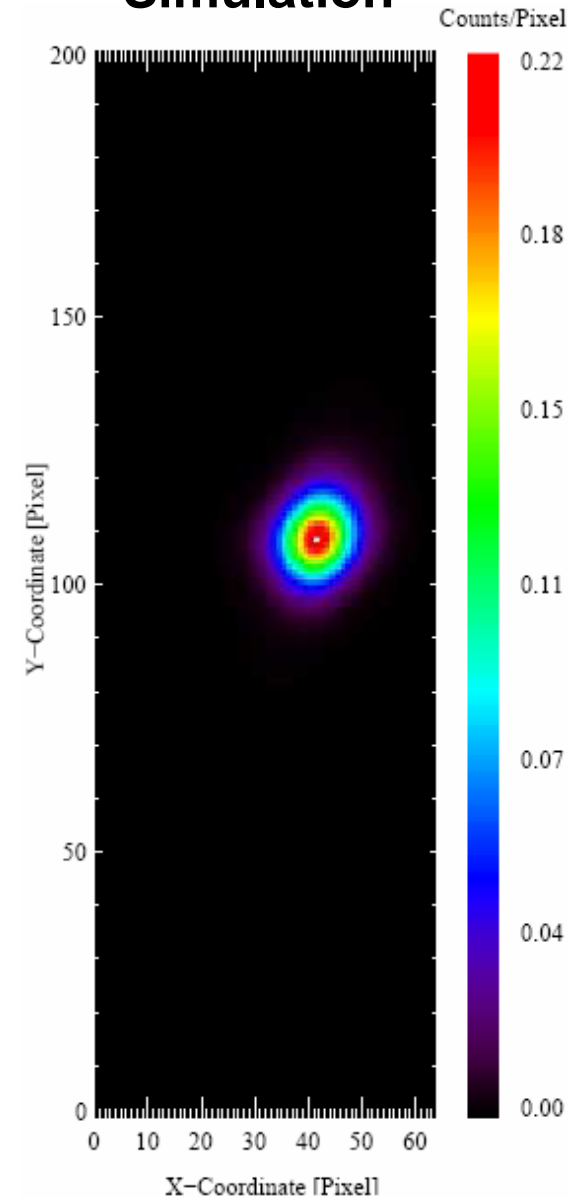
## CCD-Detektor

- Prototyp of the ESA-Mission XMM-Newton
- Sensitive area of the CCD:  
 $3 \text{ cm}^2$
- Pixel size:  
 $150 \times 150 \mu\text{m}^2$
- Energy resolution:  
about  $160 \text{ eV}$  @  $6 \text{ keV}$

### Magnet pointing towards sun



### Simulation







# Ergebnisse

