Einblick in versteckte Welten

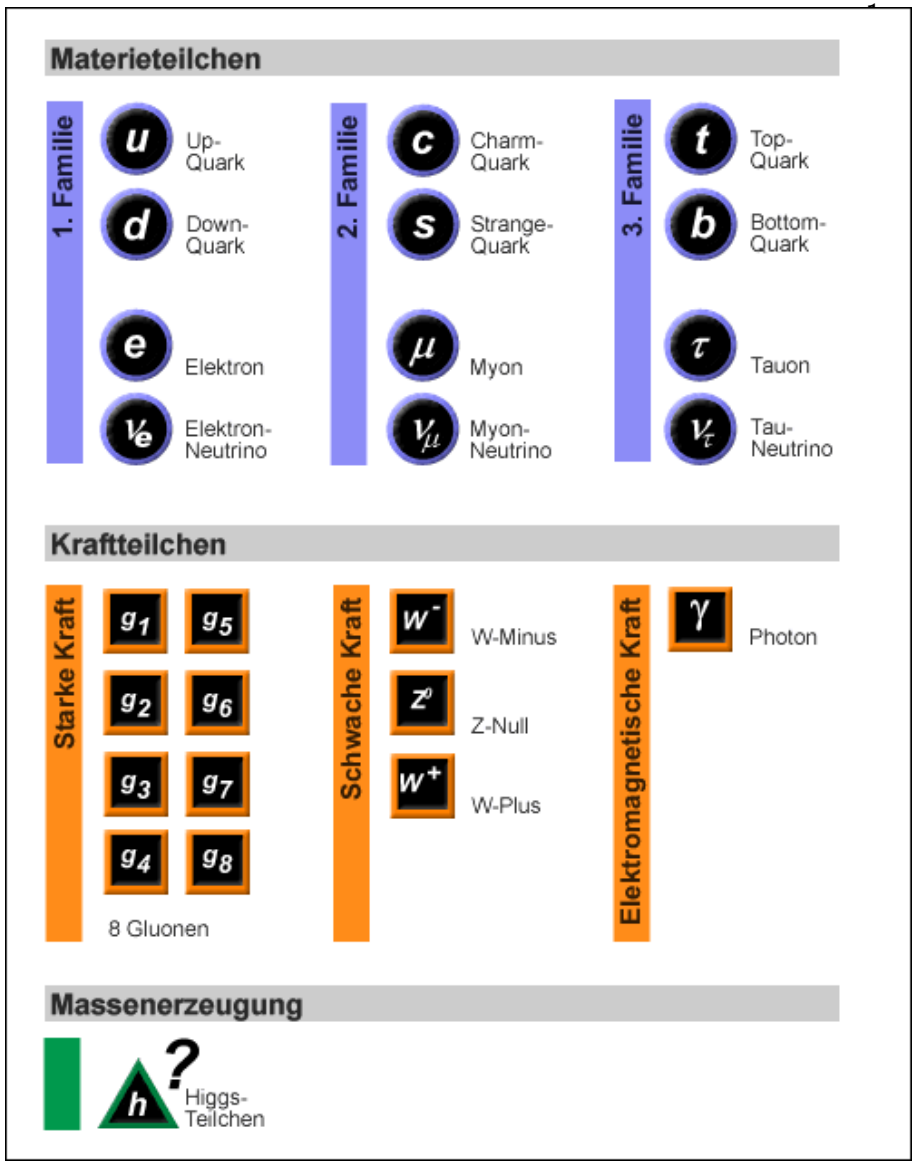
Teilchenphysik mit niederenergetischen Photonen

Andreas Ringwald

Physikalisches Kolloquium, Universität Jena, 19. Januar 2009

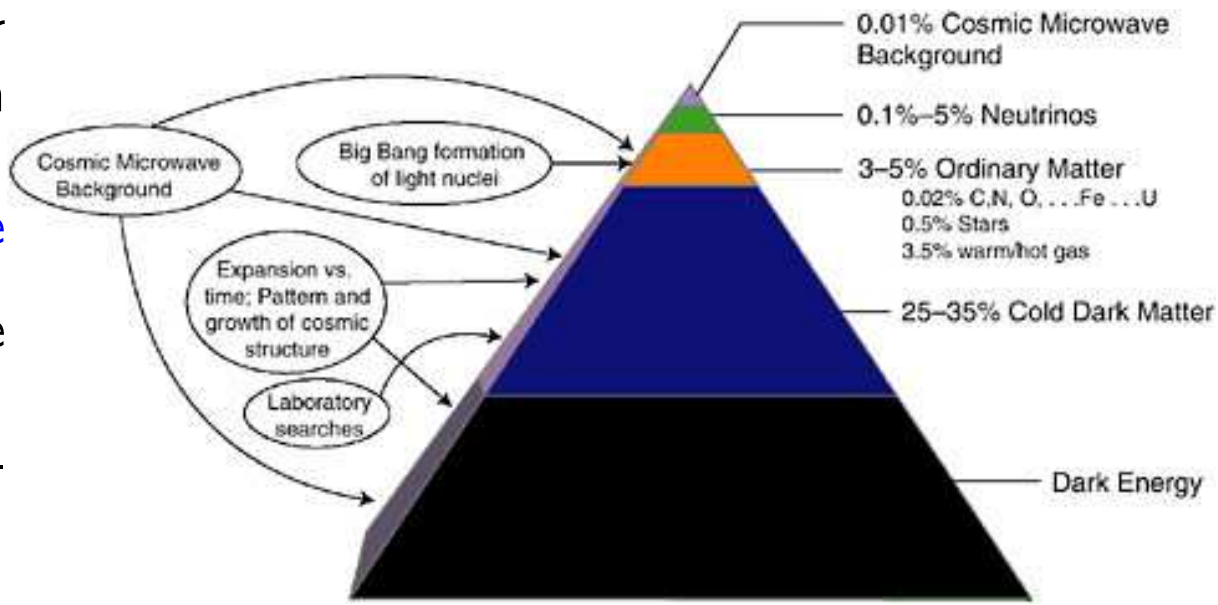
Motivation

- Bekannte Bausteine und Kräfte der Welt: Standardmodell



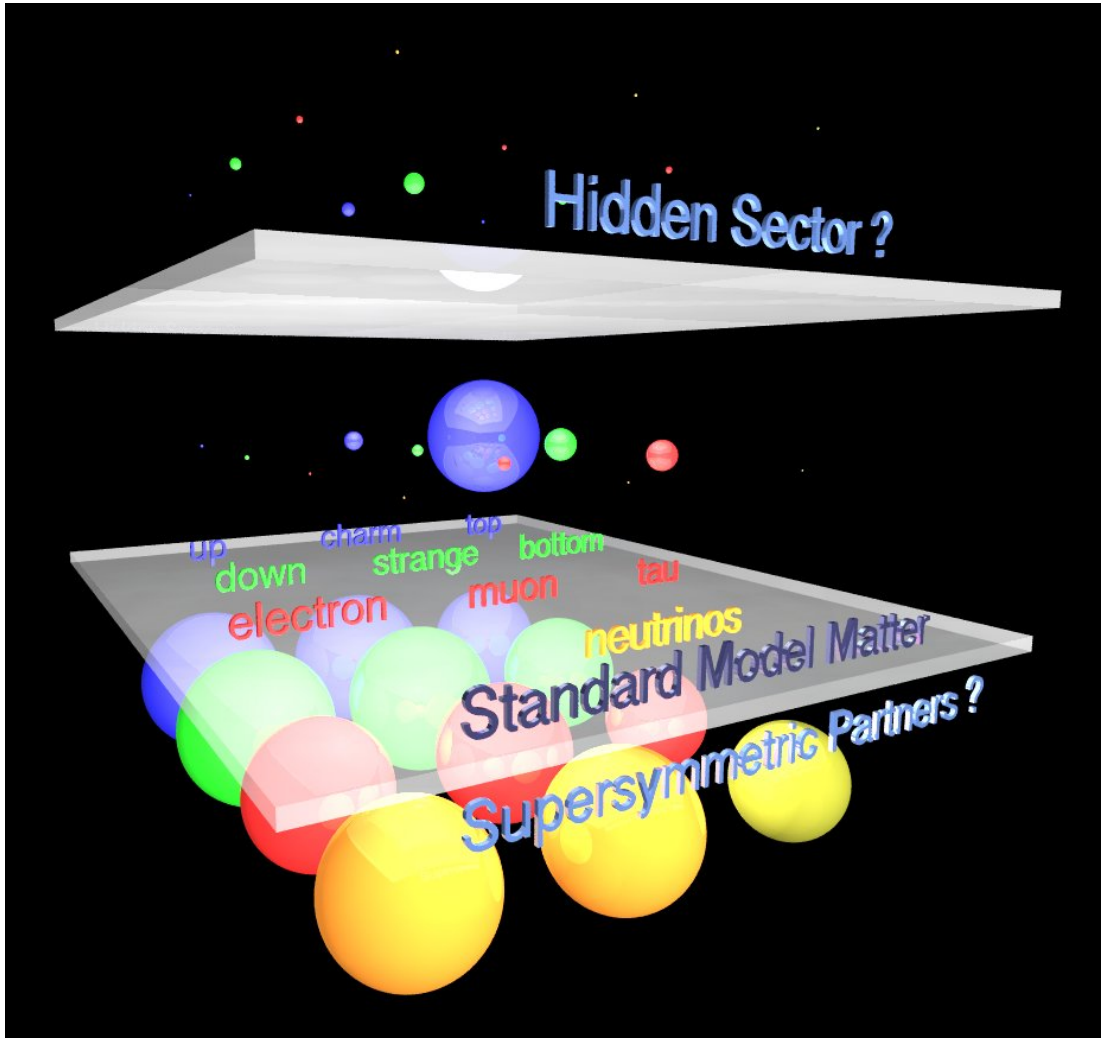
Motivation

- Bekannte Bausteine und Kräfte der Welt: Standardmodell
- Indiz für Existenz versteckter Welt von Teilchen und Kräften jenseits des Standardmodells: Dunkle Materie
  - schwach wechselwirkende schwere Teilchen (WIMPs)
  - sehr schwach wechselwirkende leichte Teilchen (WISPs)



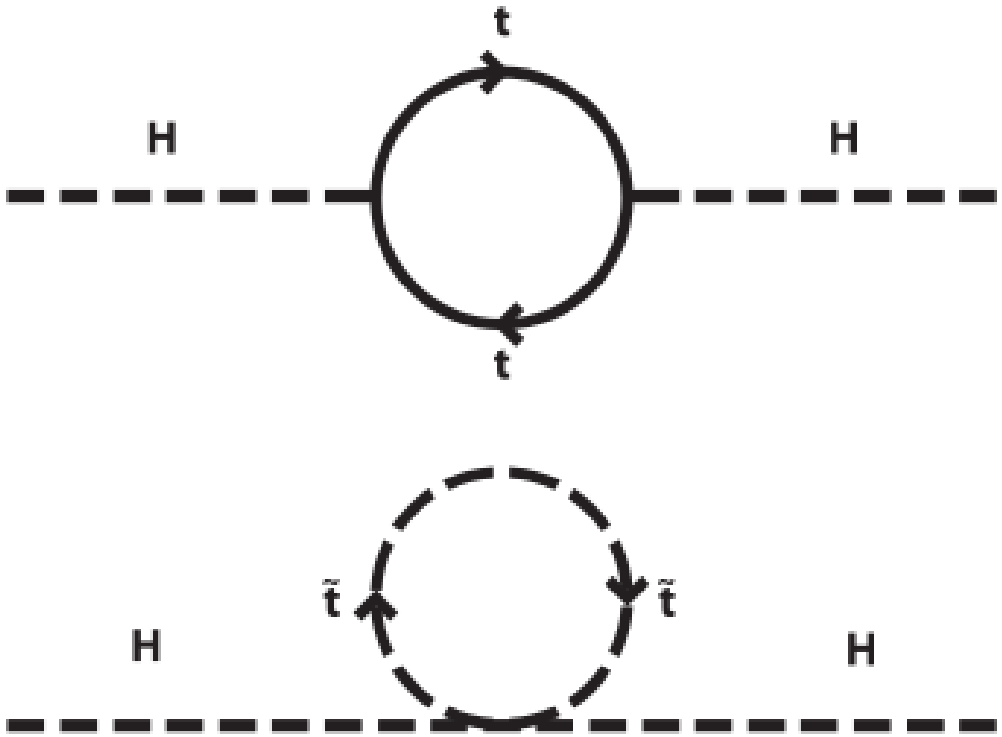
Motivation

- Bekannte Bausteine und Kräfte der Welt: Standardmodell
- Indiz für Existenz versteckter Welt von Teilchen und Kräften jenseits des Standardmodells: Dunkle Materie
  - schwach wechselwirkende schwere Teilchen (WIMPs)
  - sehr schwach wechselwirkende leichte Teilchen (WISPs)
- Erweiterungen des Standardmodells, schon vor Entdeckung der Dunklen Materie aus anderen Motiven vorgeschlagen: Zoo versteckter Teilchen



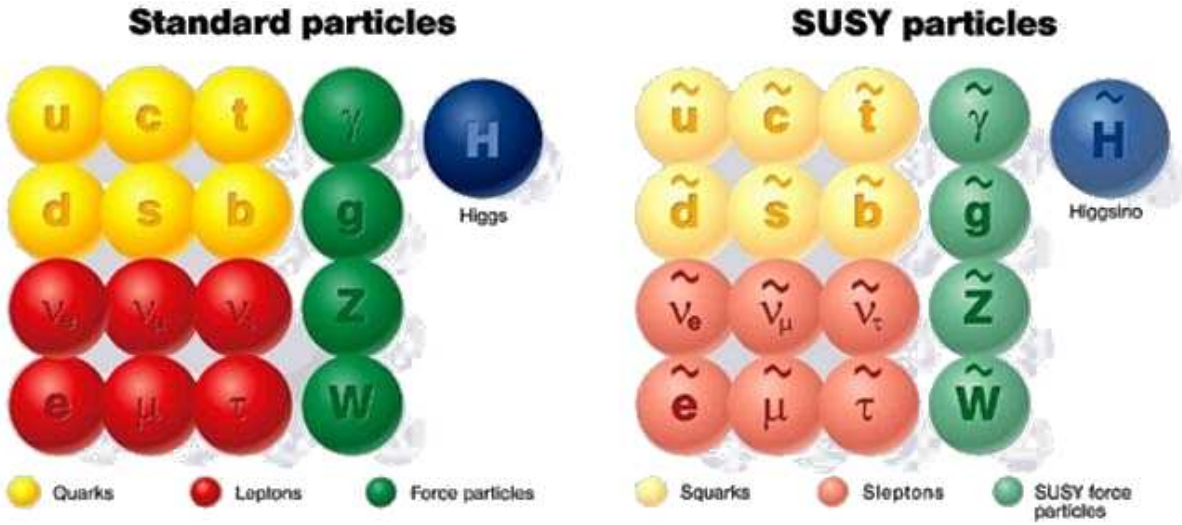
Supersymmetrische Erweiterung

- Motivation:
  Lösung des Natürlichkeits-problems $m_H \ll M_{\mathrm{Planck}}$ durch Zähmung von Quanten-korrekturen durch Superpartner im TeV Massenbereich



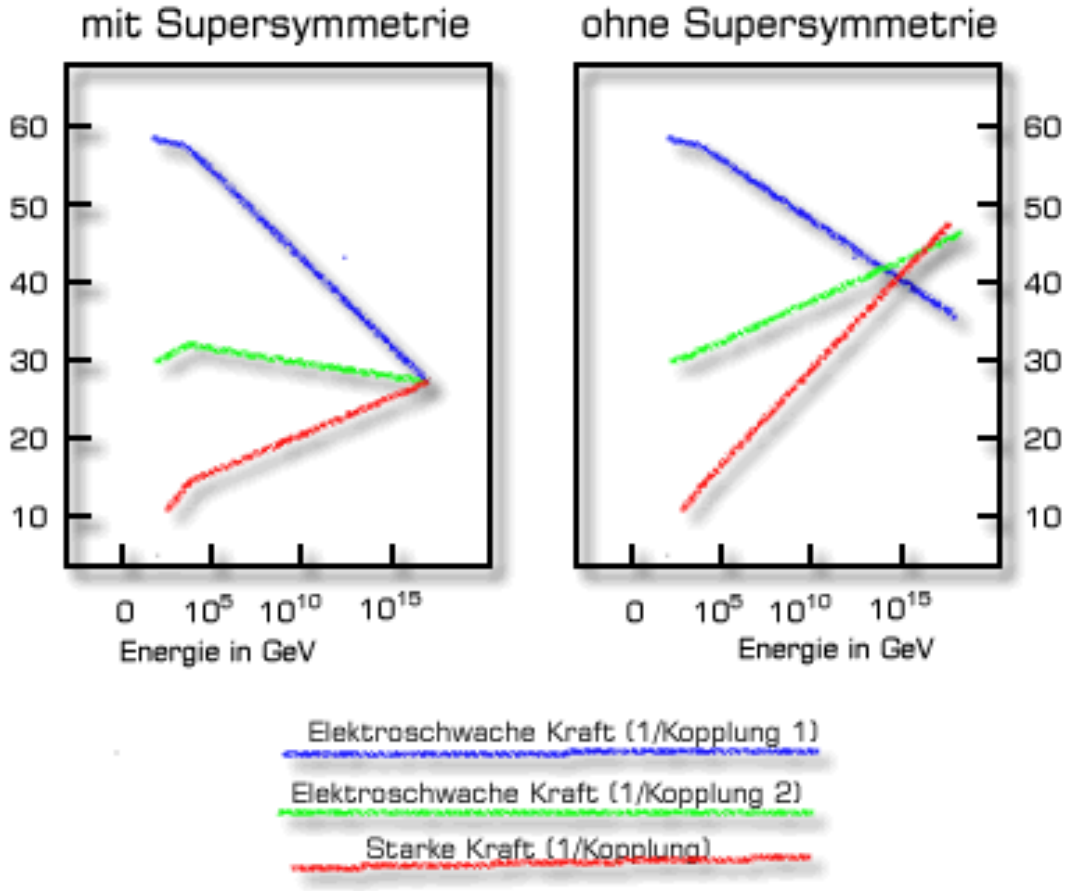
Supersymmetrische Erweiterung

- Motivation:
  Lösung des Natürlichkeits-problems $m_H \ll M_{\text{Planck}}$ durch Zähmung von Quanten-korrekturen durch Superpartner im TeV Massenbereich



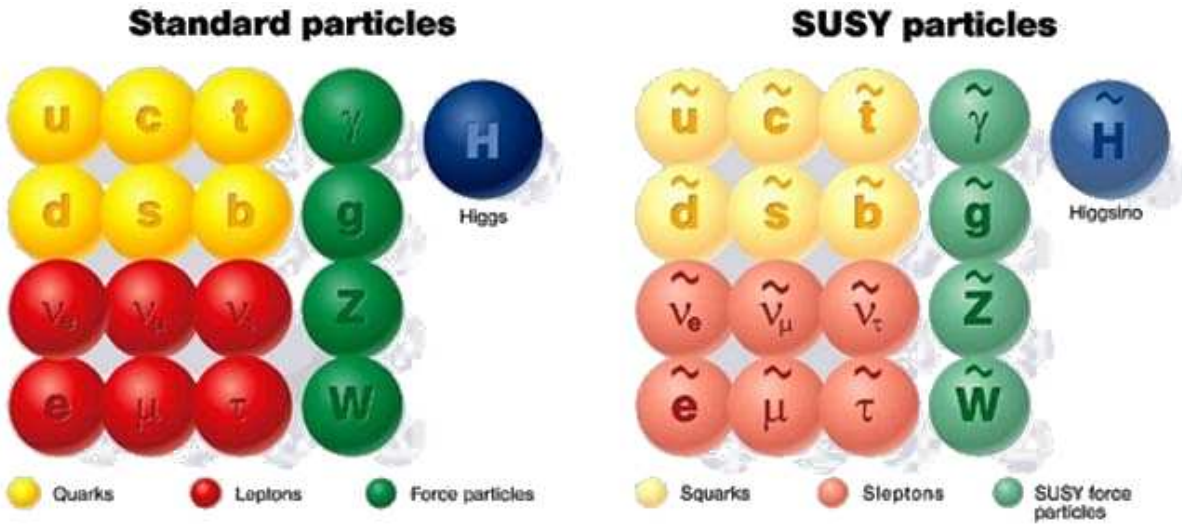
Supersymmetrische Erweiterung

- Motivation:
  Lösung des Natürlichkeits-problems $m_H \ll M_{\text{Planck}}$ durch Zähmung von Quanten-korrekturen durch Superpartner im TeV Massenbereich
- Willkommene Eigenschaften:
  - Vereinigung der Kopplungen



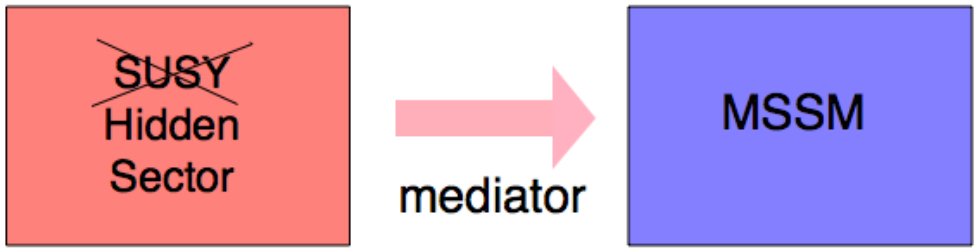
Supersymmetrische Erweiterung

- Motivation:
  Lösung des Natürlichkeits-problems $m_H \ll M_{\text{Planck}}$ durch Zähmung von Quanten-korrekturen durch Superpartner im TeV Massenbereich
- Willkommene Eigenschaften:
  - Vereinigung der Kopplungen
  - WIMP DM Kandidaten
    - Neutralino
    - Gravitino



Supersymmetrische Erweiterung

- Motivation:
  Lösung des Natürlichkeits-problems $m_H \ll M_{\text{Planck}}$ durch Zähmung von Quanten-korrekturen durch Superpartner im TeV Massenbereich
- Willkommene Eigenschaften:
  - Vereinigung der Kopplungen
  - WIMP DM Kandidaten
    - Neutralino
    - Gravitino
- Versteckter Sektor notwendig für Supersymmetriebrechung
  $\Rightarrow$ Zoo versteckter Teilchen



- Sektor "versteckt" $\Leftrightarrow$ Vermittler-teilchen schwach gekoppelt (z.B. Gravitonen) oder schwer
- Mögliche Zoobewohner:
  - Versteckte "Photonen" γ'
  - Versteckte "Elektronen" e'
  - ...
- Superstring-basierte Modelle sagen versteckte Sektoren voraus

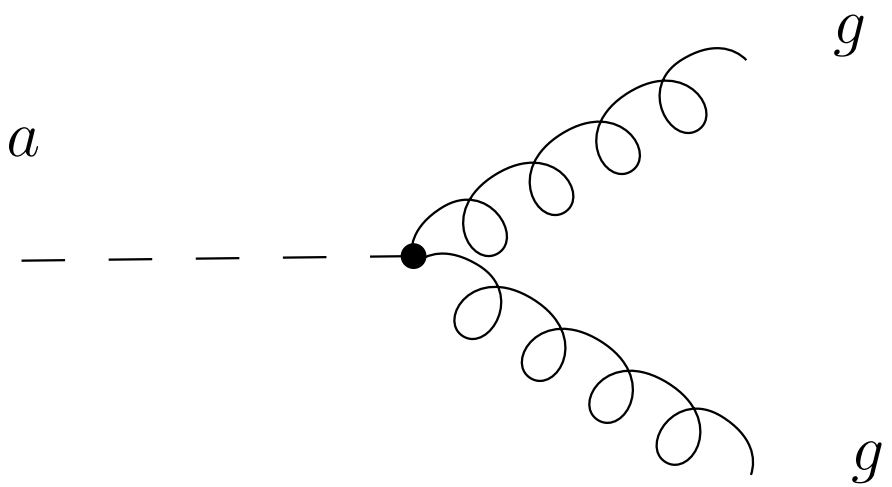
Peccei-Quinn Erweiterung

- Motivation:
  CP-verletzender Term in QCD:

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

  Experimentell: $\theta < 10^{-10}$

  Peccei-Quinn Lösung des Natürlichkeitsproblems: $\theta \longrightarrow a(x)/f_a$

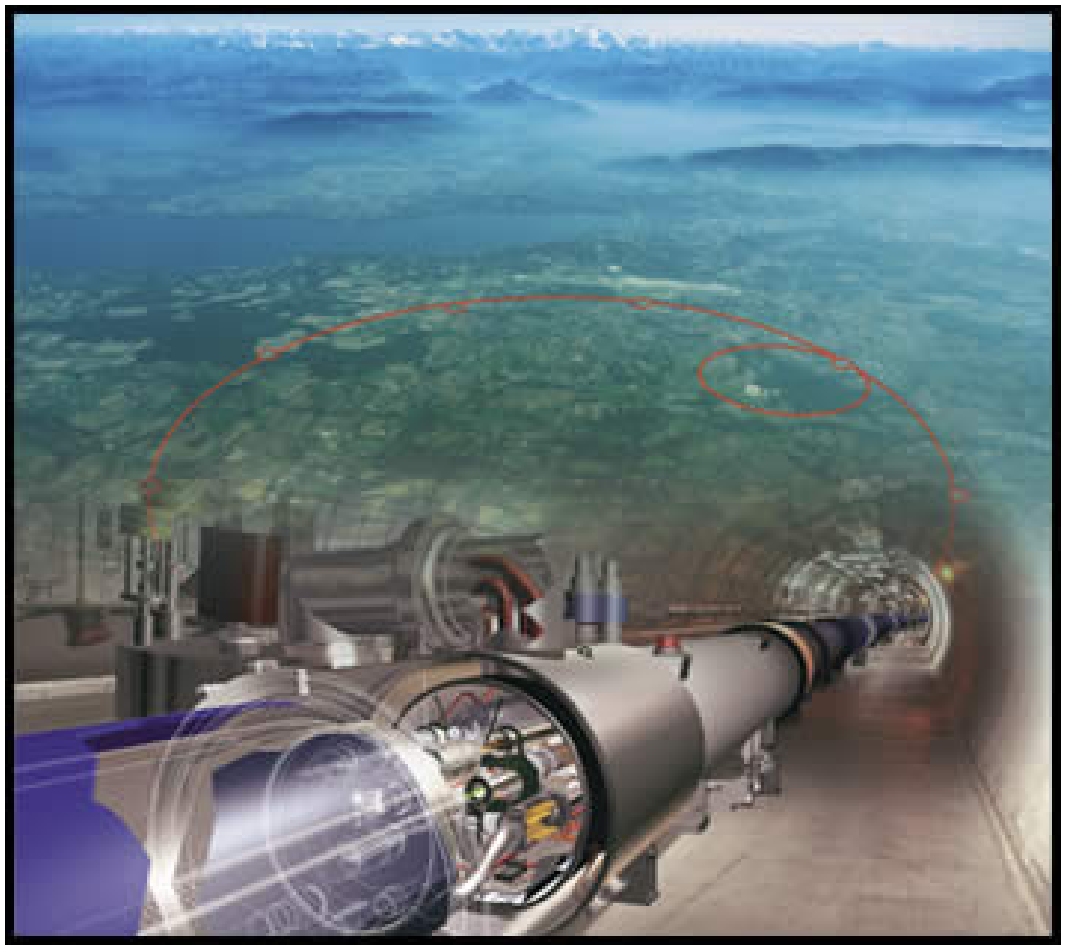


- Axion a: WISP DM Kandidat
  - schwach gekoppelt, da Mediatoren schwer, $f_a \gg m_Z$
  - sehr leicht; analog zu Pion, $m_a \sim m_\pi f_\pi / f_a \ll m_\pi$

Die Jagd nach den neuen Teilchen

- **WIMPs:**
  - Massen im TeV Bereich
  - direkte Wechselwirkungen mit Standardmodellteilchen

$\Rightarrow$ Können am Large Hadron Collider (LHC) produziert und nachgewiesen werden



Die Jagd nach den neuen Teilchen

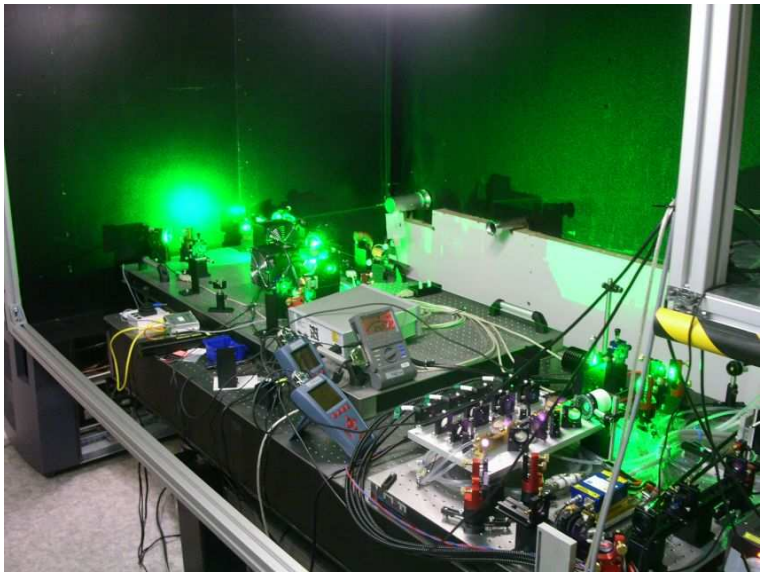
- **WIMPs:**
  - Massen im TeV Bereich
  - direkte Wechselwirkungen mit Standardmodellteilchen

⇒ Können am Large Hadron Collider (LHC) produziert und nachgewiesen werden

- **WISPs:**
  - Massen im meV Bereich
  - keine direkten Wechselwirkungen mit Standardmodellteilchen

⇒ Teilchenphysik mit niederenergetischen Photonen

- Laserexperimente

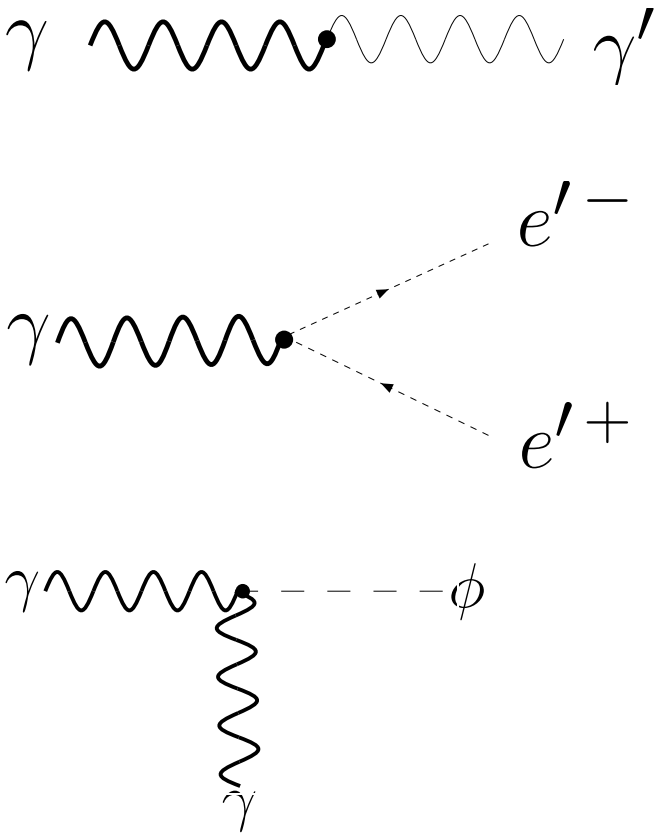


- Experimente mit Mikrowellen-Hohlraumresonatoren

- Torsionswaagen (Coulomb- oder Newtongesetz)

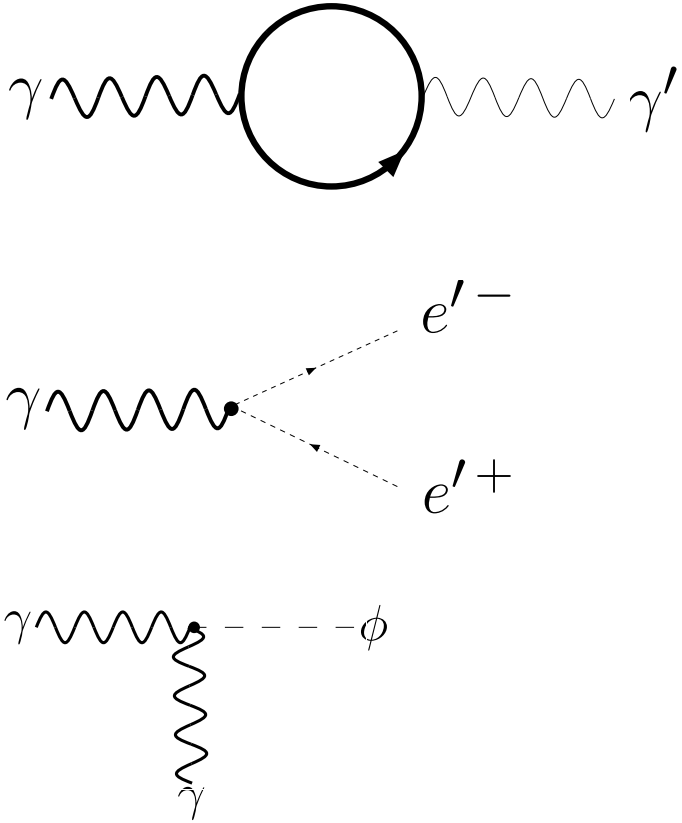
Elektromagnetische Wechselwirkungen versteckter Teilchen

- Indirekte Wechselwirkungen von Photonen mit versteckten Teilchen



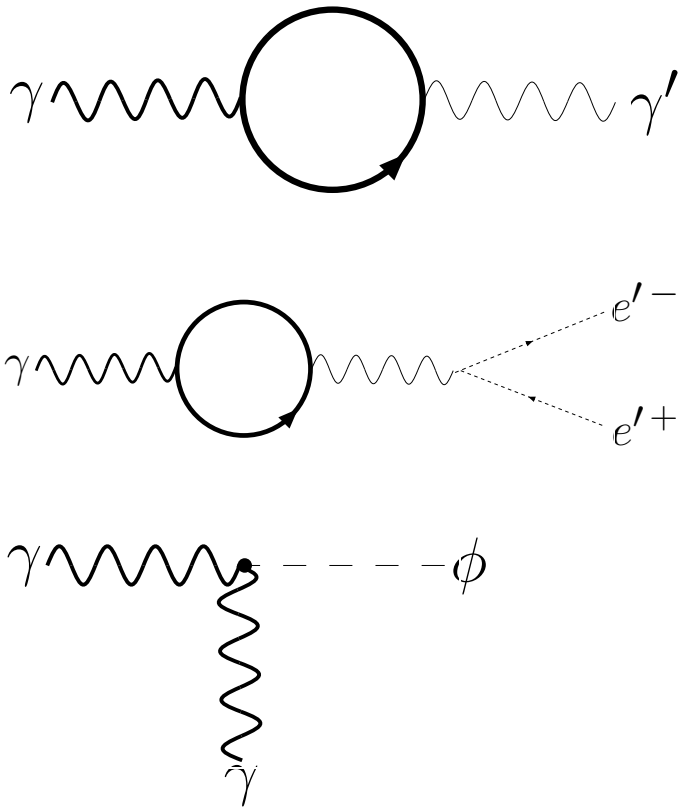
Elektromagnetische Wechselwirkungen versteckter Teilchen

- Indirekte Wechselwirkungen von Photonen mit versteckten Teilchen durch Quantenfluktuationen in neue, sehr schwere Vermittlerteilchen



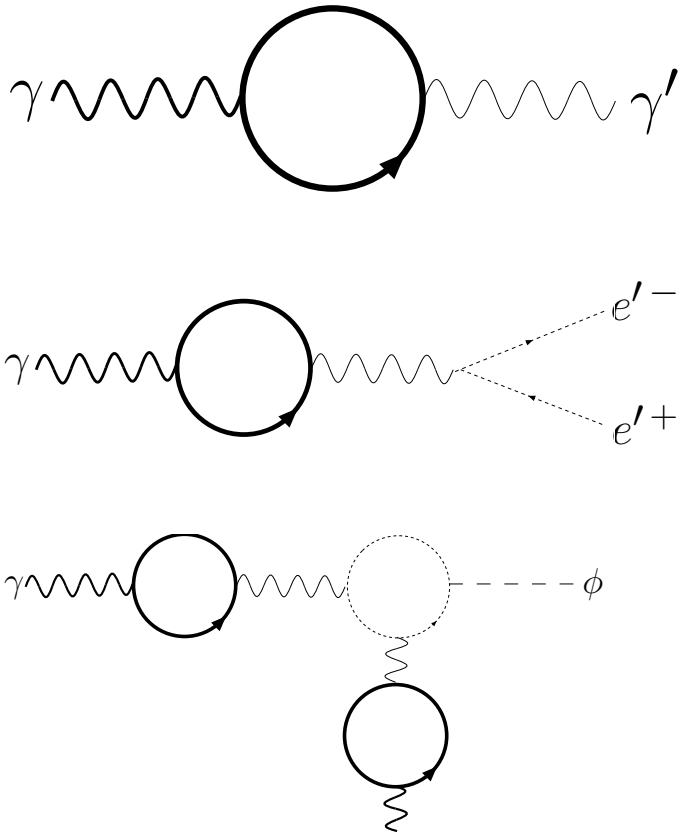
Elektromagnetische Wechselwirkungen versteckter Teilchen

- Indirekte Wechselwirkungen von Photonen mit versteckten Teilchen durch Quantenfluktuationen in neue, sehr schwere Vermittlerteilchen



Elektromagnetische Wechselwirkungen versteckter Teilchen

- Indirekte Wechselwirkungen von Photonen mit versteckten Teilchen durch Quantenfluktuationen in neue, sehr schwere Vermittlerteilchen

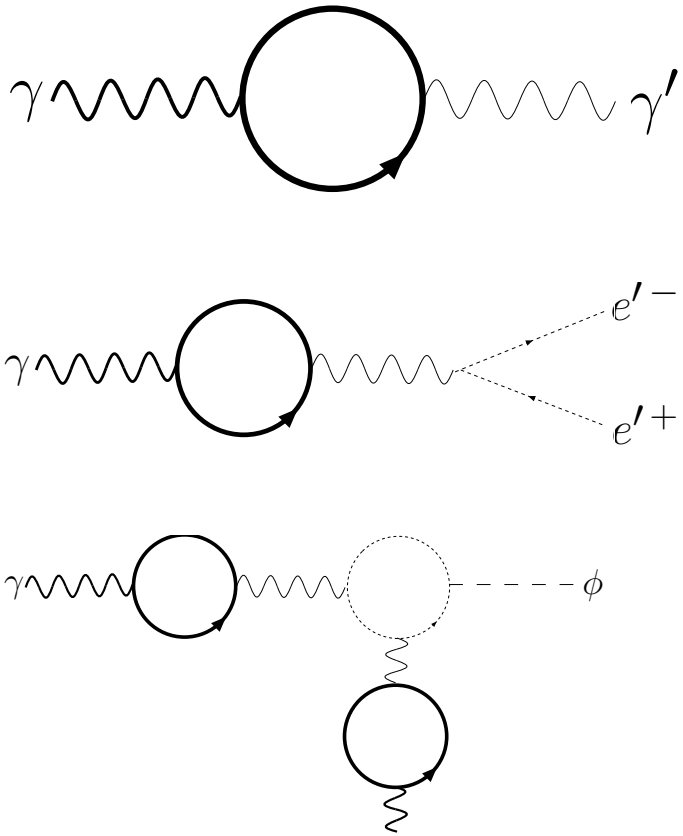


Elektromagnetische Wechselwirkungen versteckter Teilchen

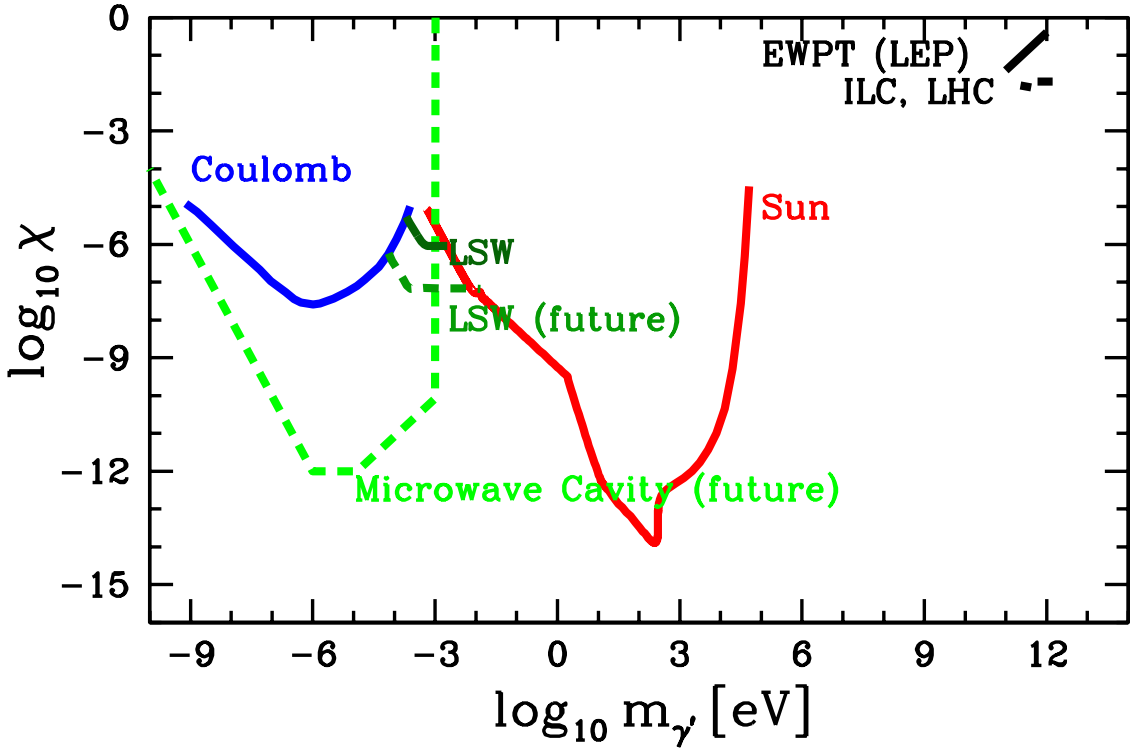
- Indirekte Wechselwirkungen von Photonen mit versteckten Teilchen durch Quantenfluktuationen in neue, sehr schwere Vermittlerteilchen

⇒ Experimente mit starken elektromagnetischen Feldern (Laser, starke Magnetfelder, elektrische Felder) ermöglichen Suche nach Effekten der versteckten Teilchen

⇒ Stärke der Effekte liefern Informationen über die versteckte Welt (Massen, Kopplungen, Größe der Extradimensionen)



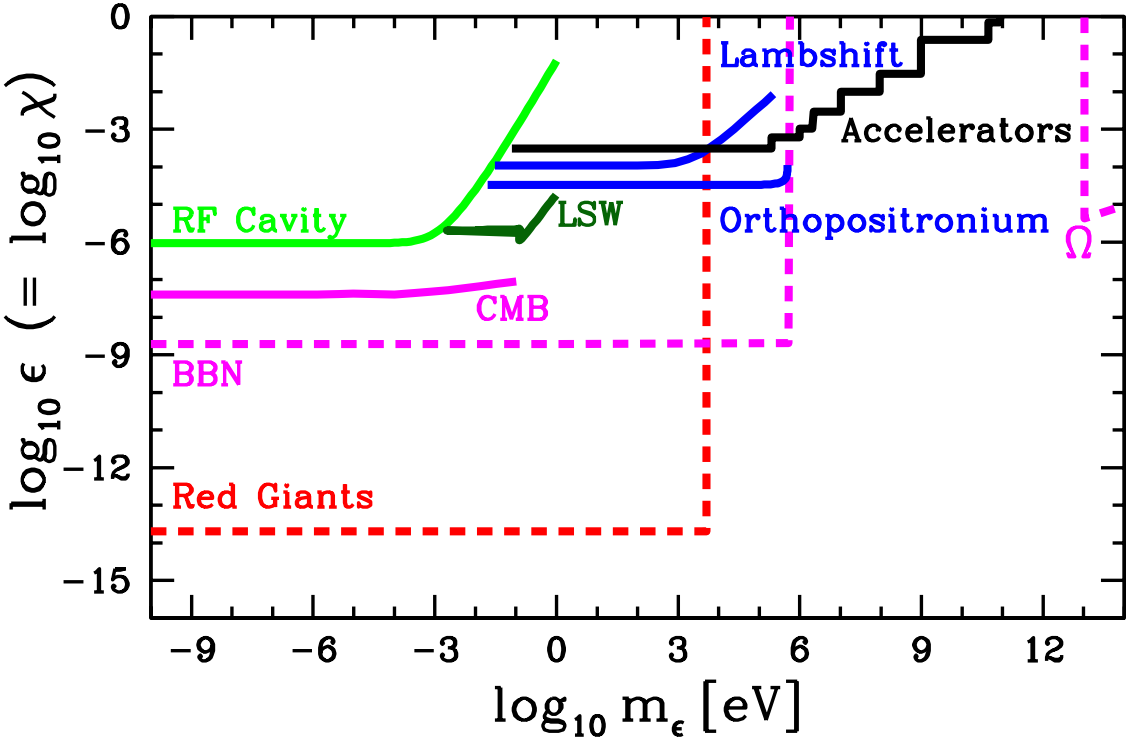
- Grenzen an γ': [Bartlett,..'88; Kumar,..'06; Ahlers,..'07; Jaeckel,..'07; Redondo,..'08]



Abweichungen von $1/r^2$ (Coulomb); $\gamma \leftrightarrow \gamma'$ Oszillationen (Cavity, Light Shining through Wall (LSW), Sun); $Z \leftrightarrow \gamma'$ Mischung (LEP, LHC, ILC)

- Superstring-basierte Modelle: $10^{-23} \lesssim \chi \lesssim 10^{-3}$ [Dienes *et al.* '96;...;Abel *et al.* '06;..]

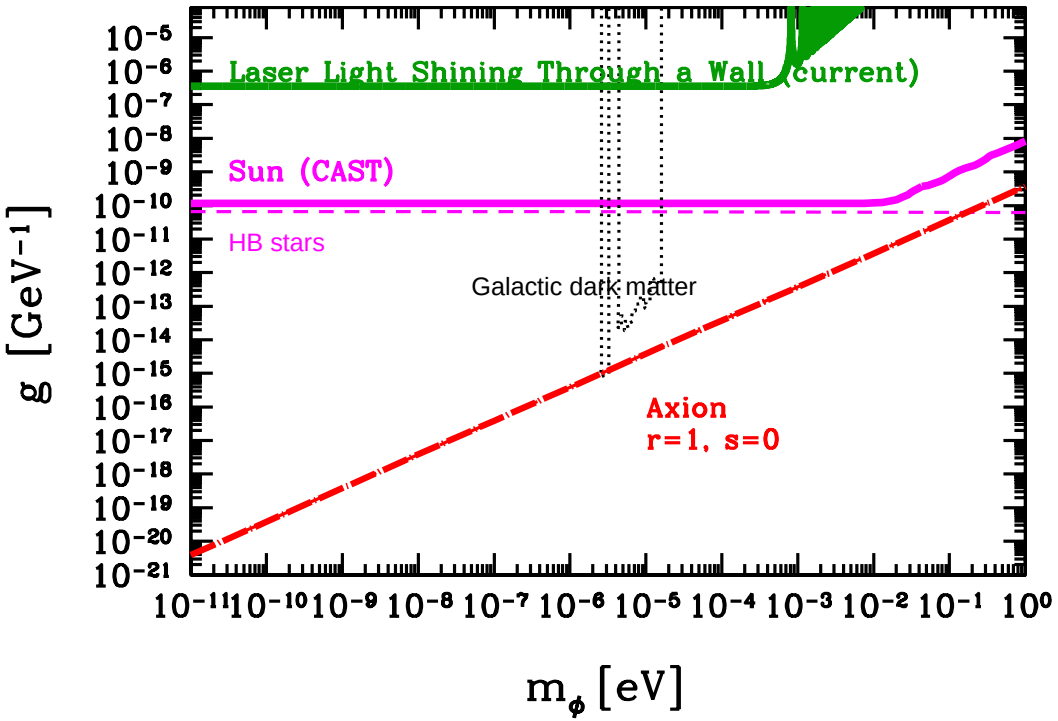
- Grenzen an e': [Davidson,..'90;Gies,..'06;Ahlers,..'07;Melchiorri,..'07]



Energieverlust (Red Giants, RF Cavity); kosm. Expansionsrate (BBN); Abweichung von Schwarzkörper (CMB); $\gamma \leftrightarrow \gamma'$ Oszillationen (LSW); ...

- Superstring-basierte Modelle: $10^{-23} \lesssim \chi \lesssim 10^{-3}$ [Dienes *et al.* '96;...;Abel *et al.* '06;..]

- Grenzen an Axion-artige Teilchen (ALPs) ϕ: [Raffelt; ...]



Photonregeneration durch ALP-γ Oszillationen (light shining through a wall; CERN Axion Solar Telescope (CAST); Galactic dark matter search); Energieverlust (Lebendsdauer von Helium Burning (HB) Sternen);

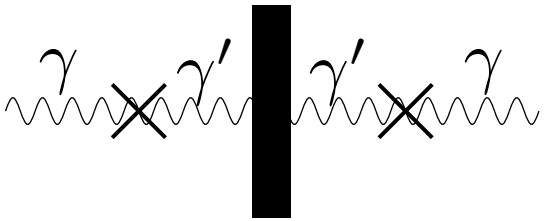
Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

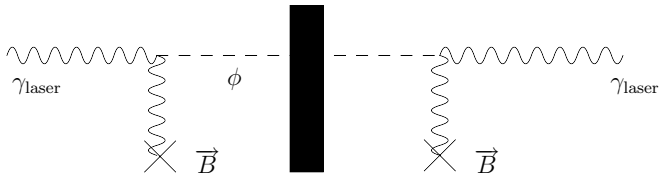
- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

Licht durch die Wand via

- γ-γ' Oszillationen:



- Photon-ALP Oszillationen:



Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

Experiment	Laser	$< P >$	Magnets
ALPS	532 nm; FP	30-300 W	$B_1 = B_2 = 5$ T $\ell_1 = \ell_2 = 4.21$ m
BFRT	$\sim$ 500 nm; DL	100 W	$B_1 = B_2 = 3.7$ T $\ell_1 = \ell_2 = 4.4$ m
BMV	1064 nm; LULI	8×10^{21} γ/pulse	$B_1 = B_2 = 11$ T $\ell_1 = \ell_2 = 0.25$ m
GammeV	532 nm;	3.2 W	$B_1 = B_2 = 5$ T $\ell_1 = \ell_2 = 3$ m
LIPSS	900 nm; FEL	300 W	$B_1 = B_2 = 1.7$ T $\ell_1 = \ell_2 = 1$ m
OSQAR	1064 nm; FP	> 1 kW	$B_1 = B_2 = 9.5$ T $\ell_1 = \ell_2 = 14$ m

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

Licht durch die Wand

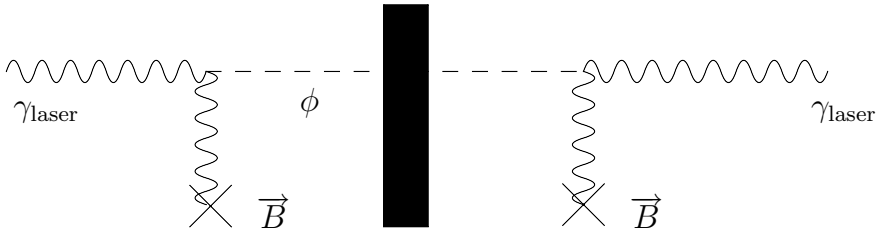
- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

ALPS (Axion-Like Particle Search):

[AEI, DESY, Hamburger Sternwarte, Laser Zentrum Hannover]



Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

ALPS (Axion-Like Particle Search):

[AEI, DESY, Hamburger Sternwarte, Laser Zentrum Hannover]

- Primärstrahl: enhanced LIGO laser (1064 nm, 35 W cw)

$\Rightarrow$ frequenzverdoppelt auf 532 nm

$\Rightarrow$ ~ 70 fache Leistungsverstärkung durch resonante optische Kavität (Fabry-Perot), $\sim 10\ \mu m$ Fokus

$\Rightarrow$ CCD Kamera: regenerierte Photonen erwartet in Signalregion von wenigen Pixeln

Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

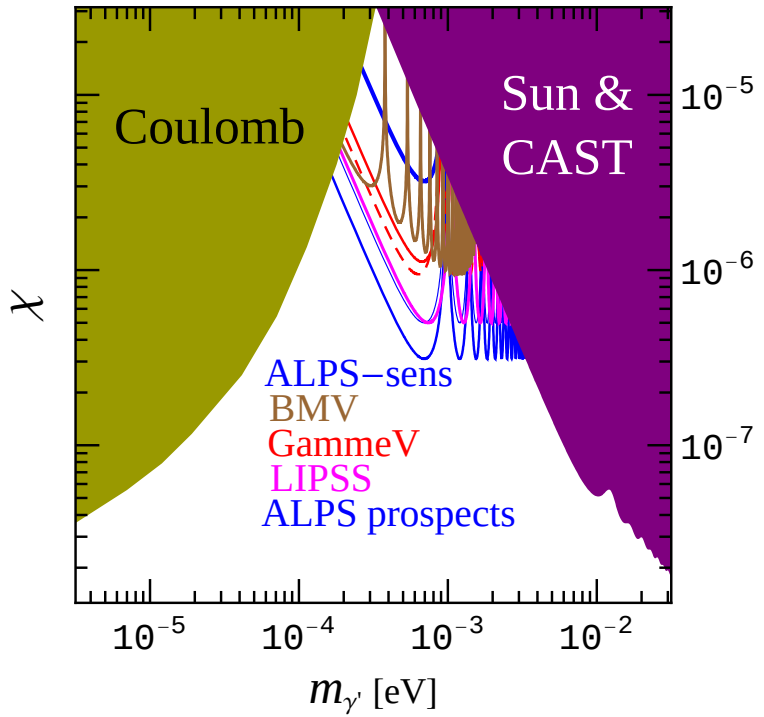
- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

ALPS (Any-Light Particle Search):

[AEI, DESY, Hamburger Sternwarte, Laser Zentrum Hannover]

Entdeckungspotential für γ':



Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

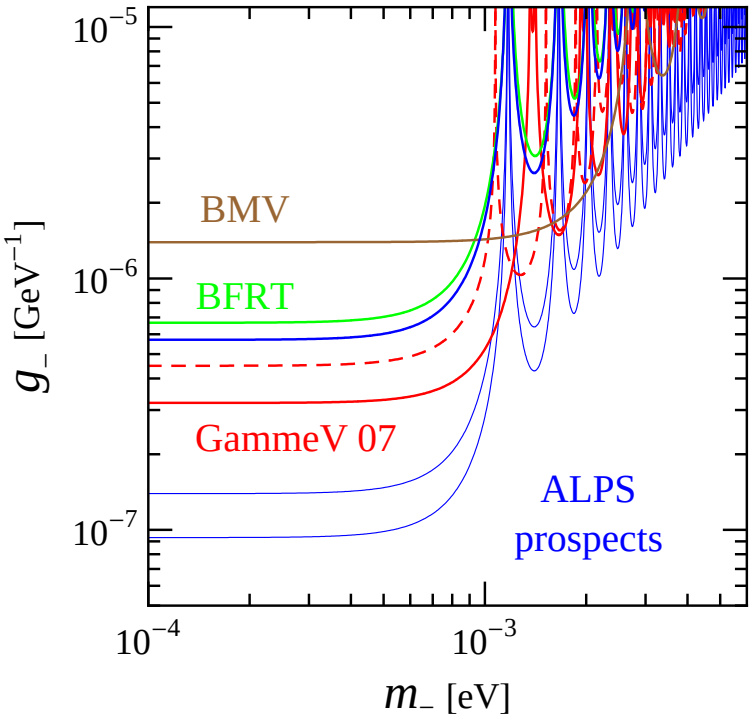
- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

ALPS (Axion-Like Particle Search):

[AEI, DESY, Hamburger Sternwarte, Laser Zentrum Hannover]

Entdeckungspotential für Axion-artige Teilchen:



Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

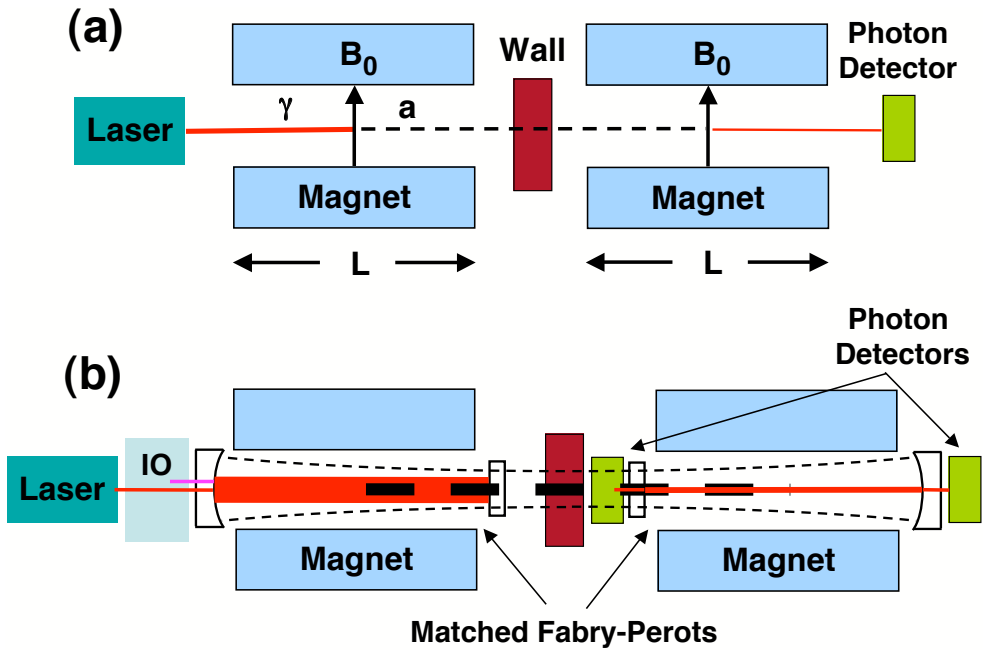
- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

Vision I:

Second Fabry-Perot Cavity:

[Hoogeveen,Ziegenhagen '91;Sikivie,Tanner,van Bibber '07]



Licht durch die Wand

- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

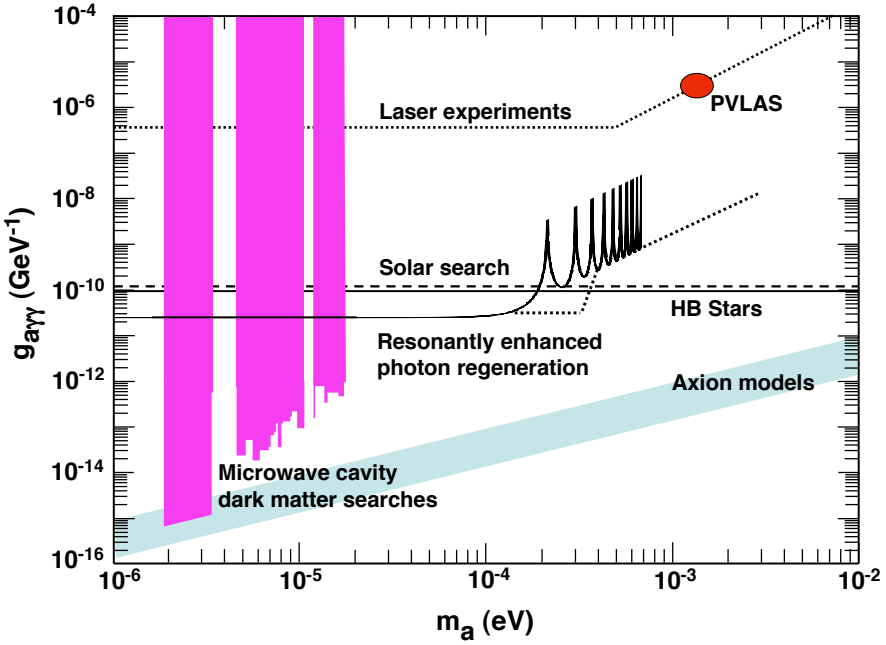
- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

$\Rightarrow$ Weltweit mehrere Experimente

Vision I:

Second Fabry-Perot Cavity:

[Hoogeveen,Ziegenhagen '91;Sikivie,Tanner,van Bibber '07]



Licht durch die Wand

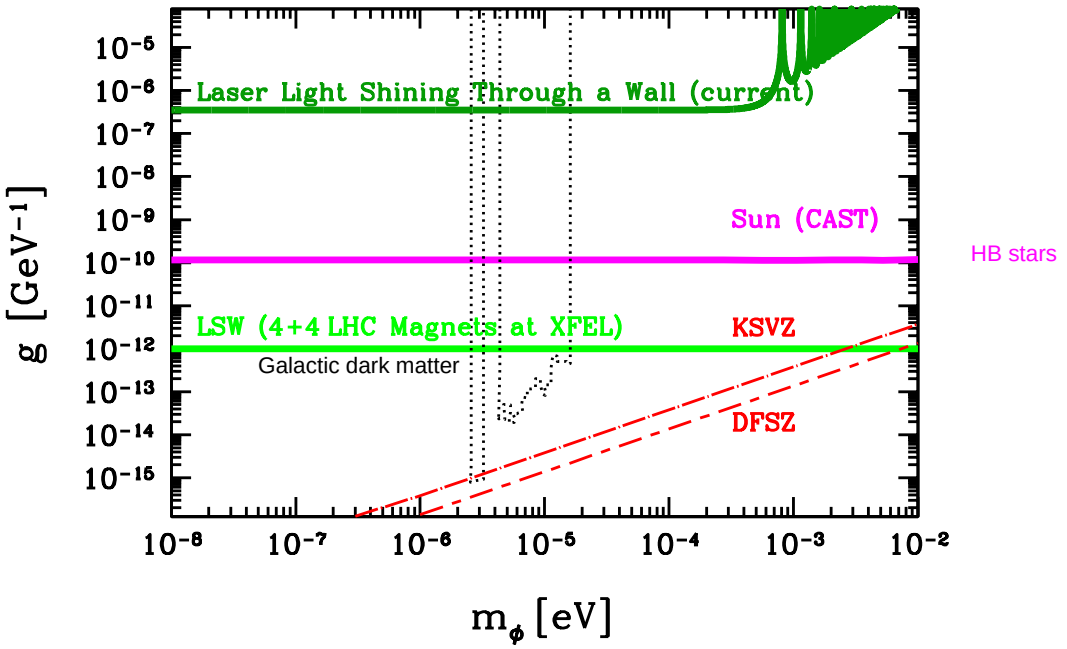
- Linear polarisierter Laserstrahl entlang eines Magnetfeldes

- Platziere Wand in der Mitte:
  - Laserstrahl wird absorbiert
  - Neutrale versteckte Teilchen fliegen durch die Wand und
  - können sich im Magnetfeld auf anderer Seite wieder in Photonen umwandeln, die nachgewiesen werden können ("Licht durch die Wand")

⇒ Weltweit mehrere Experimente

Vision II:

Röntgenlicht (XFEL) durch die Wand: [Rabadan,AR,Sigurdson '06]



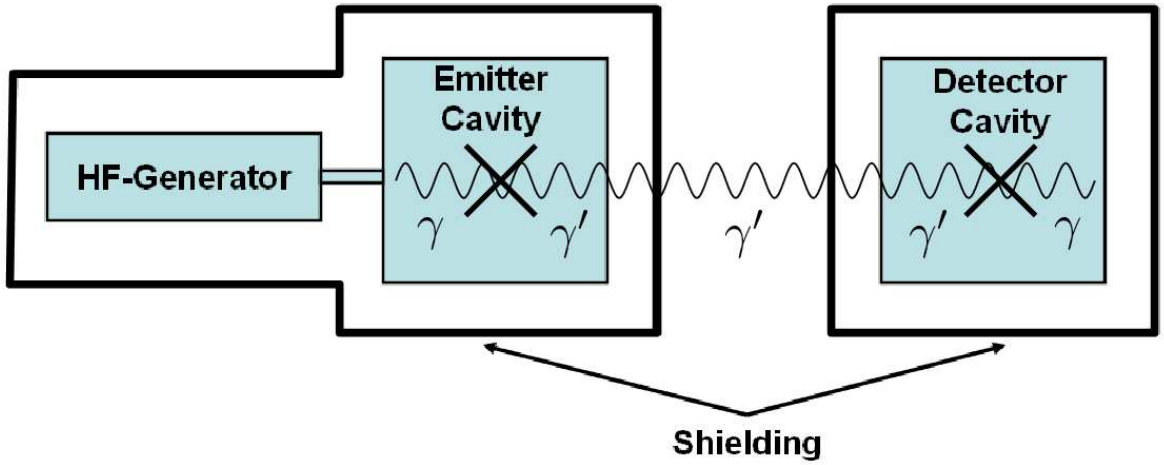
Mikrowellen durch die Wand

- Hohlraumresonatoren als Sender und Empfänger von

[Jaeckel,AR '07]

  – versteckten Photonen (γ')

[Hoogeveen '92]



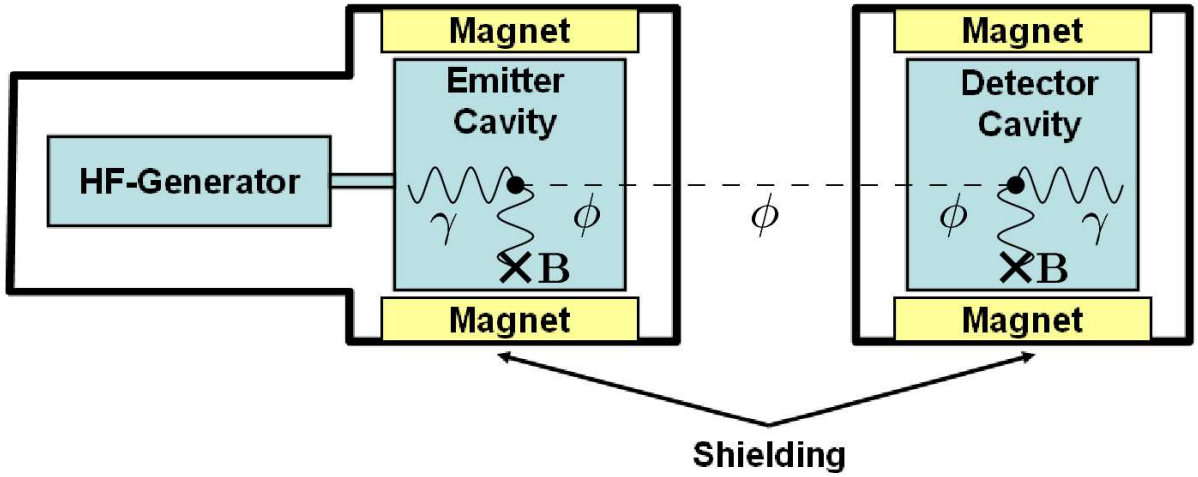
[Jaeckel,AR '07]

Mikrowellen durch die Wand

- Hohlraumresonatoren als Sender und Empfänger von

  [Jaeckel,AR '07]

  – versteckten Photonen (γ')
  – ALPs (ϕ) [Hoogeveen '92]



[Jaeckel,AR '07]

Mikrowellen durch die Wand

- Hohlraumresonatoren als Sender und Empfänger von

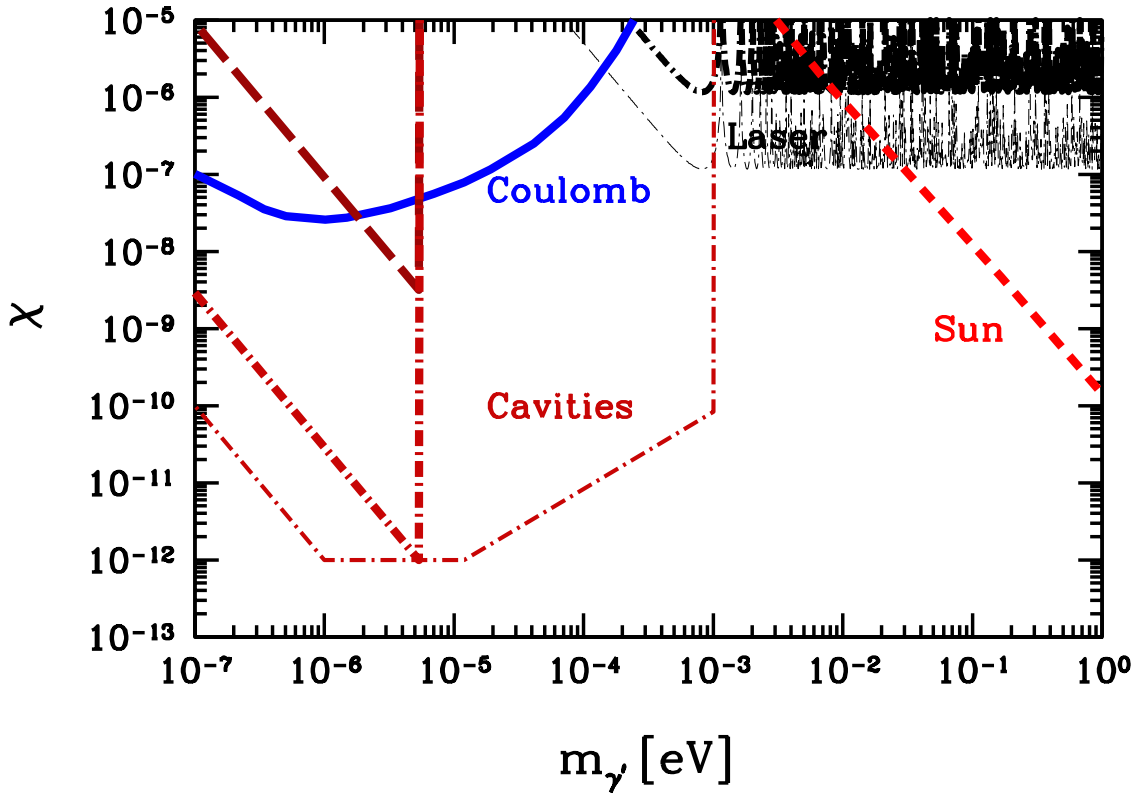
  [Jaeckel,AR '07]

  – versteckten Photonen (γ')
  – ALPs (ϕ) [Hoogeveen '92]

- Entdeckungspotential:

  – viel Neuland für γ'
  – CAST's ALPs Sensitivität erreichbar mit gegenwärtiger Technologie

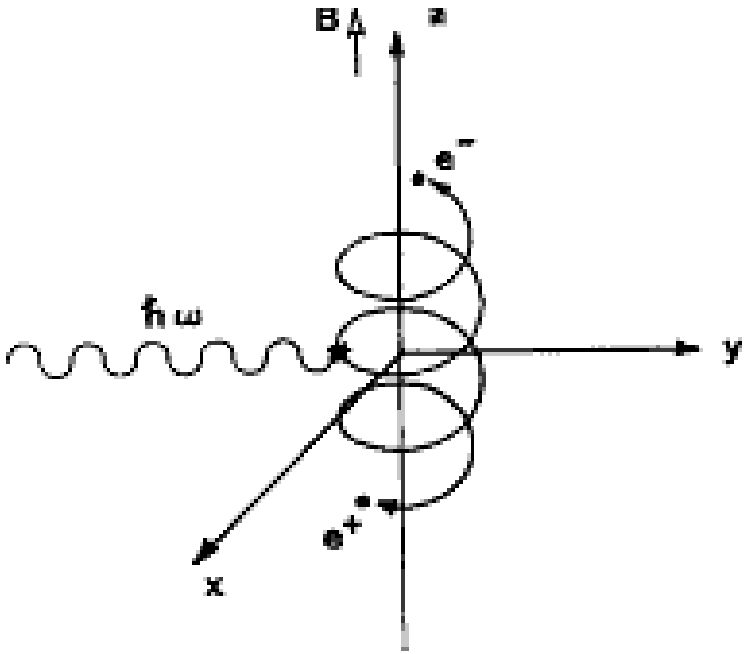
- Yale: Experiment im Aufbau



[Jaeckel,AR '07]

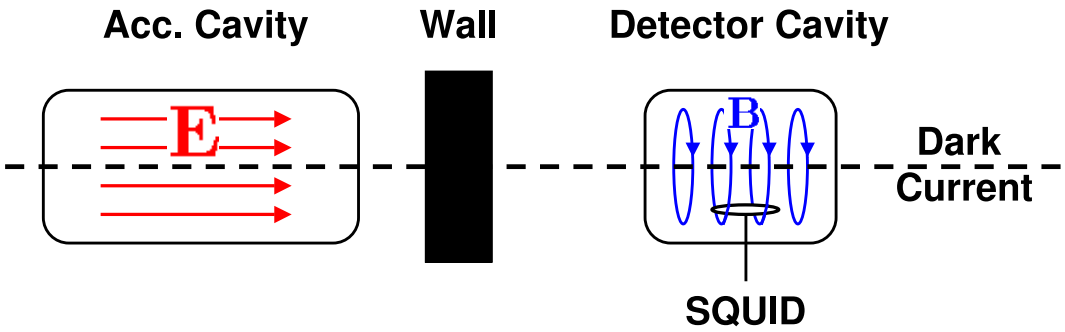
Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand



Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden



[Gies,Jaeckel,AR '06]

Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden

ACDC (Accelerator Cavity Dark Current):

- Resonator

Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden

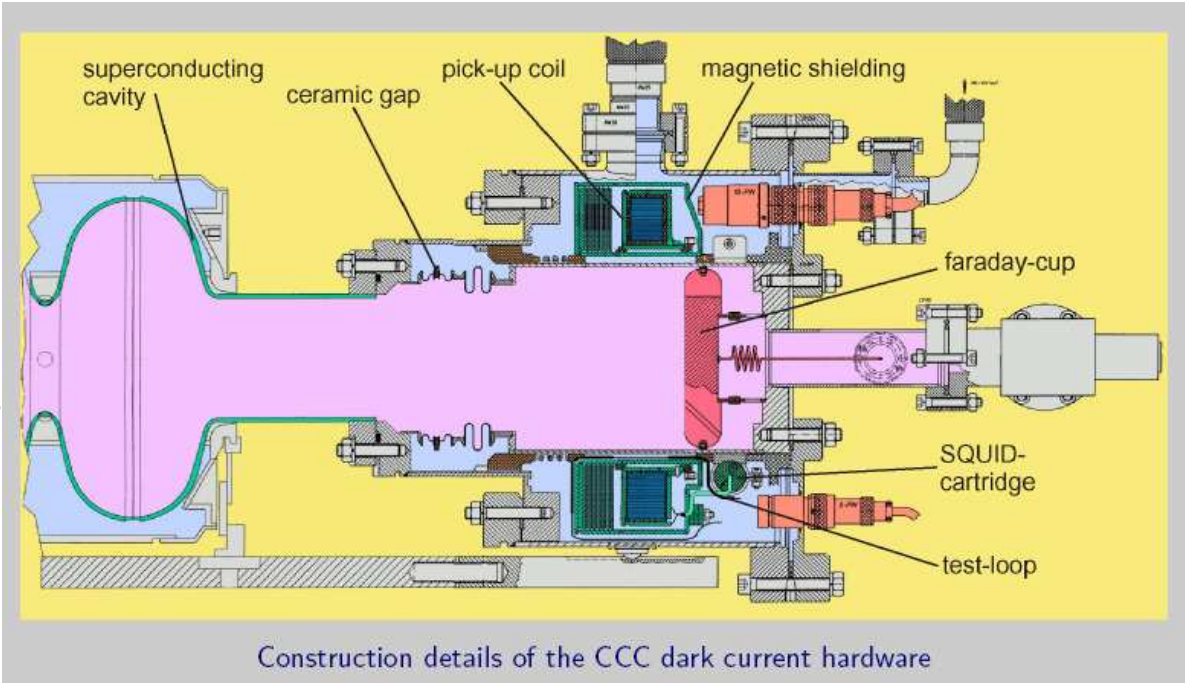
ACDC (Accelerator Cavity Dark Current):

- Resonator und Wand vorhanden

Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden

ACDC (Accelerator Cavity Dark Current):



Construction details of the CCC dark current hardware

[DESY,GSI,Jena]

- Resonator und Wand vorhanden
- Strommeßgerät vorhanden

Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden

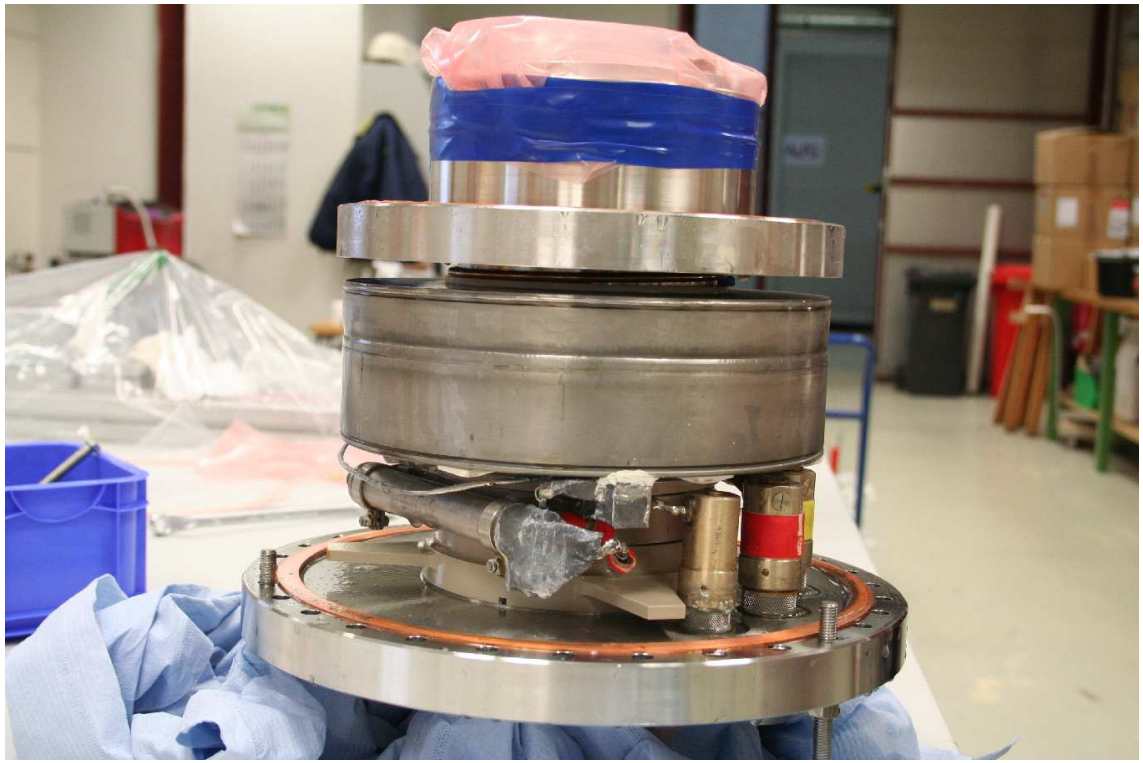
ACDC (Accelerator Cavity Dark Current):

- Resonator und Wand vorhanden
- Strommeßgerät vorhanden

Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden

ACDC (Accelerator Cavity Dark Current):

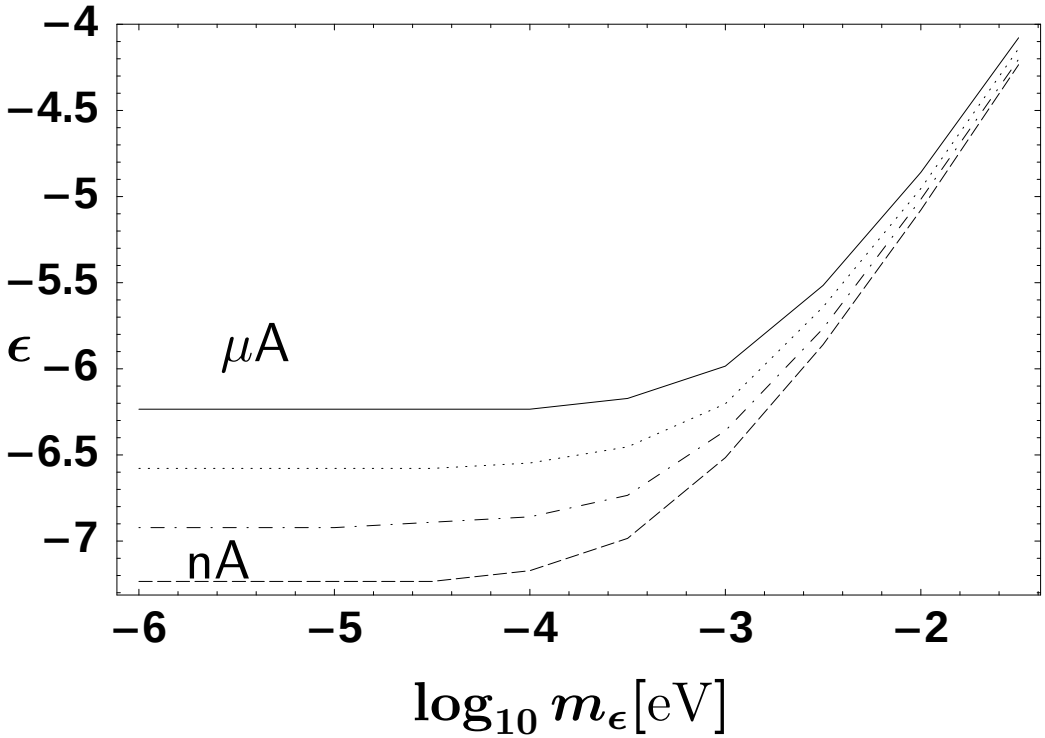


- Resonator und Wand vorhanden
- Strommeßgerät (war) vorhanden

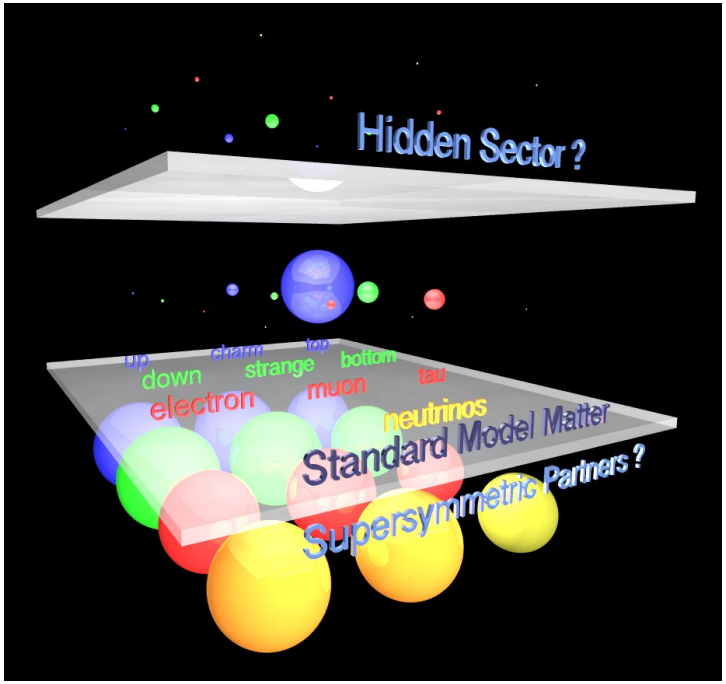
Strom durch die Wand

- Versteckte Elektronen e' im Magnetfeld auf Kreisbahnen $\Rightarrow$ kein Licht durch die Wand
- Strom durch die Wand:
  - Im starken elektrischen Feld eines Hohlraumresonators für Teilchenbeschleunigung werden e' in Paaren erzeugt und entlang der Strahlachse beschleunigt
  - Der Teilchenstrom verlässt den Resonator, fließt ungehindert durch eine Wand und
  - der entsprechende elektrische Strom kann über sein induziertes Magnetfeld gemessen werden

ACDC (Accelerator Cavity Dark Current):



[Ahlers,Gies,Jaeckel,AR in prep.]

Und die Moral von der Geschicht' . . .

Auch mit niederenergetischen Photonen und "Ersatzteilen" der Hochenergiebeschleuniger können spannende Fragen der Teilchenphysik untersucht werden . . .