The low energy frontier:
probes with photons

Javier Redondo
Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY)

43th Rencontres de Moriond (2008/03/07)
Electroweak and unified theories

In collaboration with A. Ringwald, H. Gies, A. Ibarra, J. Jaeckel, M. Ahlers and C. Weniger
Motivation

in the days of exploring the TeV frontier ... are we leaving something behind us?

are they new particles at sub eV scale?

have they any relevance?

- Understanding HE symmetries ?
- Cosmology ?
- Unification ?
5 “clear” messages:

- Candidate WISPs (weakly interacting subeV particles)
- \textit{ALPs, hidden photons} and MCPs
- WISPs could evade HE bounds (astrophysics and cosmology)
- Light degrees of freedom required for late Cosmology
- The ALPS experiment at DESY & meV valley
- Massless U(1)’s
WISPs #2 & #3

hidden photons & MCPs

Additional U(1) gauge symmetries are ubiquitous in PBSM
- Unification
- String Theory compactifications

If SM particles uncharged ➞ Hidden sector
- window to high energy content through ren. operator:
  - Kinetic mixing

New particles charged under new U(1)
- unquantized small electric charge ➞ MCPs
- Chiral symmetries ➞ light fermions
kinetic mixing

\[ \mathcal{L}_H = -\frac{\sin \chi}{2} A_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\gamma}^2 B_\mu B^\mu \]

kinetic mixing with photon (or hypercharge)

- In principle can have any value between 0 and 1...
- If B belongs to a broken non abelian group, \( \sin \chi = 0 \) at high E, but it can develop a nonzero value below the SSB scale

\[ A^\mu B^\mu = \frac{e g_B}{6\pi^2} \sum_{\psi_{AB}} Q_A Q_B \log \frac{m_{\psi_{AB}}}{\mu} \]

SUSY, String theory ... \( \sin \chi = 10^{-4}, -16 \)

mass degeneracy

K. R. Dienes, C. F. Kolda, and J. March-Russell. Nucl. Phys., B492:104–118, 1997.
photon “Flavor” oscillations & kinetic mixing

\[
-\frac{1}{4} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} + e j_\mu A^\mu - \frac{1}{4} \tilde{A}_{\mu\nu} \tilde{A}^{\mu\nu} - \frac{\sin \chi}{2} A_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\gamma^2 B_\mu B^\mu
\]

\[
A^\mu \rightarrow \tilde{A}^\mu - \sin \chi B^\mu \sim \tilde{A}^\mu - \chi B^\mu
\]

“Flavor” eigenstate

“mass” eigenstates

photon-sterile oscillation prob.

\[
P_{A-S} = \sin^2 2\chi \times \sin^2 \frac{m_\gamma^2 L}{4\omega}
\]

“Sterile” photon

S “Sterile” photon

\[
S^\mu \propto B^\mu + \chi \tilde{A}^\mu
\]

L. B. Okun. Sov. Phys. JETP, 56:502, 1982.
Particles charged under new U(1) acquire electric charge when $m_{\gamma'} = 0$

\[
B^\mu \rightarrow B^\mu - \chi A^\mu \leftrightarrow A^\mu \rightarrow A^\mu - \chi B^\mu
\]

Fermions, scalars... charged under $U(1)_h$

\[
\epsilon \equiv Q_A = -\chi Q_B
\]

(Other possibilities for MCPs... SM or extra dimensions)
Impact of WISPs

- New Long Range Forces
- Stellar cooling
- Missing energy at colliders ...
- CMB distortion
- extra neutrinos at BBN
Cosmological Constraint on the Effective Number of Neutrino Species  
K. Ichikawa arXiv:0706.3465v1 [astro-ph]

| Seljak, Slosar, McDonald [4] | 95% limit | Data set |
|---------------------------|-----------|---------|
| $N_\nu = 5.3^{+2.1}_{-1.7}$ | All      |
| $N_\nu = 4.8^{+1.6}_{-1.4}$ | All + HST|
| $N_\nu = 6.0^{+2.9}_{-2.4}$ | All - BAO|
| $N_\nu = 3.9^{+2.1}_{-1.7}$ | All - Lyα|
| $N_\nu = 7.8^{+3.2}_{-2.3}$ | WMAP3+SN+SDSS(main) |
| $N_\nu = 3.2^{+3.6}_{-2.3}$ | WMAP3+SN+2dF |
| $N_\nu = 5.2^{+2.1}_{-1.8}$ | All-2dF-SDSS(main) |

| Ichikawa, Kawasaki, Takahashi [11] | $N_\nu = 3.1^{+5.1}_{-2.2}$ | WMAP3+SDSS(LRG) |

Table 1: Comparison of $N_\nu$ constraints using various data set combinations. “All” refers to WMAP3 + other CMB + Lyα + galaxy power spectrum (SDSS main sample + 2dF) + SDSS baryon acoustic oscillation (BAO) + Supernovae Ia (SN). See Ref. [4] for details. SDSS (main) and Lyα favor $N_\nu > 3$.

| Olive, Skillman [21] | $Y_p (1\sigma)$ | $N_\nu$ (95% limit) |
|----------------------|----------------|----------------------|
| 0.249 ± 0.009        | 3.1^{+1.4}_{-1.2} |
| Fukugita, Kawasaki [22] | 0.250 ± 0.004 | 3.20^{+0.76}_{-0.68} |
| Peimbert, Luridiana, Peimbert [23] | 0.2427 ± 0.0028 | 3.01^{+0.52}_{-0.48} |
| Izotov, Thuan, Stasinska [24] | 0.2516 ± 0.0011 | 3.32^{+0.23}_{-0.24} |

Table 2: Comparison of $N_\nu$ constraints from recent $Y_p$ measurements. We also used the observed deuterium abundance $D/H = (2.82 \pm 0.27) \times 10^{-5}$ [25] and the BBN fitting formula in Ref. [26]. $N_\nu > 4$ is not favored by the three recent measurements.
Constraints on Hidden photons

Log$_{10} \chi$

Log$_{10} m_{\gamma'}$ [eV]

$R_{\text{earth}}$

$\sim \text{mm}$
$
\sim \text{cm}$

$\sim \text{nm}$

$\sim \text{fm}$

Jupiter

Coulomb

Rydberg

LSW

CAST & Sun

LEP, ILC

$\sim \text{cm}$

$\sim \text{mm}$

$\sim \text{nm}$

$\sim \text{fm}$
Constraints on MCPs (massless HP)
Helioscopes

Detect Solar ALPs at earth by means of inverse Primakoff conversion in a strong magnetic field

Three Helioscopes built (with no trace of ALPs)

Brookhaven (S. Moriyama et al., Phys. Lett. B434, 147 (1998), hep-ex/9805026)
Tokio (D. M. Lazarus et al., Phys. Rev. Lett. 69, 2333 (1992))
CERN (CAST, K. Zioutas et al., Phys. Rev. Lett. 94, 121301 (2005), hep-ex/0411033.)
Helioscopes

Detect Solar ALPs at earth by means of inverse Primakoff conversion in a strong magnetic field

P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. 51, 1415 (1983)

CAST Helioscope

LHC decommissioned magnet

$L \sim 9.3 \text{ m} \quad B_{\text{ext}} \sim 9 \text{ T}$
II - The Sun as a hidden photon source

- photons behave as massive particles in a plasma with \( m \sim \omega_P \) (plasma freq.) \( \omega_P^2 \sim 1 - 300\text{eV} \)

\[
\chi_{\text{eff}} = \chi \frac{m_{\gamma'}^2}{\omega_P^2 - m_{\gamma'}^2 - i\omega\Gamma}
\]

- Three cases:

1 - Suppressed production \( m_{\gamma'} \ll \omega_P \)

2 - Resonance \( m_{\gamma'} = \omega_P \) (\( \omega\Gamma \ll \omega_P \))

3 - Normal regime \( m_{\gamma'} \gg \omega_P \) (\( \chi_{\text{eff}} = \chi \))

\[
P_{S-A} = 4\chi^2 \times \sin^2 \frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega}
\]

V. Popov. Turkish Journal of Physics, 23(5):943–950, 05. 1999.
V. Popov and O. V. Vasil'ev. Europhys. Lett., 15(1):7–10, 1991.
J. Redondo. arXiv:0801.1527 [hep-ph] Submitted to JCAP

(Cern Axion Solar Telescope) CAST \( \omega \sim \text{keV} \)

\[
LHC \text{ magnet } \quad L = 10 \, \text{m}
\]

\[
L_{\gamma'} \gtrsim L_{\odot}
\]

too much energy loss!
Constraints on Hidden photons

- $R_{\text{Earth}}$
- $\sim \text{mm}$
- $\sim \text{cm}$
- $\sim \text{nm}$
- $\sim \text{fm}$

Constraints on Hidden photons

- Jupiter
- Coulomb
- LSW
- Rydberg
- CAST & Sun
- LEP, ILC

$\log_{10} \chi$

$\log_{10} m_{\gamma'} \text{[eV]}$
III– “Light shining through walls”

Laser as intense/controlled source: BFRT (BNL), BMV (LNCMP), GammeV (FL), ALPS (DESY)

... looking for axion-like particles

M. Ahlers, H. Gies, J. Jaeckel, J. Redondo, and A. Ringwald. Laser experiments explore the hidden sector. 2007.

regeneration probability

\[ P = 16 \chi^4 \sin^2 \frac{m_{\gamma'}^2 L_1}{4\omega} \sin^2 \frac{m_{\gamma'}^2 L_2}{4\omega} \]

typical configurations

\[ L \sim m, \ \omega \sim eV \]
“Light shining through walls”

Other experiments: BFRT (BNL), BMV (LNCMP), GammeV (FL), OSQAR (CERN)
“Light shining through walls”

ALPS phase-1

13 Watt, $\omega = 2.33 \text{ eV}$ (green), $L_1 = L_2 = 4.3 \text{ m}, B \approx 5.2 \text{T}
“Light shining through walls”

WISP

\( \gamma \text{laser} \quad \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg \nel

\( L \sim 40 \sim 100 m \)

2- phase shift plates?

J. Jaeckel and A. Ringwald. Phys. Lett., B653:167–172, 2007.

3- Increase sensitivity

Optical cavities (orders of magnitude!)

P. Sikivie, D.B. Tanner, van Bibber, K. hep-ph/0701198

Better detector?
"Light shining through walls" RF cavities

J. Jaeckel and A. Ringwald. arXiv:0707.2063 [hep-ph]
The m=0 case (no light MCP)

\[-\frac{1}{4} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} + e j_\mu A^\mu\]

\[-\frac{\sin \chi}{2} A_{\mu\nu} B^{\mu\nu}\]

\[-\frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}\]

\[B^\mu \to \tilde{B}^\mu - \sin \chi A^\mu\]

\[-\frac{1}{4} - \frac{\sin^2 \chi}{4} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} + e j_\mu A^\mu\]

\[-\frac{1}{4} \tilde{B}_{\mu\nu} \tilde{B}^{\mu\nu}\]

\[\sin \chi \rightarrow \text{harmless renormalization of electric charge}\]
The m=0 case... harmless?

In a general framework (SM), $B^\mu$, mixes with hypercharge $Y^\mu$

In bare SM, $g'$ is a free parameter ... so kinetic mixing is completely invisible!

But!! this is not the case in GUT models!

$$-\frac{1}{4} Y_{\mu\nu} Y^{\mu\nu} + \frac{g'}{\cos \chi} j^Y_{\mu} Y^\mu$$

$$\frac{g'}{\cos \chi} \equiv g'_{\text{mes}} \quad g' < g'_{\text{mes}}$$

In progress... with A. Ibarra, A. Ringwald and C. Weniger

\[\begin{align*}
\chi &= 0 \\
\chi &\simeq 40^\circ \\
\chi &\simeq 0.05^\circ
\end{align*}\]
Conclusions

- candidate WISPs (weakly interacting subeV particles)
- ALPs, hidden photons, and MCPs
- WISPs could evade HE bounds (astrophysics and cosmology)
- Light degrees of freedom required for late Cosmology
- The ALPS experiment at DESY & meV valley
- Massless U(1)’s