

# Licht durch die Wand:

## *Teilchenphysik bei kleinsten Energien*

**A. Lindner, DESY**

Öffentlicher Abendvortrag,  
DESY in Zeuthen, 8 Dezember 2010

# Licht durch die Wand ...

... ist eigentlich nichts Besonderes:



© Randy Glasbergen / glasbergen.com

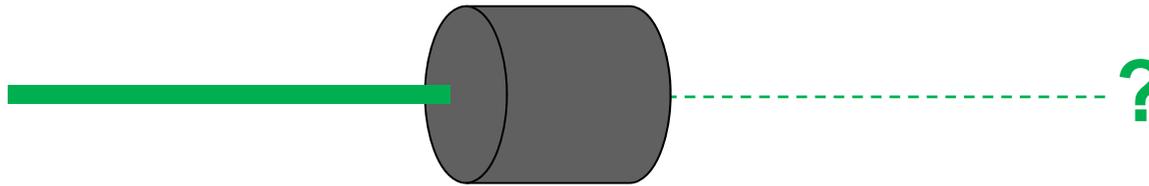


"Aren't you going to tweet me goodnight?"

Allgemein: „Durchsichtigkeit“ hängt von der Wellenlänge (Energie) des Lichtes und dem Material der Wand ab!

# Licht durch die Wand ...

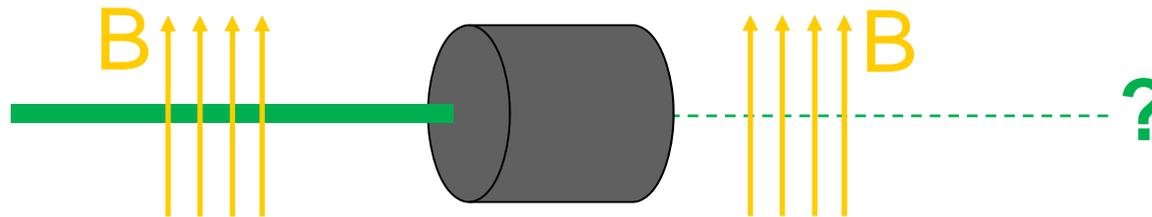
... etwas genauer: grünes Licht durch Stahl.



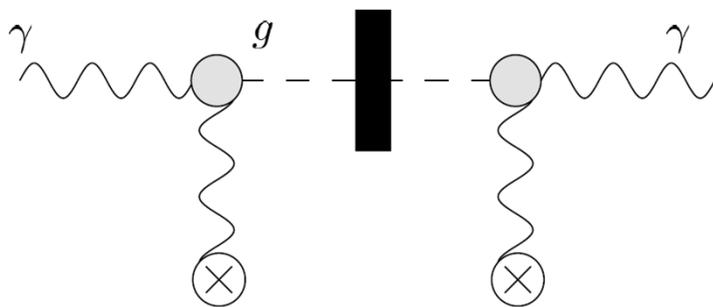
Alltagserfahrung: dies geht normalerweise nicht!

# Licht durch die Wand ...

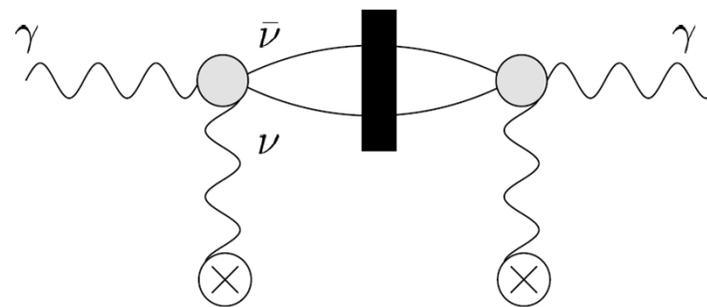
... etwas genauer: grünes Licht im Magnetfeld durch Stahl.



Das klappt im Standardmodell der Teilchenphysik:



Ein „Graviton“ geht durch die Wand



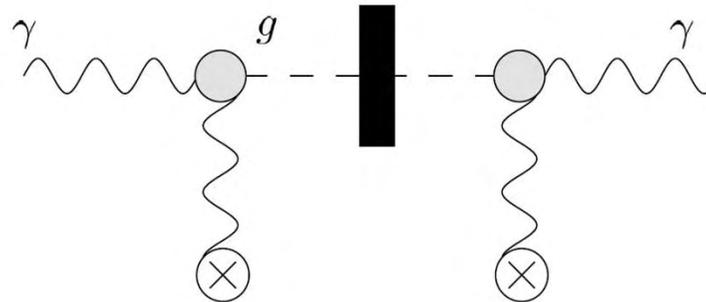
Neutrinos gehen durch die Wand

A. Ringwald, J.Redondo,  
arXiv:1011.3741v1 [hep-ph]

# Licht durch die Wand ...

... quantitativ:

Ein „Graviton“ geht durch die Wand



A. Ringwald, J.Redondo,  
arXiv:1011.3741v1 [hep-ph]

$$P(\gamma \rightarrow g \rightarrow \gamma) \simeq 10^{-83} \left( \frac{B}{T} \right)^4 \left( \frac{L}{m} \right)^4$$

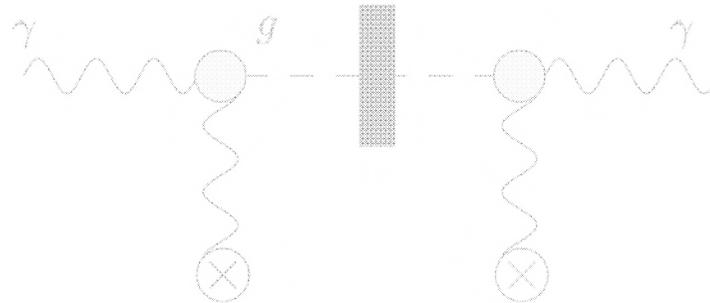
Vergleich: die Sonne hat bisher „nur“  $10^{63}$  Photonen abgestrahlt.

Wenn alles Licht aller Sterne aller Galaxien aller Zeiten im Universum auf die Wand gerichtet worden wäre, hätte es möglicherweise ein Photon durch die Wand geschafft.

# Licht durch die Wand ...

... quantitativ:

Ein „Graviton“ geht durch die Wand



A. Ringwald, J. Redondo,  
arXiv:1011.3741v1 [hep-ph]

$$P(\gamma \rightarrow g \rightarrow \gamma) \simeq 10^{-83} \left( \frac{B}{T} \right)^4 \left( \frac{L}{m} \right)^4$$

Vergleich: die Sonne hat bisher „nur“  $10^{63}$  Photonen abgestrahlt.

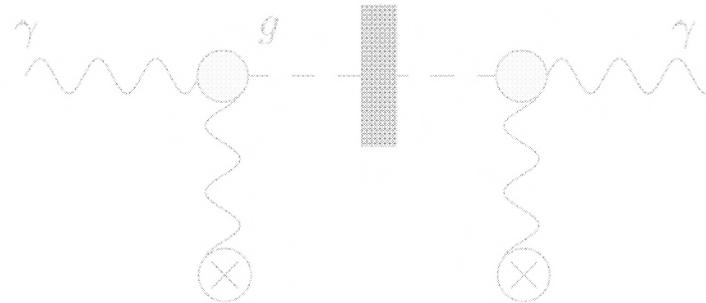
Wenn alles Licht aller Sterne aller Galaxien aller Zeiten im Universum auf die Wand gerichtet worden wäre, hätte es möglicherweise ein Photon durch die Wand geschafft.

## ... geht eigentlich nicht!

# Licht durch die Wand ...

... quantitativ:

Ein „Graviton“ geht durch die Wand



A. Ringwald, J. Redondo,  
arXiv:1011.3741v1 [hep-ph]

$$P(\gamma \rightarrow g \rightarrow \gamma) \simeq 10^{-83} \left( \frac{B}{T} \right)^4 \left( \frac{L}{m} \right)^4$$

Vergleich: die Sonne hat bisher „nur“  $10^{63}$  Photonen abgestrahlt.

Wenn alles Licht aller Sterne aller Galaxien aller Zeiten im Universum auf die Wand gerichtet worden wäre, hätte es möglicherweise ein Photon durch die Wand geschafft.

## ... zeigt neue Eigenschaften der Natur!

# Licht durch die Wand...



... Unsinn ...

# Licht durch die Wand...



... oder ein neues Fenster zur Natur?

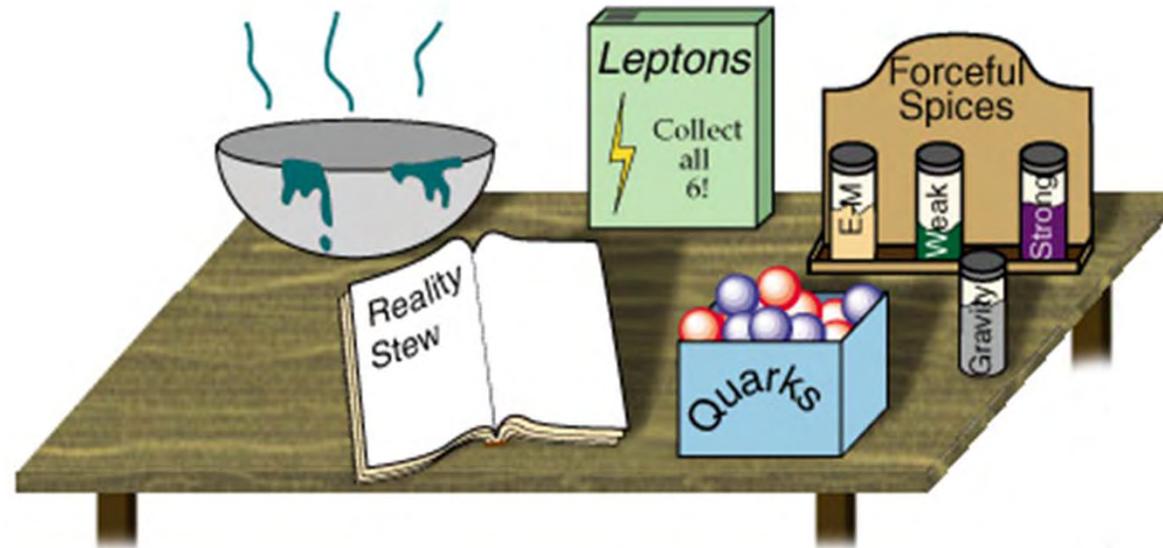
# Das Programm für heute

- > Warum „Licht-durch-die-Wand“
  - Ein Zensus des Kosmos
  - Ein Makel der Teilchenphysik mit Ausflug zu den Grundlagen der theoretischen Physik
- > Das Axion und Gleichgesinnte
  - Weakly Interacting Slight Particles: WISPs
- > Grundlagen der WISP-Suche
- > Das ALPS Projekt
  - Aufbau
  - Ergebnisse
- > Möglichkeiten für ein ALPS-II Projekt



# Ein Zensus des Kosmos

- > Ein Ziel für die Physik ist das „Kochrezept“ für die Zusammensetzung unserer Welt.



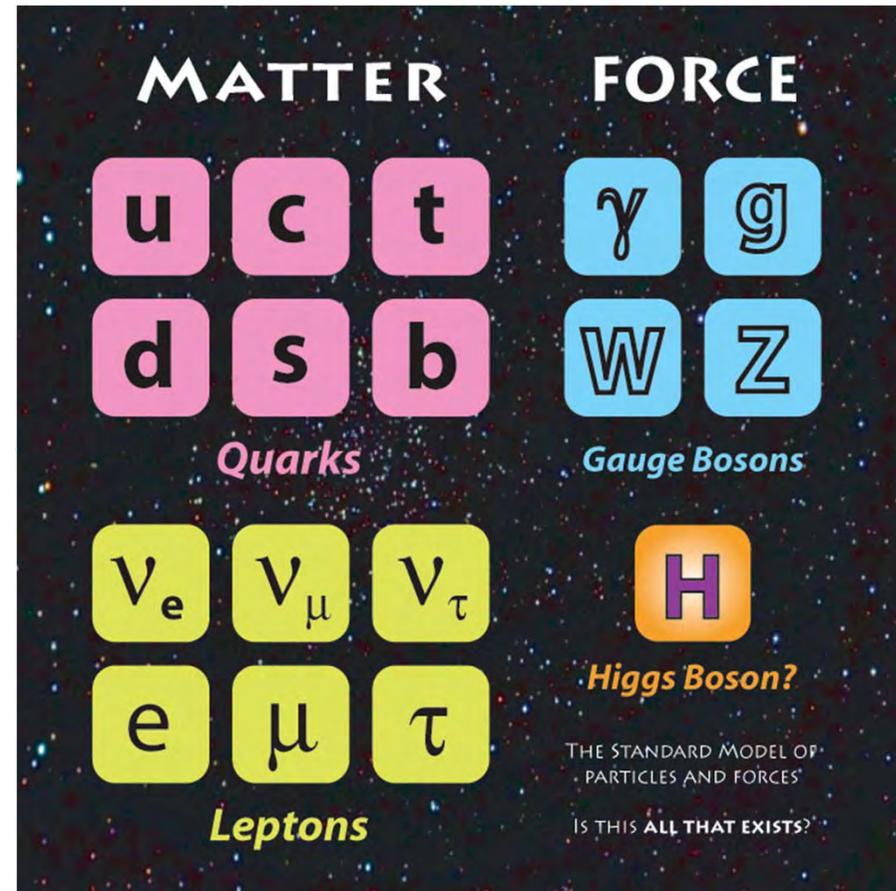
*„... zu klären was die Welt im Innersten zusammenhält.“ (Goethe, 1808)*

# Ein Zensus des Kosmos

- > Damit sind wir sehr erfolgreich:

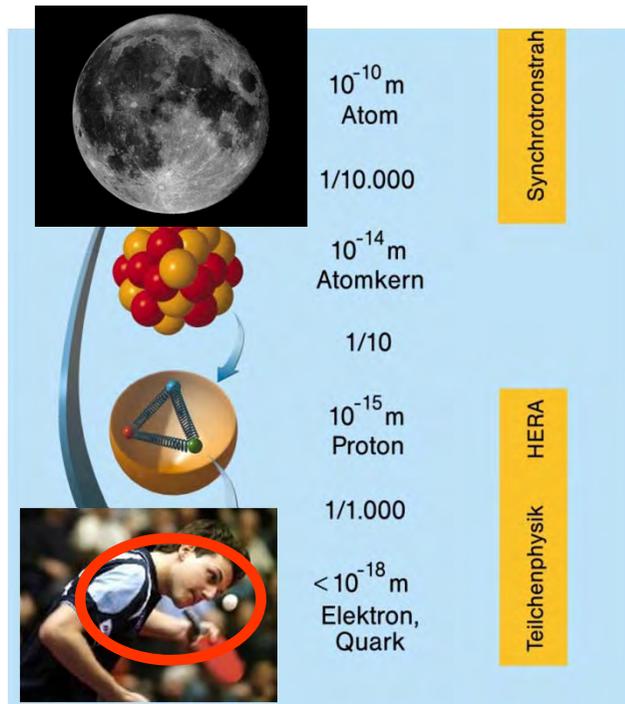
Mit den Quarks, Leptonen und Bosonen, können im Prinzip alle Dinge um uns herum und beinahe alle Wechselwirkungen verstanden werden.

- > Es gibt **kein einziges** Experiment auf der Erde, welches mit diesem „Standard Modell“ unverträgliche Resultate zeigt. Nur das „Higgs-Boson“ fehlt noch. Es soll mit LHC gefunden werden.



<http://www.gridpp.ac.uk/cubes/>

# Ein Zensus des Kosmos



Atom =

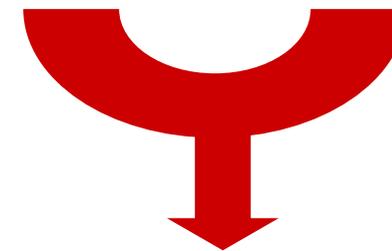
99.999999999999 % leerer Raum

+ Elektronen

(Leptonen, **elementar**)

+ Atomkern

( **Protonen & Neutronen** )



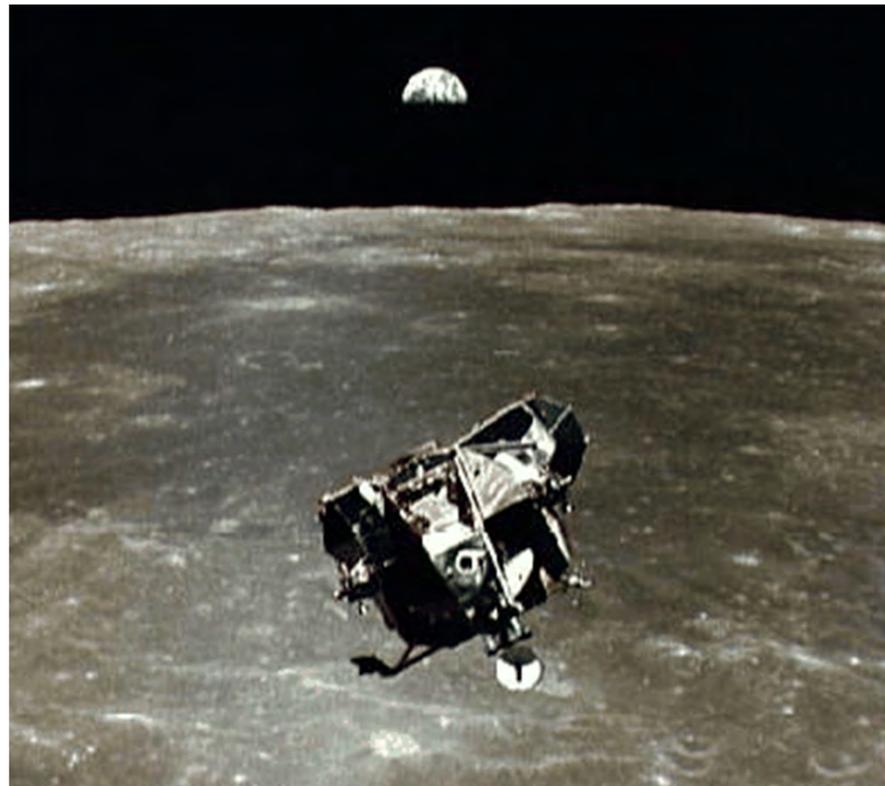
**“Quarks“**

(**elementar**)

# Ein Zensus des Kosmos

- > Eine zentrale Erkenntnis der modernen Wissenschaft lautet:

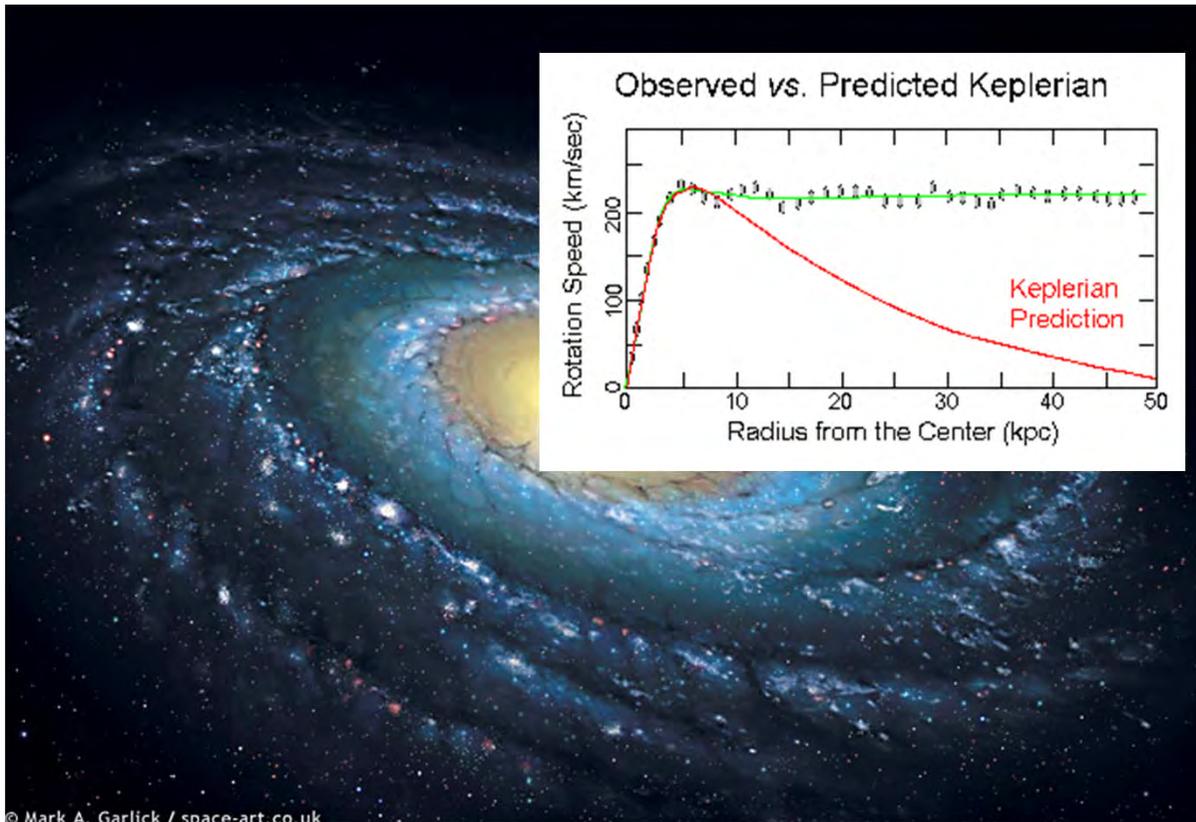
*Im Himmel und auf der Erde gelten die gleichen Naturgesetze.*



# Ein Zensus des Kosmos

- > Unser schönes Standard Modell ist sehr unbefriedigend, wenn wir in den Himmel blicken:

Alle Galaxien drehen sich anders, als wir berechnen:

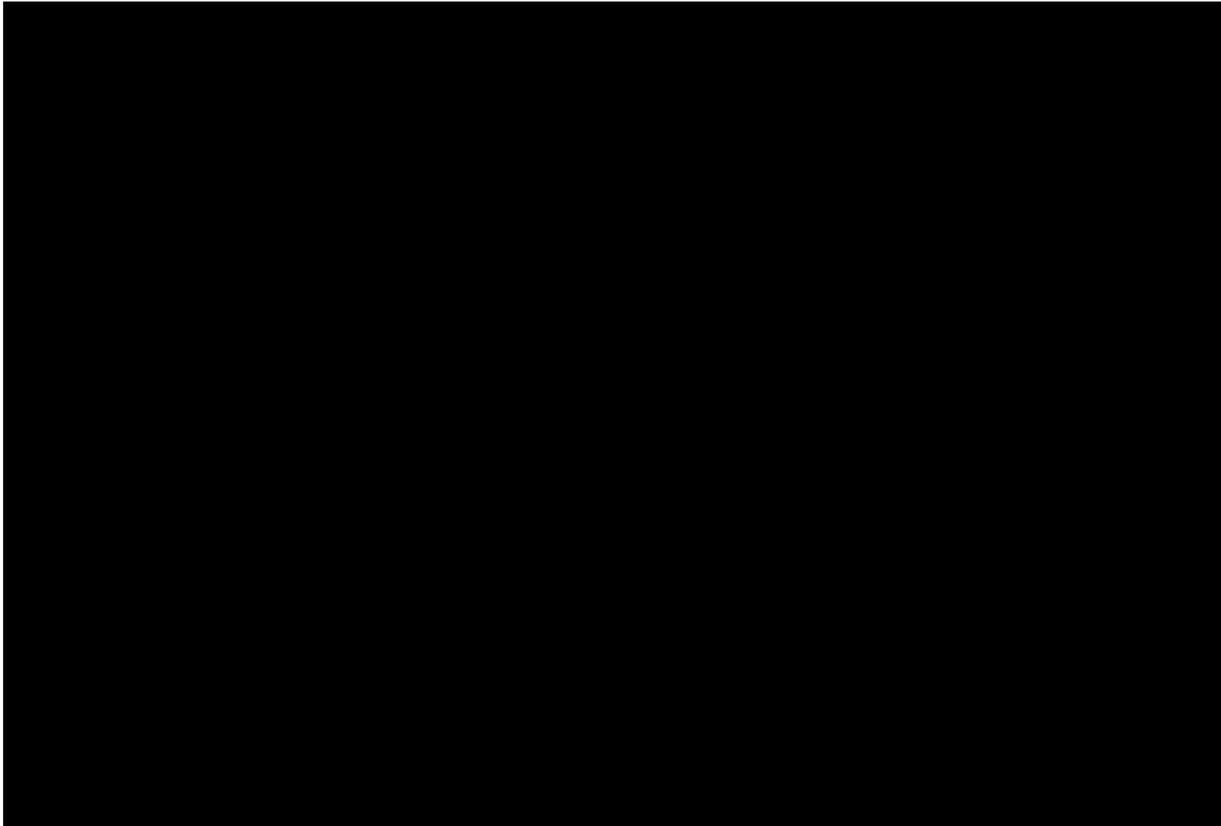


Es muss eine Art  
„Dunkle Materie“  
geben, die für  
zusätzliche  
Anziehungskraft  
sorgt.

# Ein Zensus des Kosmos

- > Unser schönes Standard Modell ist sehr unbefriedigend, wenn wir in den Himmel blicken:

Es gibt eine mysteriöse Kraft, die alles auseinander treibt:



Es muss eine Art

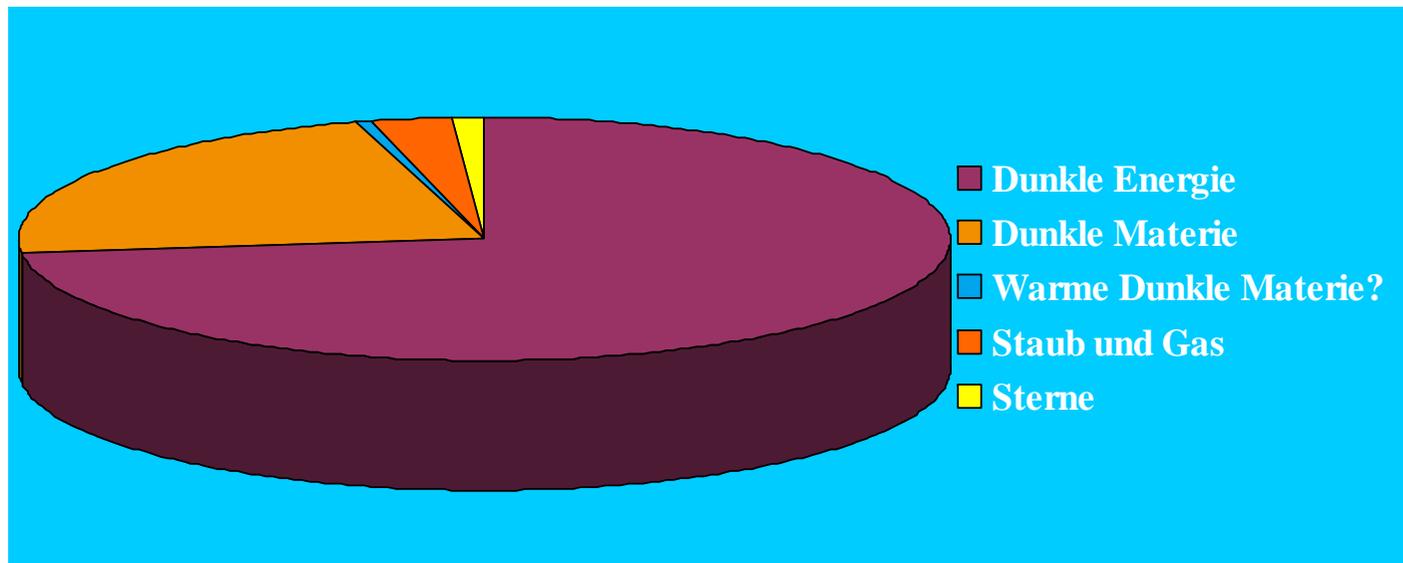
„*Dunkle Energie*“

geben, die die  
Expansion des  
Universums  
antreibt.

# Ein Zensus des Kosmos

- > Unser schönes Standard Modell ist sehr unbefriedigend, wenn wir in den Himmel blicken:

Es gibt viel mehr, als wir bisher entdeckt haben.



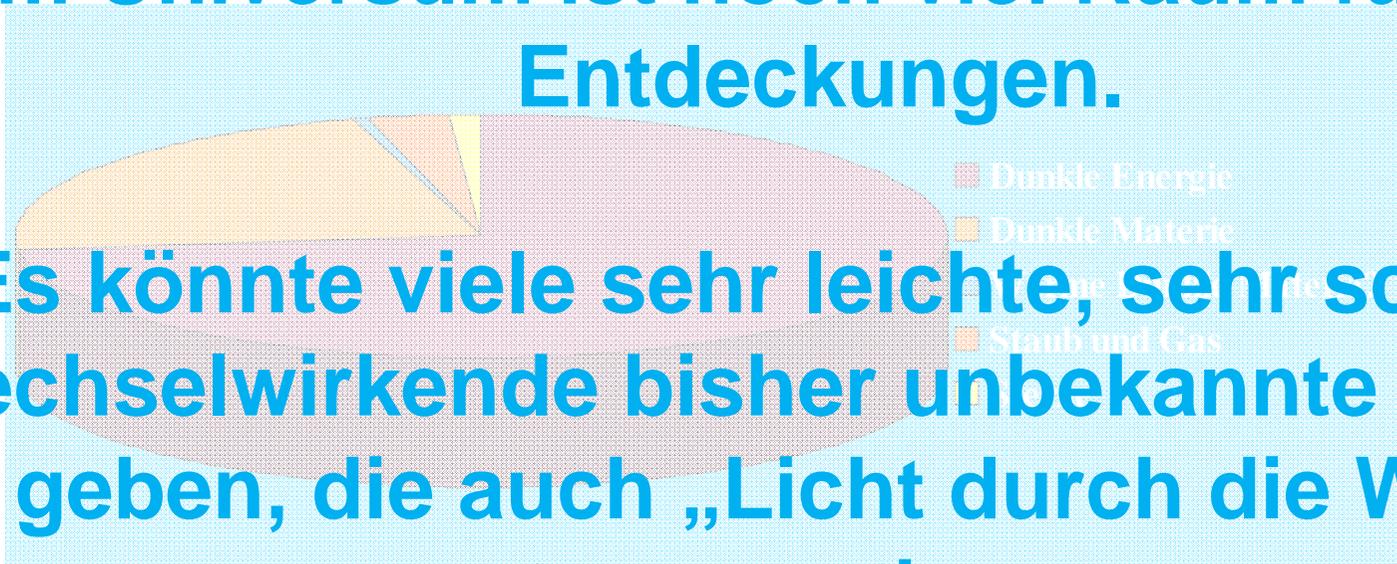
96% der Bestandteile des Universums sind uns unbekannt!

Trost: dies wissen wir sehr genau!

# Ein Zensus des Kosmos

- > Unser schönes Standard Modell ist sehr unbefriedigend, wenn wir in den Himmel blicken:

Es gibt viel mehr, als wir bisher entdeckt haben.  
**Im Universum ist noch viel Raum für neue Entdeckungen.**



**Es könnte viele sehr leichte, sehr schwach wechselwirkende bisher unbekannte Teilchen geben, die auch „Licht durch die Wand“ transportieren.**

96% der Bestandteile des Universums sind uns unbekannt!

Trost: dies wissen wir sehr genau!

# Das Programm für heute

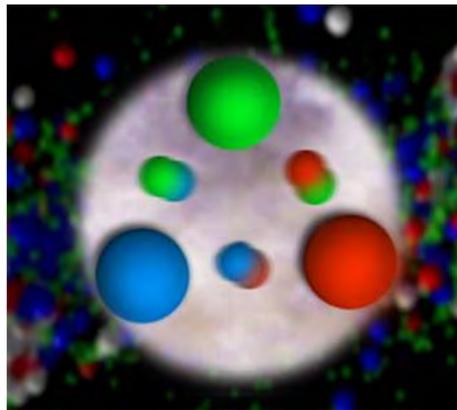
- > Warum „Licht-durch-die-Wand“
  - Ein Zensus des Kosmos
  - Ein Makel der Teilchenphysik  
mit Ausflug zu den Grundlagen der theoretischen Physik
- > Das Axion und Gleichgesinnte
  - Weakly Interacting Slight Particles: WISPs
- > Grundlagen der WISP-Suche
- > Das ALPS Projekt
  - Aufbau
  - Ergebnisse
- > Möglichkeiten für ein ALPS-II Projekt



# Ein Makel des Neutrons?

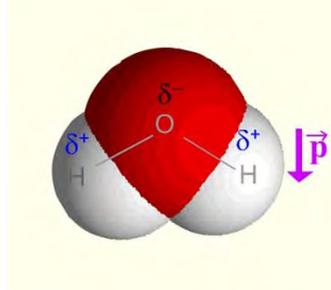
Das Neutron hat eine seltsame Eigenschaft:

Es besteht aus drei (elektrisch geladenen) Quarks, zeigt aber kein (statisches) elektrisches Dipolmoment.



<http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sabl/2006/Oct/3.html>

Vergleich: Dipolmoment eines Wassermoleküls:



<http://www.chemgapedia.de>

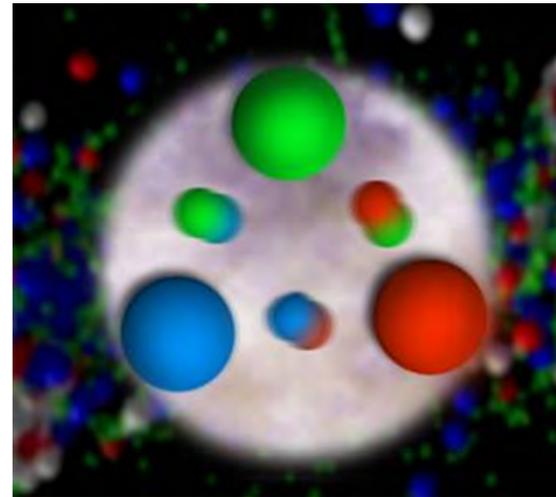
Wieso sind die Wellenfunktionen der drei Quarks im Neutron so genau aufeinander abgestimmt, dass kein elekt. Dipolmoment auftritt?

# Ein Makel des Neutrons?

Naiv erwartet man für das elektrische Dipolmoment:

$$d_{n\text{-QCD}} \sim 10^{-15} \text{ e}\cdot\text{cm}.$$

$\sim 10^{-15} \text{ cm}$



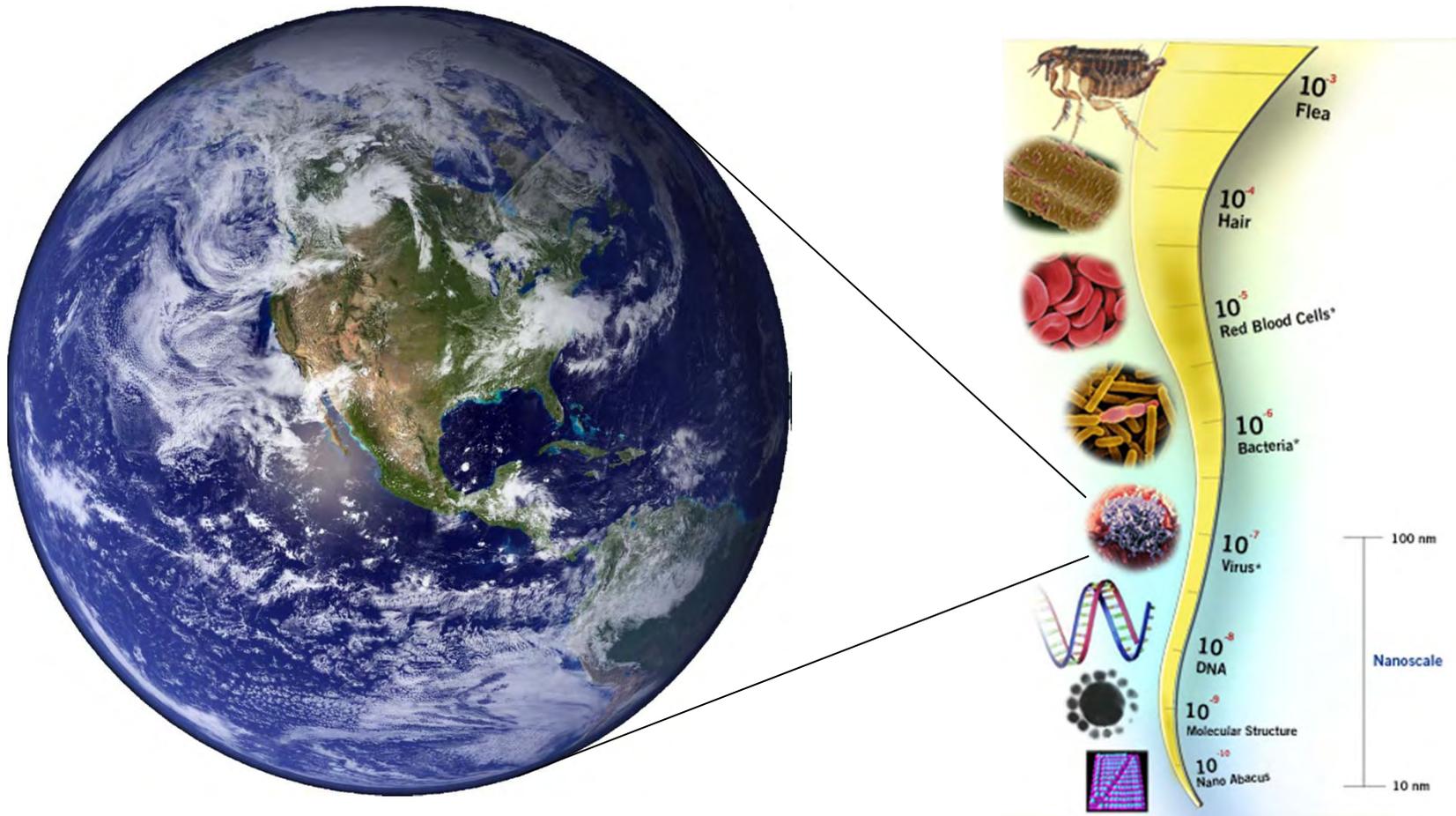
Experimentell ergibt sich:  $d_{n\text{-data}} < 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}!$

Wie kann man den Unterschied von 11 Größenordnungen verstehen?

<http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sabl/2006/Oct/3.html>

# Elf Größenordnungen

... expecting a planet and finding the nanoscale ...



# Ein Makel des Neutrons?

Magnetisches und elektrisches Dipolmoment des Neutrons haben einen engen Bezug zu fundamentalen „Symmetrien“ der Natur:

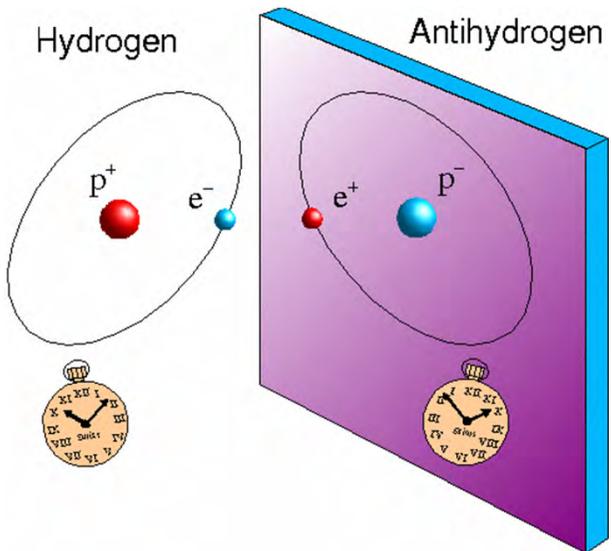
> C (Ladungstausch), P (Spiegelung), T (Zeitumkehr)



# C·P·T und C·P

Theorem:

Physik ist unverändert unter einer C·P·T-Transformation.



*In einem Wasserstoffatom und in einem Antimaterie-Wasserstoffatom (in dem die Zeit rückwärts läuft) sieht alles gleich aus.*



<http://www.mpg.de/~haensch/antihydrogen/introduction.html>

<http://www.mpg.de/~haensch/antihydrogen/annihilate.html>

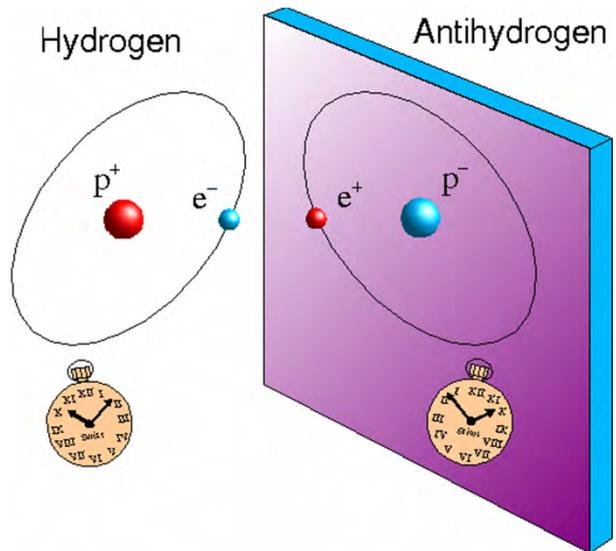
Gesucht:

physikalische Reaktion, die unter einer C·P-Transformation veränderlich ist!

# C·P·T und C·P

Gesucht:

Phänomene, die sich unter einer C·P-Transformation ändern.



*Sieht in einem Wasserstoffatom und in  
einem Antimaterie-Wasserstoffatom  
alles  
gleich aus?*

<http://www.mpq.mpg.de/~haensch/antihydrogen/introduction.html>

Eine solche (ausreichend große) „C·P-Verletzung“  
ist ein „heiliger Graal“ der Physik!

# C-P ist keine akademische Frage!

C-P Verletzung ist essentiell um zu erklären,

warum im frühen Universum das Verhältnis von Materie und Antimaterie

Matter/Antimatter =  $1+10^{-9}$  war: wir und alle Dinge entstammen diesem  $10^{-9}$  Anteil.



<http://www.weltmaschine.de>

Ein einziges Sandkorn!

Verführerisch:

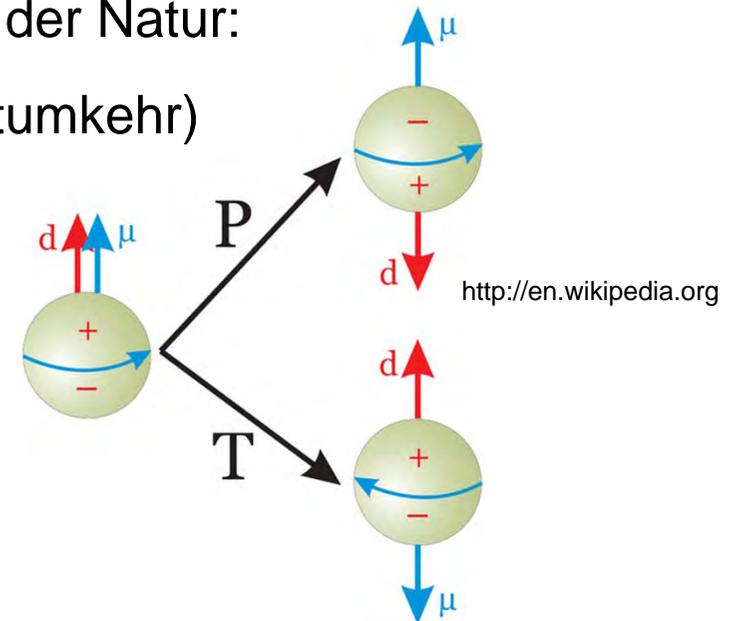
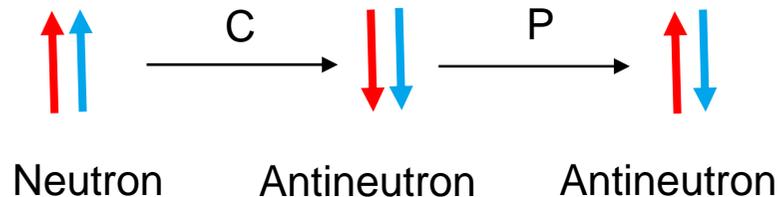
die Struktur der Theorie der QCD, die auch die Zusammensetzung des Neutrons beschreibt, ermöglicht diese C-P Verletzung!



# Das Neutron und C-P

Magnetisches und elektrisches Dipolmoment des Neutrons haben einen engen Bezug zu fundamentalen Symmetrien der Natur:

> C (Ladungstausch), P (Spiegelung), T (Zeitumkehr)



Falls das Neutron ein **elektrisches Dipolmoment** zeigt zusätzlich zum gemessenen **magnetischen Dipolmoment**, ist C-P verletzt!  
Beide Momente würden zwischen Parallelität und Antiparallelität wechseln.

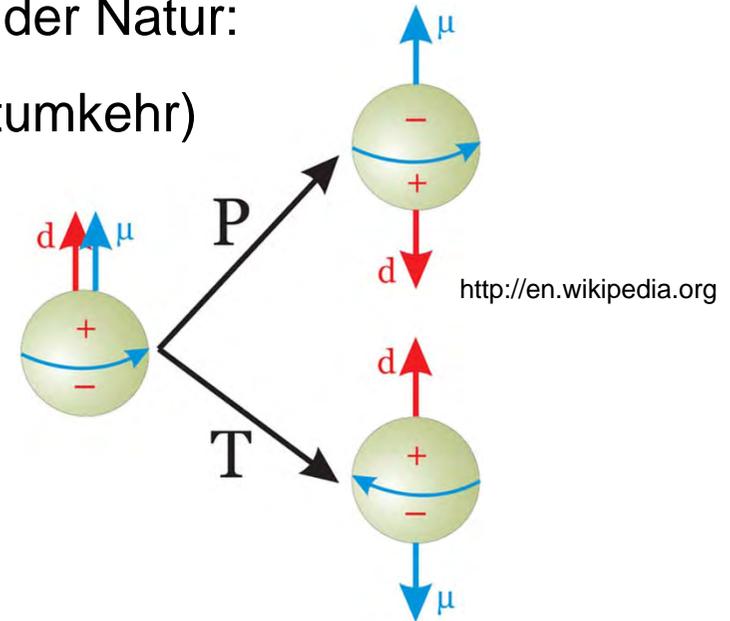
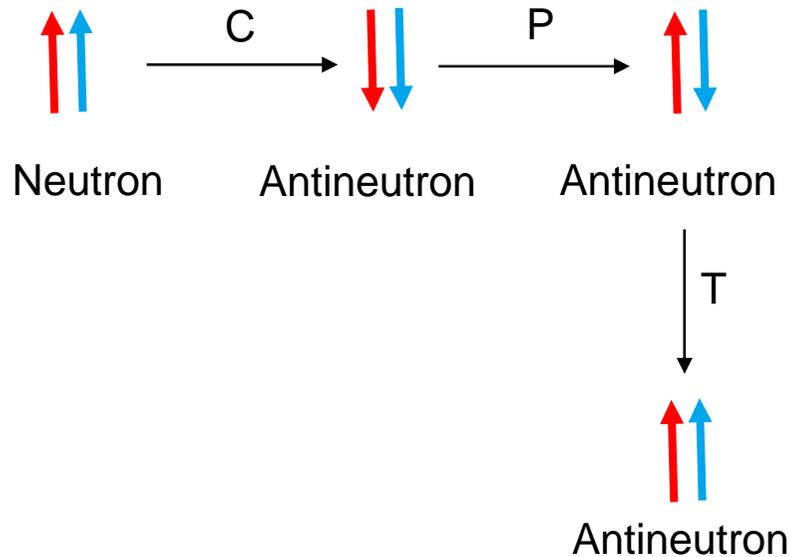
QCD verletzt C-P ↔ elektrisches Dipolmoment des Neutrons!

Messungen: das Dipolmoment ist Null!

# Alles ok mit C-P-T!

Magnetisches und elektrisches Dipolmoment des Neutrons haben einen engen Bezug zu fundamentalen Symmetrien der Natur:

> C (Ladungstausch), P (Spiegelung), T (Zeitumkehr)



# Warum erhält die QCD C-P?

- > Das elektrische Dipolmoment des Neutrons verschwindet “zufällig” aufgrund der zufälligen Parameter der QCD. Es bleibt nichts zu erklären.  
Dies wäre ein Physiker-Albtraum:



*“I had the dream about meaningful employment again last night.”*

- > Gibt es eine bessere Erklärung? Wie könnte man diese beweisen?

# Das Programm für heute

- > Warum „Licht-durch-die-Wand“
  - Ein Zensus des Kosmos
  - Ein Makel der Teilchenphysik  
mit Ausflug zu den Grundlagen der theoretischen Physik
  
- > Das Axion und Gleichgesinnte
  - Weakly Interacting Slight Particles: WISPs
  
- > Grundlagen der WISP-Suche
  
- > Das ALPS Projekt
  - Aufbau
  - Ergebnisse
  
- > Möglichkeiten für ein ALPS-II Projekt



# Von einem Makel zu einem Teilchen

Peccei-Quinn 1977:

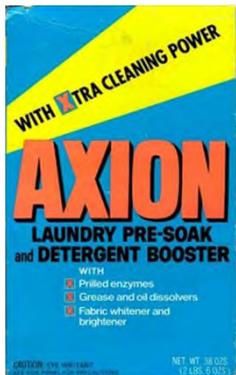
Es gibt eine neue Art von Kraftfeld, welches erst bei sehr hohen Energien direkt wirksam wird, aber bei niedrigen Energien die C-P-Erhaltung der QCD sicher stellt.

Wilczek und Weinberg 1978:

Wenn dies richtig ist, muss es ein neues sehr leichtes und sehr schwach wechselwirkendes Teilchen geben: das Axion.

Also:

Man kann das verschwindende elektrische Dipolmoment des Neutrons erklären, wenn es das Axion gibt.

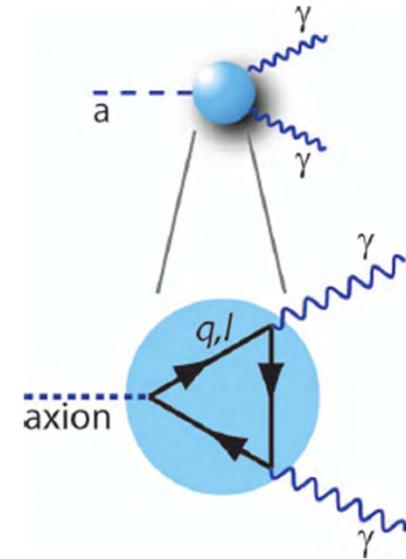


Das Axion „reinigt“ die QCD.



# Eigenschaften des QCD Axions

- > Das Axion ist der kleine Bruder des  $\pi^0$ -Mesons. Es koppelt an zwei Photonen.
- > Seine Masse ergibt sich aus der Energieskala  $f_a$  des neuen Feldes :  
$$m_a = 0.6\text{eV} \cdot (10^7\text{GeV} / f_a)$$
- > Die Stärke der Kopplung an zwei Photonen ist  
$$g_{a\gamma\gamma} = \alpha \cdot g_\gamma / (\pi \cdot f_a)$$
, wobei  $g_\gamma$  modellabhängig und  $O(1)$  ist.

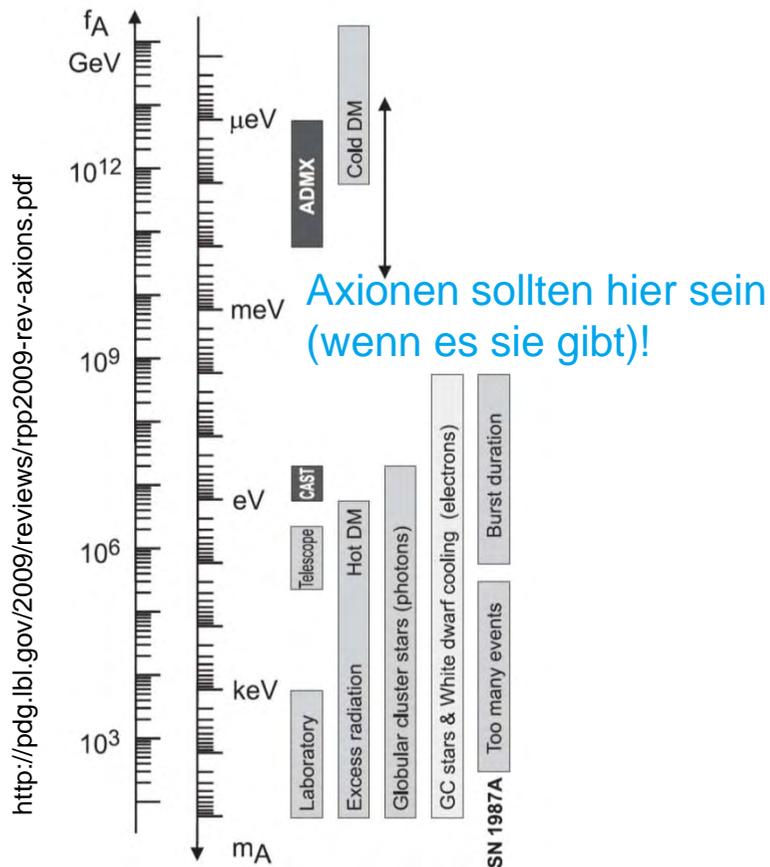


- > Die Dichte der Axionen im Universum ist  
$$\Omega_a / \Omega_c \sim (f_a / 10^{12}\text{GeV})^{7/6}.$$

$$\left. \begin{array}{l} f_a < 10^{12}\text{GeV} \\ m_a > \mu\text{eV} \end{array} \right\}$$

*Bis auf "Zufall" und  
ähnliche Auswege*

# ... and here we are:

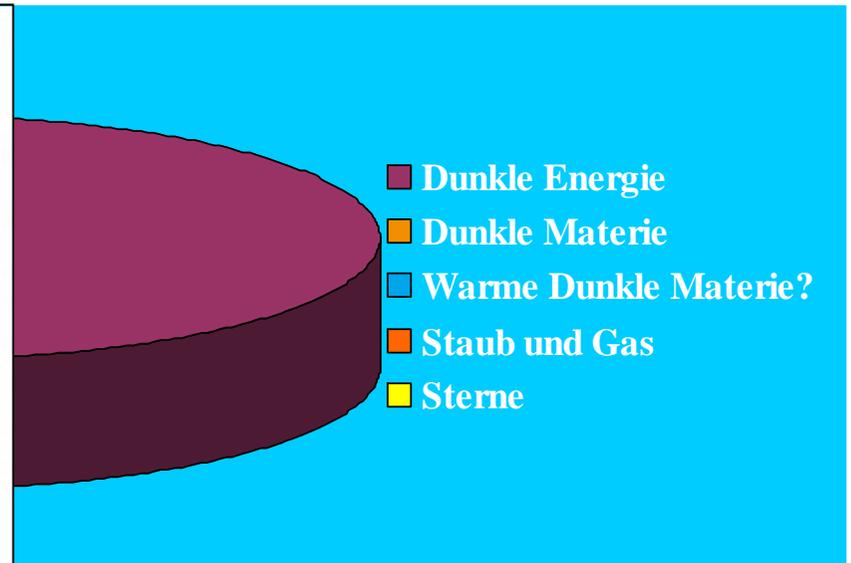
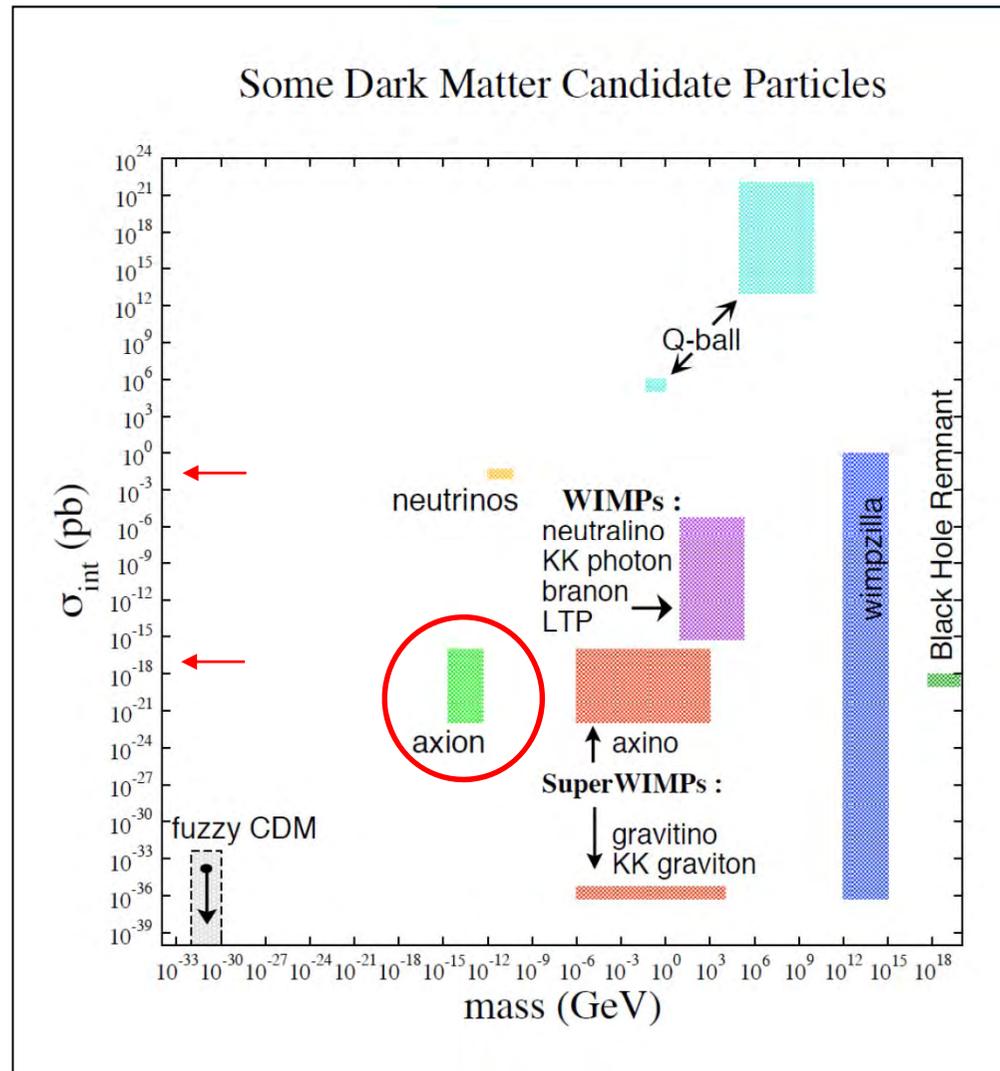


**Figure 1:** Exclusion ranges as described in the text. The dark intervals are the approximate CAST and ADMX search ranges. Limits on coupling strengths are translated into limits on  $m_A$  and  $f_A$  using  $z = 0.56$  and the KSVZ values for the coupling strengths. The “Laboratory” bar is a rough representation of the exclusion range for standard or variant axions. The “GC stars and white-dwarf cooling” range uses the DFSZ model with an axion-electron coupling corresponding to  $\cos^2 \beta = 1/2$ . The Cold Dark Matter exclusion range is particularly uncertain. We show the benchmark case from the misalignment mechanism.

- > Es könnte ein bisher unbekanntes Teilchen, das Axion, geben:
  - $m_a \approx 1 \text{ meV}$  ( $1/100.000.000 \cdot m_e$ )
  - $f_a \approx 10^{10} \text{ GeV}$  ( $1.000.000 \cdot \text{LHC}$ )
  - $g_{a\gamma\gamma} \approx 10^{-13} \text{ GeV}^{-1}$
- > Wenn es gefunden wird, lernen wir etwas über sehr hohe Energieskalen.
- > Ein solches Axion könnte die meiste Masse des Universums ausmachen.
- > Leider reagiert es nur sehr schwach mit anderer Materie.



# Dunkle Materie: Axionen?



**Das Axion wurde nicht „erfunden“, um das Problem der Dunklen Materie im Universum zu lösen!**

# Von Axionen zu ALPs und WISPs

Es könnte noch viel mehr neue Teilchen geben als das QCD Axion:

> **ALPs**: “axion-like particles”

String Axiverse

A. Arvanitaki, S. Dimopoulos, S. Dubovsky, N. Kaloper, and J. March-Russell,  
arXiv:0905.4720 [hep-th]

*String theory suggests the simultaneous presence of many ultralight axions, possibly populating each decade of mass down to the Hubble scale  $10^{-33}$ eV. Conversely the presence of such a plenitude of axions (an “axiverse”) would be evidence for string theory, ...*

> **WISPs**, **W**eakly **I**nteracting **S**light **P**articles,  
(Axionen und ALPs, schwere Photonen, mini-geladene Teilchen) ergeben sich auf natürliche Art und Weise aus String-Theorien

Naturally Light Hidden Photons in LARGE Volume String Compactifications

M. Goodsell, J. Jaeckel, J. Redondo and A. Ringwald,  
arXiv:0909.0515 [hep-ph], JHEP 0911:027,2009

*Extra “hidden”  $U(1)$  gauge factors are a generic feature of string theory that is of particular phenomenological interest. They can kinetically mix with the Standard Model photon and are thereby accessible to a wide variety of astrophysical and cosmological observations and laboratory experiments.*



# Zusammenfassung der Motivation

- > Mit der Entdeckung des Axions könnte
  - die CP-Erhaltung der QCD erklärt werden,
  - die Zusammensetzung der Dunklen Materie verstanden werden.
- > Es könnte einen Zoo von **Weakly Interacting Slight Particles** geben
- > Es gibt viele bisher unverstandene Phänomene auf sehr kleinen Energieskalen. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Experimente am LHC hierzu Lösungen aufzeigen werden.
  - Die Masse der Neutrinos ist im meV-Bereich.
  - Die Dichte der Dunklen Energie liegt im meV-Bereich.
  - Die Gesamtdichte des Universums liegt im meV-Bereich.
- > „Licht-durch-die-Wand“-Experimente könnten WISPs finden!



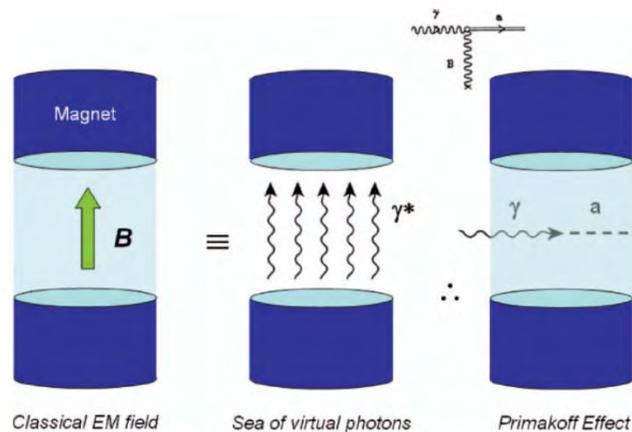
# Das Programm für heute

- > Warum „Licht-durch-die-Wand“
  - Ein Zensus des Kosmos
  - Ein Makel der Teilchenphysik mit Ausflug zu den Grundlagen der theoretischen Physik
  
- > Das Axion und Gleichgesinnte
  - Weakly Interacting Slight Particles: WISPs
  
- > Grundlagen der WISP-Suche
  
- > Das ALPS Projekt
  - Aufbau
  - Ergebnisse
  
- > Möglichkeiten für ein ALPS-II Projekt

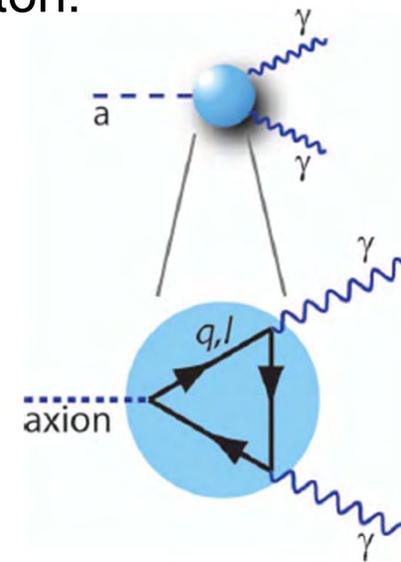


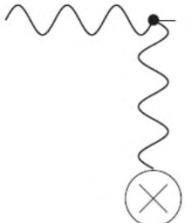
# Grundlagen der WISP-Suche

- > Neutrale Spin-0 WISPs (Axion, ALP) koppeln an 2 Photon:
- > Eines der Photonen kann von einem Magnetfeld geliefert werden: Primakoff Effekt



The Search for Axions,  
Carosi, van Bibber, Pivovarov,  
Contemp. Phys. 49, No. 4, 2008





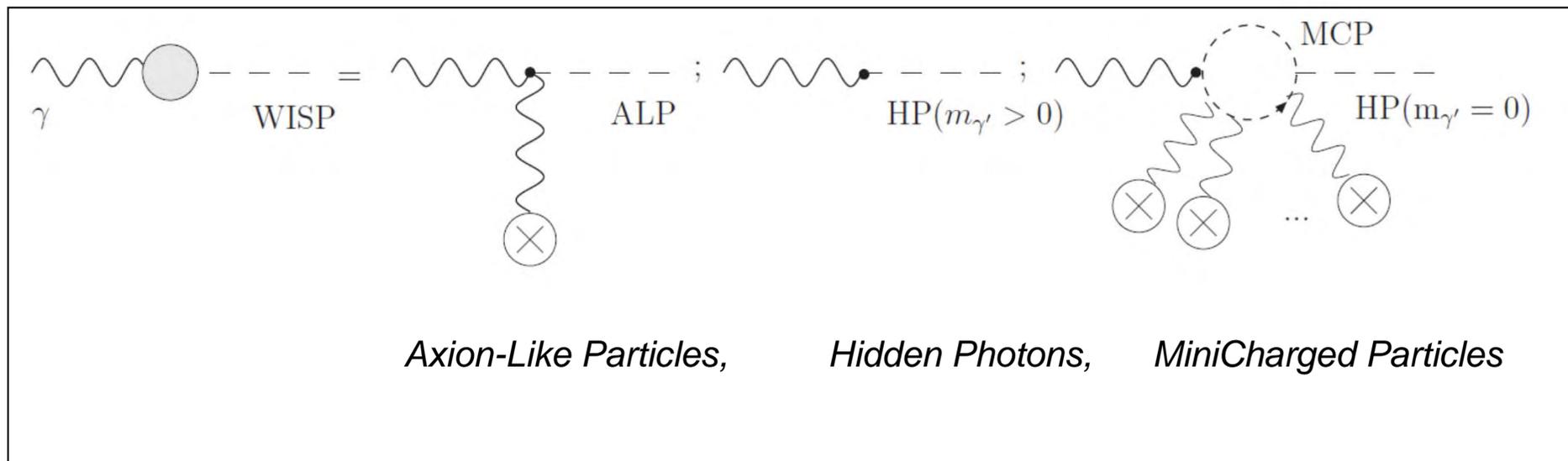
ALP

- WISPs können durch Licht in einem Magnetfeld erzeugt werden.
- WISPs können sich in einem Magnetfeld in Licht umwandeln.



# Grundlagen der WISP-Suche

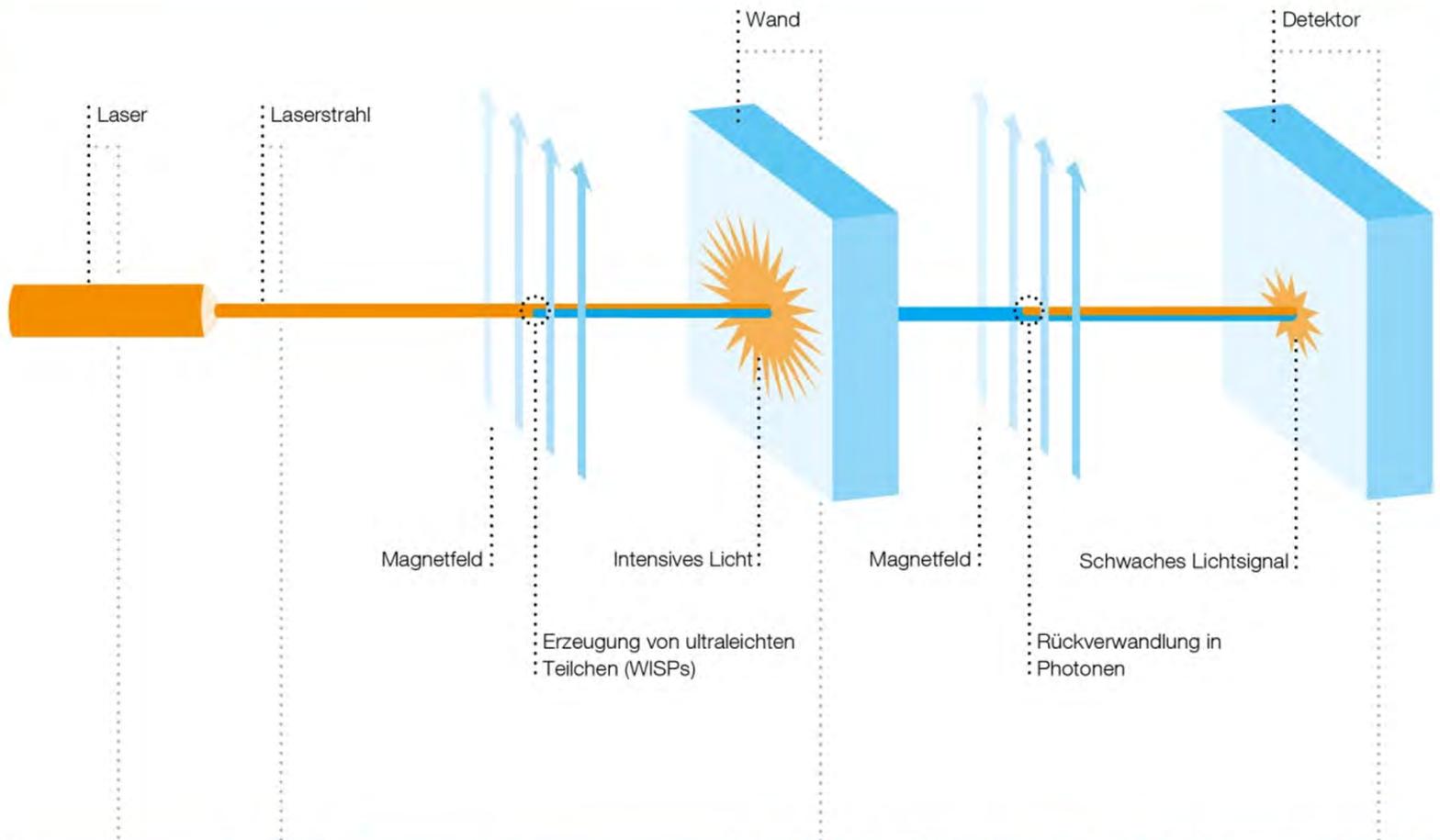
- > Neutrale Spin-0 WISPs : Primakoff Effekt
- > Neutral Spin-1 WISPs (“hidden Sector Photons” HP) oszillieren im Vakuum mit normalen Photonen (wie Neutrinos).
- > Minigeladene Teilchen (MCP, etwa  $10^{-6} e$ ) können indirekt durch Schleifeneffekte nachgewiesen werden.



# Das Programm für heute

- > Warum „Licht-durch-die-Wand“
  - Ein Zensus des Kosmos
  - Ein Makel der Teilchenphysik  
mit Ausflug zu den Grundlagen der theoretischen Physik
  
- > Das Axion und Gleichgesinnte
  - Weakly Interacting Slight Particles: WISPs
  
- > Grundlagen der WISP-Suche
  
- > Das ALPS Projekt
  - Aufbau
  - Ergebnisse
  
- > Möglichkeiten für ein ALPS-II Projekt





Das ALPS-Experiment bei DESY.

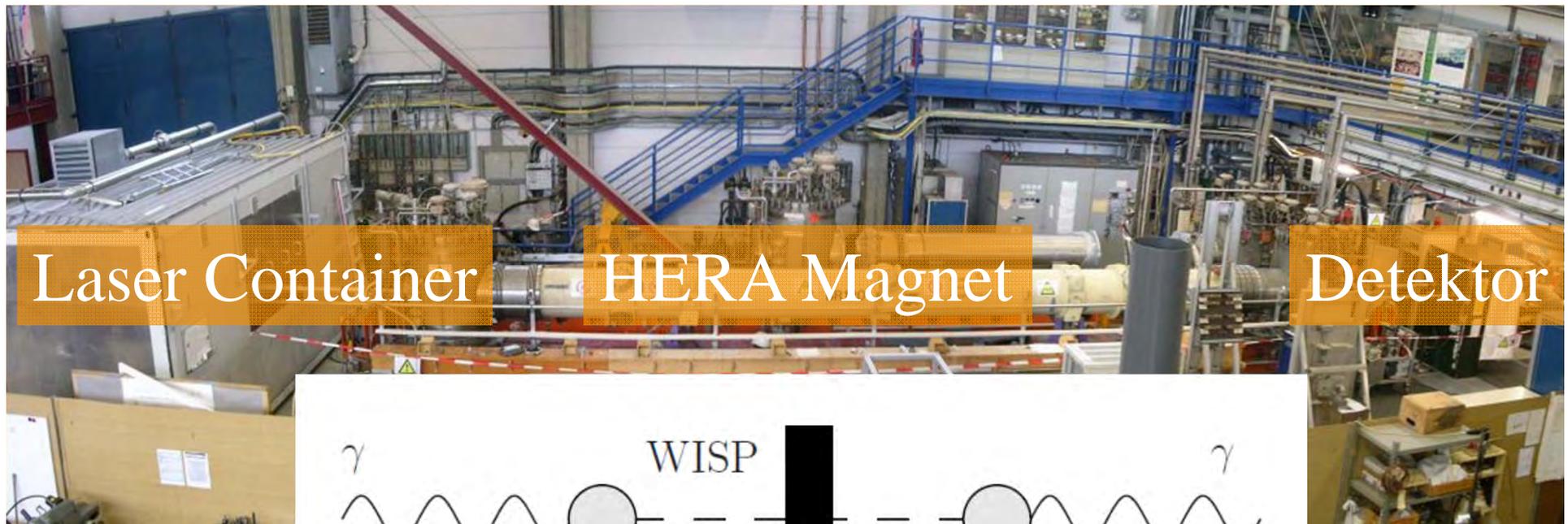
# Das ALPS Projekt

Any Light Particle Search @ DESY



# Das ALPS Projekt

Any Light Particle Search @ DESY



Ein Licht-durch-die-Wand Experiment

# Das ALPS Projekt

## Any Light Particle Search @ DESY

- DESY
- Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), and Institute for Gravitational Physics, Leibniz University Hannover
- Laserzentrum Hannover
- Hamburger Sternwarte



# ALPS @ DESY in Hamburg



PETRA III

FLASH

European XFEL

ALPS

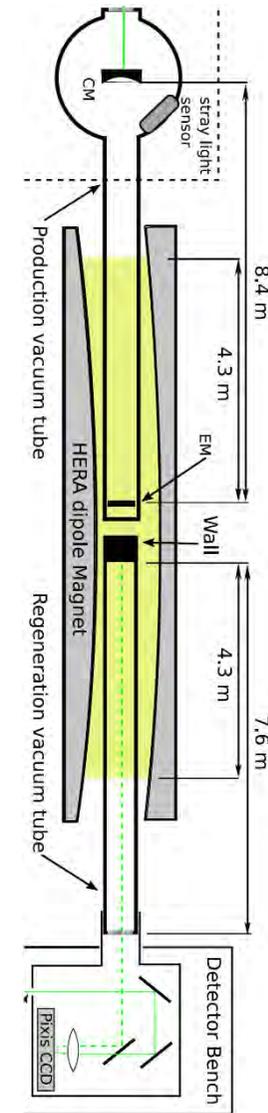
(das derzeit einzige  
Teilchenphysik-Experiment  
bei DESY)

- > Genehmigt: Januar 2007
- > Ende der ersten Phase:  
Dezember 2009

# Die drei ALPS-Komponenten



- > Starker Laser:
- > Starker Magnet:  
HERA-Dipol: 5 T, supraleitend
- > Sensitiver Detektor:  
CCD



## Tubes:

- diameter:  
34 mm
- clear aperture:  
14 mm

# Die technischen Herausforderungen

- > Möglichst viel Licht!
- > Möglichst starker Magnet!
- > Möglichst sensitiver Detektor!
- > Vakuumröhren im Magneten, Sauberkeit („Reinraumbedingungen“)

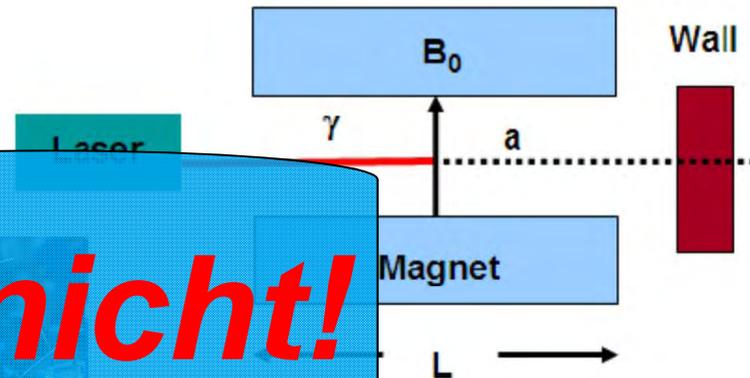


# Wie: möglichst viel Licht

- > Erste Ansatz:  
möglichst starker Laser!

**Funktioniert nicht!**

- > z.B. Schweiß-Laser:



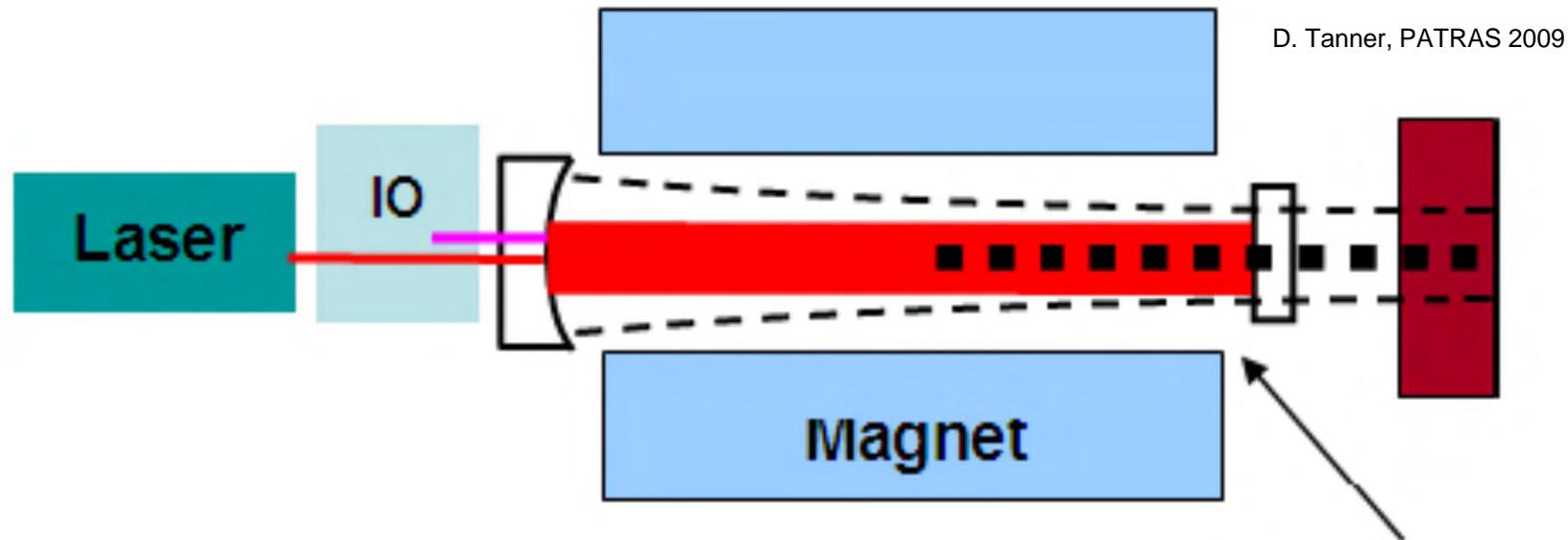
D. Tanner, PATRAS 2009

- > Problem: bei ALPS trifft der Laser in der Mitte des Magneten auf die Wand. Der Magnet arbeitet bei einer Temperatur von  $-269^{\circ}\text{C}$ . Dies ist schlecht verträglich mit hohen Temperaturen!



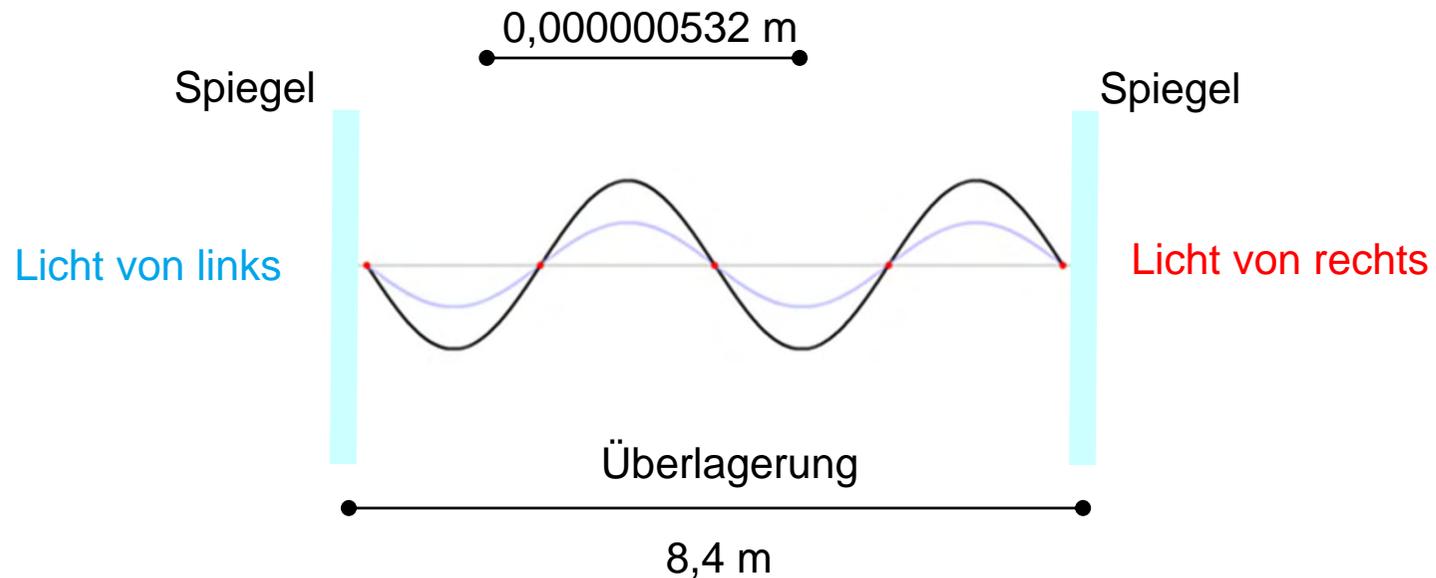
# Wie: möglichst viel Licht

- > Trick:  
Licht wird hin und her reflektiert,  
ein optischer Resonator wird in den Magneten eingebaut.



# Wie: möglichst viel Licht

- > Trick:  
wenig Licht wird hin und her reflektiert,  
ein *optischer Resonator* wird in den Magneten eingebaut.



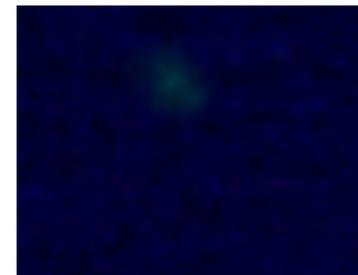
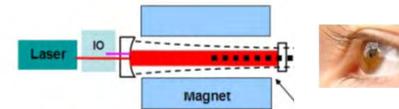
Das Licht wird zwischen den Spiegeln „gespeichert“:  
hohe Verstärkungen sind so möglich!

# Wie: möglichst viel Licht

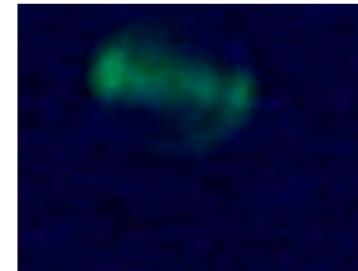
## > Herausforderung:

- Der Abstand der Spiegel und die Wellenlänge des Lichtes müssen auf wenige Hundertstel eines Millionstel eines Meters überein stimmen. Dies erfordert ständige elektronische Überwachung und Korrektur.
- Das von beiden Spiegeln reflektierte Licht muss exakt wieder in sich zurück gespiegelt werden.
- Und dies alles in einem Magneten ohne Zugang zu dem inneren Spiegel.

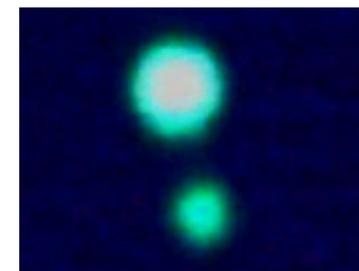
## > Dies ist erstmalig bei ALPS gelungen.



*Resonator  
verstimmt.*



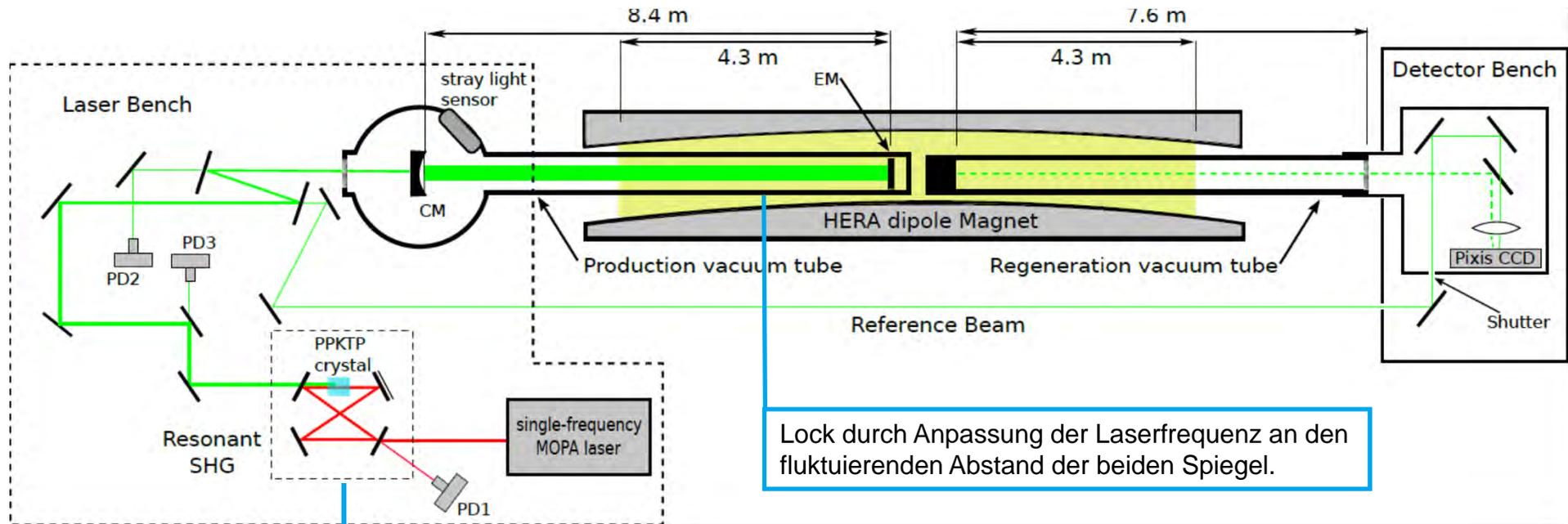
*abgestimmt,  
aber ohne „Lock“.*



*Locked!*

# Das ALPS Laser-System

> Komplexes und empfindlich!

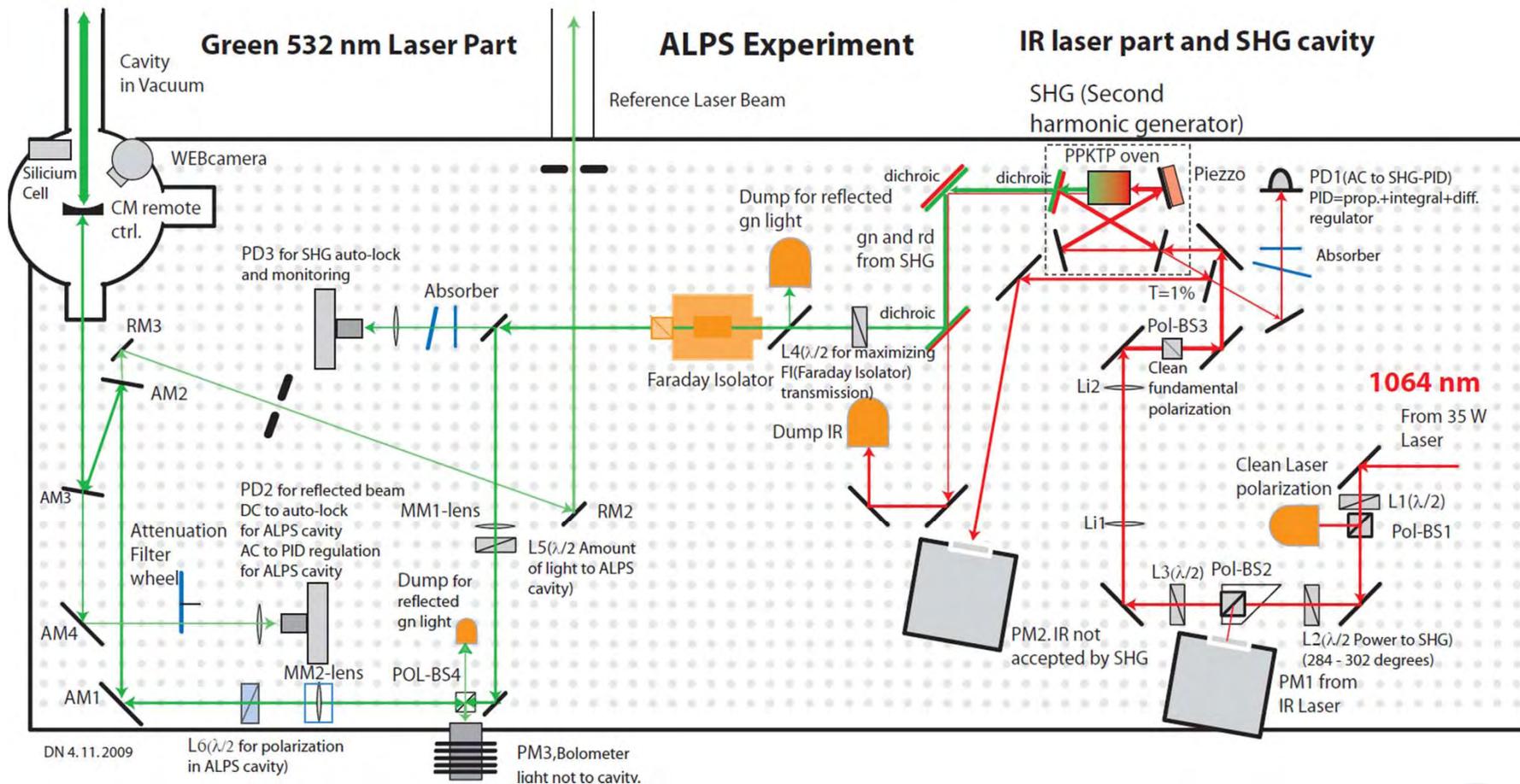


Lock durch Anpassung der Laserfrequenz an den fluktuierenden Abstand der beiden Spiegel.

Lock durch Anpassung des Spiegelabstandes an die sich verändernde Laserfrequenz.

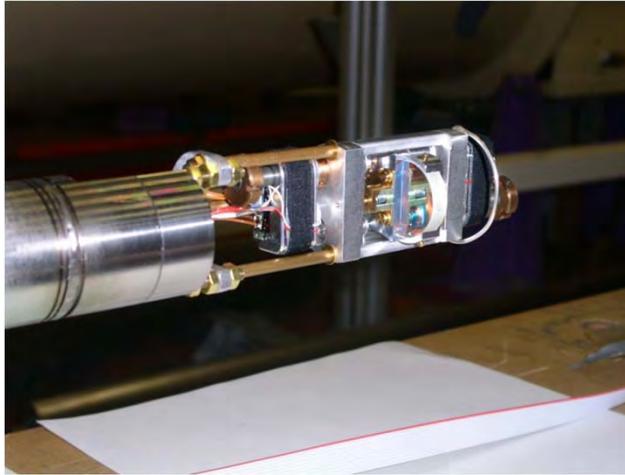
# Das ALPS Laser-System

> Komplex und empfindlich!



# Das ALPS Laser-System

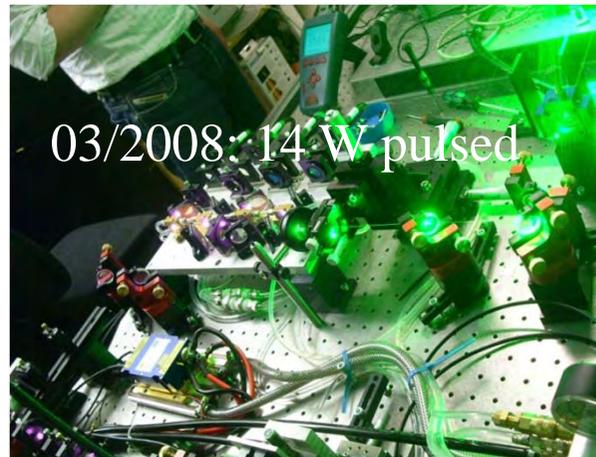
- > Beispiel: Entwicklung von ferngesteuerten Spiegelhaltern.



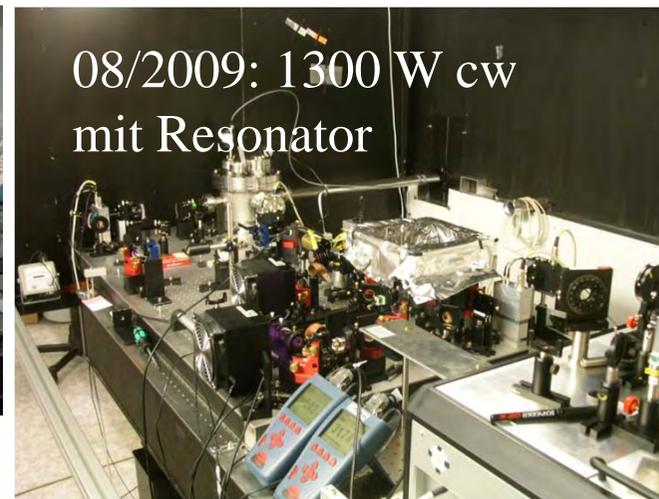
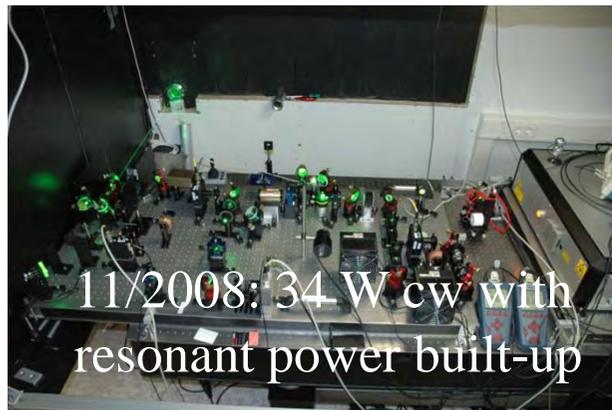
Die Ausrichtung des Spiegels in der Magnetmitte muss ferngesteuert erfolgen.

Dazu müssen spezielle Motoren verwendet werden, die noch in sehr starken Magnetfeldern und (unten) auch im Vakuum funktionieren.

# Das ALPS Laser-System

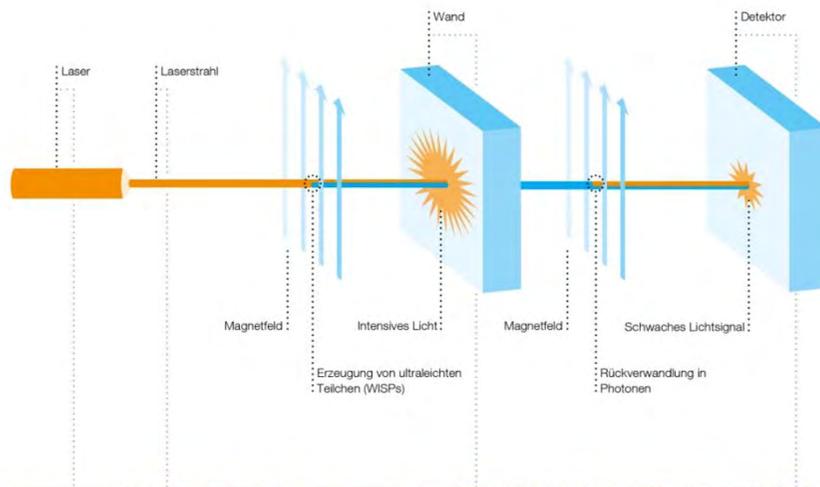


Die Leistung von 1300 W wird erreicht, in dem ein 4,4 W Laser mit einem optischen Resonator um den Faktor 300 verstärkt wird.



1300 W entsprechen der Leistung von etwa 15.000.000 Laserpointern!

# Wie: möglichst sensitiver Detektor



Das ALPS-Experiment bei DESY.

> ALPS verwendet eine Digitalkamera, die nach dem gleichen Prinzip wie jeder (moderne) Fotoapparat funktioniert.

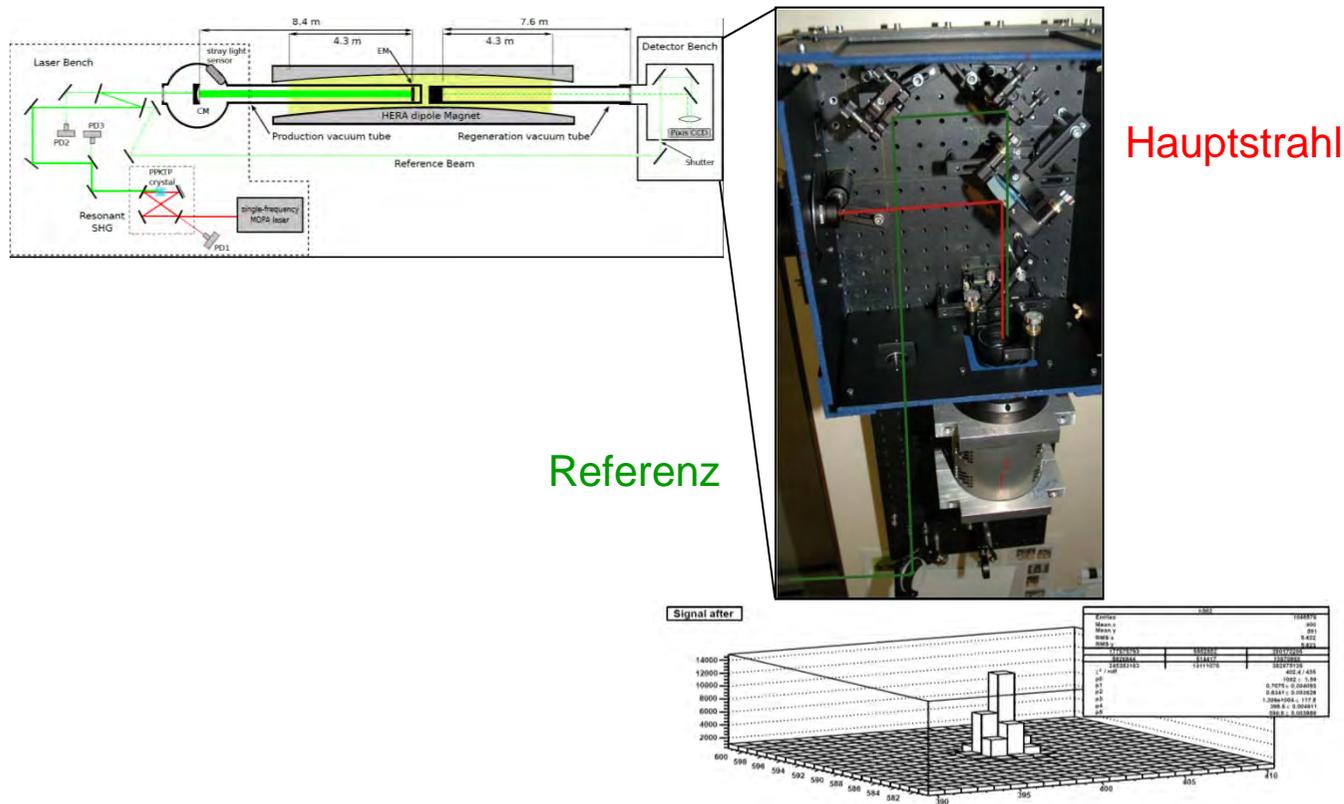
- nur 1 Megapixel, aber
- hochempfindlich.

PIXIS 1024B:



# Der ALPS Detektor

> Das Licht wird auf wenige Pixel fokussiert:



Fokus auf der CCD  
(Pixelgröße 13  $\mu\text{m}$ ).



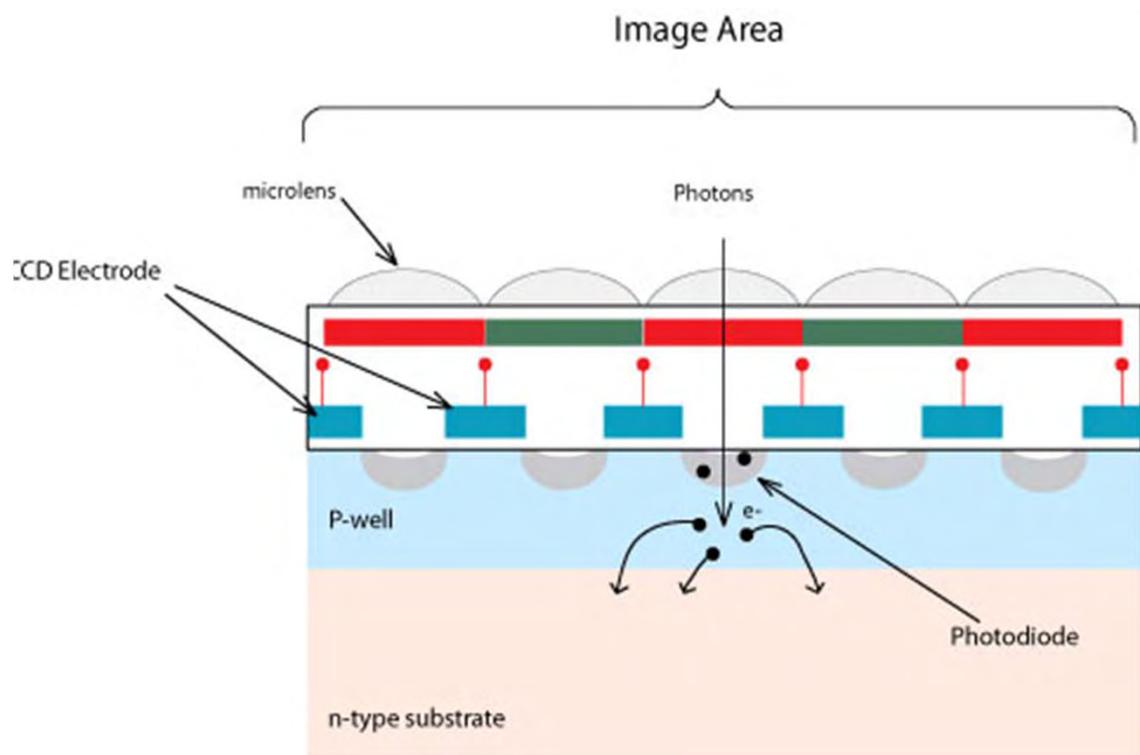
# Wie: möglichst sensitiver Detektor

- > Die Herausforderung:  
Das „Rauschen“ von CCD-Pixeln.



# Wie: möglichst sensitiver Detektor

> Ursachen des „Rauschen“ von CCD-Pixeln I:



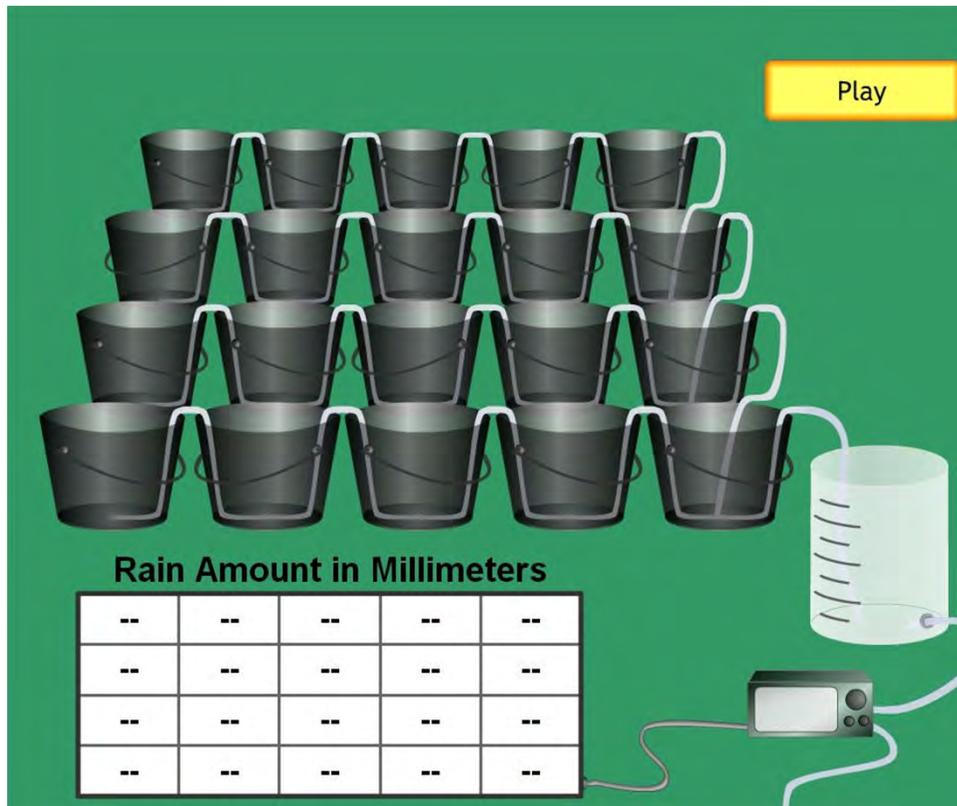
<http://estevens-hkomori.pluggedin.kodak.com/default.asp?item=2179980>

- Licht erzeugt Elektronen, deren Ladung eingesammelt wird.
- Der gleiche Prozess kann auch durch thermische Bewegung passieren: elektrische Ladung sammelt sich an, ohne dass Licht gemessen wurde.
- Dieser „Dunkelstrom“ kann stark reduziert werden, wenn der Chip gekühlt wird.

Bei dem ALPS-Detektor beträgt die Chip-Temperatur  $-70^{\circ}\text{C}$ .

# Wie: möglichst sensitiver Detektor

> Ursachen des „Rauschen“ von CCD-Pixeln II:

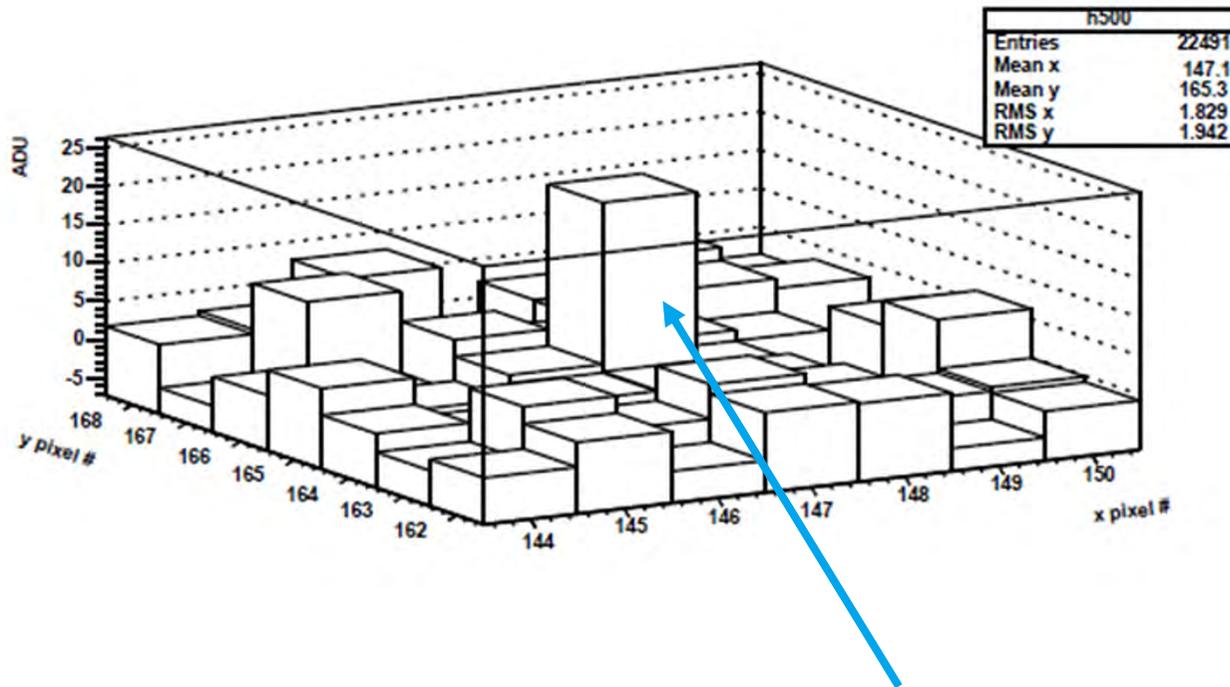


- Die Auslese-Elektronik arbeitet nicht perfekt, sondern induziert kleine Schwankungen.
- Dies nennt man Ausleserauschen.
- Bei dem ALPS-Detektor wurde dies möglichst minimiert, in dem langsam und sorgfältig ausgelesen wird:  
Das Speichern eines Bildes dauert 10 Sekunden.

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/telescopes/buckets.html>

# ALPS at Work

> So würde ein Signal aussehen:



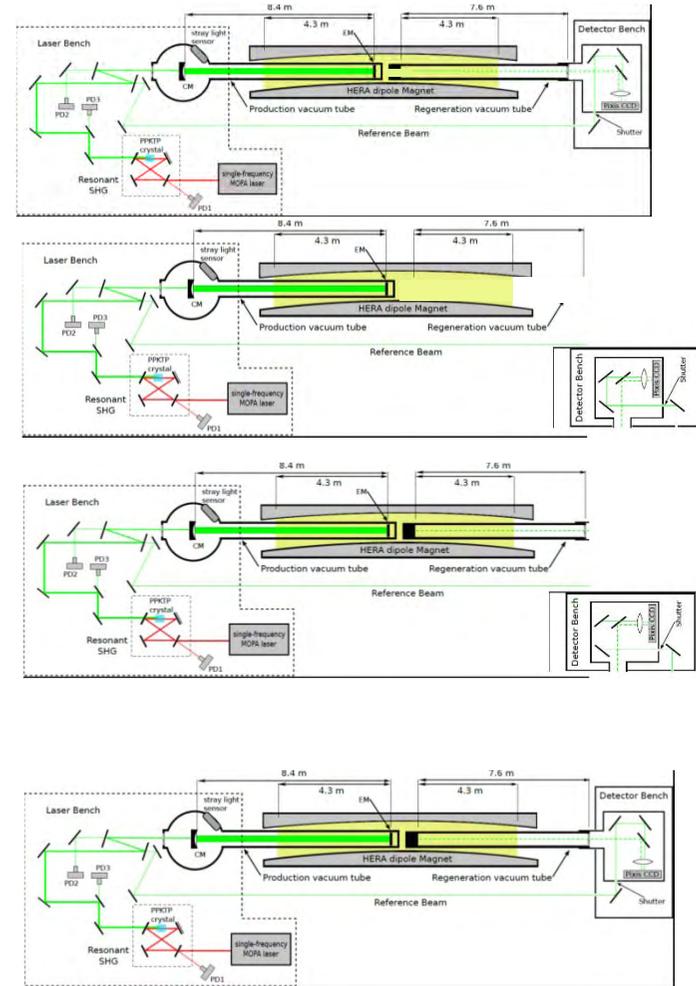
Testsignal mit einem Photonfluss von  $(9.0 \pm 1.2)$  mHz ( $3.3 \cdot 10^{-21}$  W).

Der Detektor ist etwa 1.000.000 mal empfindlicher als das menschliche Auge.

# ALPS at Work

Schritte der Datennahme:

1. Test der Einstellung ohne Wand mit dem Anteil des Lichtes ( $10^{-4}$ ), das den Spiegel durchquert.
2. Ausbau von Detektor und Detektorröhre.
3. Schließen der Detektorröhre und Wiedereinbau.
4. Datennahme (1h-Aufnahmen mit der CCD).





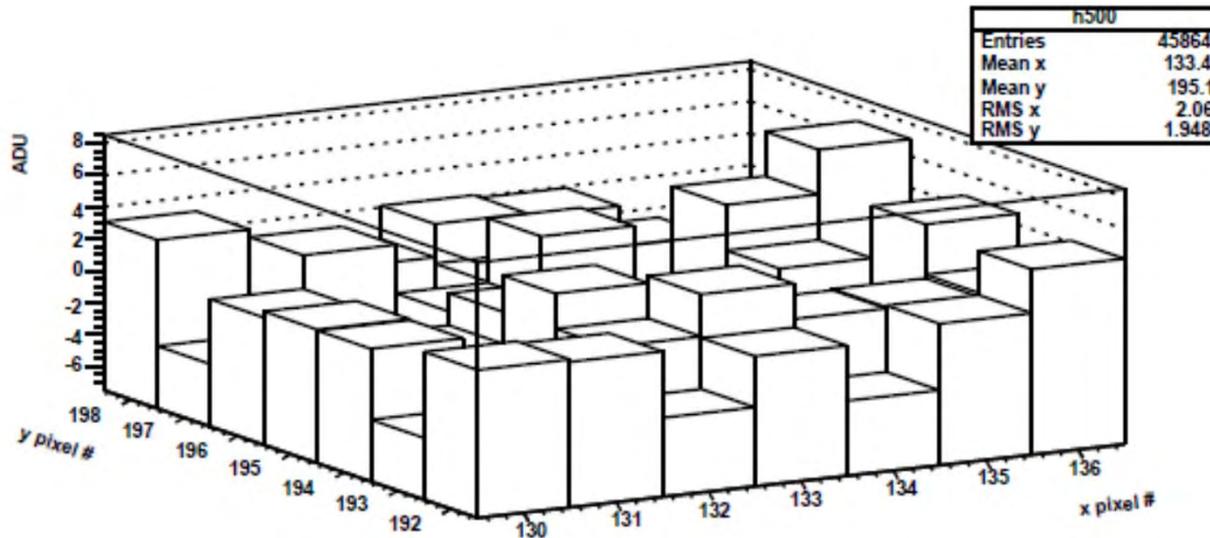
# ALPS at Work

5. Ausbau von Detektor und Detektorröhre.
6. Öffnen der Detektorröhre und Wiedereinbau.
7. Kontrolle der Einstellung ohne Wand mit dem Anteil des Lichtes ( $10^{-4}$ ), das den Spiegel durchquert.



# Was ist bisher herausgekommen?

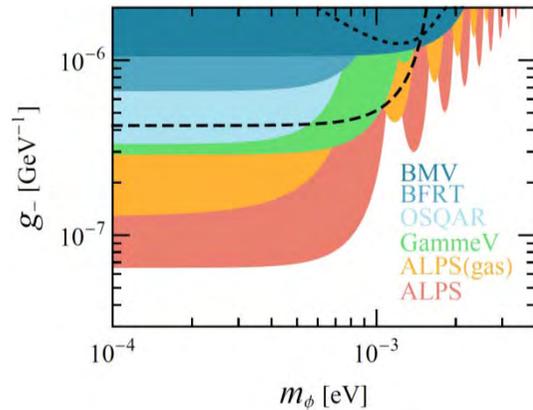
- > Leider haben wir kein WISP entdecken können:



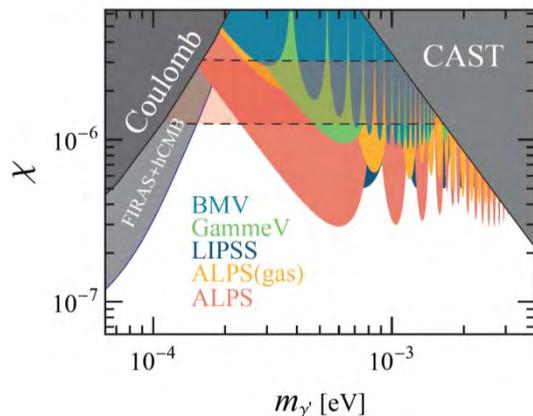
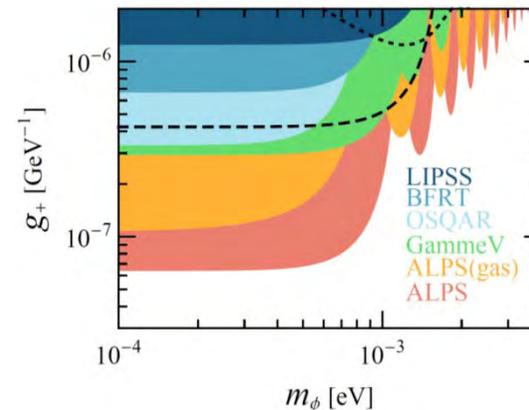
Die Daten zeigen nur die erwarteten Schwankungen aufgrund von Dunkelstrom und Ausleserauschen.

# Was ist bisher herausgekommen?

> Aber wir sind die Besten weltweit ...

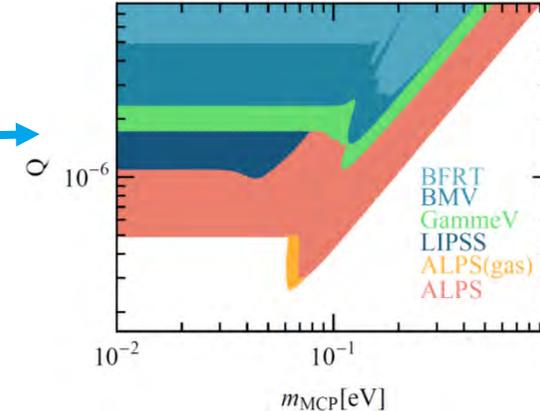


← pseudoscalar  
and  
scalar →  
axion-like particles



← hidden sector photons  
and  
minicharged particles →

← Filling a gap remaining  
from astrophysics and  
other experiments!



... und wollen die Suche mit einem größeren ALPS fortsetzen.

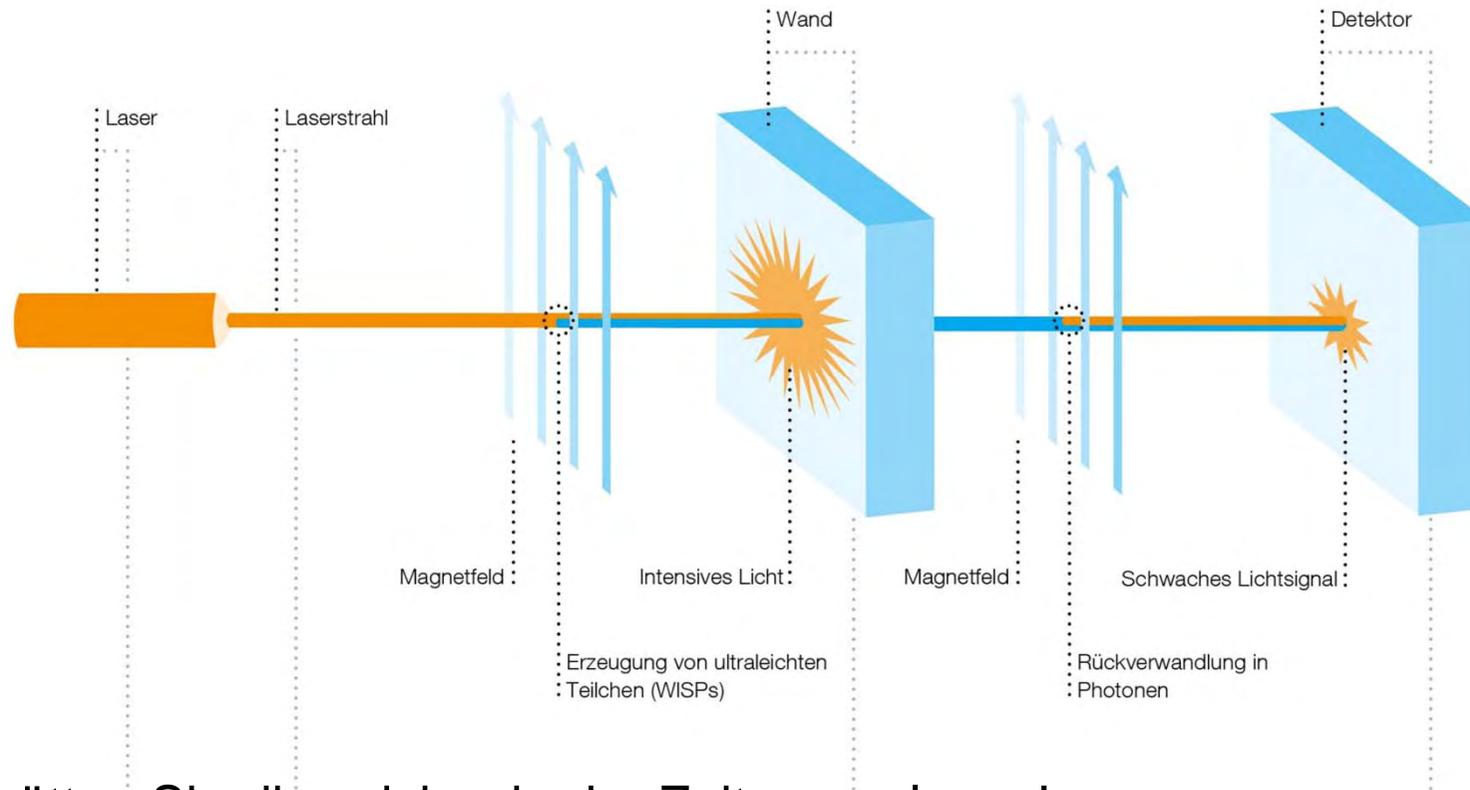
PLB 689 (2010), 149



# Was ist bisher herausgekommen?

Wenn aus einem von  
1.000.000.000.000 Photonen  
ein WISP entstanden wäre ...

...und sich jedes  
1.000.000.000.000-ste WISP in ein  
Photon zurück verwandelt hätte ...



... hätten Sie dies sicher in der Zeitung gelesen!

# Trotzdem: viele Artikel über ALPS!

Großes Interesse in den Medien:

The screenshot shows a web browser window with the URL <http://alps.desy.de/e163/>. The page is titled "ALPS in the Media" and lists several media articles:

- » **Physics: Not a WISP of evidence**  
Nature 465, page 271 (20 May 2010), doi:10.1038/465271c
- » **As you can see, there is nothing to see!**  
symmetriemagazin (Volume 7 Issue 2 April 2010)
- » **Wie Sie sehen, sehen Sie nichts!**  
DESYinForm May 2010 (in German, also available in English)
- » **LASER PHYSICS: 'Light shining through walls' experiment gets a boost**  
Laser Focus World (Volume 45 Issue 8 August, 2009, in English)
- » **Licht am Ende des Magneten**  
DESYinForm August 2009 (in German, also available in English)
- » **Nachwuchs für den Teilchenzoo**  
Weser Kurier, 01.04.2009 (in German)
- » **Gesucht: axionartige Teilchen**  
Siegener Zeitung, 07.03.2009 (in German)
- » **Dark matters: when light walks through a wall**  
Hamburg News, 03/2009
- » **Licht ins Dunkel: Hamburg will dunkle Materie nachweisen**  
Hamburg News, 03/2009 (in German)
- » **Physiker fahnden nach Axionen**  
Dresdner Neueste Nachrichten, 27.01.2009 (german)
- » **Nachwuchs im Teilchenzoo?**  
Landeszeitung Lüneburg, 24.01.2009 (german)
- » **Bald Nachwuchs im Teilchenzoo?**  
Wiesbadener Kurier, 20.01.2009 (german)
- » **Nachwuchs im Teilchenzoo?**  
Kieler Nachrichten, 15.01.2009 (german)
- » **Auf der Suche nach ultraleichten Axionen**  
Fuldaer Zeitung, 14.01.2009 (german)
- » **Experiment schickt "Licht durch die Wand"**

The screenshot shows the Nature journal website. The article title is "Physics: Not a WISP of evidence". The page includes the following information:

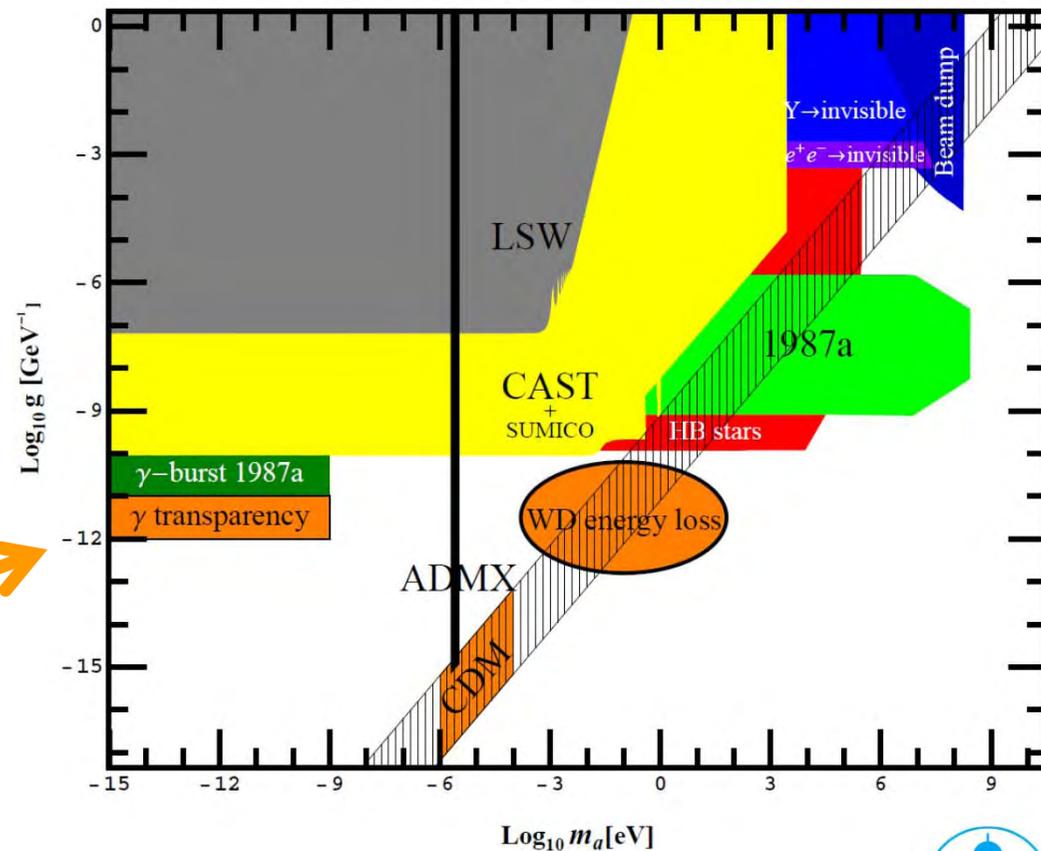
- Journal home | archive | issue | research highlights | full text
- » previous article | next article »
- Journal home | Subscribe | Current issue | E-alert sign up | For authors | RSS feed
- » **Open innovation challenges**
- » **Seeking Cell Line Expressing A Specific Protein**  
Deadline: Jul 11 2010  
Reward: \$0 USD  
The Seeker is looking for an individual, laboratory or other organization that would be able to prov...
- » **Identification of Substrates that Mimic Human Skin**  
Deadline: Jul 03 2010  
Reward: \$10,000 USD



# ALPS-I Zusammenfassung

- > Die guten Ergebnisse von ALPS-I sind eine gute Basis für neue, größere Experimente.
- > Die Stärke von ALPS ist die enge Kollaboration von Teilchenphysikern (Theorie und Experiment) mit Laser-Physikern, die große Interferometer für den Nachweis von Gravitationswellen betreiben.
- > Die Infrastruktur und die großen Magnete eines Labors wie DESY sind essentiell für ein Experiment wie ALPS.
- > Zukünftige Experimente müssen die Empfindlichkeit deutlich steigern!

Hier müssen wir hin!



compiled by J. Jäckel and A. Ringwald



# Das Programm für heute

- > Warum „Licht-durch-die-Wand“
  - Ein Zensus des Kosmos
  - Ein Makel der Teilchenphysik  
mit Ausflug zu den Grundlagen der theoretischen Physik
  
- > Das Axion und Gleichgesinnte
  - Weakly Interacting Slight Particles: WISPs
  
- > Grundlagen der WISP-Suche
  
- > Das ALPS Projekt
  - Aufbau
  - Ergebnisse
  
- > Möglichkeiten für ein ALPS-II Projekt



# „Licht-durch-die-Wand“ weltweit

> Weltweit steigt die Anzahl der „Licht-durch-die-Wand“ Experimente.

*Light shining through walls* 17

Experiment	$\omega$	$P_g$	$\beta_g$	Magnets
ALPS (DESY) [61, 62]	2.33 eV	4 W	300	$B_g = B_r = 5$ T $L_g = L_r = 21$ m
BFRT (Brookhaven) [64, 65]	2.47 eV	2 W	10	$B_g = B_r = 3.7$ T $L_g = L_r = 4.4$ m
BMV (LULI) [66, 67]	1.17 eV	$10^{21}$ pulses	1	$B_g = B_r = 12.3$ T $L_g = L_r = 0.4$ m
GammeV (Fermilab) [68]	2.33 eV	$10^{17}$ pulses	1	$B_g = B_r = 5$ T $L_g = L_r = 3$ m
LIPSS (JLab) [69]	1.03 eV	180 W	1	$B_g = B_r = 1.7$ T $L_g = L_r = 1$ m
OSQAR (CERN) [71, 72]	2.5 eV	15 W	1	$B_g = B_r = 9$ T $L_g = L_r = 7$ m
BMV (ESRF) [73]	50/90 keV	10/0.5 mW	1	$B_g = B_r = 3$ T $L_g = 1.5, L_r \sim 1$ m

Table 1. Some experimental parameters of the past and current generation of LSW experiments.

November 2010:  
 bei KEK in Tsukuba Pläne für vier verschiedene  
 Experimente zur Suche nach WISPs.

Light shining through walls,  
 Javier Redondo, Andreas Ringwald,  
 arXiv:1011.3741v1 [hep-ph]



# Neue Hinweise auf WISP-Physik?

## Aus der Astrophysik:

- > *Axions and the cooling of white dwarf stars.*  
J. Isern et al., arXiv:0806.2807v2 [astro-ph], Astrophys.J.L. 682 (2008) L109
- > *Evidence for a New Light Boson from Cosmological Gamma-Ray Propagation?*  
M. Roncadelli et al., arXiv:0902.0895v1 [astro-ph.CO]
- > Does the X-ray spectrum of the sun points at a 10 meV axion?  
K. Zioutas et al., arXiv:0903.1807v4 [astro-ph.SR]
- > Large-Scale Alignments of Quasar Polarization Vectors: Evidence at Cosmological Scales for Very Light Pseudoscalar Particles Mixing with Photons?  
D. Hutsemekers et al., arXiv:0809.3088v1 [astro-ph]
- > Signatures of a hidden cosmic microwave background  
J.Jaeckel, J. Redondo, A. Ringwald, Phys.Rev.Lett.101:131801,2008
- > ....



# Hinweise für ALPs?

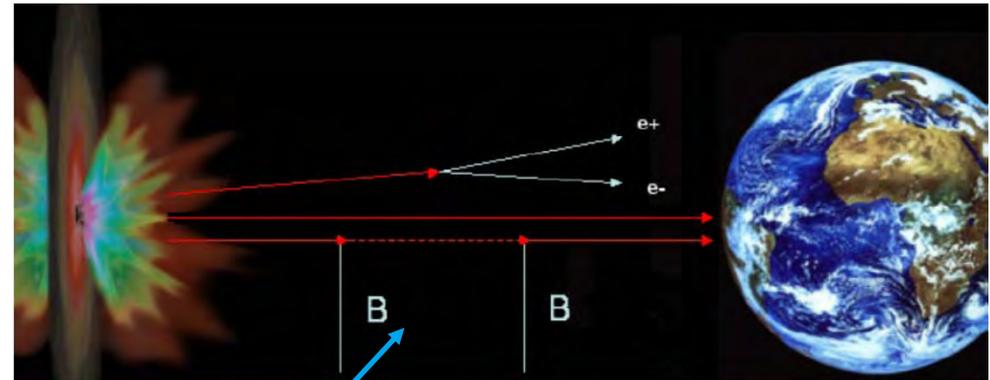
Photonen mit einer TeV-Energie werden aus fernen aktiven Galaxienzentren beobachtet (z.B. von MAGIC, HESS). Sie sollten die Erde aber kaum erreichen, denn sie müssten durch Paarbildung am extragalaktischen Hintergrundlicht absorbiert werden :

$$\gamma_{TeV} + \gamma_{eV} \rightarrow e^+ + e^-$$

Allerdings zeigen die Energiespektren der entfernten Galaxienzentren nicht das erwartete Absorptionsverhalten.

Mit der Existenz von ALPs wäre dies einfach zu erklären!

M. Roncadelli, presentation at the 4th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs, 2008



TeV Photonen verstecken sich als ALPs!

# ALPS-II @ DESY in Hamburg



PETRA III

FLASH

ALPS

European XFEL

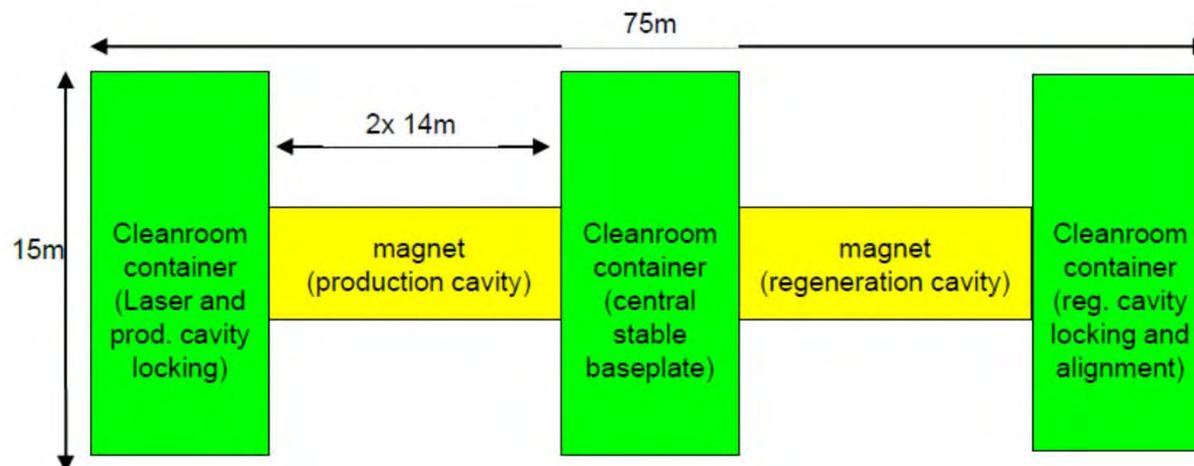
ALPS-II ?

Alternative:  
HERA  
Tunnel?

# Möglichkeiten für ALPS-II

Basis:

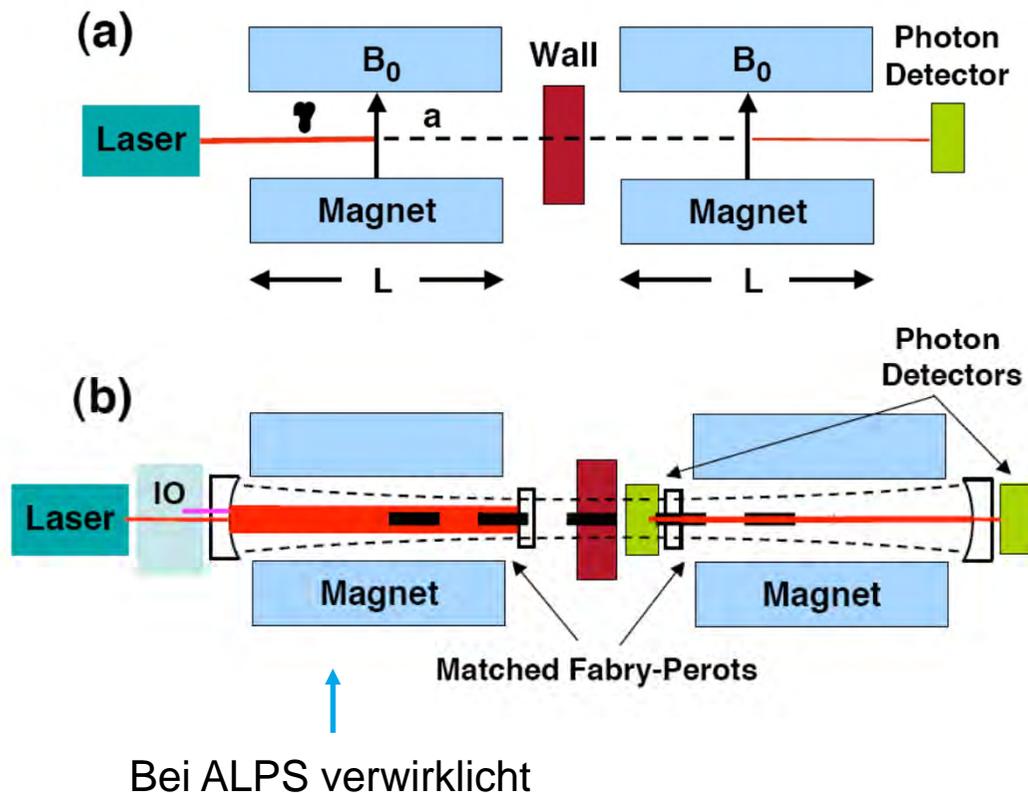
- > Wenigstens zwei Magnete, um Zugang zu allen optischen Komponenten zu haben (bei ALPS-I ist ein Spiegel in der Magnetmitte).
- > Von Anfang an müssen Reinraumbedingungen sicher gestellt sein.



# Möglichkeiten für ALPS-II

Zentral für eine Steigerung der Empfindlichkeit:

- > Einbau eines zweiten Resonators im hinteren Teil des Experiments, um die Umwandlungswahrscheinlichkeit WISP  $\rightarrow$  Photon zu erhöhen.



“Resonantly enhanced Axion-Photon Regeneration”

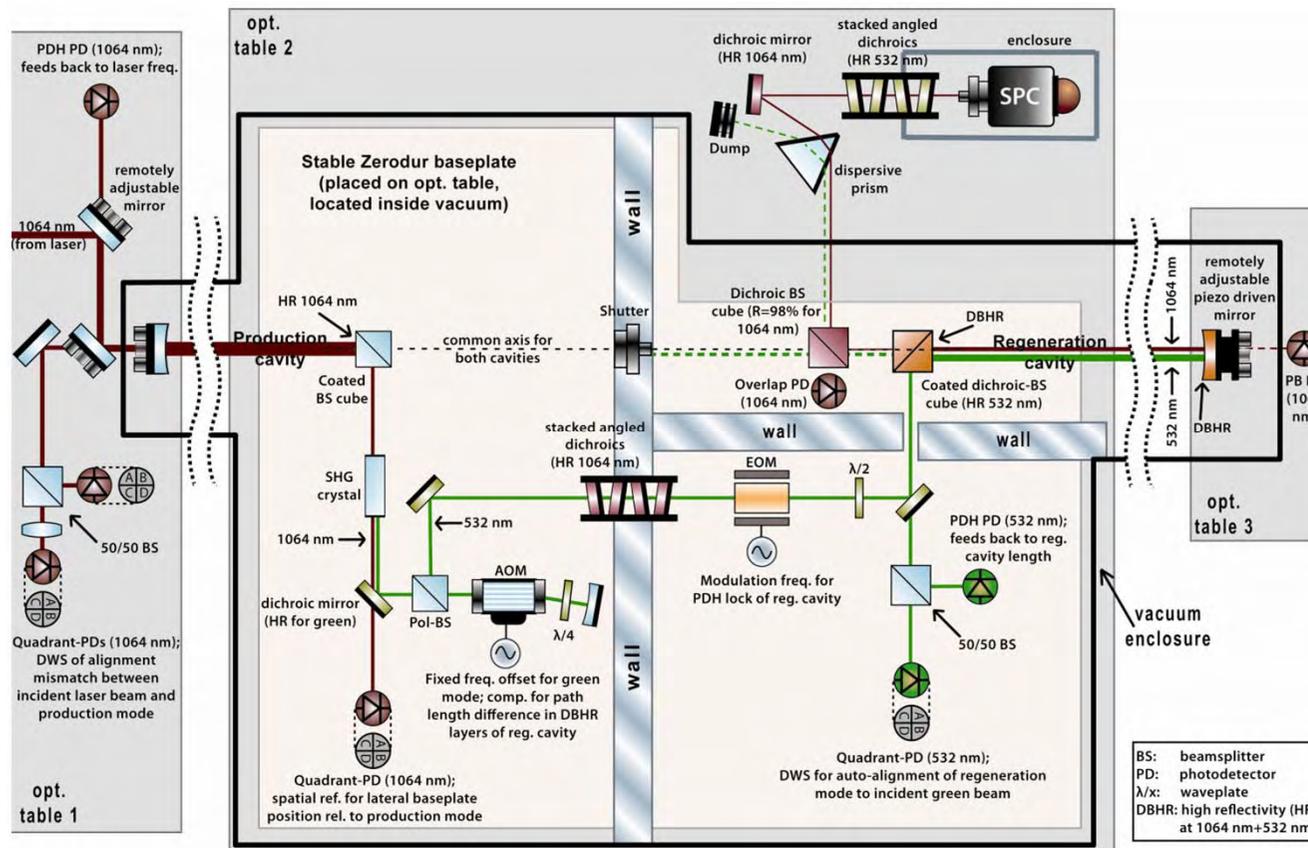
[P. Sikivie](#), [D.B. Tanner](#), [Karl van Bibber](#). *Phys.Rev.Lett.*98:172002,2007.

(also [F. Hoogeveen](#), [T. Ziegenhagen](#), DESY-90-165, *Nucl.Phys.*B358)

# Möglichkeiten für ALPS-II

Ein vorläufiger Entwurf:

150 kW Laserleistung, zweiter Resonator mit einer Finesse von etwa  $10^5$ .



T. Meier (AEI Hannover):

Herausforderung, basiert aber auf existierenden Technologien der Gravitationswellen-Experimente LIGO und LISA.

Alternative in den USA:

G. Mueller, P. Sikivie, D. B. Tanner, K. v.Bibber

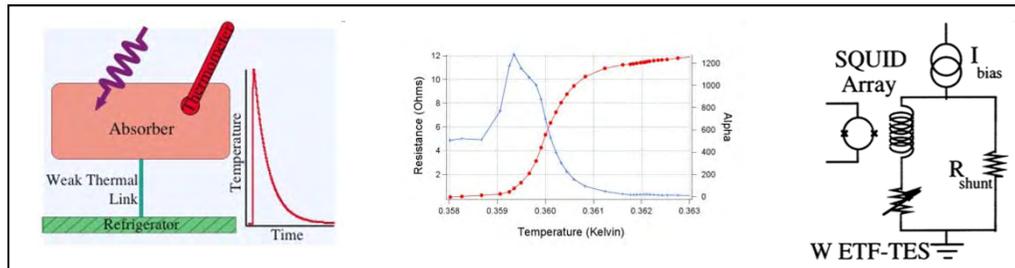
[10.1103/PhysRevD.80.072004](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.80.072004)



# Möglichkeiten für ALPS-II

Detektor:

- > Entwicklung eines untergrundfreien supraleitenden Photonzählers:  
Transition Edge Sensor @ 100 mK?

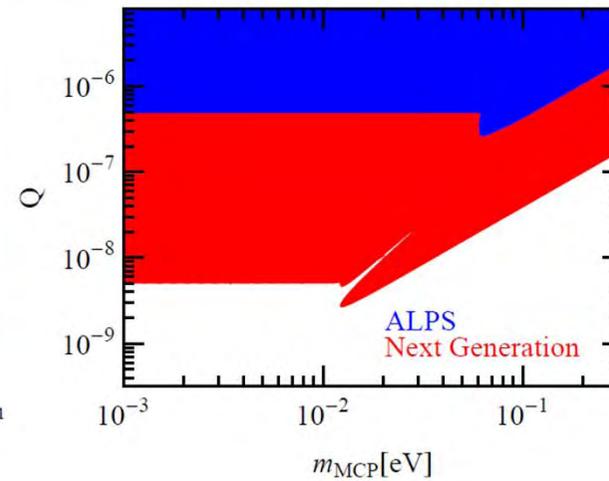
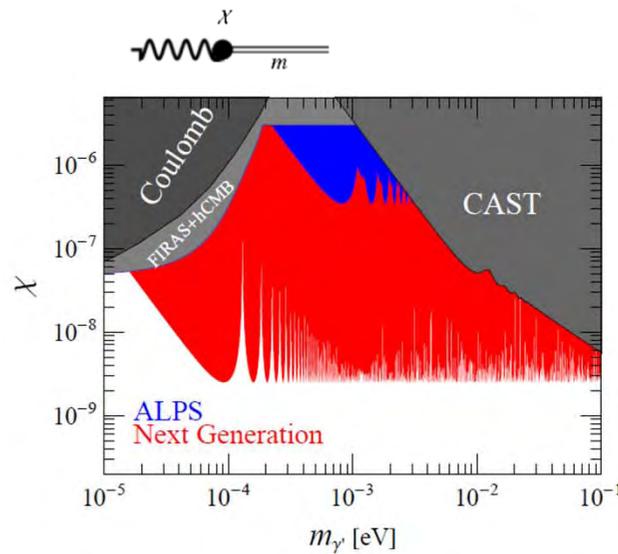
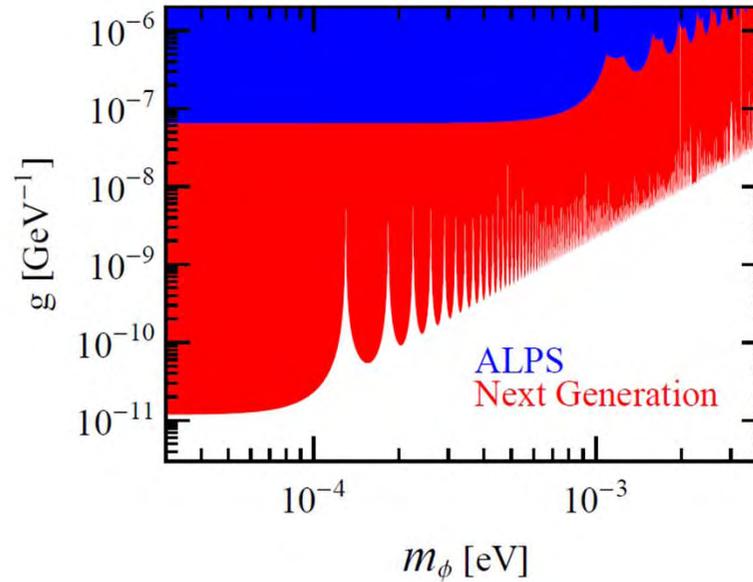


Dies wird zusammen mit italienischen Partnern versucht (Camerino, Genua und Triest).

# Aussichten für ein ALPS-II

Ein ALPS-Traum:

- 20+20 HERA Dipole
- 300 kW IR Laser
- TES Detektor
- Zweiter Resonator mit Finesse von  $3 \cdot 10^5$ .

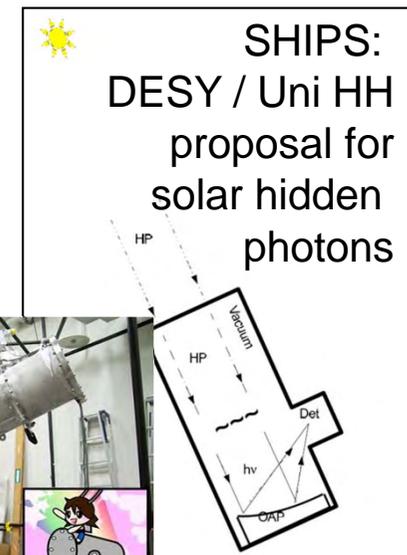
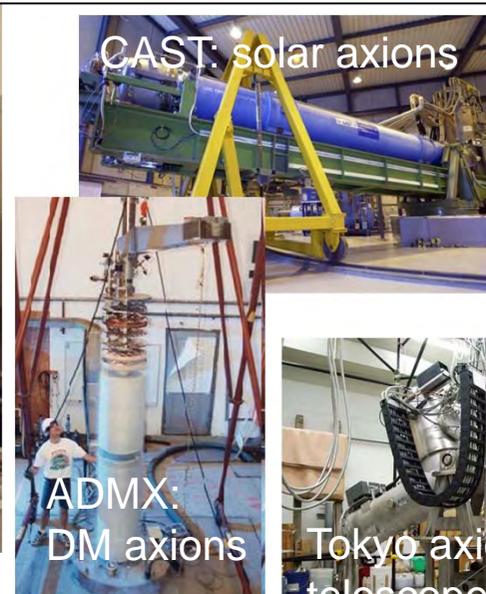
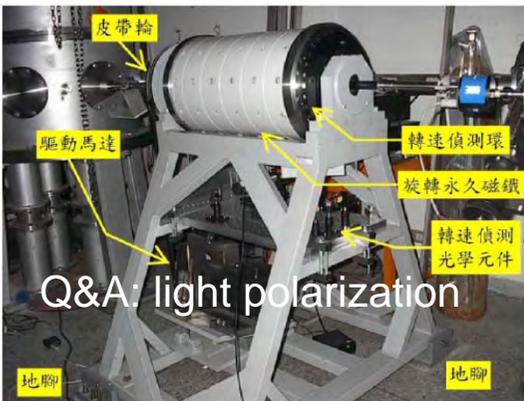


Light shining through walls,  
 Javier Redondo, Andreas Ringwald,  
 arXiv:1011.3741v1 [hep-ph]



# Zusammenfassung

- > Teilchenphysik bei kleinsten Energien könnte Antworten auf fundamentale und schon lange offene Fragen geben
  - > CP conservation in QCD, dark matter, (dark energy), astrophysics miracles durch die Entdeckung eines neuen Zoos von **Weakly Interacting Slight Particles**.
- > Weltweit suchen viele Experimente nach diesen WISPs.



**Diese Experimente ergänzen die Aktivitäten an großen Beschleunigeranlagen (bei bescheidenen Kosten)**



LHC II



meV scale



# Vielen Dank an alle ALPS Kollegen!

Klaus Ehret<sup>a</sup>, Maik Frede<sup>b</sup>, Samvel Ghazaryan<sup>a</sup>, Matthias Hildebrandt<sup>b</sup>, Ernst-Axel Knabbe<sup>a</sup>, Dietmar Kracht<sup>b</sup>, Axel Lindner<sup>a</sup>, Jenny List<sup>a</sup>, Tobias Meier<sup>c</sup>, Niels Meyer<sup>a</sup>, Dieter Notz<sup>a</sup>, Javier Redondo<sup>a</sup>, Andreas Ringwald<sup>a</sup>, Günter Wiedemann<sup>d</sup>, Benno Willke<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestraße 85, D-22607 Hamburg, Germany

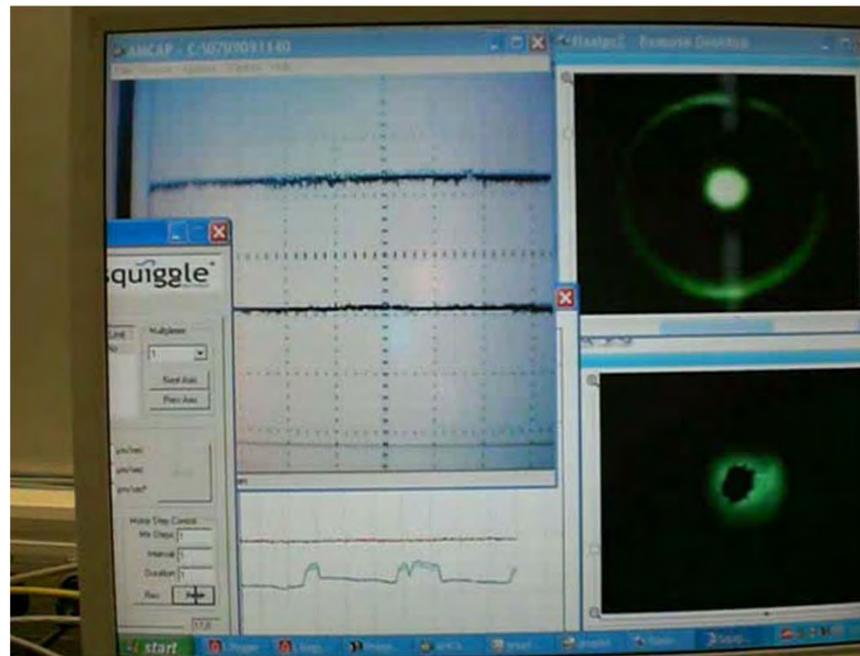
<sup>b</sup>Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, D-30419 Hannover, Germany

<sup>c</sup>Max-Planck-Institute for Gravitational Physics, Albert-Einstein-Institute, and Institut für Gravitationsphysik, Leibniz Universität, Hannover, Callinstraße 38, D-30167 Hannover, Germany

<sup>d</sup>Hamburger Sternwarte, Gojenbergsweg 112, D-21029 Hamburg, Germany

Lichtleistung im ALPS  
Magneten

Leistung der  
Umwandlung von  
Infrarotstrahlung in  
grünes Licht



Resonator Lock

Referenzstrahl