

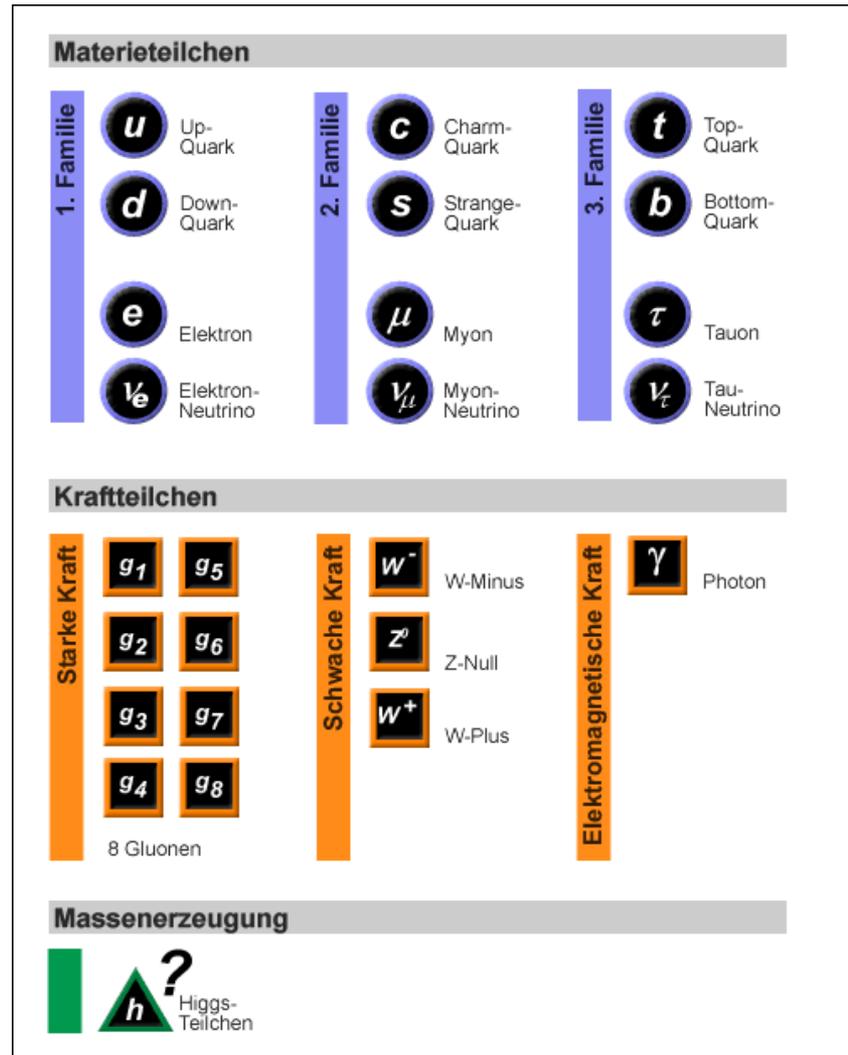
Die Suche nach ultraleichten Teilchen jenseits des Standardmodells.

Andreas Ringwald (DESY)

Physikalisches Kolloquium,
Duisburg, 9. Mai 2012

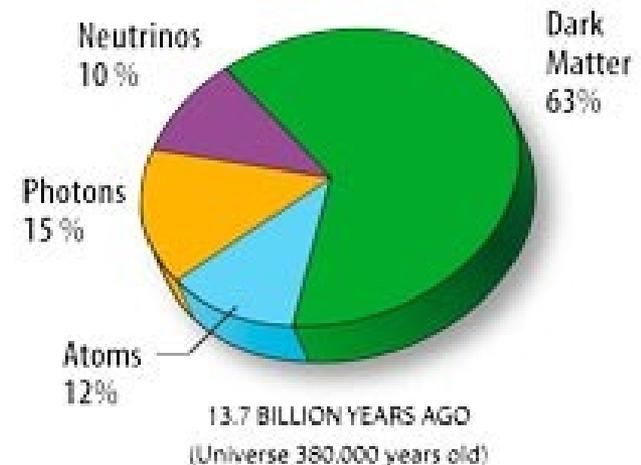
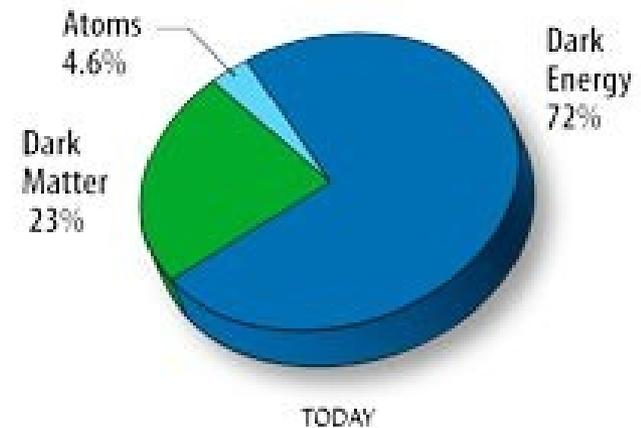
Teilchen jenseits des Standardmodells?!

- Standardmodell der Teilchenphysik: fundamentale Beschreibung der Bausteine und Kräfte der bekannten Teilchen



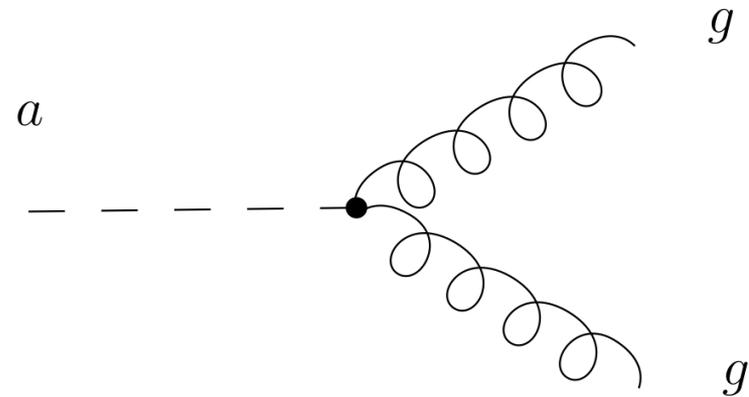
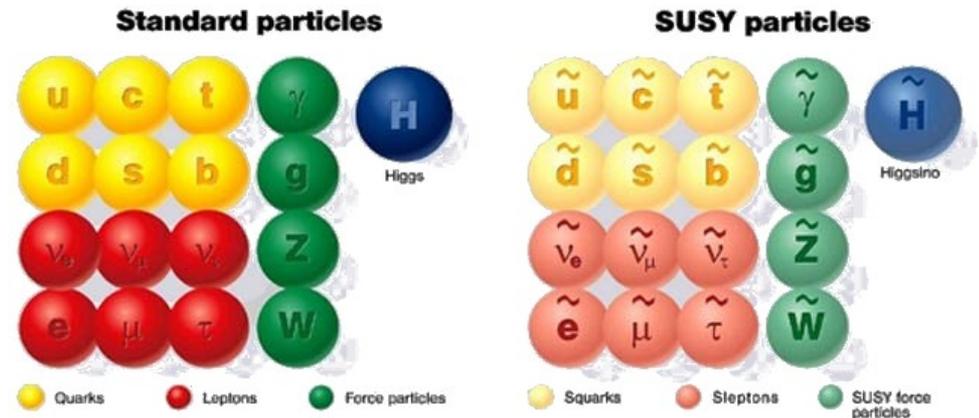
Teilchen jenseits des Standardmodells?!

- > Standardmodell der Teilchenphysik: fundamentale Beschreibung der Bausteine und Kräfte der bekannten Teilchen
- > Standardmodell der Kosmologie: nur ca. 5 % der Energie/Masse im gegenwärtigen Universum bestehen aus den bekannten Teilchen



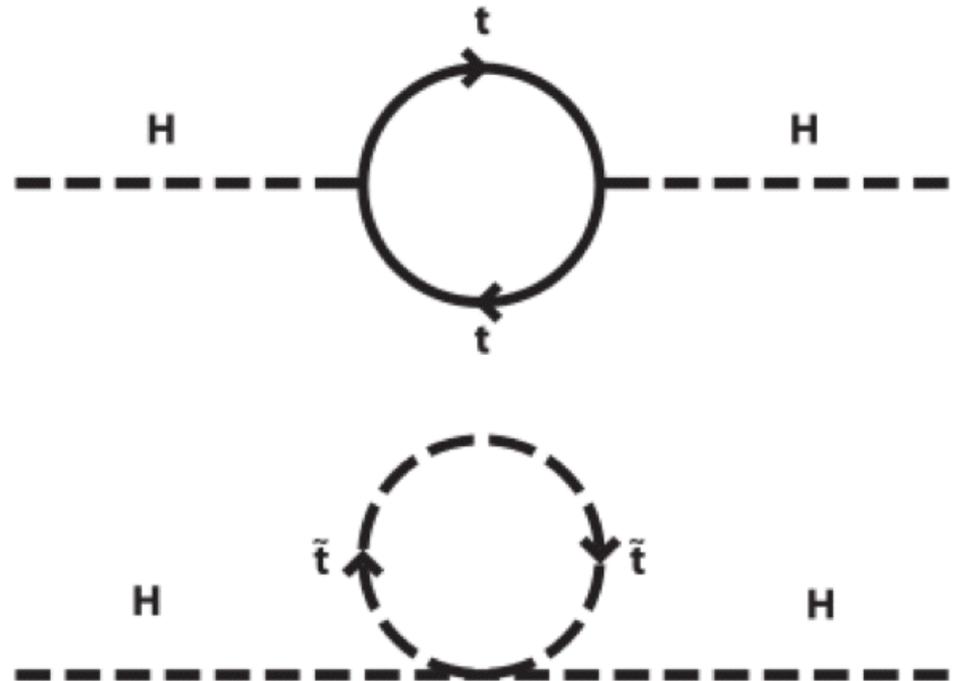
Teilchen jenseits des Standardmodells?!

- > Standardmodell der Teilchenphysik: fundamentale Beschreibung der Bausteine und Kräfte der bekannten Teilchen
- > Standardmodell der Kosmologie: nur ca. 5 % der Energie/Masse im gegenwärtigen Universum bestehen aus den bekannten Teilchen
- > Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik: mehrere gut motivierte Kandidaten für die Konstituenten der dunklen Materie
 - Neutralinos
 - Axionen



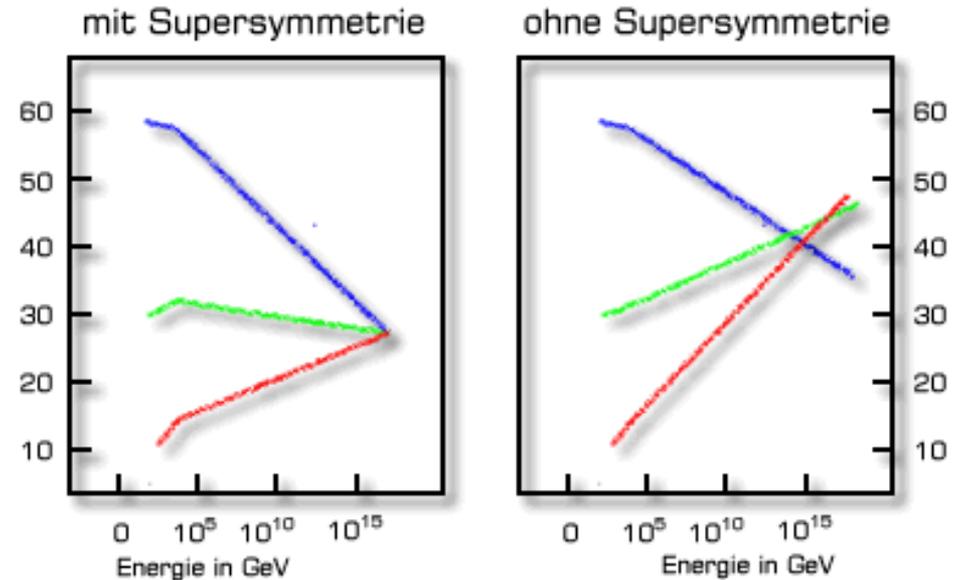
Supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells

- Motivation:
Zähmung von Quantenkorrekturen zur Higgsmasse durch Superpartner im TeV Massenbereich

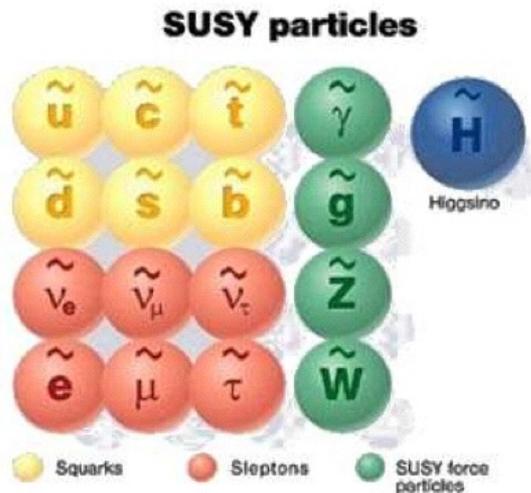


Supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells

- > Motivation:
 - Zähmung von Quantenkorrekturen zur Higgsmasse durch Superpartner im TeV Massenbereich
- > Willkommene Eigenschaften:
 - Vereinigung der Kopplungen
 - Kandidaten für dunkle Materie:



— Elektroschwache Kraft (1/Kopplung 1)
— Elektroschwache Kraft (1/Kopplung 2)
— Starke Kraft (1/Kopplung)

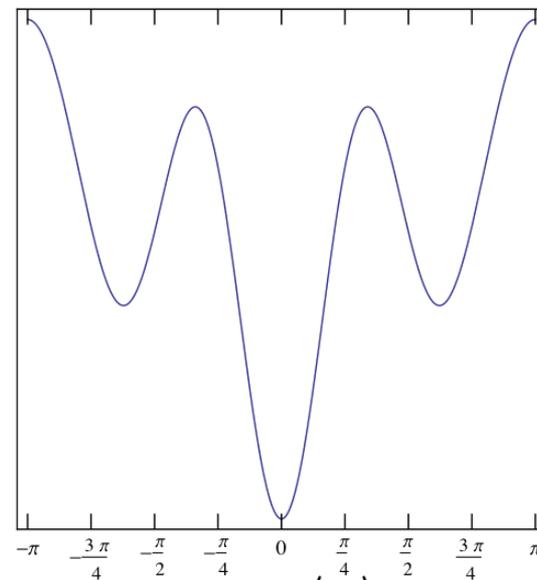
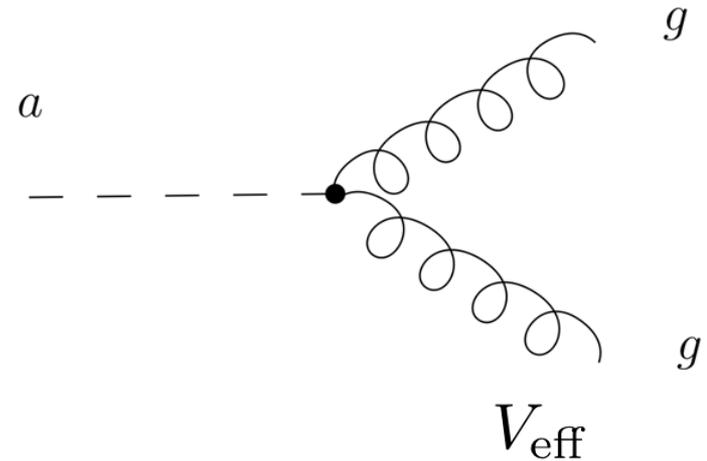


Peccei-Quinn Erweiterung des Standardmodells

- Motivation:
Erklärung der unnatürlichen Kleinheit, $\theta < 10^{-10}$, des CP-verletzenden Terms in der Lagrangedichte der QCD.

$$\mathcal{L}_{\text{CP-viol.}} = \frac{\alpha_s}{4\pi} \theta \text{tr} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

- Axionfeld $\theta \rightarrow a(x)/f_a$
 - $\langle a \rangle = 0$



Peccei-Quinn Erweiterung des Standardmodells

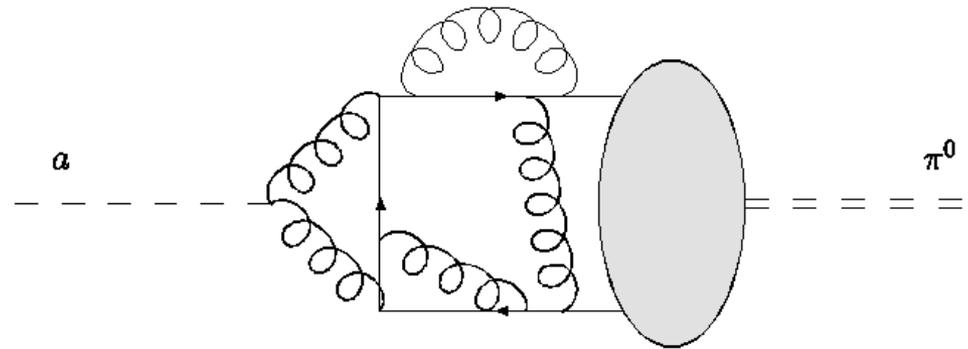
- Motivation:
Erklärung der unnatürlichen Kleinheit, $\theta < 10^{-10}$, des CP-verletzenden Terms in der Lagrangedichte der QCD.

$$\mathcal{L}_{\text{CP-viol.}} = \frac{\alpha_s}{4\pi} \theta \text{tr} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

- Axionfeld $\theta \rightarrow a(x)/f_a$

- $\langle a \rangle = 0$
- Axion: ultraleichtes Teilchen, cf. Weinberg '78; Wilczek '78

$$m_a = \frac{m_\pi f_\pi}{f_a} \frac{\sqrt{m_u m_d}}{m_u + m_d} \simeq 6 \text{ meV} \times \left(\frac{10^9 \text{ GeV}}{f_a} \right)$$



Peccei-Quinn Erweiterung des Standardmodells

- > Motivation:
Erklärung der unnatürlichen Kleinheit, $\theta < 10^{-10}$, des CP-verletzenden Terms in der Lagrangedichte der QCD.

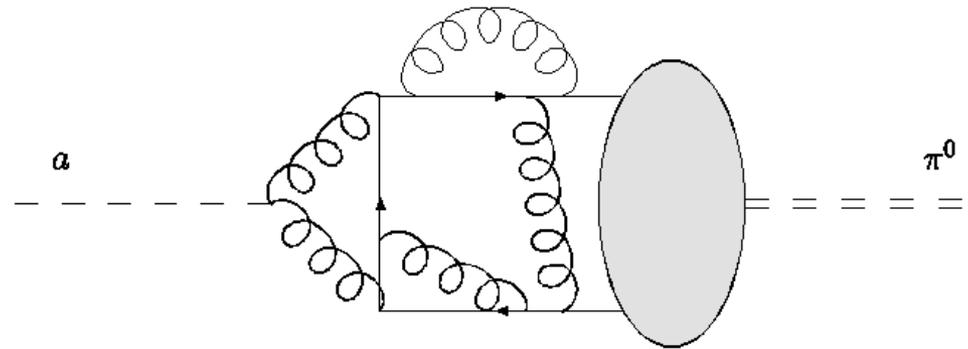
$$\mathcal{L}_{\text{CP-viol.}} = \frac{\alpha_s}{4\pi} \theta \text{tr} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

- > Axionfeld $\theta \rightarrow a(x)/f_a$

- $\langle a \rangle = 0$
- Axion: ultraleichtes Teilchen, cf. Weinberg '78; Wilczek '78
- extrem schwache Wechselwirkung mit Standardmodellteilchen

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{1}{4} g_{a\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = g_{a\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B},$$

$$g_{a\gamma} \simeq \frac{\alpha}{2\pi f_a} \sim 10^{-12} \text{ GeV}^{-1} \left(\frac{10^9 \text{ GeV}}{f_a} \right)$$

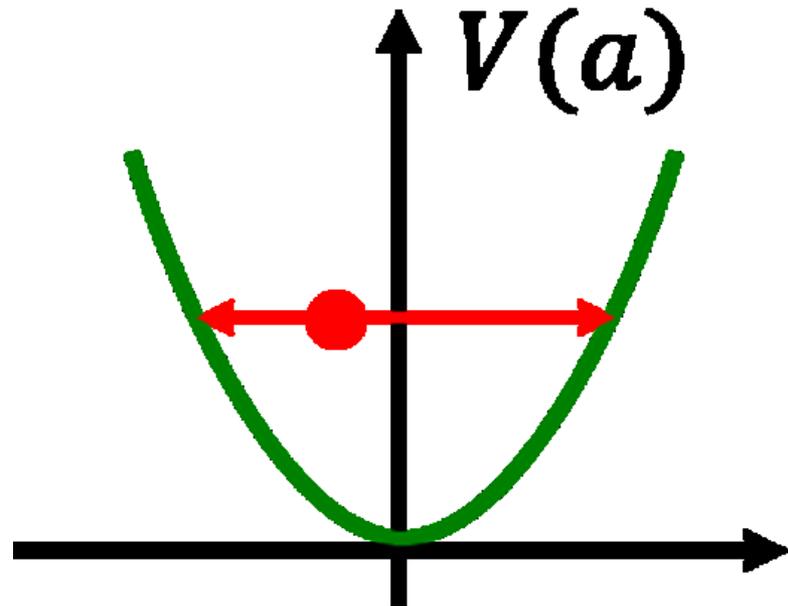


Peccei-Quinn Erweiterung des Standardmodells

- > Motivation:
Erklärung der unnatürlichen Kleinheit, $\theta < 10^{-10}$, des CP-verletzenden Terms in der Lagrangedichte der QCD.

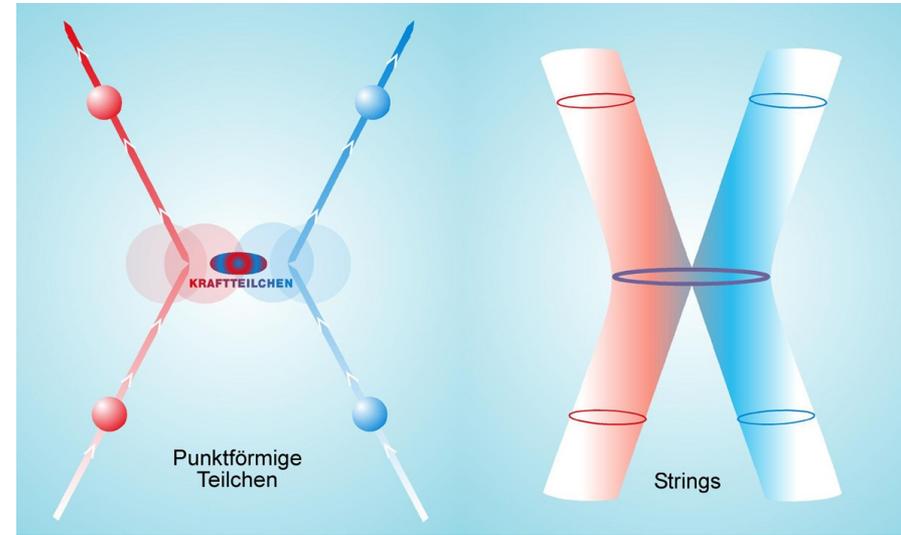
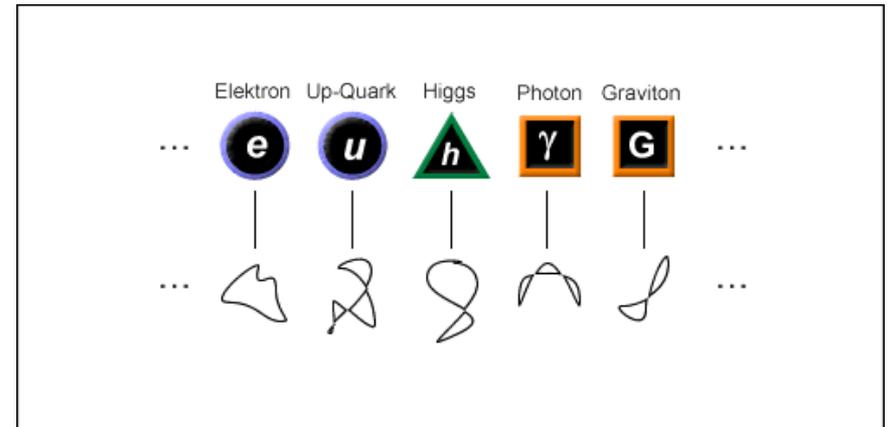
$$\mathcal{L}_{\text{CP-viol.}} = \frac{\alpha_s}{4\pi} \theta \text{tr} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

- > Axionfeld $\theta \rightarrow a(x)/f_a$
 - $\langle a \rangle = 0$
 - Axion: ultraleichtes Teilchen, cf. Weinberg '78; Wilczek '78
 - extrem schwache Wechselwirkung mit Standardmodellteilchen
- > Willkommener Nebeneffekt:
 - Axion: Kandidat für dunkle Materie



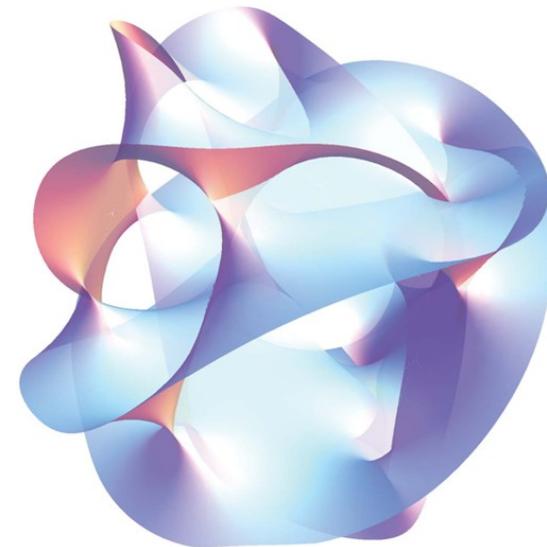
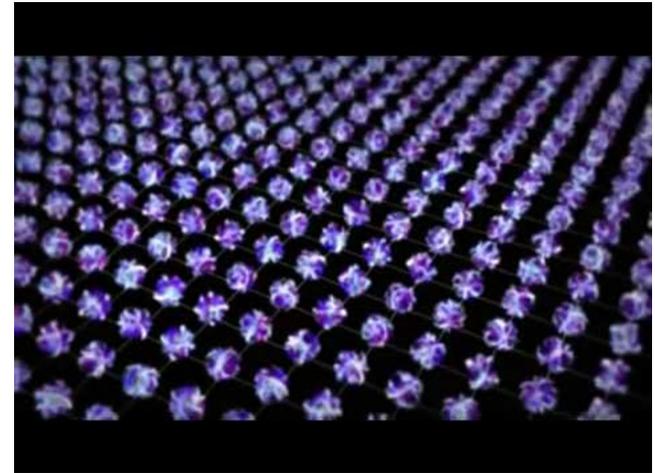
SUSY und Peccei-Quinn Erweiterungen in Stringtheorie

- > Besonders stark motivierte Erweiterungen des Standardmodells basieren auf der Stringtheorie:
- Teilchen sind niedrigste Anregungen von Saiten (= Strings), die in einer (9+1)-dimensionalen Raumzeit propagieren
 - Vereinigung aller Kräfte



SUSY und Peccei-Quinn Erweiterungen in Stringtheorie

- Besonders stark motivierte Erweiterungen des Standardmodells basieren auf der Stringtheorie:
 - Teilchen sind niedrigste Anregungen von Saiten (= Strings), die in einer $(9+1)$ -dimensionalen Raumzeit propagieren
 - Vereinigung aller Kräfte
- Spektrum der effektiven Niederenergie-Theorie in $(4+1)$ -Dimensionen ist supersymmetrisch und enthält mehrere ultraleichte Kandidaten: **Axion**, **ALPs (Axion-Like Particles)**, **HPs (Hidden Photons)**
 - falls der kompakte Unterraum der „aufgerollten“ 6 Dimensionen gewisse geometrische und topologische Eigenschaften hat (Ricci flach; mehrere „Löcher“), cf. **Witten '84**



Terminologie: WIMPs, SuperWIMPs, WISPs, ...

> WIMPs ... Weakly Interacting Massive Particles

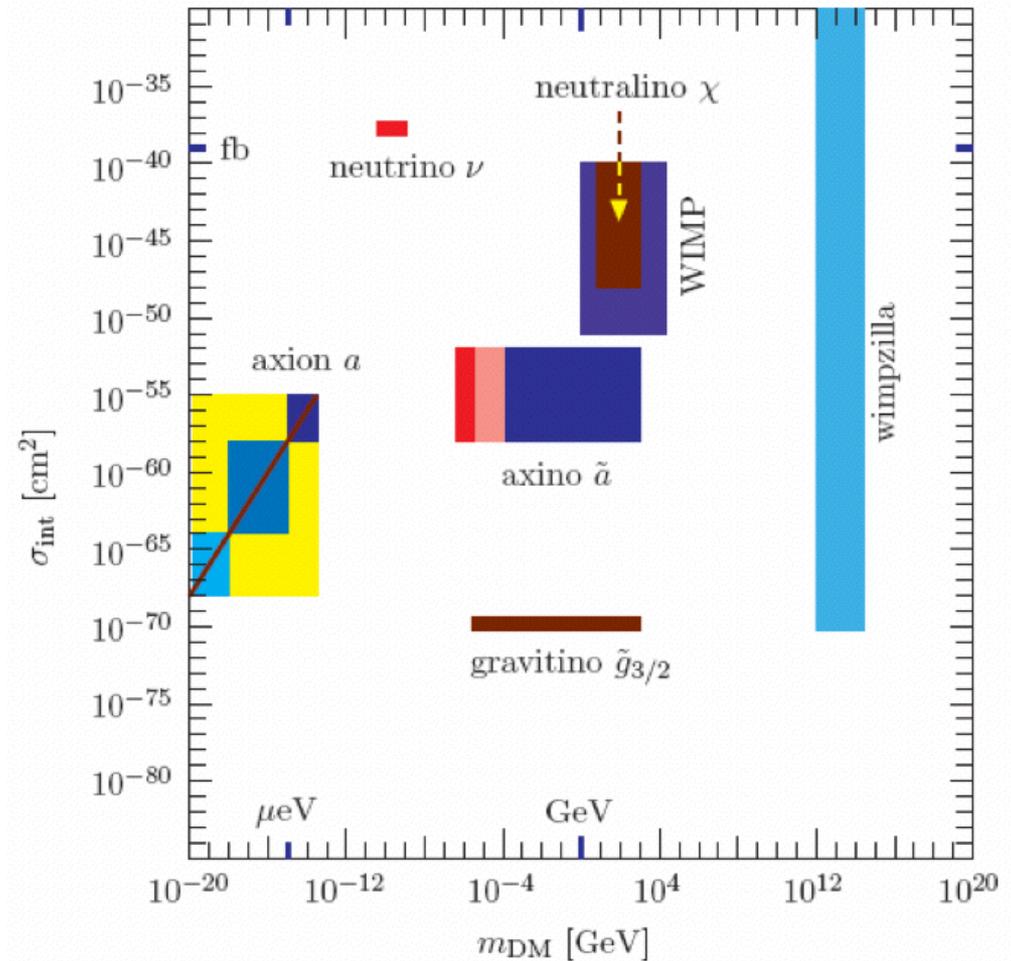
- Neutralinos
- Axinos

> SuperWIMPs ... Super-Weakly Interacting Massive Particles

- Gravitinos

> WISPs ... very Weakly Interacting Slim Particles

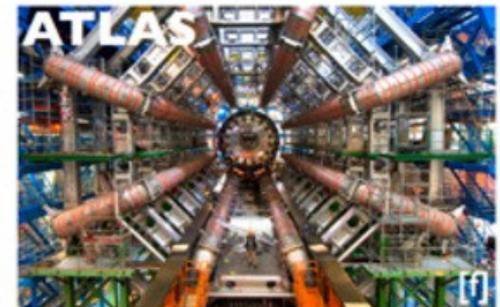
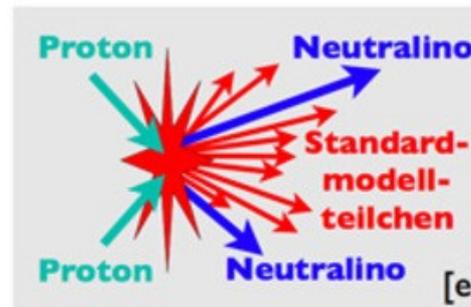
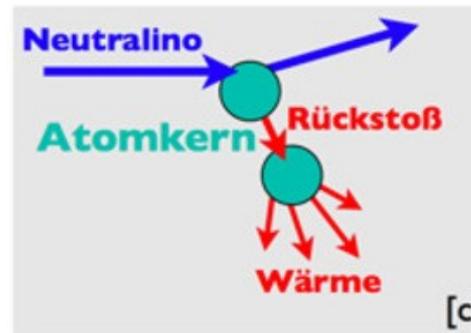
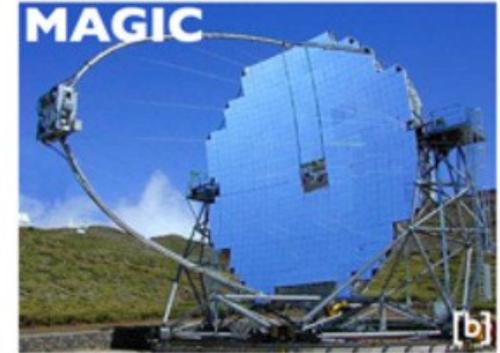
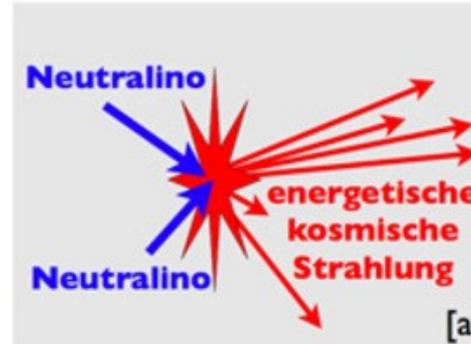
- Axions
- ALPs (Axion-Like Particles)
- HPs (Hidden Photons)



Weltweite Jagd nach den Kandidaten der dunklen Materie

> Dunkle Materie aus WIMPs:

- Direkter Nachweis (WIMP Streuung an Kernen)
- Indirekter Nachweis in kosmischer Strahlung
- Produktion von WIMPs in Hochenergiebeschleunigern



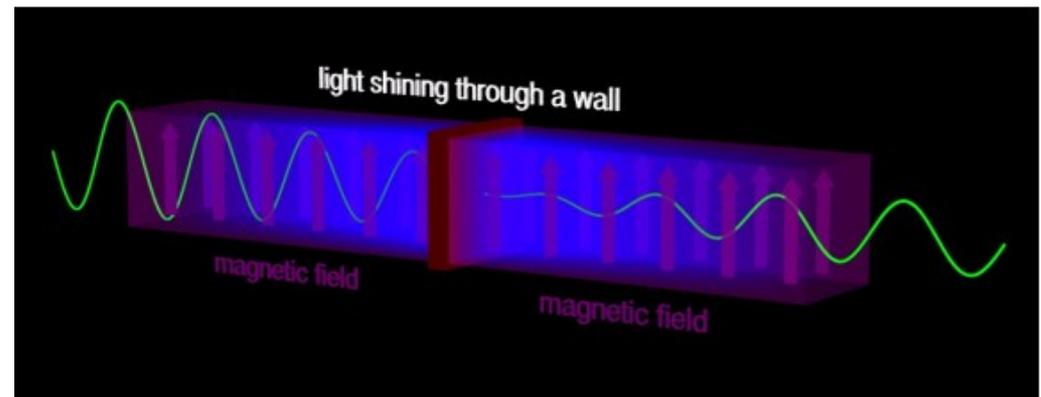
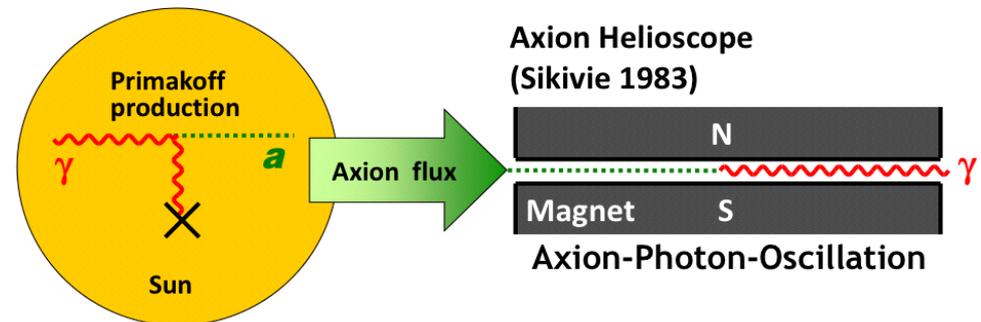
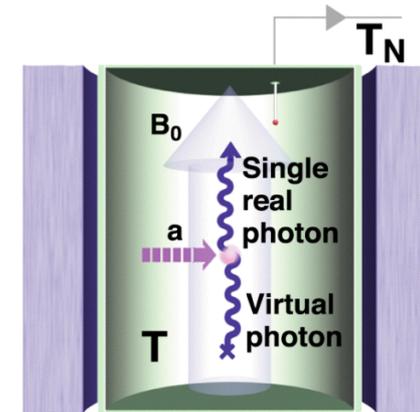
Weltweite Jagd nach den Kandidaten der dunklen Materie

> Dunkle Materie aus WIMPs:

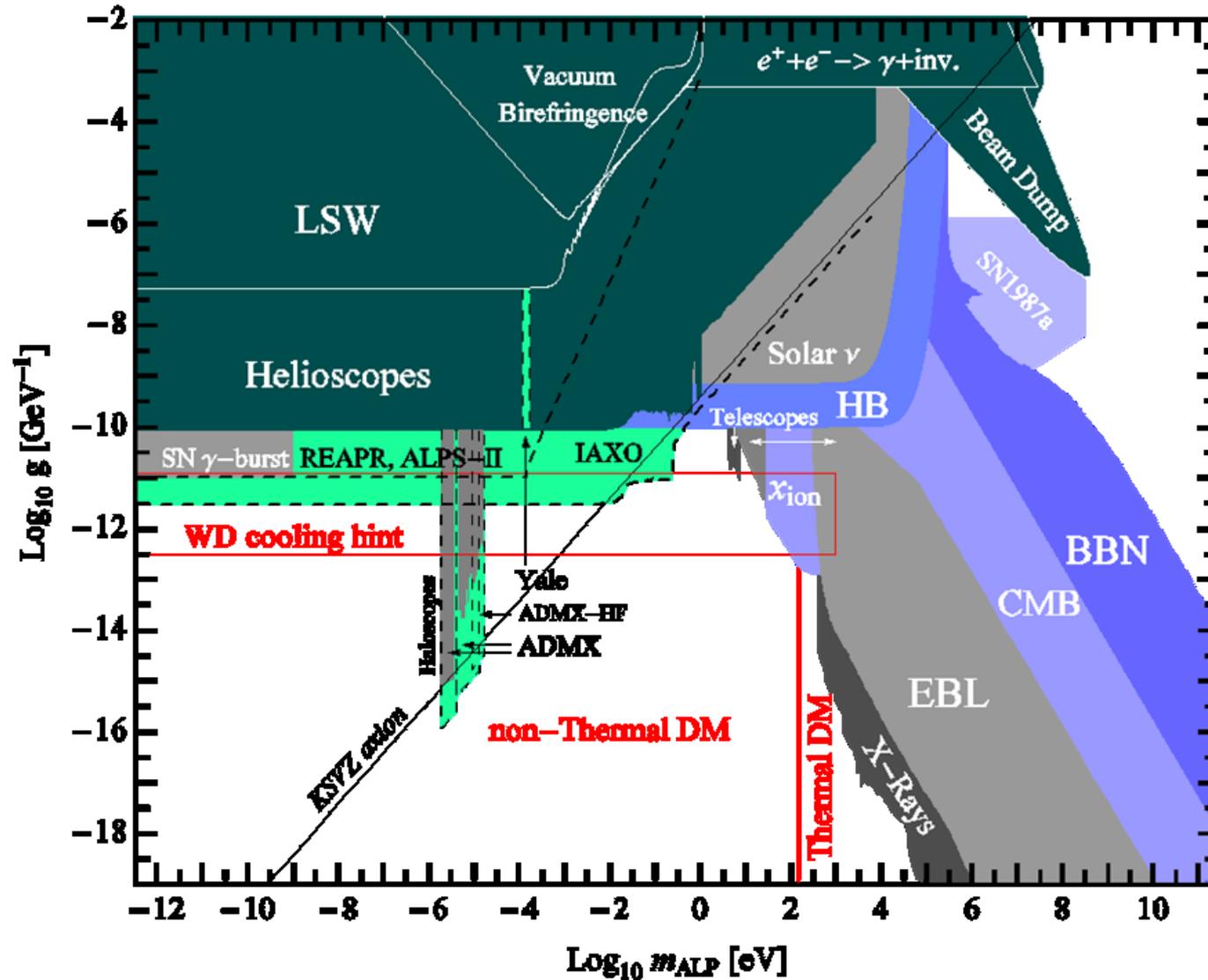
- Direkter Nachweis (WIMP Streuung an Kernen)
- Indirekter Nachweis in kosmischer Strahlung
- Produktion von WIMPs in Hochenergiebeschleunigern

> Dunkle Materie aus WISPs

- Direkter Nachweis (WISP Signale in Hohlraumresonatoren)
- Indirekter Nachweis in Astrophysik und Kosmologie
- Produktion von WISPs mit Hochleistungslasern und Nachweis als Licht, das scheinbar durch die Wand geht

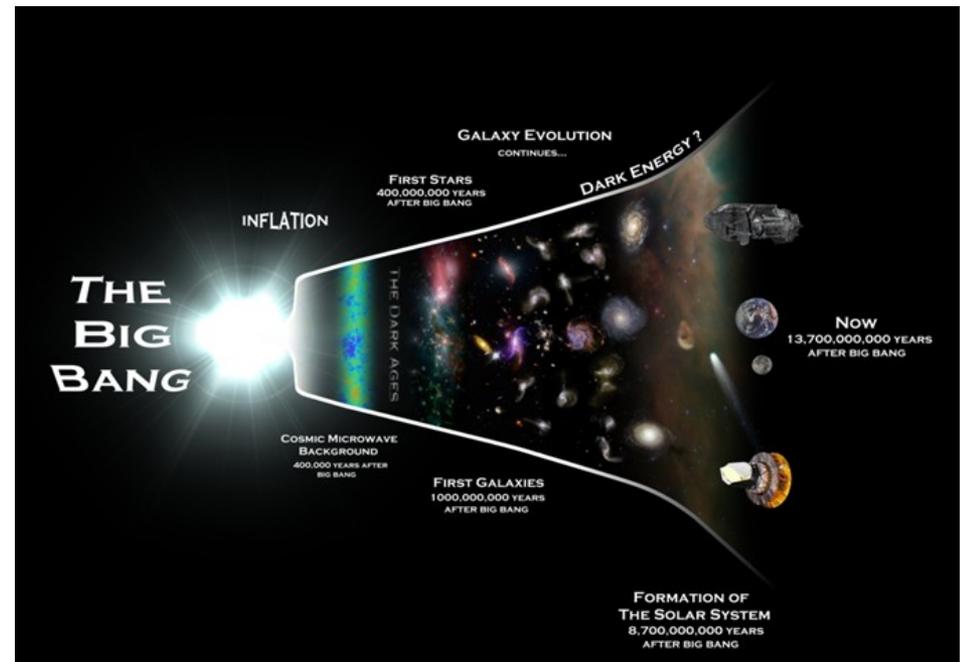


Axionen und ALPs in Kosmologie, Astrophysik + Labor



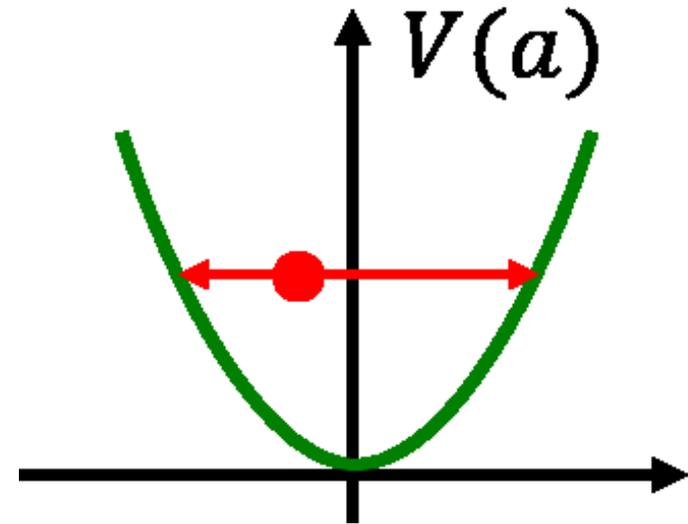
Produktionsmechanismus von Axion und ALP DM

- Nach Inflation: Axion/ALP-Felder räumlich homogen, mit zufälligem Anfangswert



Produktionsmechanismus von Axion und ALP DM

- > Nach Inflation: Axion/ALP-Felder räumlich homogen, mit zufälligem Anfangswert
- > Klassische Oszillationen von Axion/ALP-Feldern = Bose Kondensaten = extrem nicht-relativistische dunkle Materie



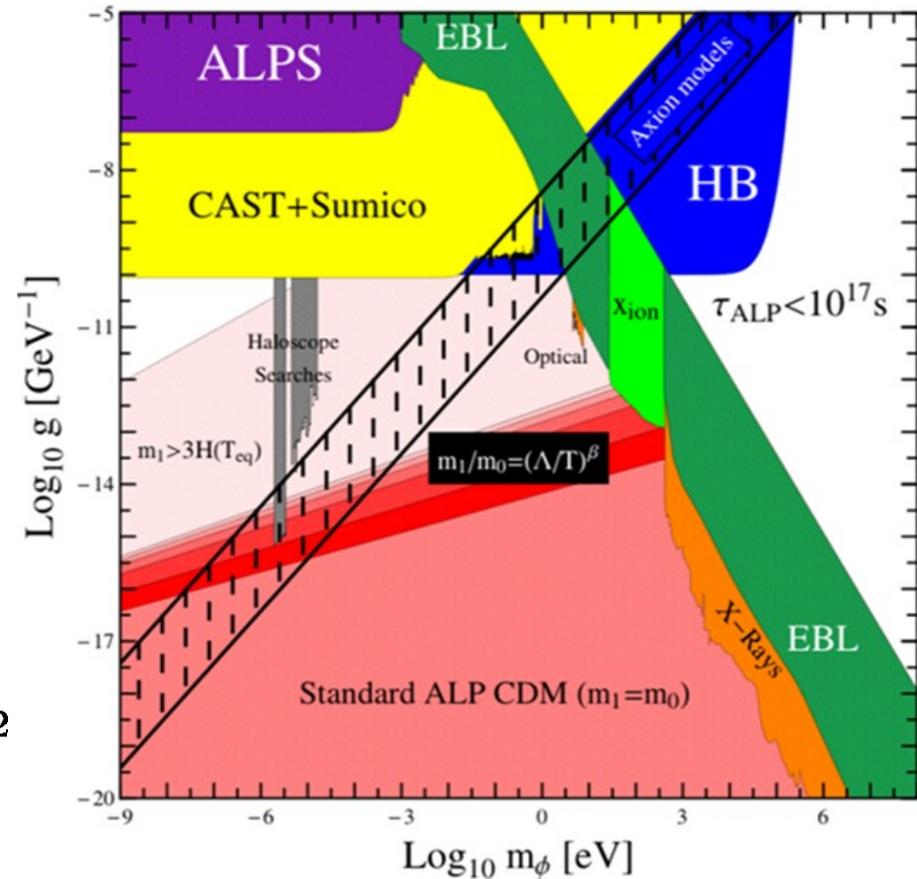
Produktionsmechanismus von Axion und ALP DM

- Nach Inflation: Axion/ALP-Felder räumlich homogen, mit zufälligem Anfangswert
- Klassische Oszillationen von Axion/ALP-Feldern = Bose Kondensaten = extrem nicht-relativistische dunkle Materie
- Axionanteil an Energie/Masseninhalt des gegenwärtigen Universums

$$\Omega_a h^2 \approx 0.7 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{7/6} \left(\frac{\theta_i}{\pi} \right)^2$$

- ALP-anteil

$$\Omega_{a_i} h^2 \approx 10^{-2} \times \left(\frac{m_{a_i}}{\mu\text{eV}} \right)^{1/2} \left(\frac{f_{a_i}}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^2 \left(\frac{\theta_{a_i}}{\pi} \right)^2$$



Direkte Suche nach Axion oder ALP DM

- > Axion oder ALP Kopplung an zwei Photonen,

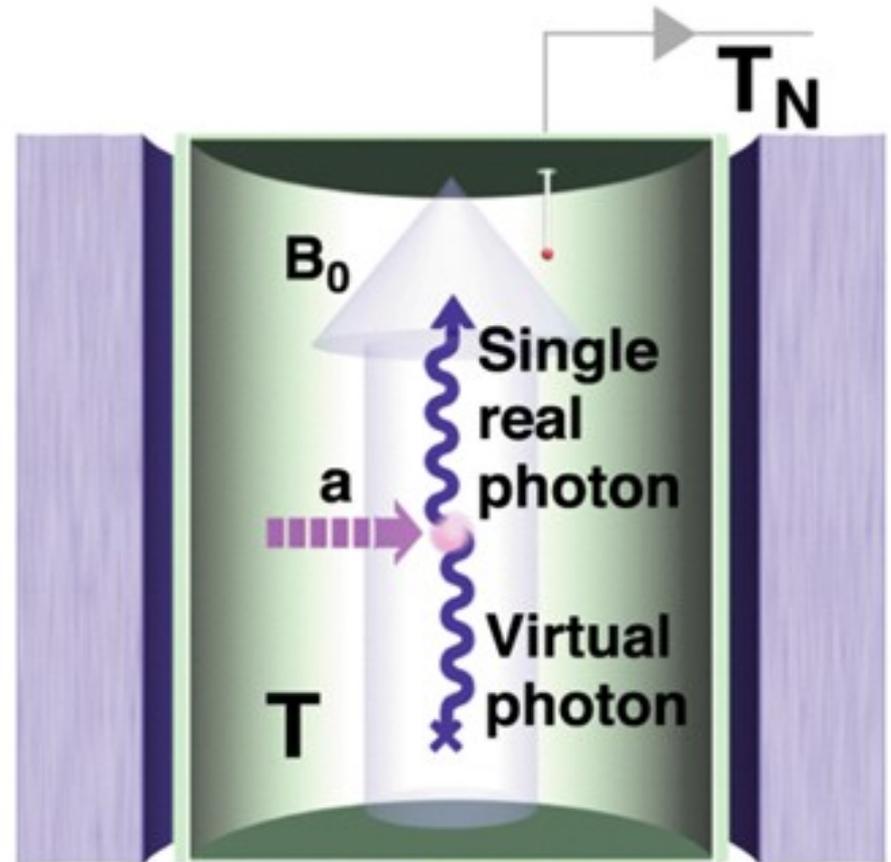
$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} \underbrace{\frac{\alpha}{2\pi} \frac{C_{a\gamma}}{f_a}}_{g_{a\gamma}} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$
$$= g_{a\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

- > Axion oder ALP DM -> Photon Konversion in einem Hohlraumresonator, der in einem Magnetfeld platziert ist,

cf. **Sikivie '83**

- > Beste Sensitivität : Masse = Resonanzfrequenz

$$m_a = 2\pi\nu \sim 4 \mu\text{eV} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)$$



Direkte Suche nach Axion oder ALP DM

- Axion oder ALP Kopplung an zwei Photonen,

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} \underbrace{\frac{\alpha}{2\pi} \frac{C_{a\gamma}}{f_a}}_{g_{a\gamma}} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$
$$= g_{a\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

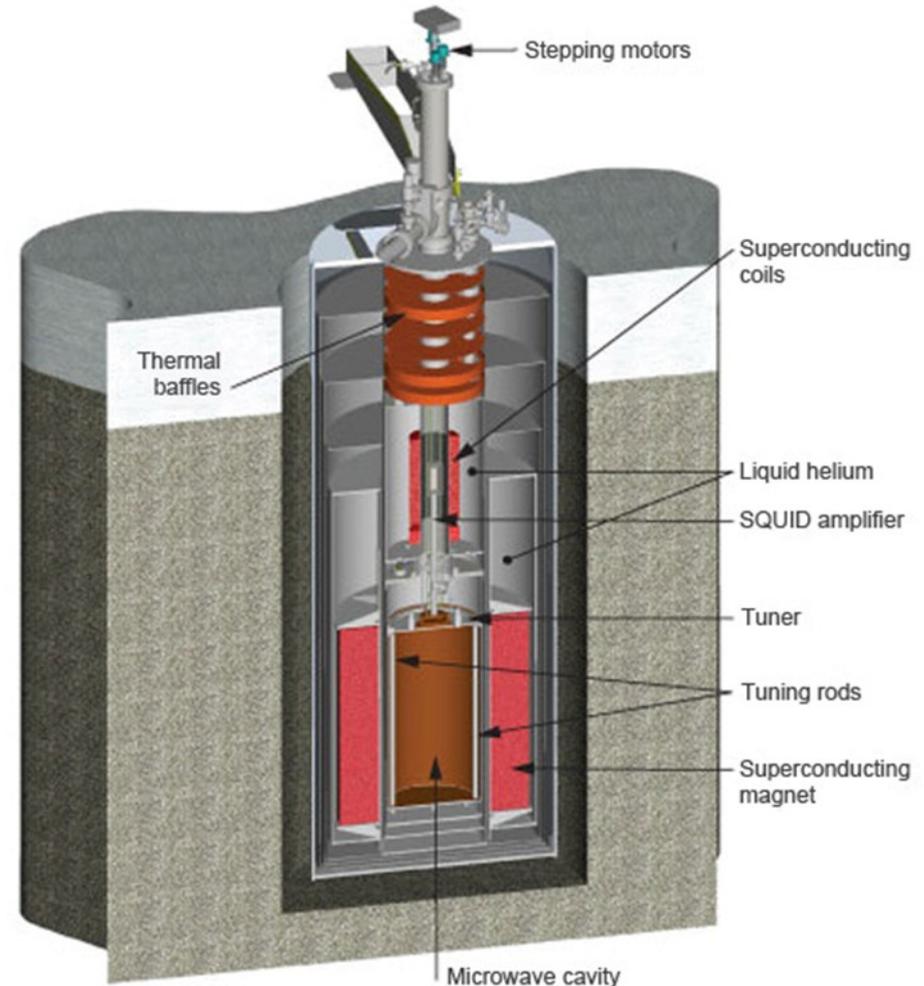
- Axion oder ALP DM -> Photon Konversion in einem Hohlraumresonator, der in einem Magnetfeld platziert ist,

cf. **Sikivie '83**

- Beste Sensitivität : Masse = Resonanzfrequenz

$$m_a = 2\pi\nu \sim 4 \mu\text{eV} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)$$

- ADMX (Seattle)



Direkte Suche nach Axion oder ALP DM

- Axion oder ALP Kopplung an zwei Photonen,

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} \underbrace{\frac{\alpha}{2\pi} \frac{C_{a\gamma}}{f_a}}_{g_{a\gamma}} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$
$$= g_{a\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

- Axion oder ALP DM -> Photon Konversion in einem Hohlraumresonator, der in einem Magnetfeld platziert ist,

cf. **Sikivie '83**

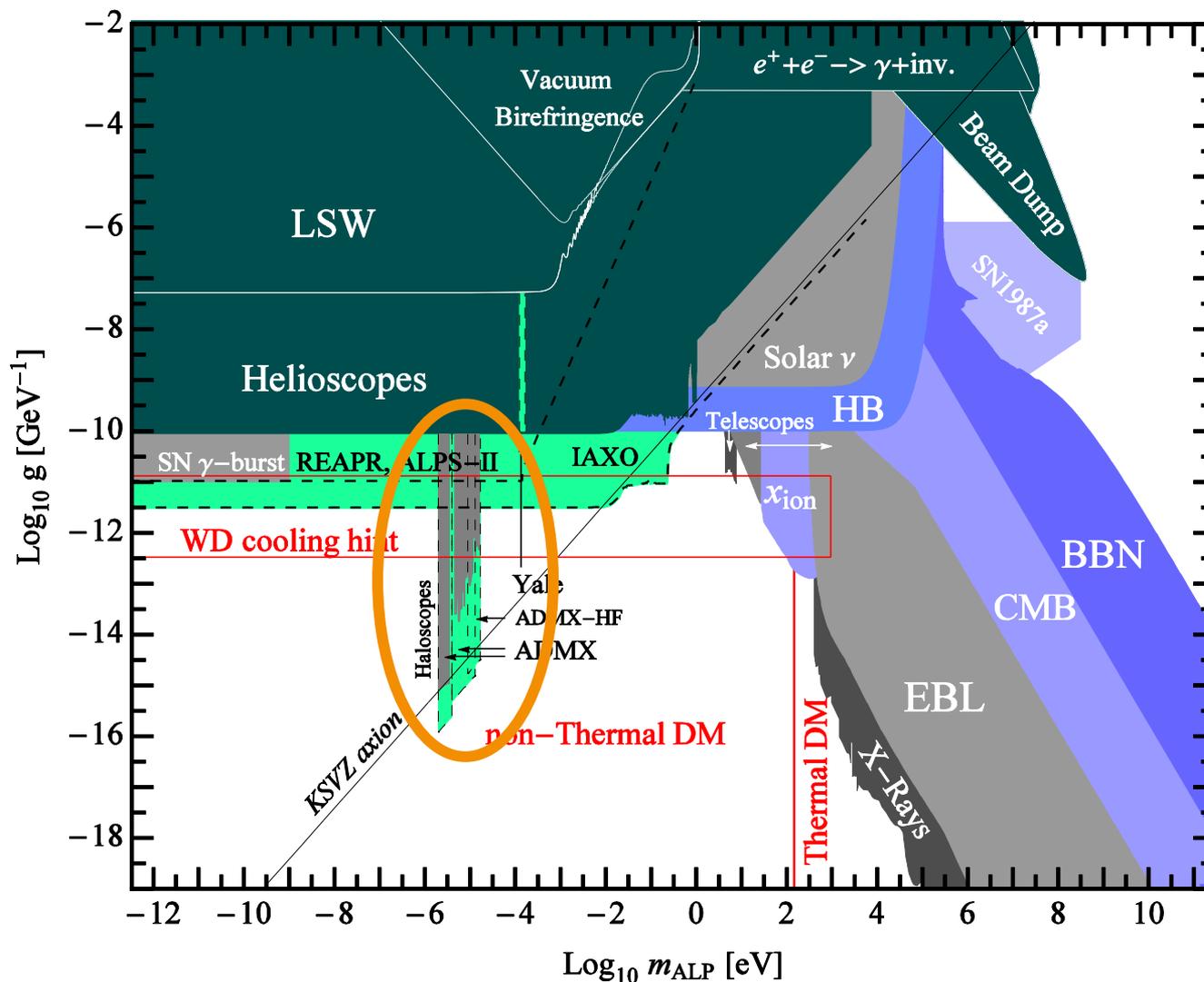
- Beste Sensitivität : Masse = Resonanzfrequenz

$$m_a = 2\pi\nu \sim 4 \mu\text{eV} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)$$

- ADMX (Seattle)



Direkte Suche nach Axion oder ALP DM



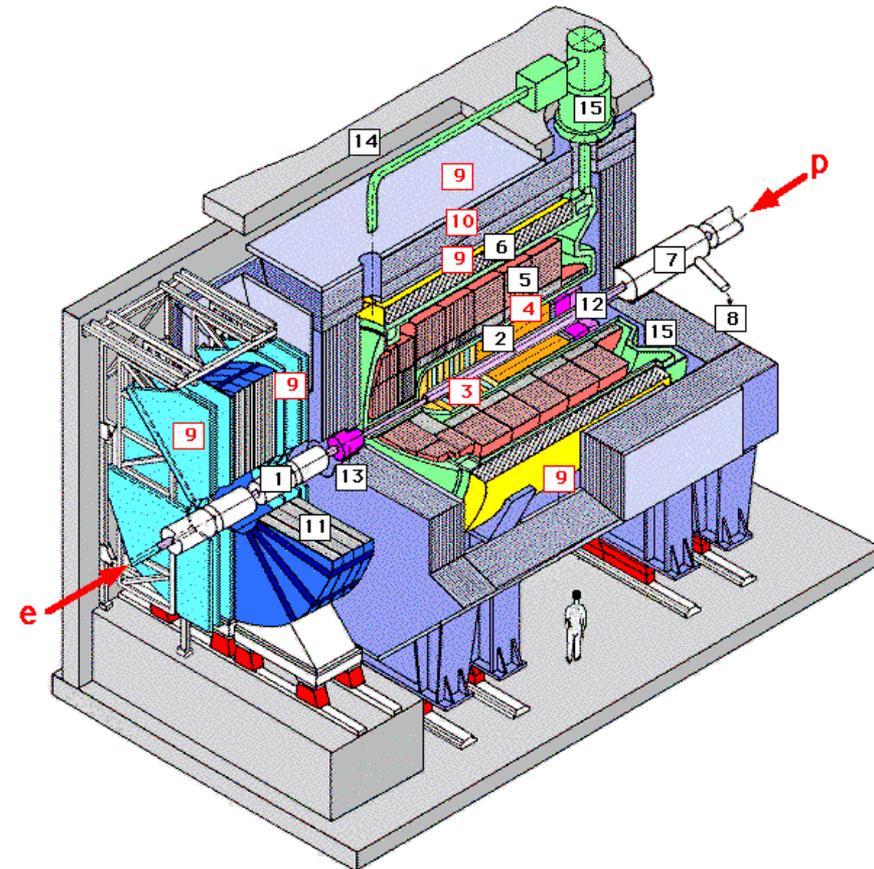
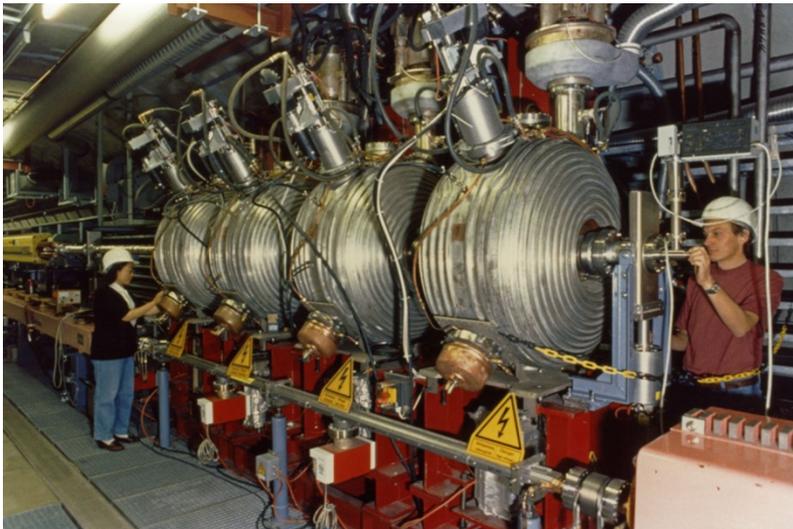
Direkte Suche nach Axion oder ALP DM: WISPDMX?

> Vorhandene Bauteile (DESY)

- HERA Protonring Hohlraumresonatoren
- H1 supraleitender Solenoid

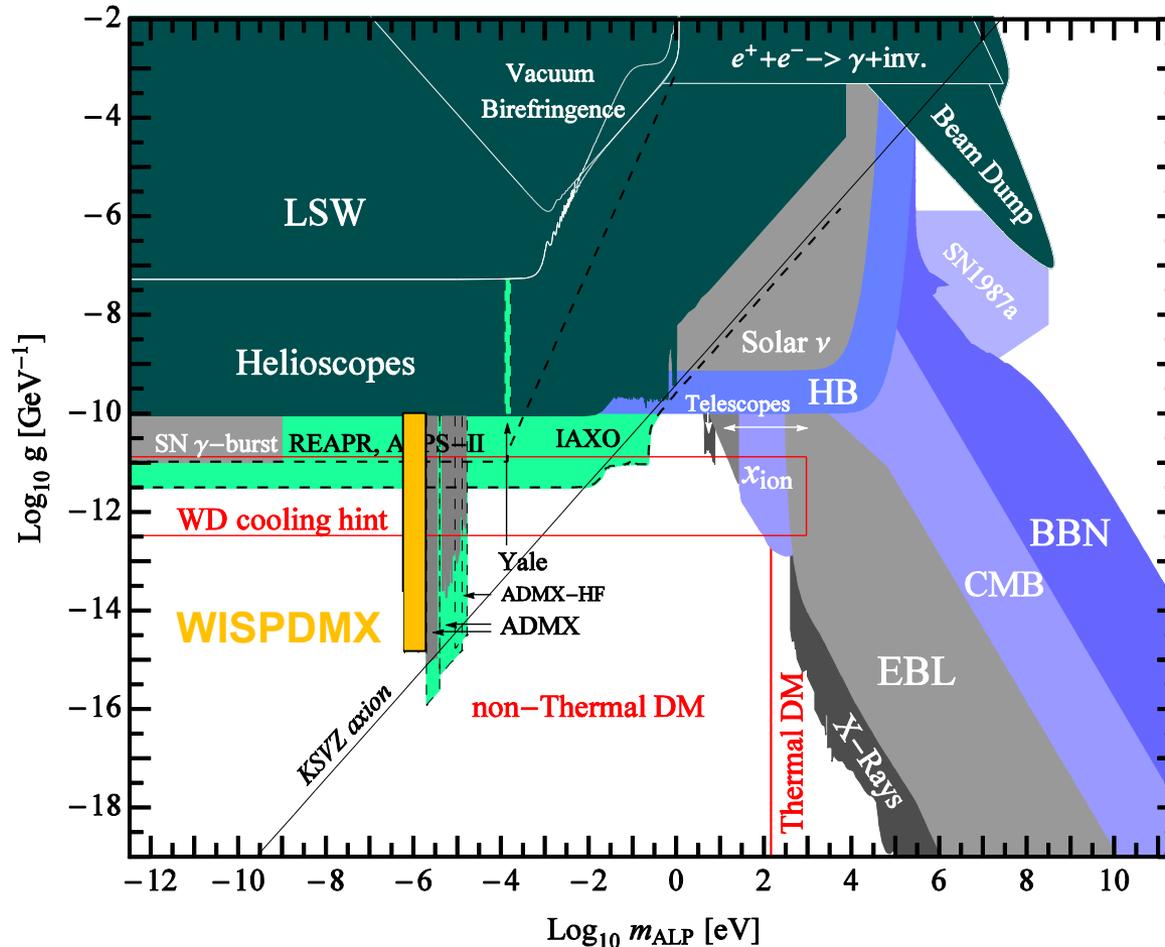
> Interessierter Partner (MPIfR Bonn)

- Empfänger, Verstärker, FFT, ...



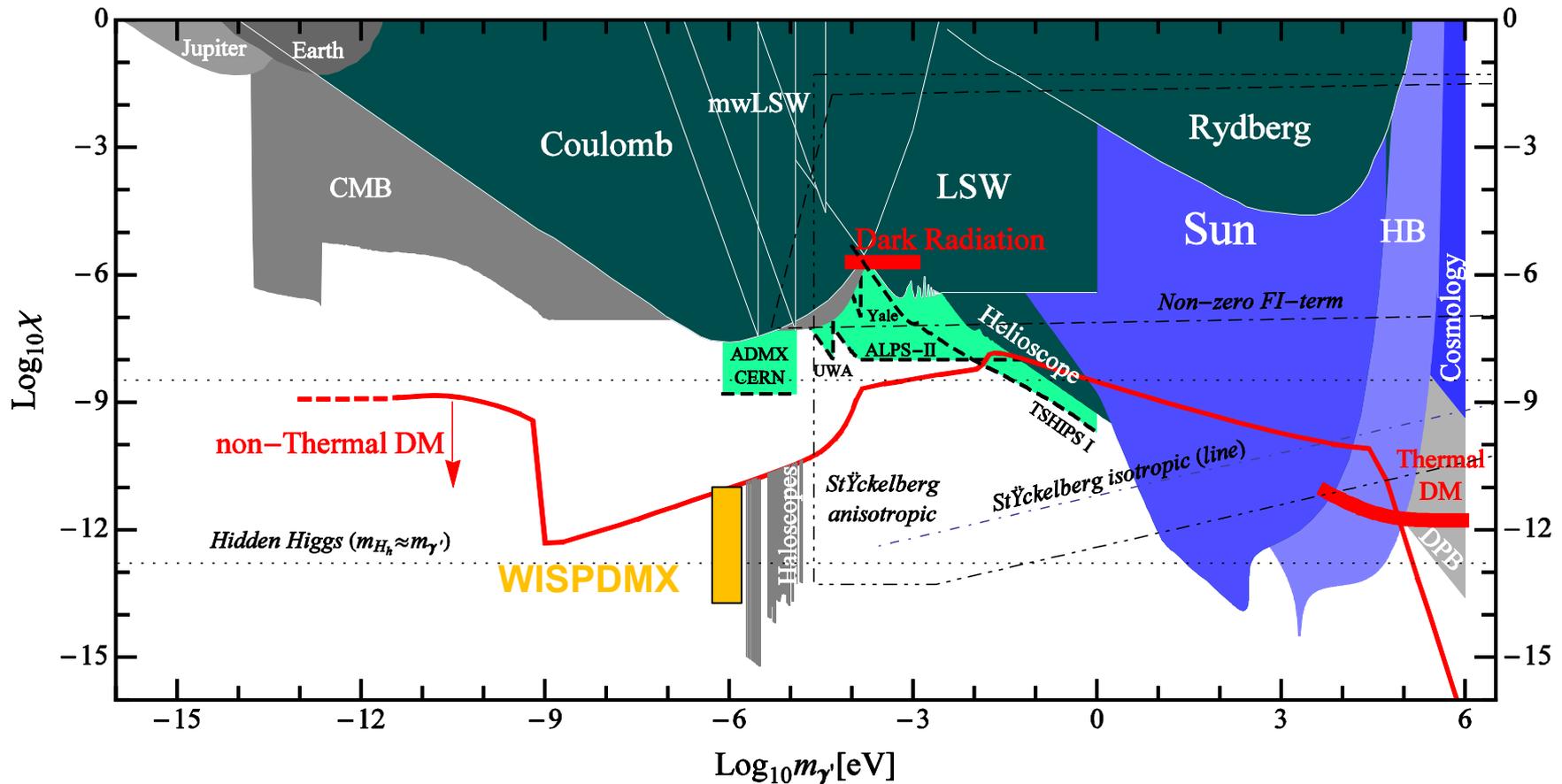
Direkte Suche nach Axion oder ALP DM

- WISPDMM könnte Massenregion unterhalb von ADMX proben: [Horns, Jaeckel, Lindner, Lobanov, Möller, AR, Sekutowicz, Trines, Westphal]



Direkte Suche nach HP DM

- Hohlraumresonator-Experimente auch sensitiv auf Hidden Photon DM

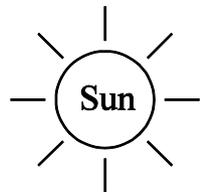
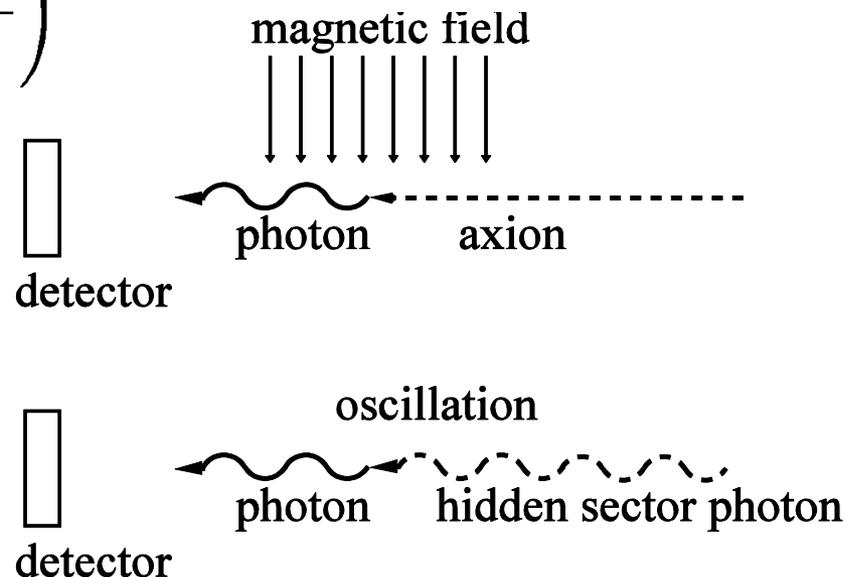


Suche nach solaren Axionen, ALPs und HPs

- > Sonne starke Quelle für WISPs
- > Helioskop-Suchen nach Axionen/ALPs und HPs

$$P(a \leftrightarrow \gamma) = 4 \frac{(g_{a\gamma} \omega B)^2}{m_a^4} \sin^2 \left(\frac{m_a^2}{4\omega} L_B \right)$$

$$P(\gamma \leftrightarrow \gamma') = 4\chi^2 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega} \right)$$



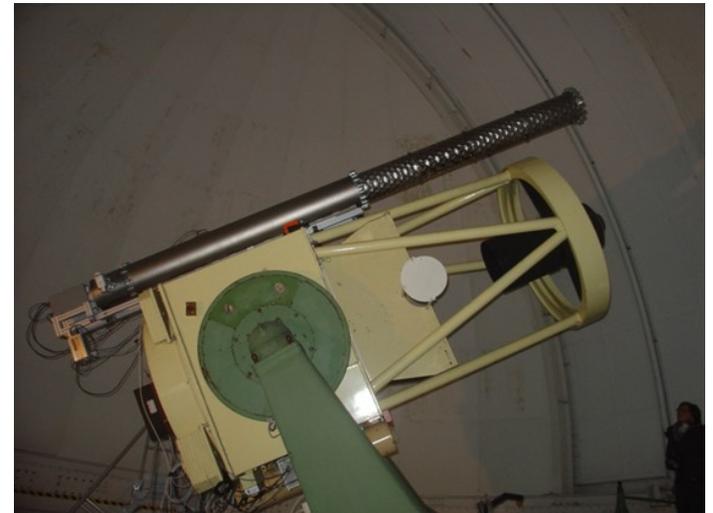
Suche nach solaren Axionen, ALPs und HPs

- Sonne starke Quelle für WISPs
- Helioskop-Suchen nach Axionen/ALPs und HPs

$$P(a \leftrightarrow \gamma) = 4 \frac{(g_{a\gamma} \omega B)^2}{m_a^4} \sin^2 \left(\frac{m_a^2}{4\omega} L_B \right)$$

$$P(\gamma \leftrightarrow \gamma') = 4\chi^2 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega} \right)$$

- CAST ... CERN Axion Solar Telescope
- SHIPS ... Solar Hidden Photon Search (Hamburg)



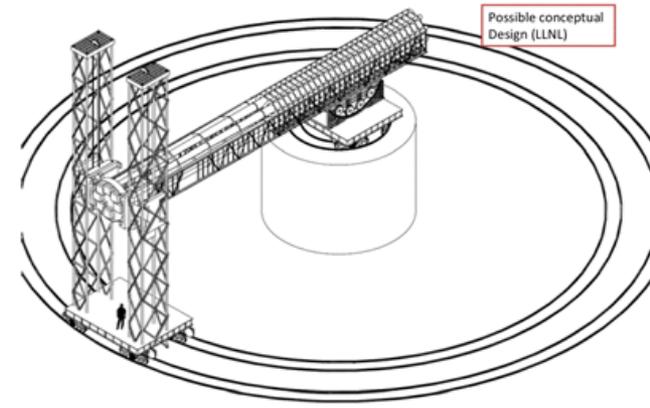
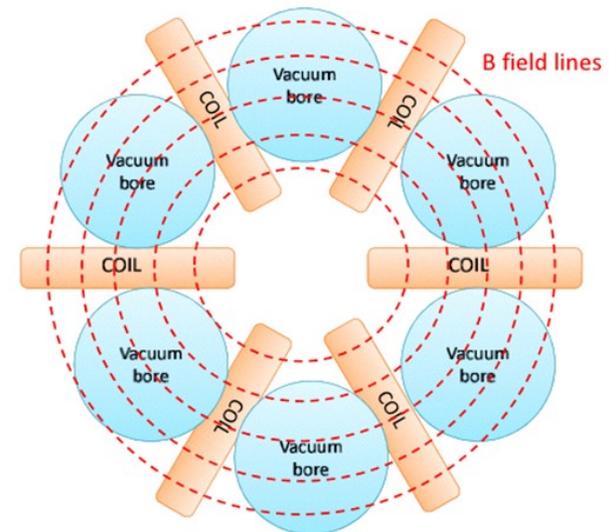
Suche nach solaren Axionen, ALPs und HPs

- Sonne starke Quelle für WISPs
- Helioskop-Suchen nach Axionen/ALPs und HPs

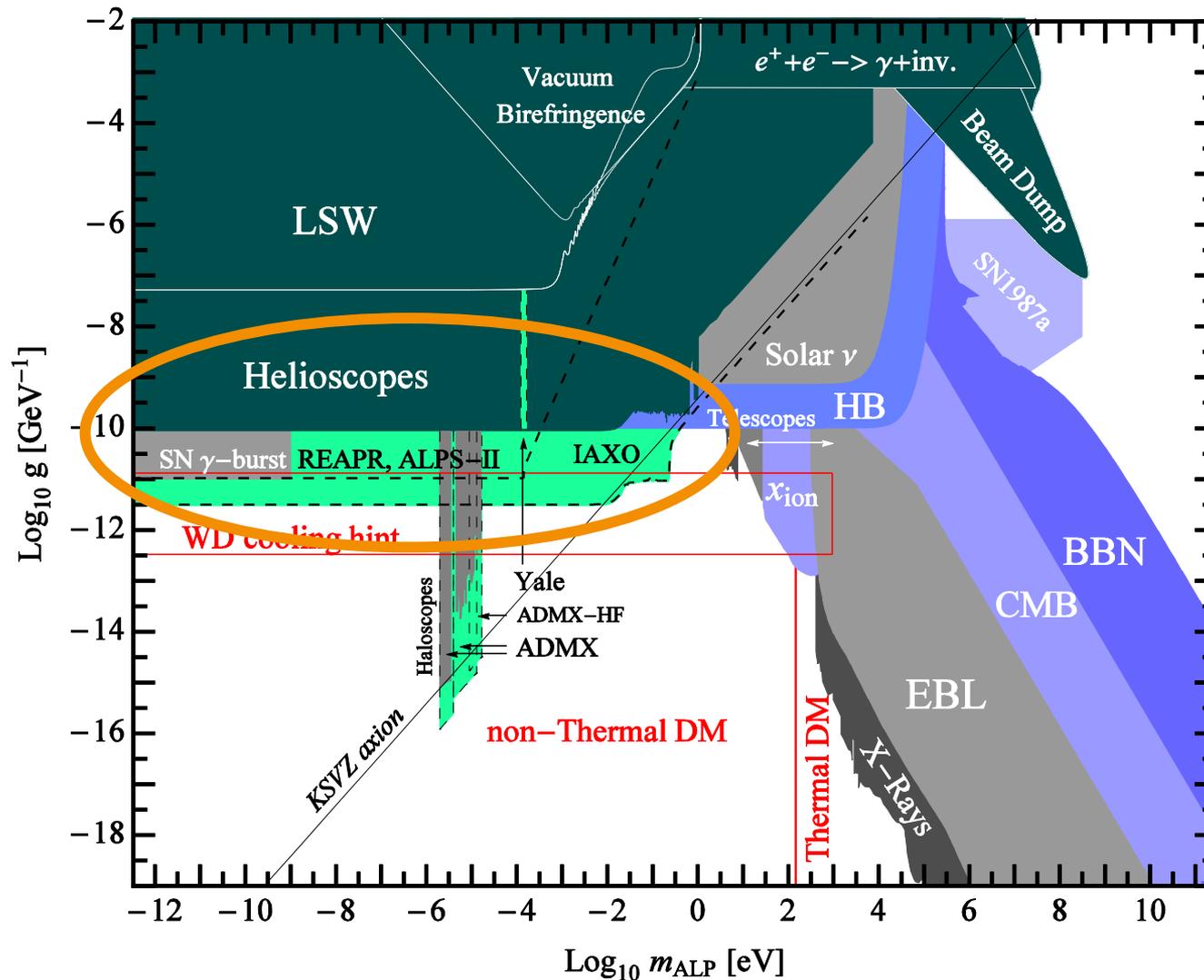
$$P(a \leftrightarrow \gamma) = 4 \frac{(g_{a\gamma} \omega B)^2}{m_a^4} \sin^2 \left(\frac{m_a^2}{4\omega} L_B \right)$$

$$P(\gamma \leftrightarrow \gamma') = 4\chi^2 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega} \right)$$

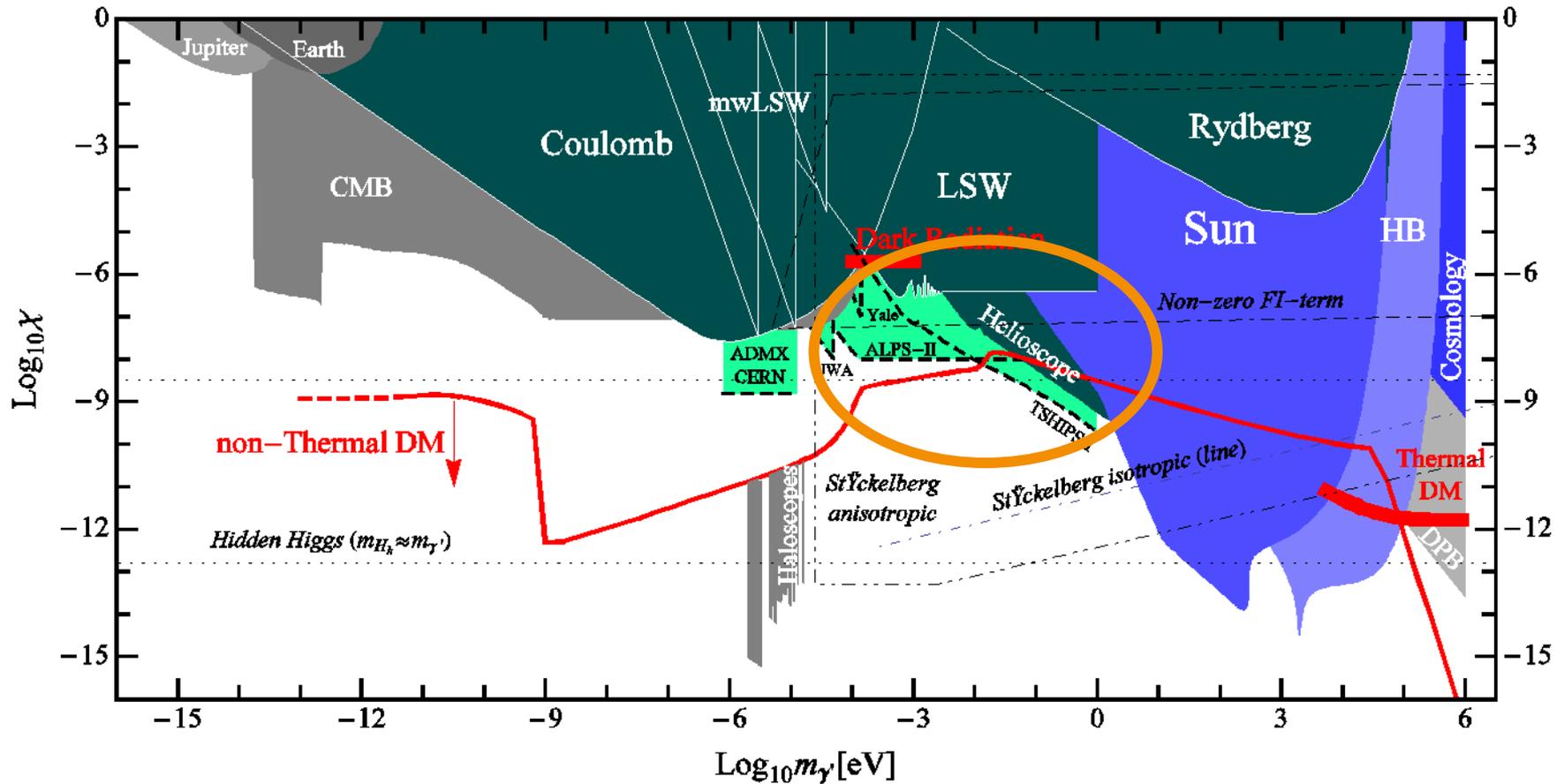
- CAST ... CERN Axion Solar Telescope
- SHIPS ... Solar Hidden Photon Search (Hamburg)
- IAXO ... International Axion Observatory



Suche nach solaren Axionen, ALPs und HPs



Suche nach solaren Axionen, ALPs und HPs



Hinweis auf Axion/ALP-Produktion in Weißen Zwergen?

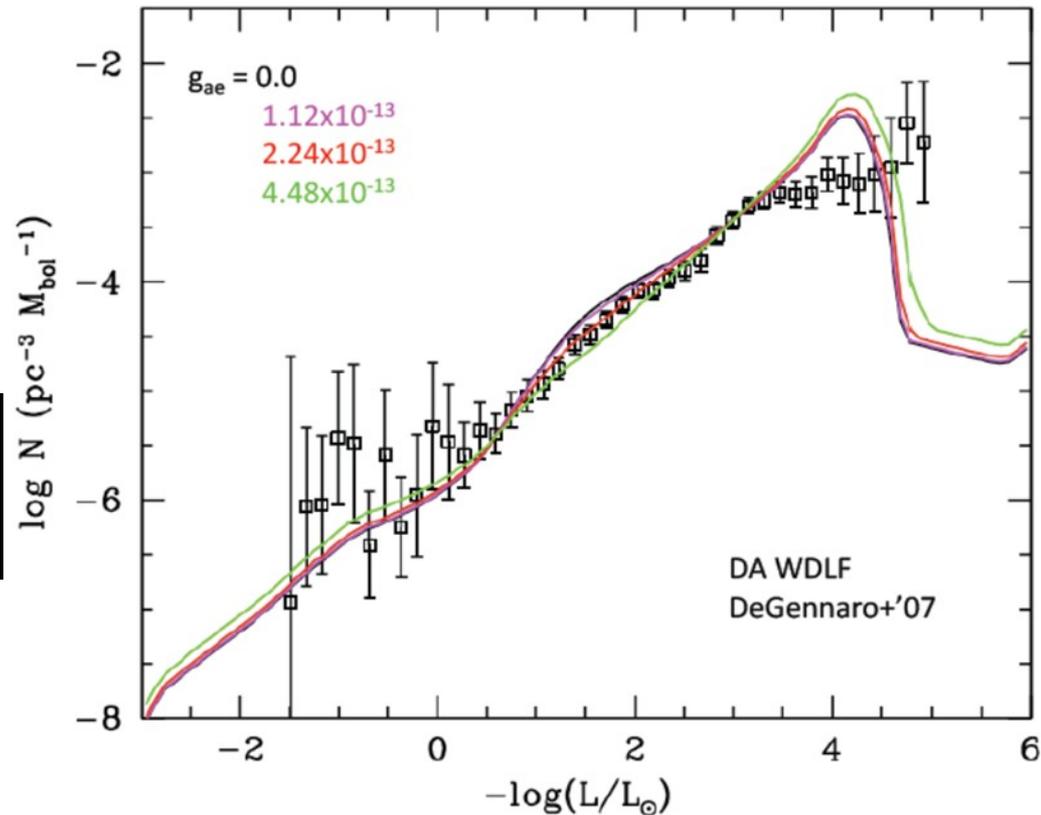
- Nicht-Standard-Energieverlustmechanismus in Weißen Zwergen
- Kompatibel mit Axion oder ALP Produktion in Elektron-Bremsstrahlung



- Erwarte auch Kopplung an Photonen, cf.

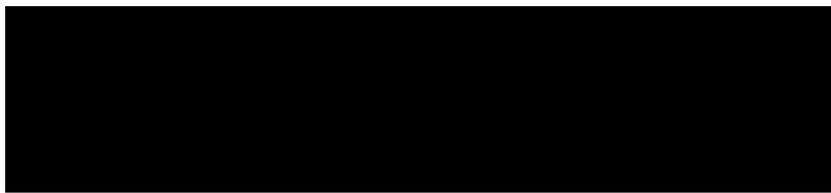
$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{1}{4} g_{a\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = g_{a\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B},$$

$$g_{a\gamma} \simeq \frac{\alpha}{2\pi f_a} \sim 10^{-12} \text{ GeV}^{-1} \left(\frac{10^9 \text{ GeV}}{f_a} \right)$$



Hinweis auf Axion/ALP-Produktion in Weißen Zwergen?

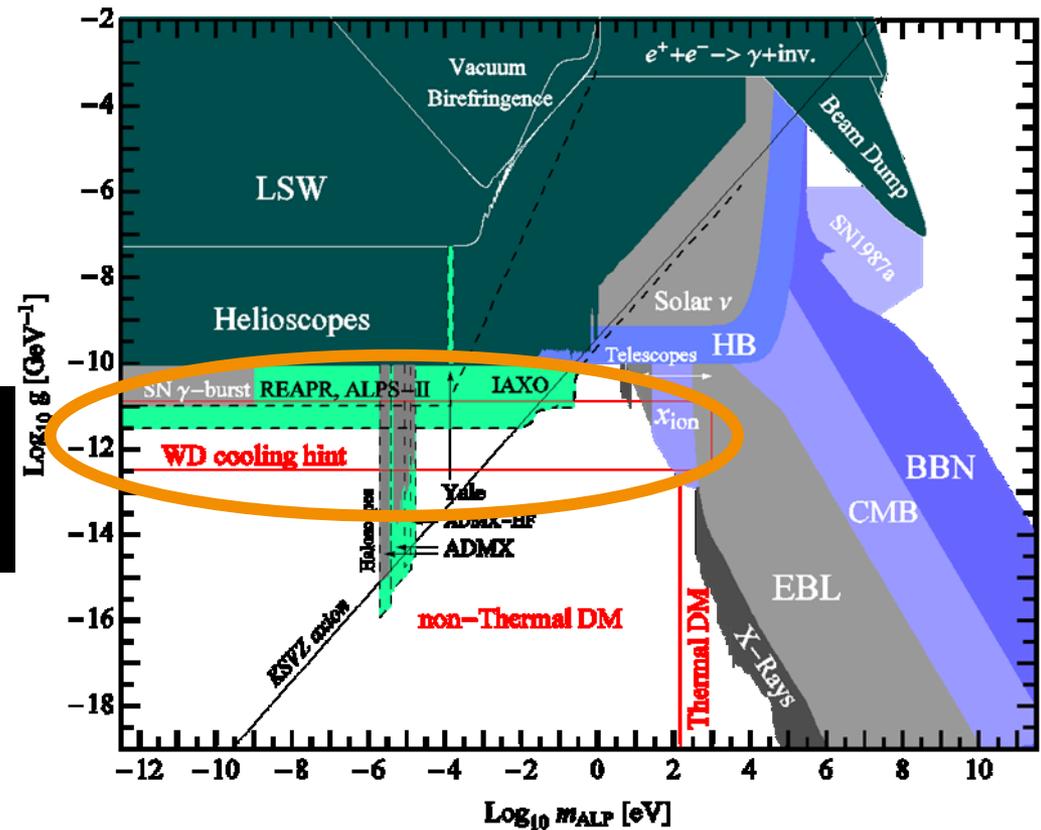
- Nicht-Standard-Energieverlustmechanismus in Weißen Zwergen
- Kompatibel mit Axion oder ALP Produktion in Elektron-Bremsstrahlung



- Erwarte auch Kopplung an Photonen, cf.

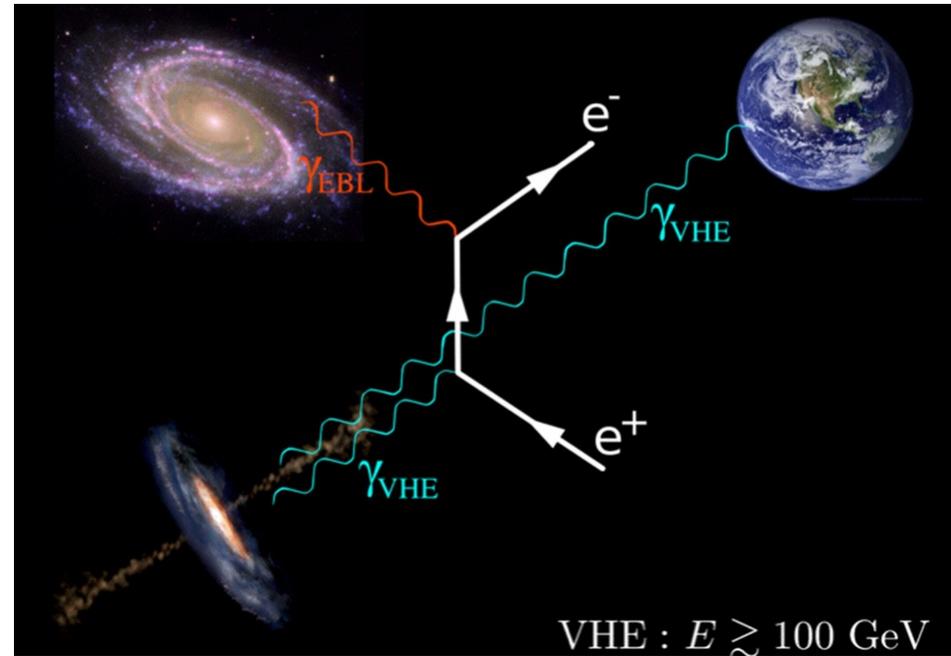
$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{1}{4} g_{a\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = g_{a\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B},$$

$$g_{a\gamma} \simeq \frac{\alpha}{2\pi f_a} \sim 10^{-12} \text{ GeV}^{-1} \left(\frac{10^9 \text{ GeV}}{f_a} \right)$$



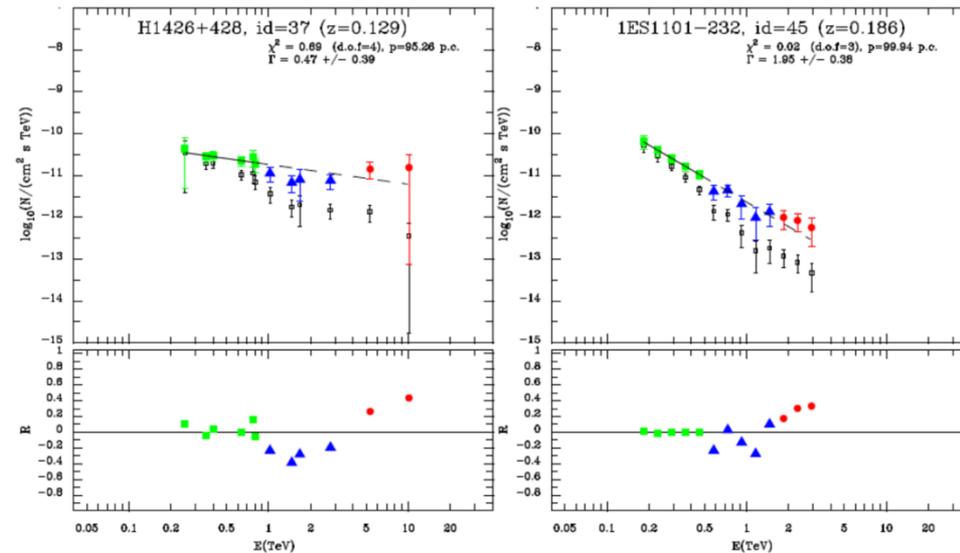
Hinweis auf Axion oder ALP Effekte in Propagation von TeV Photonen durch das Universum?

- TeV Photonen von entfernten Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) sollten Absorptionskanten zeigen auf Grund von Elektron-Positron-Paarproduktion am extragalaktischen Hintergrundlicht (EBL)



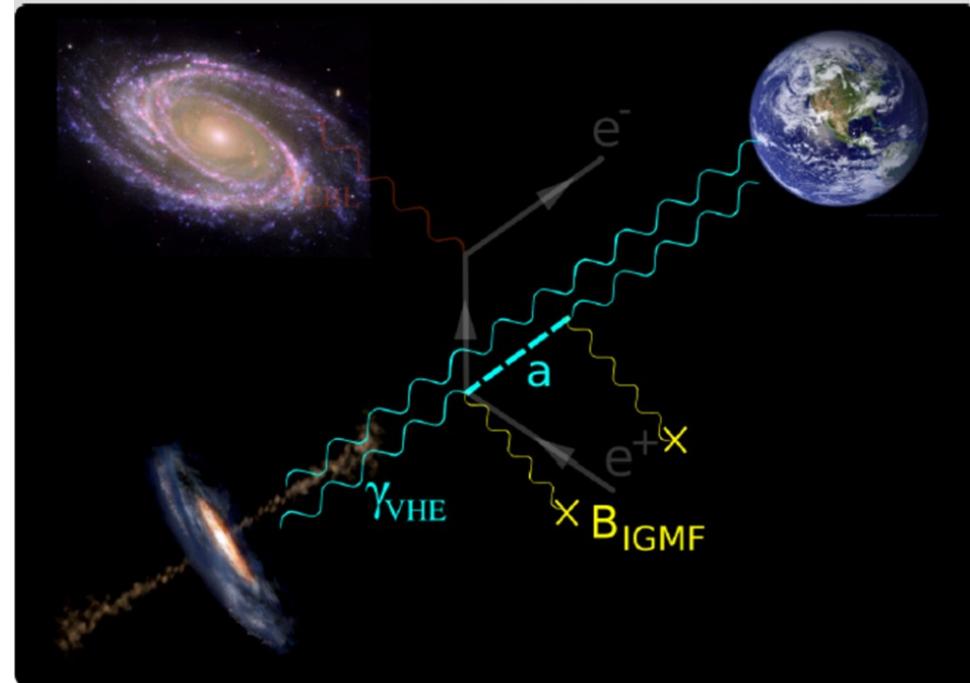
Hinweis auf Axion oder ALP Effekte in Propagation von TeV Photonen durch das Universum?

- TeV Photonen von entfernten Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) sollten Absorptionskanten zeigen auf Grund von Elektron-Positron-Paarproduktion am extragalaktischen Hintergrundlicht (EBL)
- Nicht der Fall:
 - 50 Spektren (HESS, MAGIC, Veritas), Annahme: minimales EBL; Absorption mehr als 4 sigma ausgeschlossen



Hinweis auf Axion oder ALP Effekte in Propagation von TeV Photonen durch das Universum?

- TeV Photonen von entfernten Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) sollten Absorptionskanten zeigen auf Grund von Elektron-Positron-Paarproduktion am extragalaktischen Hintergrundlicht (EBL)
- Nicht der Fall:
 - 50 Spektren (HESS, MAGIC, Veritas), Annahme: minimales EBL; Absorption mehr als 4 sigma ausgeschlossen
- Mögliche Erklärung: Photon \leftrightarrow ALP Konversion in astrophysikalischen Magnetfeldern

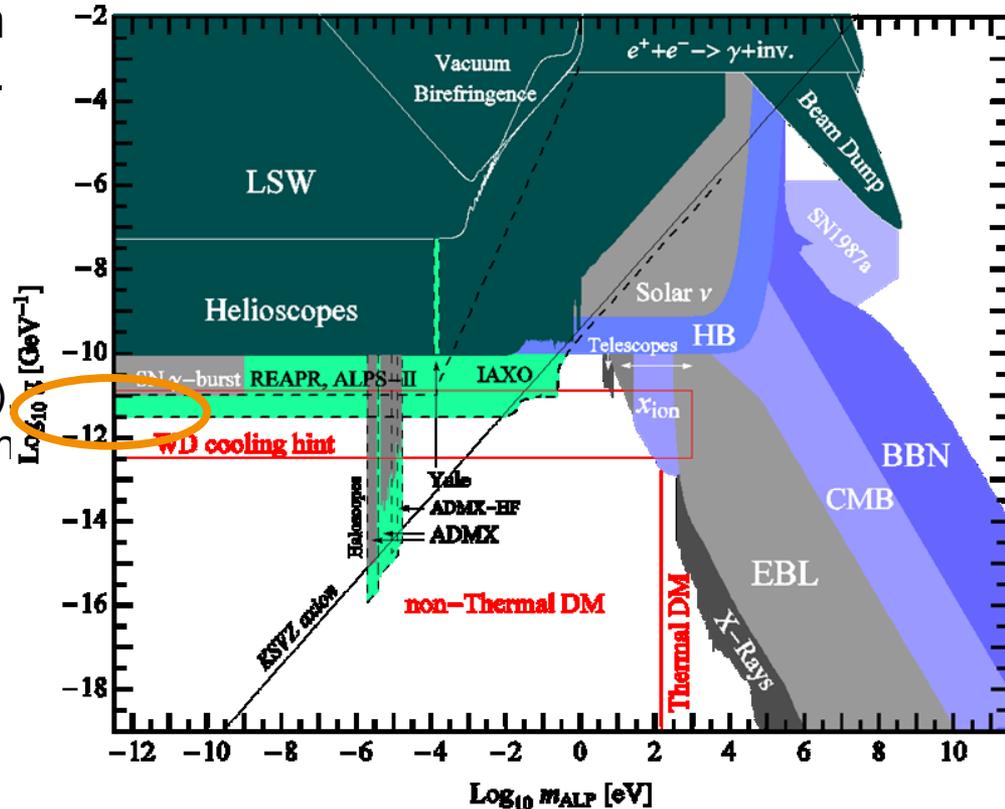


$$m_{a_i} \lesssim \text{neV}, \quad g_{i\gamma} \equiv \frac{\alpha}{2\pi} \frac{C_{i\gamma}}{f_{a_i}} \sim 10^{-12} \div 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

$$\Rightarrow f_{a_i} \sim 10^8 \div 10^9 C_{i\gamma} \text{ GeV}$$

Hinweis auf Axion oder ALP Effekte in Propagation von TeV Photonen durch das Universum?

- TeV Photonen von entfernten Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) sollten Absorptionskanten zeigen auf Grund von Elektron-Positron-Paarproduktion am extragalaktischen Hintergrundlicht (EBL)
- Nicht der Fall:
 - 50 Spektren (HESS, MAGIC, Veritas) Annahme: minimales EBL; Absorption mehr als 4 sigma ausgeschlossen
- Mögliche Erklärung: Photon <-> ALP Konversion in astrophysikalischen Magnetfeldern



$$m_{a_i} \lesssim \text{neV}, \quad g_{i\gamma} \equiv \frac{\alpha}{2\pi} \frac{C_{i\gamma}}{f_{a_i}} \sim 10^{-12} \div 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

$$\Rightarrow f_{a_i} \sim 10^8 \div 10^9 C_{i\gamma} \text{ GeV}$$



Suche nach ALPs und HPs via Licht-durch-die-Wand

- WISPs können ähnlich wie Neutrinos Wände durchqueren
- Licht-durch-die-Wand Experiment: (hier ALPS (@DESY)):



$$P(a \leftrightarrow \gamma) = 4 \frac{(g_{a\gamma} \omega B)^2}{m_a^4} \sin^2 \left(\frac{m_a^2}{4\omega} L_B \right)$$

Suche nach ALPs und HPs via Licht-durch-die-Wand

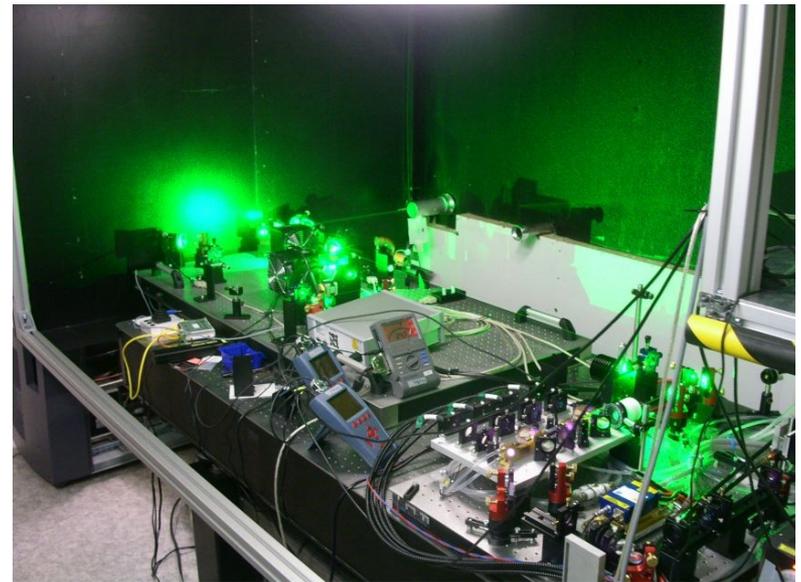
> ALPS:

- HERA Dipol (8.4 m, 5 T)
- Primärlaser: enhanced LIGO laser (1064 nm, 35 W)
- frequenzverdoppelt: 523 nm
- 300-fache Leistungserhöhung in Fabry-Perot-Cavity

> ALPS-II Pläne (2016+):

- 12 + 12 HERA Dipole
- Cavity auch auf Regenerationsseite

> Ähnliche Pläne auch am Fermilab (REAPR)



Suche nach ALPs und HPs via Licht-durch-die-Wand

> ALPS:

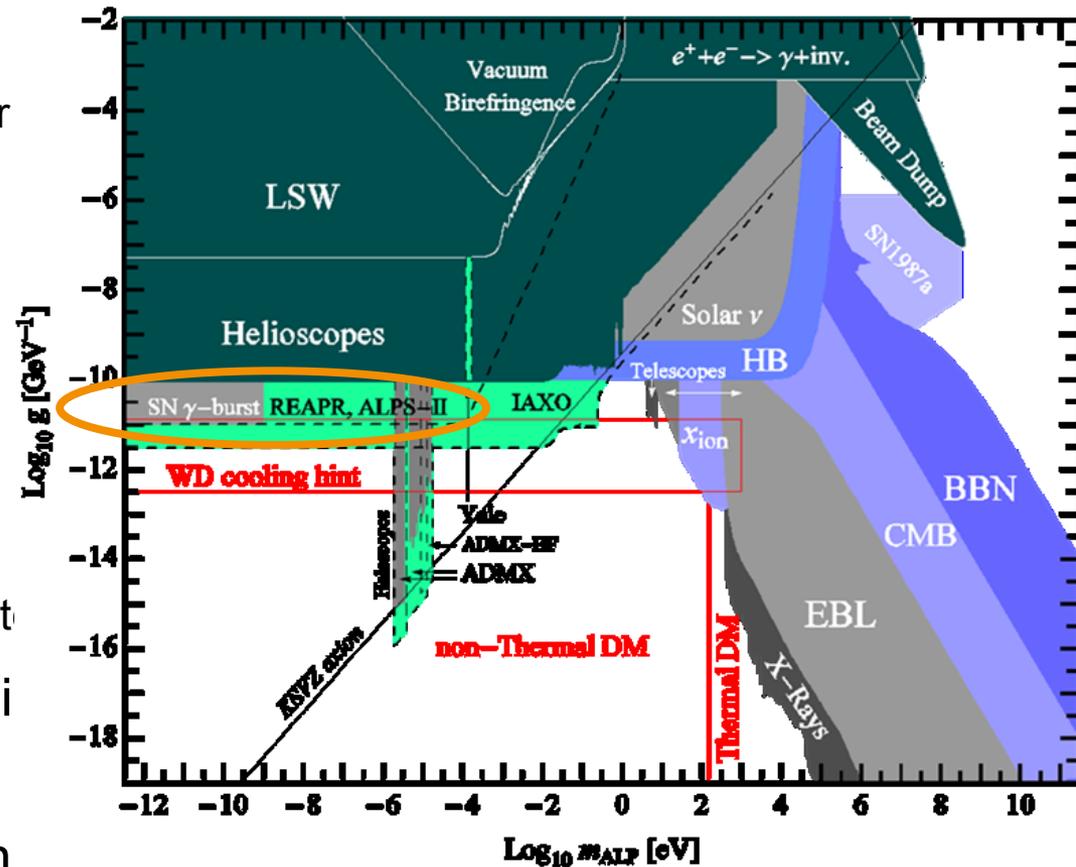
- HERA Dipol (8.4 m, 5 T)
- Primärlaser: enhanced LIGO laser (1064 nm, 35 W)
- frequenzverdoppelt: 523 nm
- 300-fache Leistungserhöhung in Fabry-Perot-Cavity

> ALPS-II Pläne (2016+):

- 12 + 12 HERA Dipole
- Cavity auch auf Regenerationsseite

> Ähnliche Pläne auch am Fermi (REAPR)

> Übernächste Generation: noch eine Größenordnung besser



- Axionen sind ähnlich gut motivierte Kandidaten für die dunkle Materie als Neutralinos
- Einbettung in Stringtheorie legt friedliche Koexistenz von Axionen und Neutralinos nahe, aber darüber hinaus auch die Existenz von weiteren ultraleichten Teilchen: ALPs und HPs
- ALPs und HPs auch Kandidaten für die dunkle Materie
- Weltweite experimentelle Aktivitäten:
 - Direkte Suche nach Axion/ALP oder HP DM (ADMX)
 - Suche nach solaren Axionen/ALPs und HPs (CAST, SHIPS, IAXO?)
 - Suche nach Licht-durch-die-Wand (... , ALPS-II?, REAPR?)
- In Anbetracht des Entdeckungspotentials und im Vergleich mit der personellen und finanziellen Ausstattung der experimentellen Suchen nach Neutralinos: eine Menge Steigerungspotential!