

Limiti sperimentali sulla birifrangenza magnetica del vuoto e limiti indipendenti dal modello sull'esistenza di Axion Like Particles (ALP)

Aldo Ejlli per la collaborazione PVLAS

IFAE Aprile 2015

10/04/2015



Contenuto della presentazione

- 1 Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto
- 2 Esperimento PVLAS
 - Apparato sperimentale
 - Birifrangenza degli specchi
- 3 Dati sperimentali e limiti
 - Limiti sulla birifrangenza magnetica del vuoto
 - Limiti sull'esistenza di ALP
- 4 Conclusioni

Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto

- L'elettrodinamica quantistica (QED) prevede l'interazione tra fotoni mediata da particelle cariche virtuali: Euler Heisenberg Weisskopf (1936), Schwinger (1951).
- Coppie virtuali elettrone-positrone (correzione $\propto \frac{1}{m_e^4}$)
- Campi lentamente variabili con valori molto più piccoli dei campi critici

$$\frac{\hbar}{m_e c} |\nabla E| \ll E, \quad \frac{\hbar}{m_e c} \left| \frac{\partial E}{\partial t} \right| \ll E \quad B \ll B_{crit} = \frac{m_e^2 c^2}{e \hbar} = 4.4 \times 10^9 \text{ T}$$

$$\frac{\hbar}{m_e c} |\nabla B| \ll B, \quad \frac{\hbar}{m_e c} \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right| \ll B \quad E \ll E_{crit} = \frac{m_e^2 c^3}{e \hbar} = 1.3 \times 10^{18} \text{ V/m}$$

- La langrangiana effettiva L_{eff} per campi macroscopici è

$$L_{eff} = \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right) + \frac{2\alpha^2}{45\mu_0^2} \frac{(\hbar/m_e c)^3}{m_e c^2} \left[\left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right)^2 + 7 \left(\frac{\mathbf{E}}{c} \cdot \mathbf{B} \right)^2 \right]$$

- La propagazione della luce nel mezzo è ancora descritta dalle equazioni di Maxwell che però non sono più lineari.



(Il processo è descritto dal diagramma di Feynman)

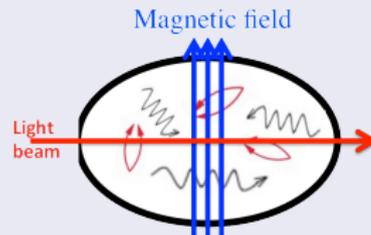
Propagazione della luce in un campo magnetico

Studio sperimentale della propagazione della luce nel vuoto: metodo generale

- **Perturbare** il vuoto con un campo elettromagnetico intenso
- **Sondare** il vuoto perturbato tramite **luce polarizzata**
- Estrarre informazione della **struttura elettromagnetica del vuoto**

Scopo dell'esperienza PVLAS

- Misura della variazione dell'indice di rifrazione in vuoto in presenza di un campo magnetico
- $n_{vac} = 1 + (n_B - ik_B)_{field}$



Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto

Birifrangenza magnetica del vuoto

- Le equazioni che legano \mathbf{E} a \mathbf{D} e \mathbf{H} a \mathbf{B} sono:

$$\begin{cases} \mathbf{D} &= \frac{\partial L_{\text{eff}}}{\partial \mathbf{E}} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \epsilon_0 A_e \left[4 \left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right) \mathbf{E} + 14 (\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B} \right] \\ \mathbf{H} &= -\frac{\partial L_{\text{eff}}}{\partial \mathbf{B}} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} + \frac{A_e}{\mu_0} \left[4 \left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right) \mathbf{B} - 14 \left(\frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}}{c} \right) \frac{\mathbf{E}}{c} \right] \end{cases}$$

$$\text{dove } A_e = \frac{2\alpha^2}{45\mu_0} \frac{(\hbar/m_e c)^3}{m_e c^2} = 1,32 \times 10^{-24} \text{T}^{-2}$$

- Considerando luce polarizzata linearmente che attraversa un campo magnetico trasverso perpendicolare alla direzione di propagazione
- $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{E}_{\text{onda}}, \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}_{\text{onda}} + \mathbf{B}_{\text{ext}},$ con $\mathbf{B}_{\text{onda}} \ll \mathbf{B}_{\text{ext}}$

- $\mathbf{E}_{\text{onda}} \parallel \mathbf{B}_{\text{ext}}:$

$$\begin{cases} \epsilon_{\parallel} &= 1 + 10A_e B_{\text{ext}}^2 \\ \mu_{\parallel} &= (1 - 4A_e B_{\text{ext}}^2)^{-1} \approx 1 + 4A_e B_{\text{ext}}^2 \\ n_{\parallel} &= \sqrt{\epsilon_{\parallel} \mu_{\parallel}} \approx 1 + 7A_e B_{\text{ext}}^2. \end{cases}$$

- $\mathbf{E}_{\text{onda}} \perp \mathbf{B}_{\text{ext}}:$

$$\begin{cases} \epsilon_{\perp} &= 1 - 4A_e B_{\text{ext}}^2 \\ \mu_{\perp} &= (1 - 12A_e B_{\text{ext}}^2)^{-1} \approx 1 + 12A_e B_{\text{ext}}^2 \\ n_{\perp} &= \sqrt{\epsilon_{\perp} \mu_{\perp}} \approx 1 + 4A_e B_{\text{ext}}^2 \end{cases}$$

- otteniamo:

$$\Delta n^{(QED)} = n_{\parallel} - n_{\perp} = 3A_e B_{\text{ext}}^2$$

- valore estremamente piccolo con un campo di 2.5 T

$$\Delta n^{(QED)} \approx 2.5 \cdot 10^{-23}$$

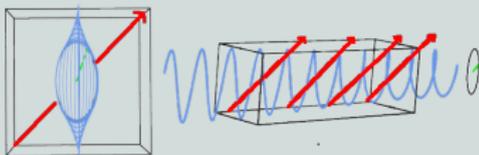
Propagazione della luce in vuoto in presenza di un campo magnetico

Birifrangenza e Dicroismo

Il vuoto è un mezzo isotropo e omogeneo. Il campo magnetico lo polarizza rendendolo anisotropo.

Birifrangenza lineare

- $n_B \propto B^2$
- $\Delta n = n_{B\parallel} - n_{B\perp} \neq 0$



$$\vec{E}_\gamma = E_\gamma \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{E}_\gamma \simeq E_\gamma \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \phi \sin(2\theta) \end{pmatrix}$$

- ϕ è il ritardo in fase della componente di polarizzazione perpendicolare.

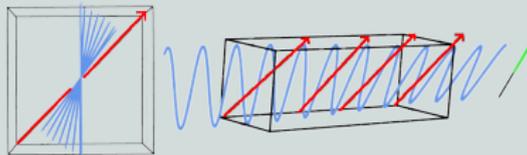
$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{B\parallel} - n_{B\perp}) L$$

- **Ellitticità** ψ

$$\psi = \frac{\phi}{2} \sin(2\theta) = \frac{\pi \Delta n L}{\lambda} \sin(2\theta)$$

Dicroismo lineare

- $k_B \propto B^2$
- $\Delta k = k_{B\parallel} - k_{B\perp} \neq 0$



$$\vec{E}_\gamma = E_\gamma \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{E}_\gamma \simeq E_\gamma \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} q \sin(2\theta) \end{pmatrix}$$

- q è il coefficiente di riduzione della componente di polarizzazione ortogonale

$$q = \frac{2\pi}{\lambda} (k_{B\parallel} - k_{B\perp}) L$$

- **Rotazione apparente** ϵ

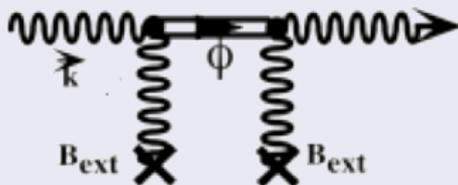
$$\epsilon = \frac{q}{2} \sin(2\theta) = \frac{\pi \Delta k L}{\lambda} \sin(2\theta)$$

Assione: particella ipotetica neutra

- Caso scalare: c'è interazione quando la polarizzazione è perpendicolare a B_{ext}
- Caso pseudo-scalare: c'è interazione quando la polarizzazione è parallela a B_{ext}

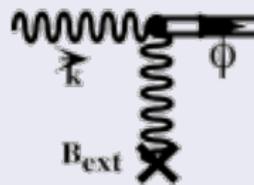
$$L_\phi = g_a \phi \left(\vec{E}_\gamma \cdot \vec{B}_{ext} \right) \quad L_\sigma = g_s \sigma \left(\vec{B}_\gamma \cdot \vec{B}_{ext} \right)$$

Birifrangenza lineare



- La luce polarizzata linearmente interagisce con il campo magnetico generando assioni.
- L'assione interagendo con il campo magnetico, decade in due fotoni.
- Essendo la massa dell'assione diversa da zero la sua velocità è minore di c : si genera **ellitticità** ψ .

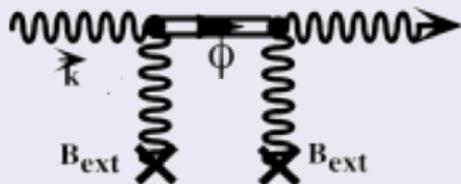
Dicroismo lineare



- La luce polarizzata linearmente interagisce con il campo magnetico generando assioni.
- Se l'assione esce dal campo magnetico si ha un assorbimento selettivo
- Una delle due componenti di polarizzazione è assorbita: si genera **rotazione** ϵ .

Assione: particella ipotetica neutra

Ellitticità



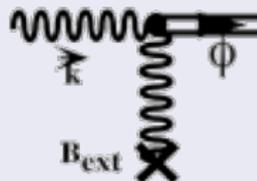
- Un ritardo in fase dovuta all'interazione della luce con i fotoni virtuali del campo produce **ellitticità**.
- L'**ellitticità** ψ si può scrivere:

$$\psi = \sin(2\theta) \left(\frac{g_{a,s}^2 kL}{4m_{a,s}^2} \right) B_{\text{ext}}^2 N \left(1 - \frac{\sin(2x)}{2x} \right)$$

dove $x = \frac{1}{2} \left(\frac{m_{a,s}^2}{2k} \right)$

- L' **ellitticità** ψ è proporzionale a **N**, il numero dei passaggi della luce che attraversa la regione di campo magnetico: **cavità Fabry-Perot**.
- L' **ellitticità** ψ è proporzionale a B^2

Rotazione



- Il **dicroismo** produce una **rotazione** apparente del piano della polarizzazione.
- La **rotazione** ϵ si può scrivere:

$$\epsilon = -\sin(2\theta) \left(\frac{g_{a,s}L}{4} \right)^2 B_{\text{ext}}^2 N \left(\frac{\sin(x)}{x} \right)$$

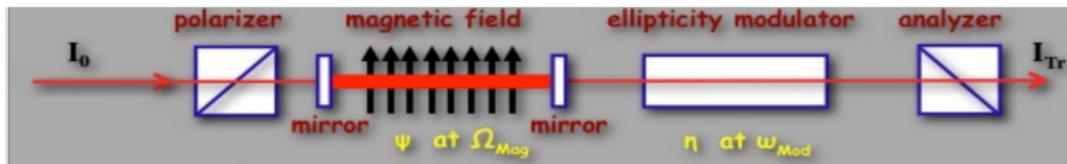
- La **rotazione** ϵ è proporzionale a B^2 a **N**, il numero dei passaggi della luce che attraversa la regione di campo magnetico: **cavità Fabry-Perot**.
- La **rotazione** ϵ e dipende solo da $g_{a,s}$ per piccoli x

Birifrangenza magnetica del vuoto

- 1 Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto
- 2 **Esperimento PVLAS**
 - **Apparato sperimentale**
 - Birifrangenza degli specchi
- 3 **Dati sperimentali e limiti**
 - Limiti sulla birifrangenza magnetica del vuoto
 - Limiti sull'esistenza di ALP
- 4 **Conclusioni**

Apparato sperimentale

- L'apparato sperimentale si può dividere concettualmente in due parti.



La regione magnetica

- La regione magnetica è dove gli effetti non lineari hanno luogo.
- Nell'apparato sono installati due magneti permanenti da 2.5 T, ognuno lungo ≈ 1 m per un totale $\int B^2 dl = 10.25 \text{ T}^2\text{m}$.
- Con i magneti che ruotano attorno al proprio asse a frequenza f , l'effetto generato è variabile nel tempo a frequenza $2f$

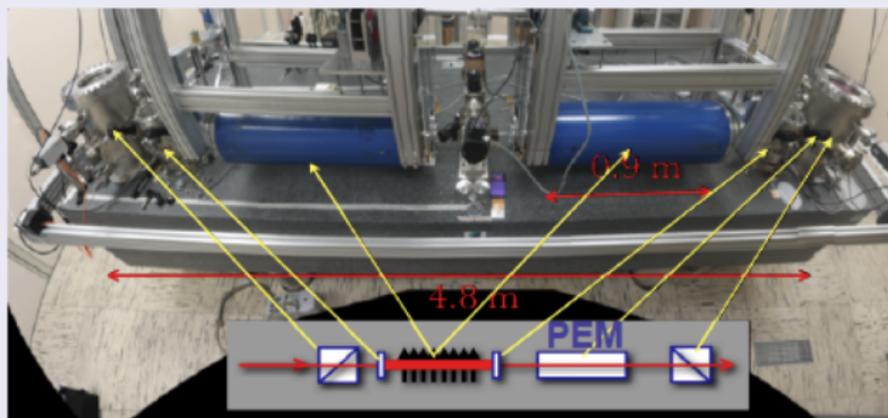
Ellissometro

L'ellissometro misura lo stato di polarizzazione della luce dopo l'attraversamento della regione magnetica:

- Due polarizzatori incrociati (segnali sulla componente di polarizzazione ortogonale).
- Un modulatore d'ellitticità fotoelastico (PEM) per la rivelazione eterodina.
- Cavità Fabry-Perot con alta finesse $F = 7 \times 10^5$: $N \approx 4.5 \times 10^5$.

Apparato sperimentale

Esperimento PVLAS



Misura con la tecnica Eterodina

- L'ellitticità ψ batte con quella del PEM. L'intensità rivelata è lineare in ψ .

$$I_{out} \simeq I_0 (\eta(t)^2 + 2\eta(t)\psi \sin(2\theta(t)))$$

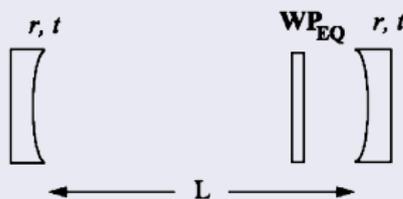
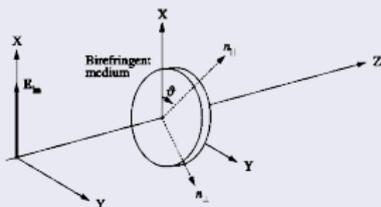
Birifrangenza magnetica del vuoto

- 1 Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto
- 2 **Esperimento PVLAS**
 - Apparato sperimentale
 - **Birifrangenza degli specchi**
- 3 **Dati sperimentali e limiti**
 - Limiti sulla birifrangenza magnetica del vuoto
 - Limiti sull'esistenza di ALP
- 4 **Conclusioni**

Birifrangenza degli specchi

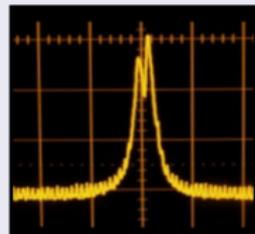
Mescolamento della rotazione con l'ellitticità

- Gli specchi della cavità Fabry-Perot hanno una birifrangenza statica intrinseca



- La cavità si comporta come una lamina. Il risultato è:

- separazione in frequenza dei due modi ortogonali di polarizzazione della cavità (perdita di segnale)
- **mescolamento di rotazione e ellitticità** (anche fino a un rapporto unitario)



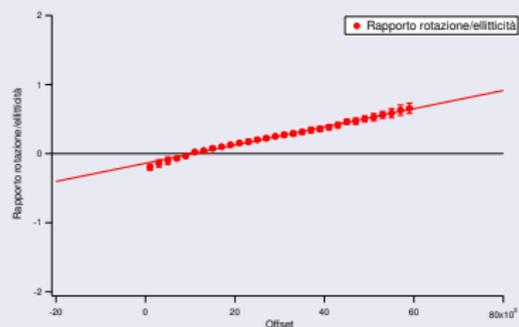
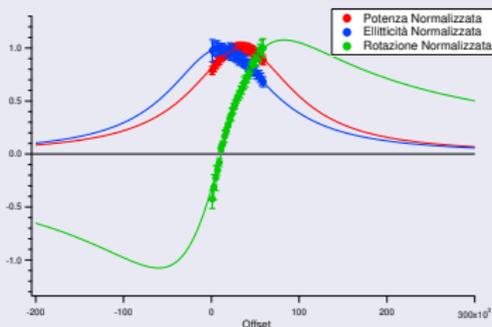
- La birifrangenza è minima quando le lamine degli specchi della cavità sono allineate

Birifrangenza degli specchi

Birifrangenza degli specchi: risultato sperimentale

- L'apparato è calibrato con la misura della **birifrangenza magnetica di un gas**.
- Con la luce laser polarizzata lungo uno degli assi di birifrangenza della cavità nel fascio estinto compaiono segnali sia di ellitticità sia di rotazione

$$\begin{cases} E(t) = E_0 \left(\frac{2F}{\pi} \right) \epsilon \sin(2\theta) \left(1 - i \alpha \frac{2F}{\pi} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{4r^2 \sin^2 \alpha}{(1-r^2)^2}} \right) \\ E(t) = E_0 \left(\frac{2F}{\pi} \right) \psi \sin(2\theta) \left(i - \alpha \frac{2F}{\pi} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{4r^2 \sin^2 \alpha}{(1-r^2)^2}} \right) \end{cases}$$



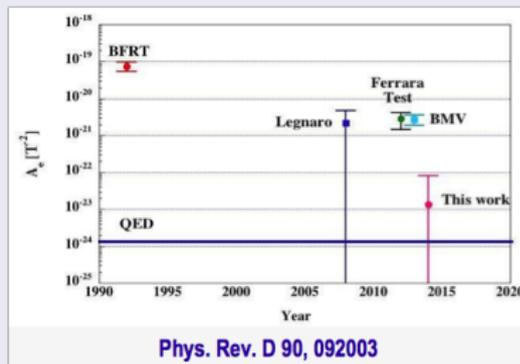
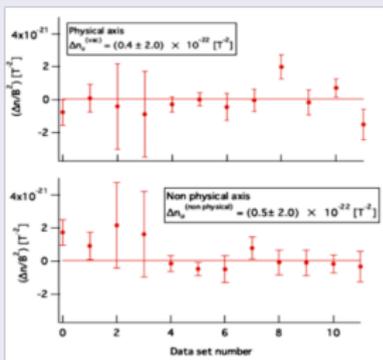
Birifrangenza magnetica del vuoto

- 1 Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto
- 2 Esperimento PVLAS
 - Apparato sperimentale
 - Birifrangenza degli specchi
- 3 **Dati sperimentali e limiti**
 - **Limiti sulla birifrangenza magnetica del vuoto**
 - Limiti sull'esistenza di ALP
- 4 Conclusioni

Dati sperimentali in ellitticità

Risultato sperimentale

- Integrazione in tempo per 210 ore.



- Birifrangenza unitaria $\Delta n_u = \frac{\Delta n}{B^2}$

$$\Delta n_u = (0.4 \pm 20) \times 10^{-22} T^{-2}$$

- Sensibilità :

$$S_{\Delta n_u} = 1.5 \times 10^{-19} T^{-2} / \sqrt{Hz}$$

F. Della Valle et al. PRD 90 (2014) 092003

Birifrangenza magnetica del vuoto

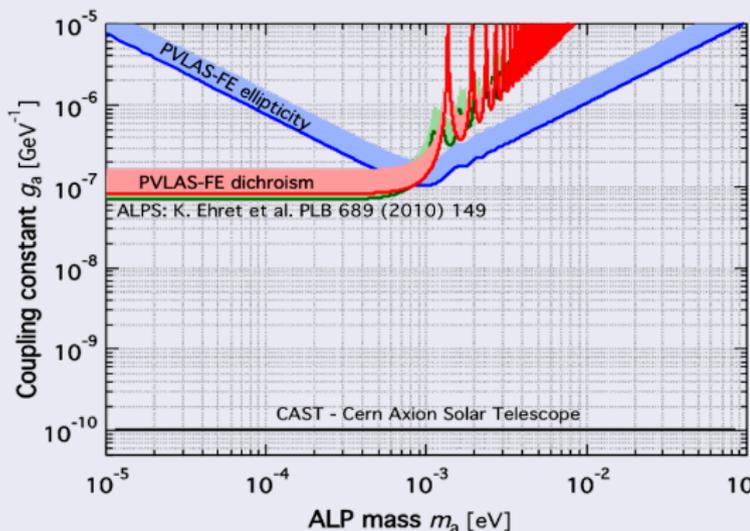
- 1 Effetti magneto-ottici non lineari in vuoto
- 2 Esperimento PVLAS
 - Apparato sperimentale
 - Birifrangenza degli specchi
- 3 **Dati sperimentali e limiti**
 - Limiti sulla birifrangenza magnetica del vuoto
 - **Limiti sull'esistenza di ALP**
- 4 Conclusioni

Limiti costante accoppiamento ALP

Risultato sperimentale e limiti sulla rotazione

- Punto di lavoro dell'apparato: rotazione/ellitticità $\cong 1$
- Mettendo tutte le nuove misure insieme con quelle pubblicate abbiamo:

$$\text{Limiti} \Rightarrow \begin{cases} \text{ellitticit\`a} & \psi < 1.4 \times 10^{-9} \\ \text{rotazione} & \epsilon < 1.4 \times 10^{-9} \end{cases}$$



Conclusioni

- 1 La QED corregge le equazioni di Maxwell in vuoto per comprendere l'interazione fotone-fotone.
- 2 Lo scopo dell'esperimento è misurare l'ellitticità e la rotazione acquisite da un fascio laser polarizzato che si propaga in vuoto ortogonalmente ad un campo magnetico
- 3 L'esperimento PVLAS finora ha posto limiti
 - * sulla birifrangenza magnetica del vuoto
 - * sull'esistenza di particelle neutre che si accoppiano a due fotoni (assioni)

FINE

Grazie per l'attenzione