

# Proprietà ottiche del "mezzo vuoto" a corte lunghezze d'onda

G. Cantatore - Giornate di studio Sparx  
LNF 9-10/5/2005

# Sommario

## 👁️ Premessa

- 👁️ ultimi risultati di PVLAS

## 👁️ Idee

- 👁️ lunghezze d'onda corte
- 👁️ nuovi esperimenti

# Premessa

- L'esperimento PVLAS ha aperto una "linea scientifica" cercando la misura diretta delle proprietà magneto-ottiche dell'elemento vuoto
- Alcuni dei processi accessibili con queste misure a bassa energia (per ora...)
  - diffusione fotone-fotone
  - produzione reale o virtuale di particelle ...
- Dopo alcuni anni di sforzi ci sono dei risultati interessanti:
  - osservato un segnale in rotazione localizzato nella cavità risonante (zona di interazione+specchi)
  - more to come .....

# Collaborazione PVLAS



## Trieste

G. Cantatore  
F. Della Valle  
M. Karuza  
E. Milotti (Udine)  
E. Zavattini

## Pisa

S. Carusotto  
E. Polacco

## Ferrara

G. di Domenico  
G. Zavattini



## LNL

U. Gastaldi  
G. Ruoso

## Technical support

S. Marigo (LNL)  
A. Zanetti (TS)

## LNF

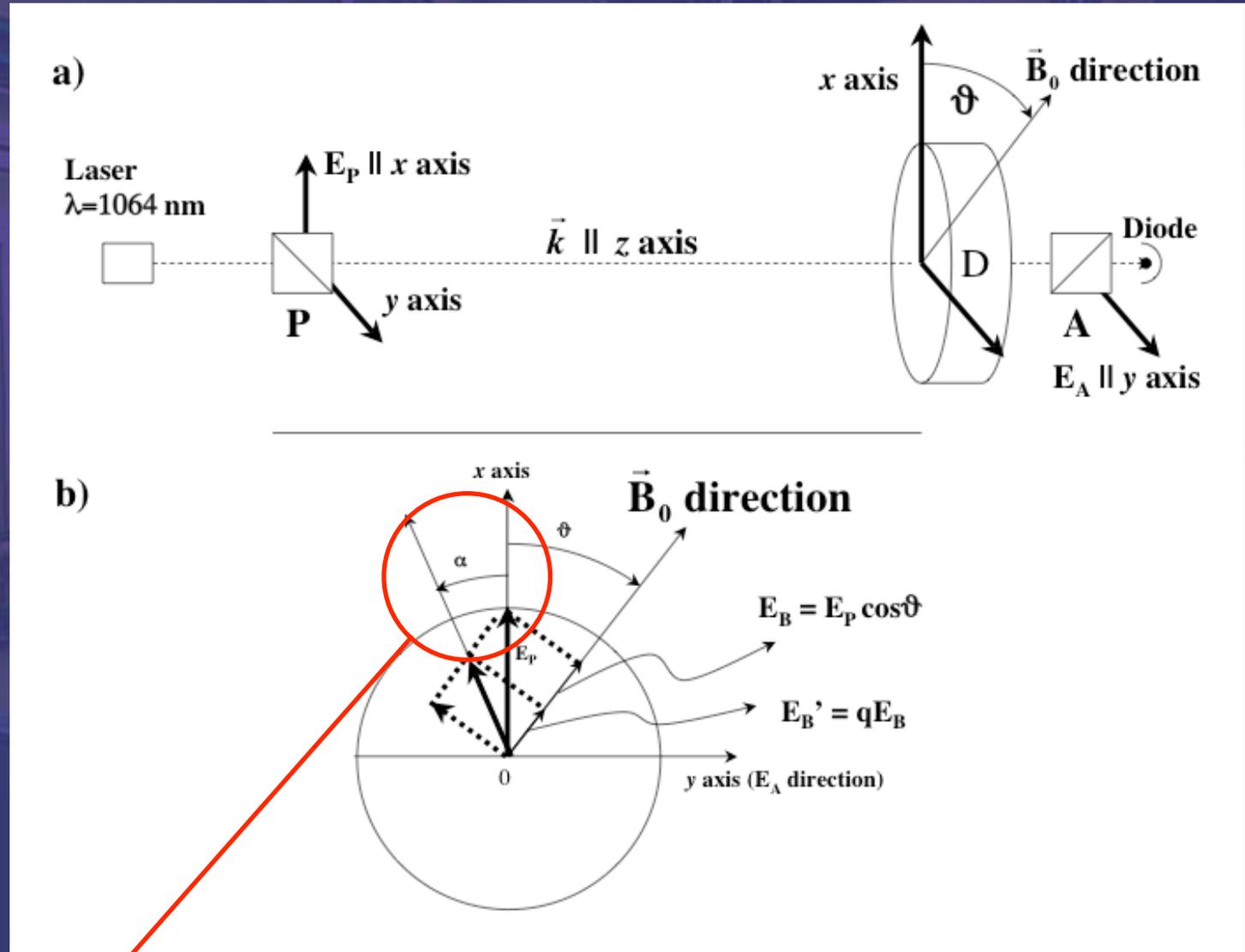
R. Cimino

# Sommario

- Richiami su PVLAS (brevissimi!)
- Risultati recenti
  - misure di rotazione ottica in vuoto
  - misure di rotazione ottica in gas
- Discussione

# Misure di rotazione

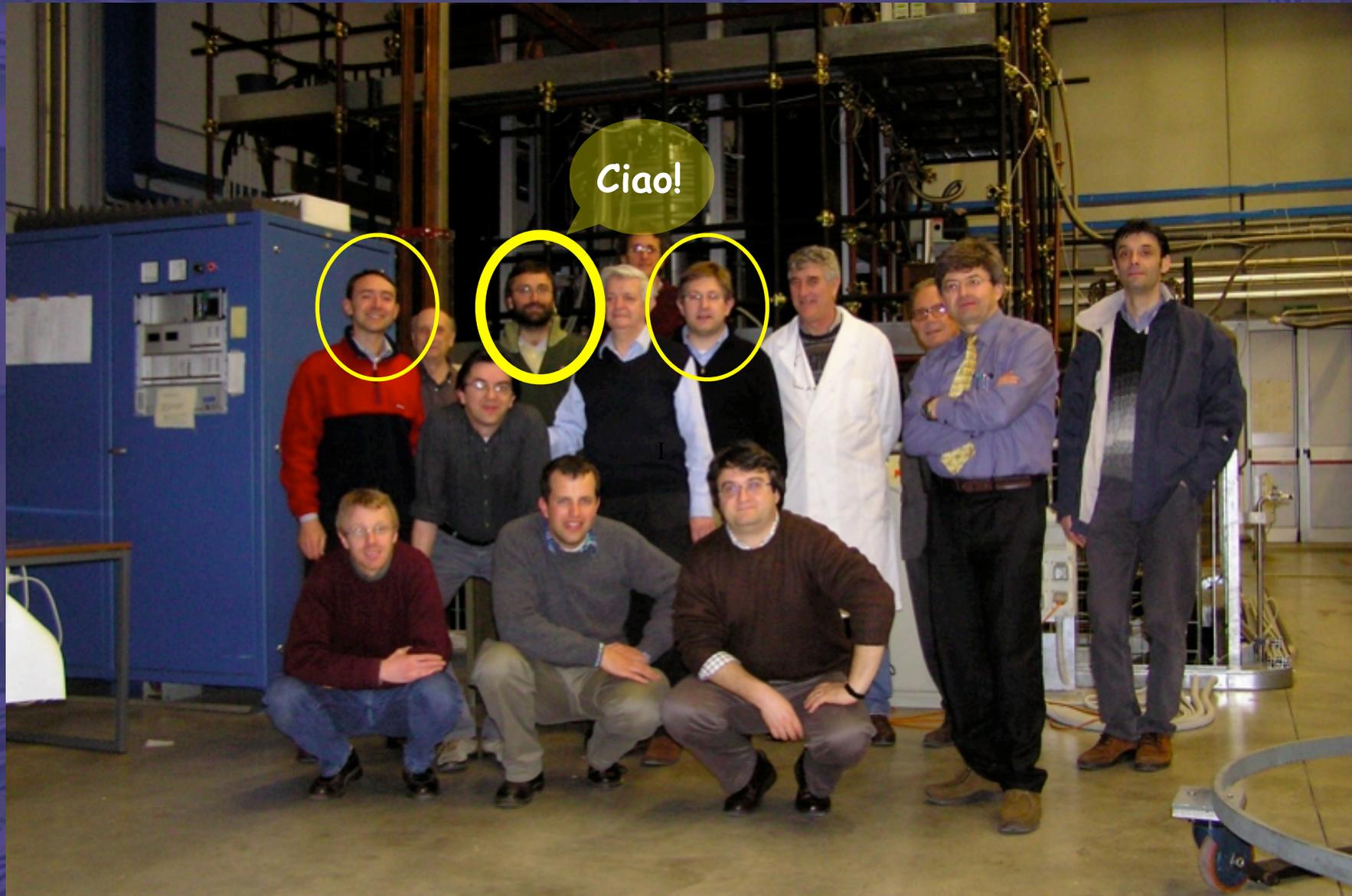
- Le misure di rotazione permettono di studiare l'effetto di un mezzo dicroico
- Nel caso illustrato si tratta di misurare l'assorbimento selettivo  $q$  generato dalla presenza del campo magnetico  $B$



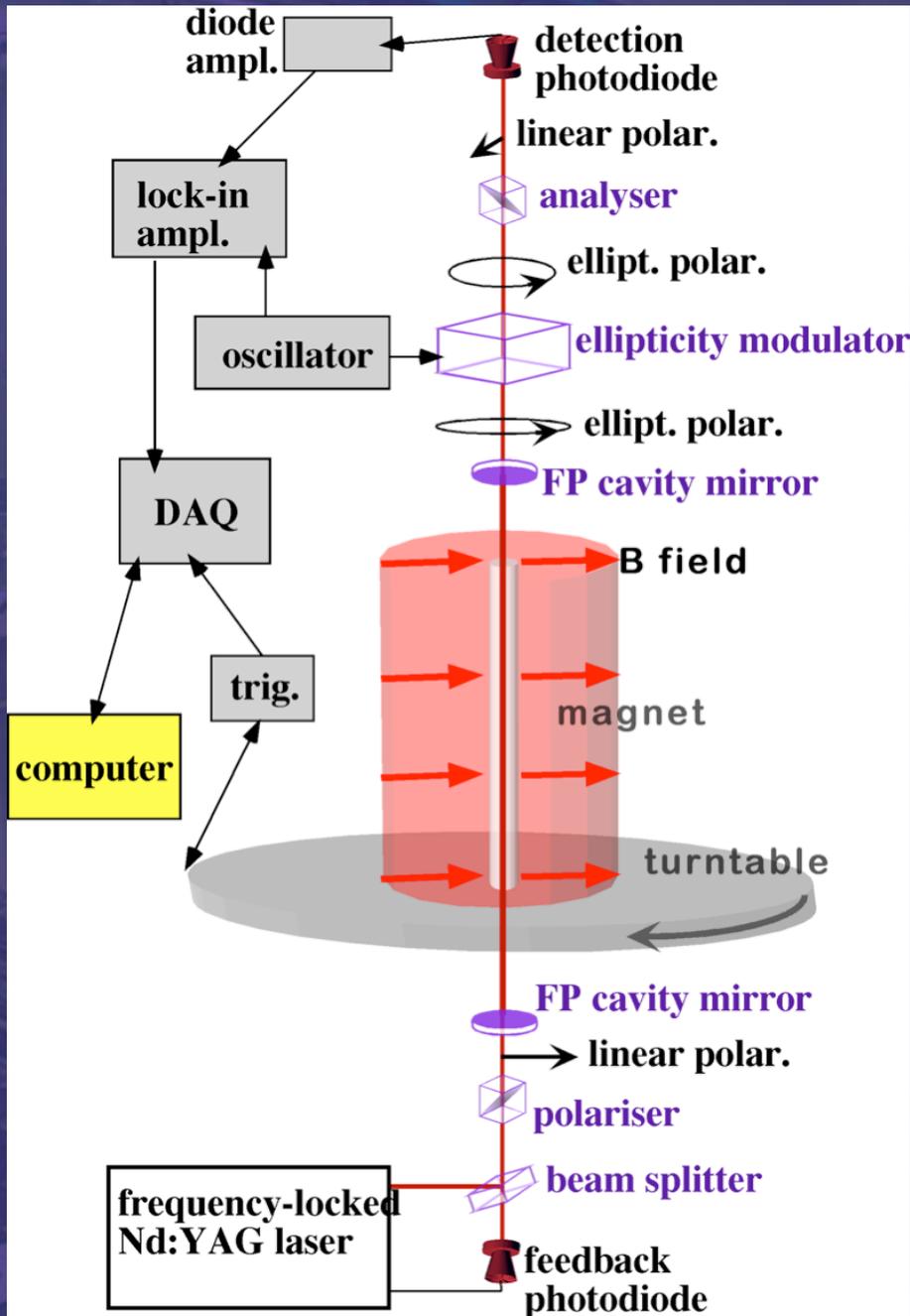
$$\alpha = \left( \frac{q-1}{2} \right)$$

$$E_A = E_P \left( \frac{q-1}{2} \right) \sin 2\vartheta$$

# A closer look ...



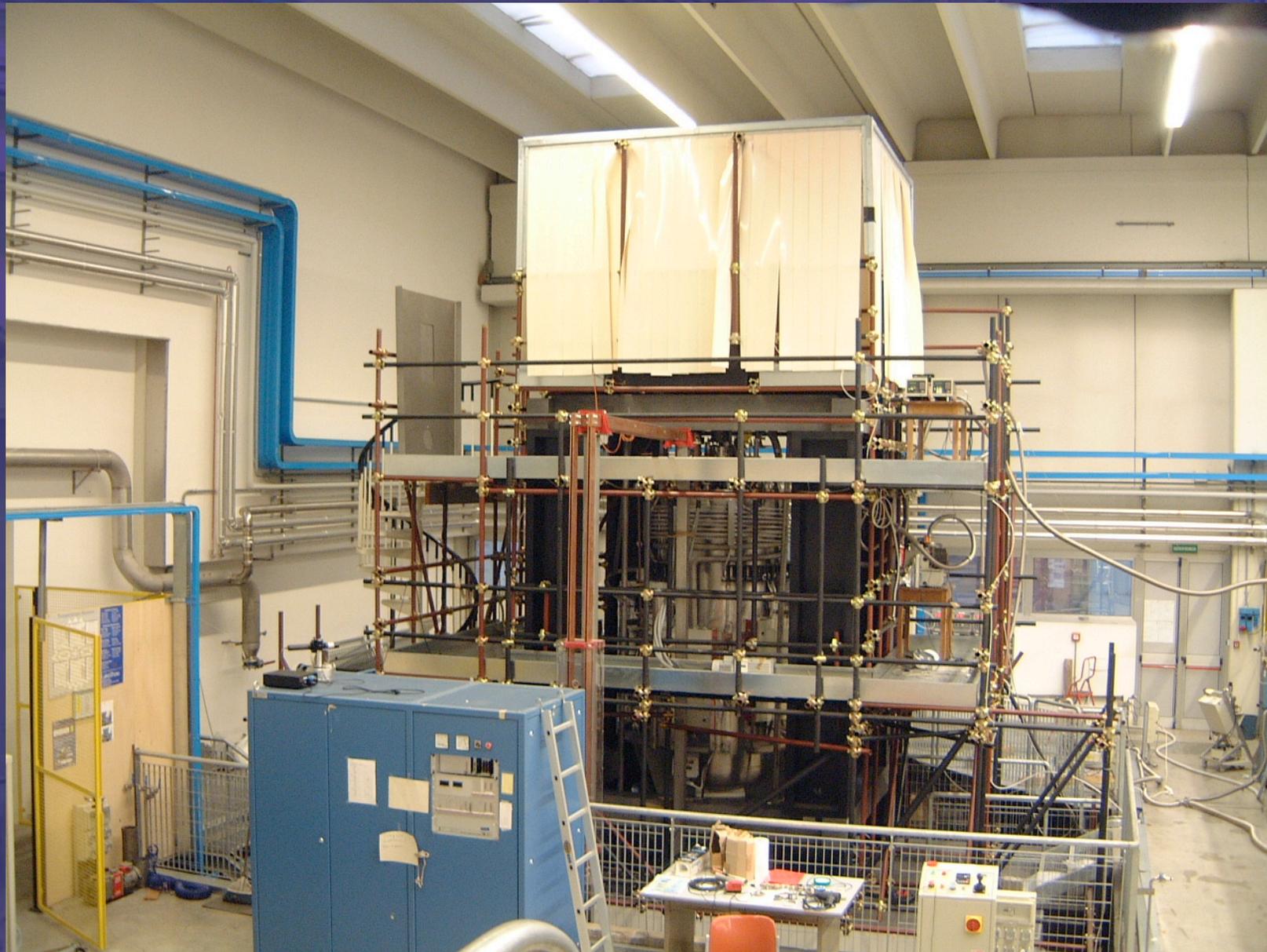
# PVLAS - Schema di principio



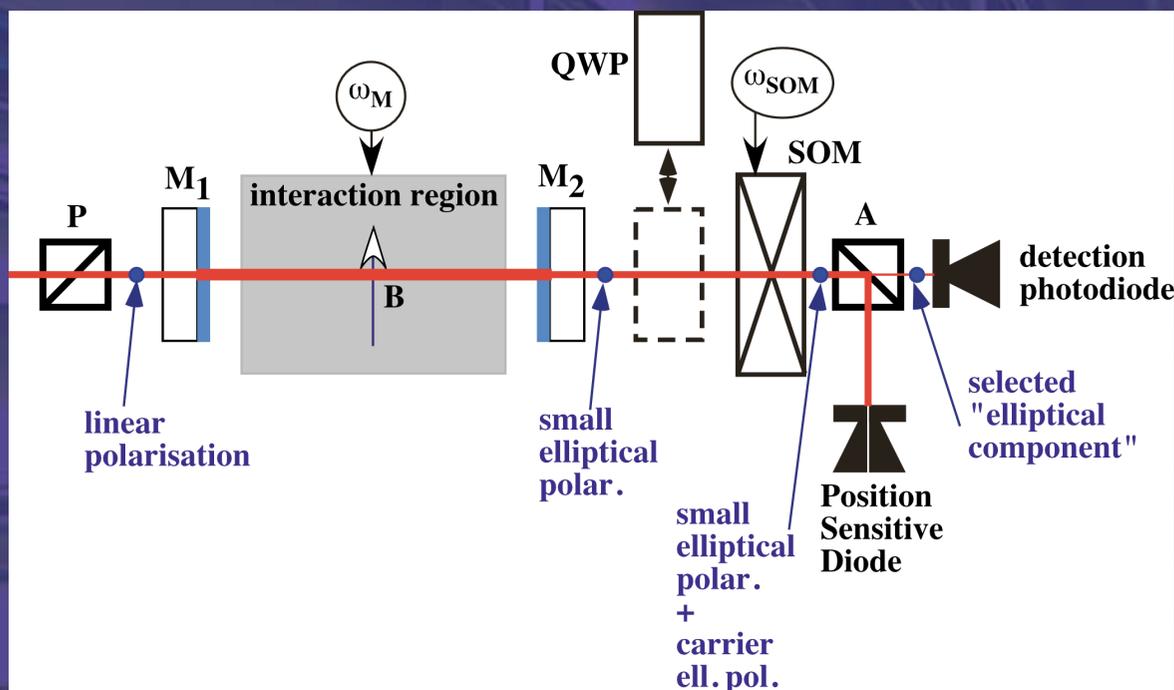
## Parametri principali dell'apparato

- **magnete**
  - dipolare, 6 T, temp. 4.2 K, zona di campo 1 m
- **criostato**
  - frequenza di rotazione 300 mHz, contatti rotanti, foro centrale a temp. ambiente per il passaggio della luce nella zona di interazione
- **laser**
  - 1064 nm, 100 mW, agganciato in freq. al risonatore F-P
- **cavità ottica di Fabry-Perot**
  - lunghezza 6.4 m, finesse  $\sim 100000$ , cammino ottico nella zona di interazione  $\sim 60$  km
- **ellissometro in eterodina**
  - modulatore di ellitticità (SOM) e polarizzatori incrociati ad alta estinzione
- **rivelazione**
  - fotodiode con amplificatore a basso rumore
- **DAQ**
  - demodulata a bassa frequenza ed agganciata in fase al campo magnetico
  - non demodulata ad alta frequenza di campionamento

# PVLAS hall at LNL

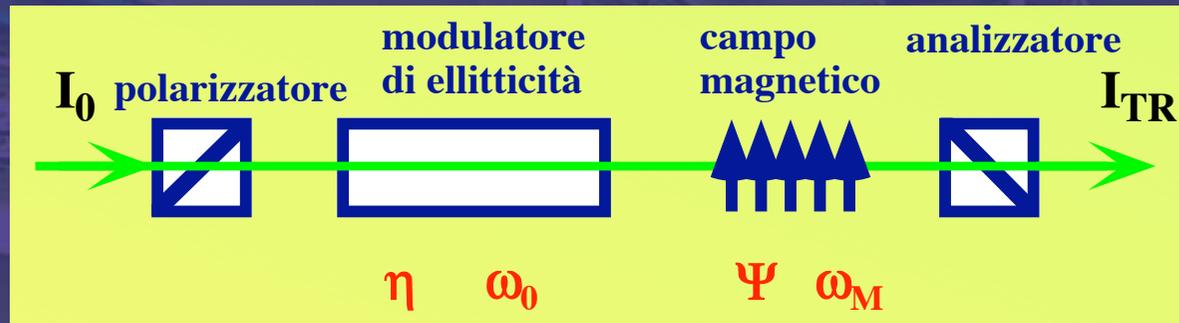


# Metodo di rivelazione



- Una coppia di polarizzatori incrociati (P, A) rivela le variazioni nello stato di polarizzazione
- Un Fabry-Perot di finesse  $\sim 10^5$  (specchi  $M_1$  and  $M_2$ ) aumenta il cammino ottico
- Un campo magnetico trasverso ( $\sim 6$  T) è generato da un dipolo superconduttore
- Un lamina quarto d'onda (QWP) permette di misurare le rotazioni
- I segnali vengono estratti usando la tecnica eterodina
  - l'interazione è modulata dalla rotazione del magnete (la rotazione stessa dà la sincronizzazione necessaria per misurare le fasi)
  - la portante in ellitticità è introdotta usando un apposito modulatore sviluppato "in casa" (SOM)
- L'intensità luminosa trasmessa attraverso l'analizzatore A è rivelata con un fotodiodo e analizzata in frequenza: lo spettro risultante contiene l'informazione fisica

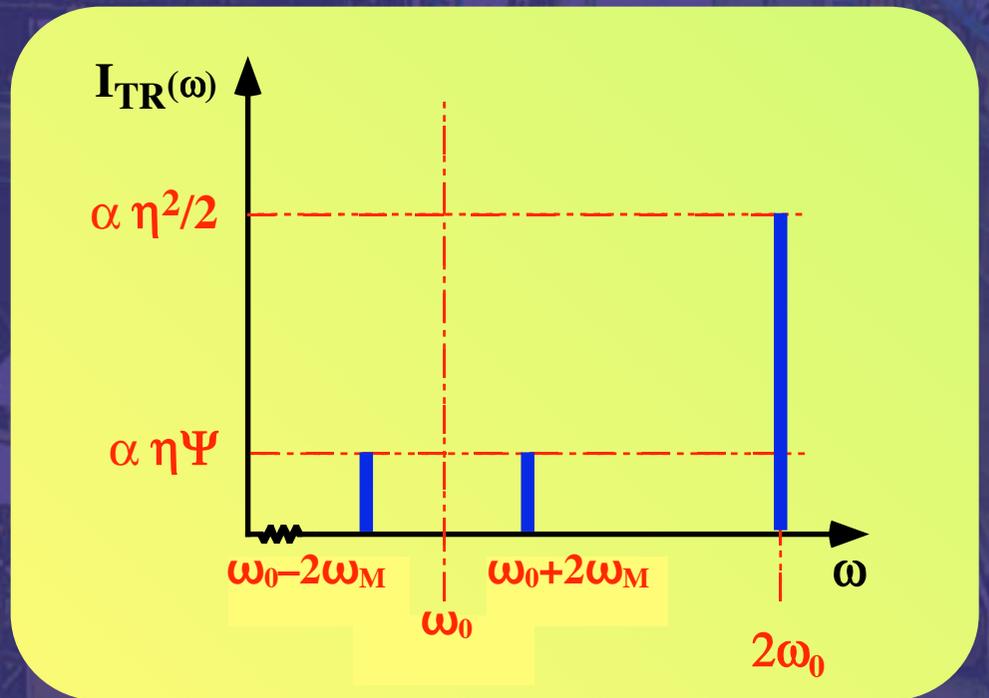
# Rivelazione in eterodina



$$I_{TR} \approx I_0 [\sigma^2 + (\eta + \Psi)^2] = I_0 [\sigma^2 (\eta \cos \omega_0 t + \Psi \cos \omega_M t)^2]$$

$$\approx I_0 \left\{ \dots + \eta \Psi [\cos(\omega_0 - \omega_M)t + \cos(\omega_0 + \omega_M)t] + \frac{\eta^2}{2} \cos 2\omega_0 t + \dots \right\}$$

Un segnale piccolo, ma variabile nel tempo, può essere estratto da un fondo di rumore elevato con la tecnica eterodina



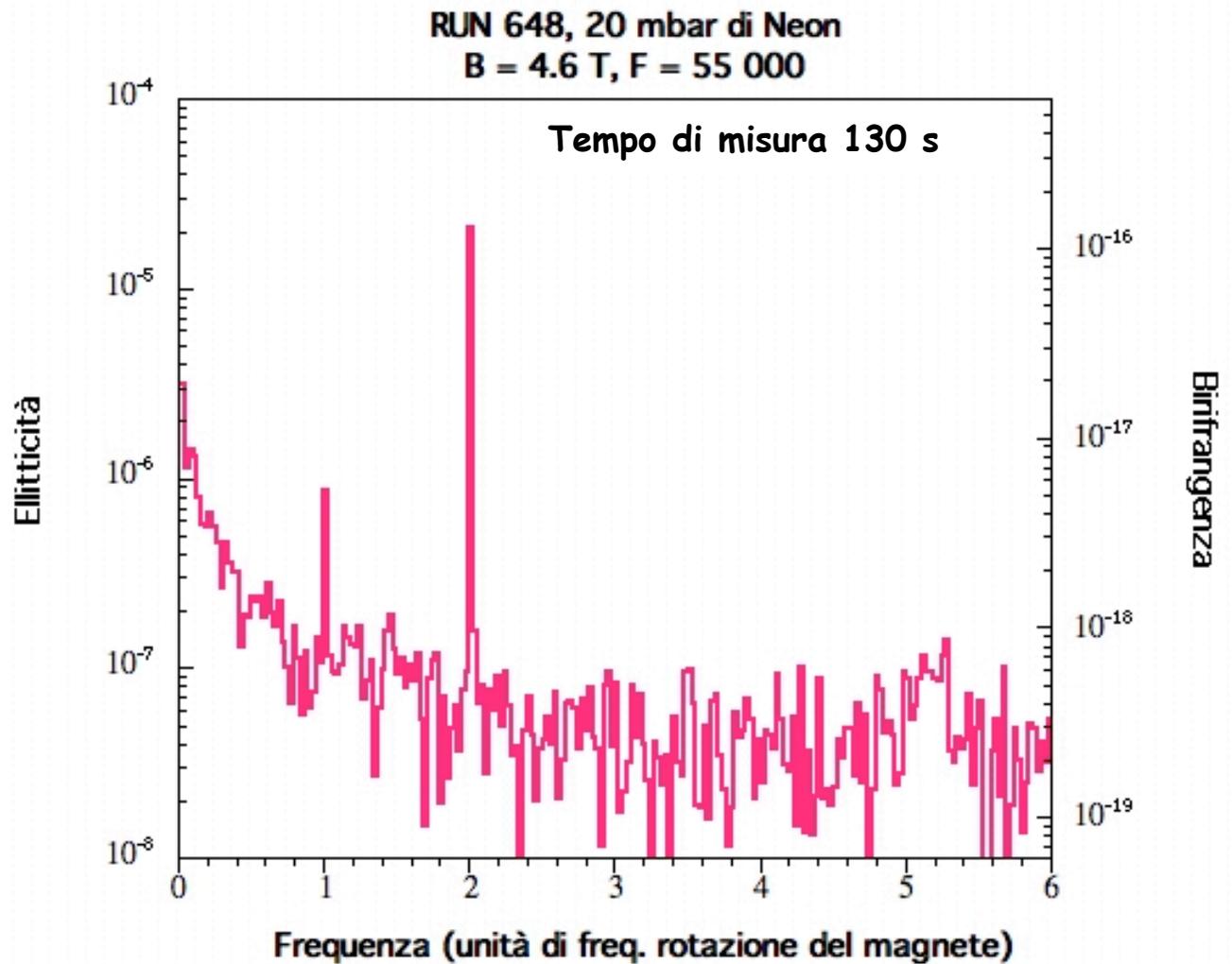
# Misure di controllo con gas



Misure fatte senza QWP sfruttando l'effetto Cotton-Mouton

Spettro di ampiezza demodulato alla frequenza portante del modulatore di ellitticità (506 Hz)

Il segnale atteso (birifrangenza magnetica in questo caso) appare al doppio della frequenza di rotazione del magnete (qui 0.6 Hz)



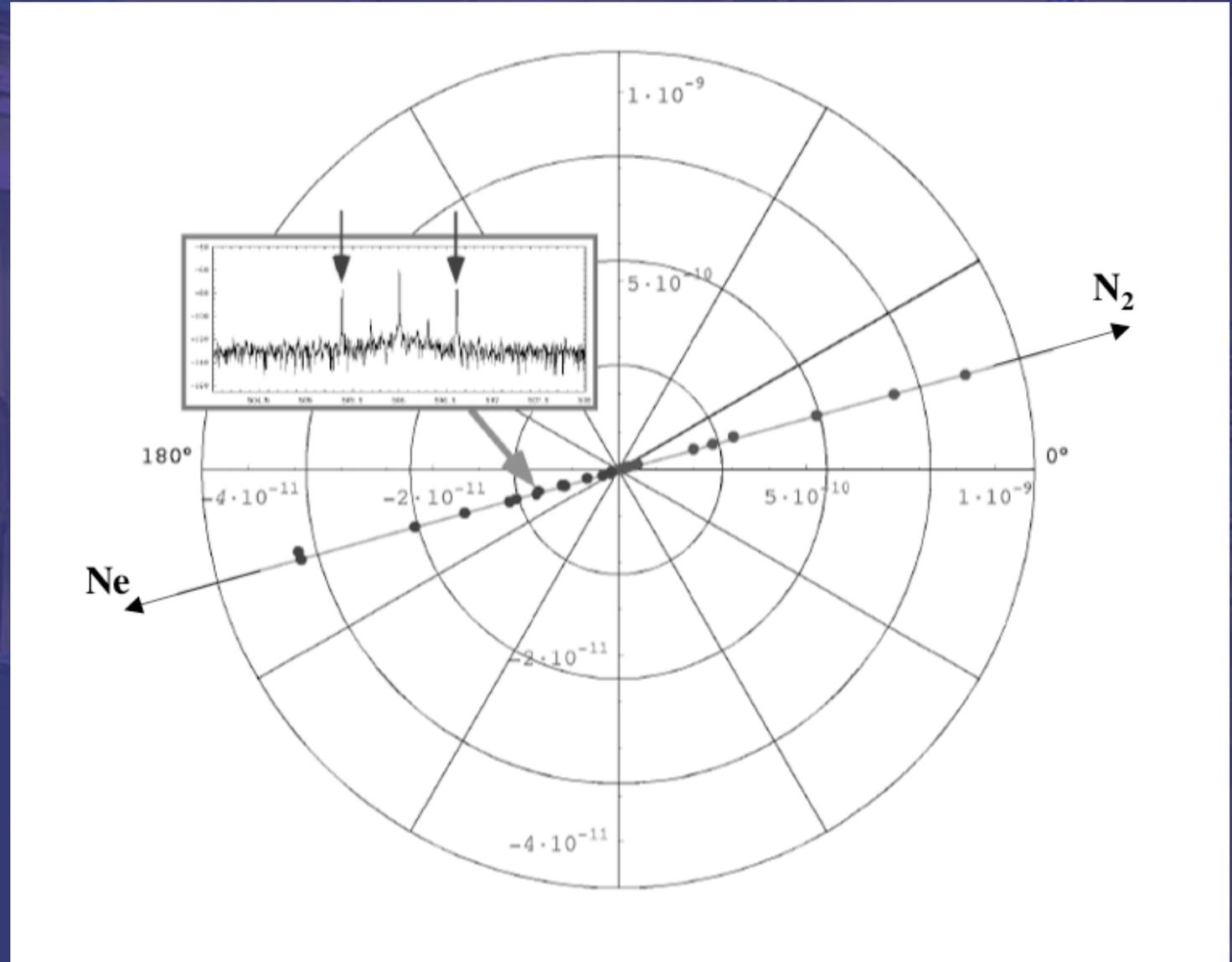
Sensibilità

$$\psi^s \approx 6 \cdot 10^{-7} \quad 1/\sqrt{\text{Hz}};$$

$$\Delta n^s \approx 2 \cdot 10^{-18} \quad 1/\sqrt{\text{Hz}};$$

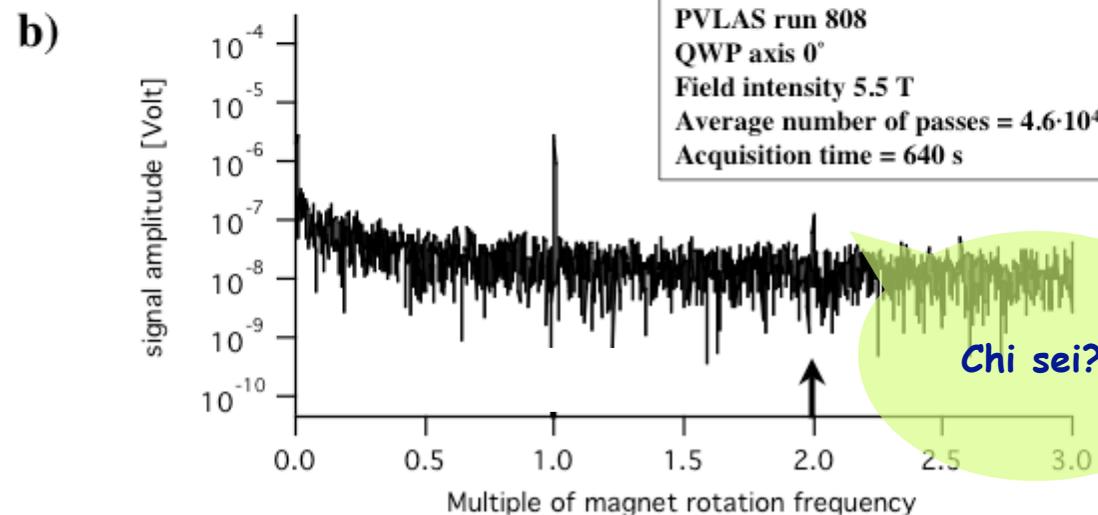
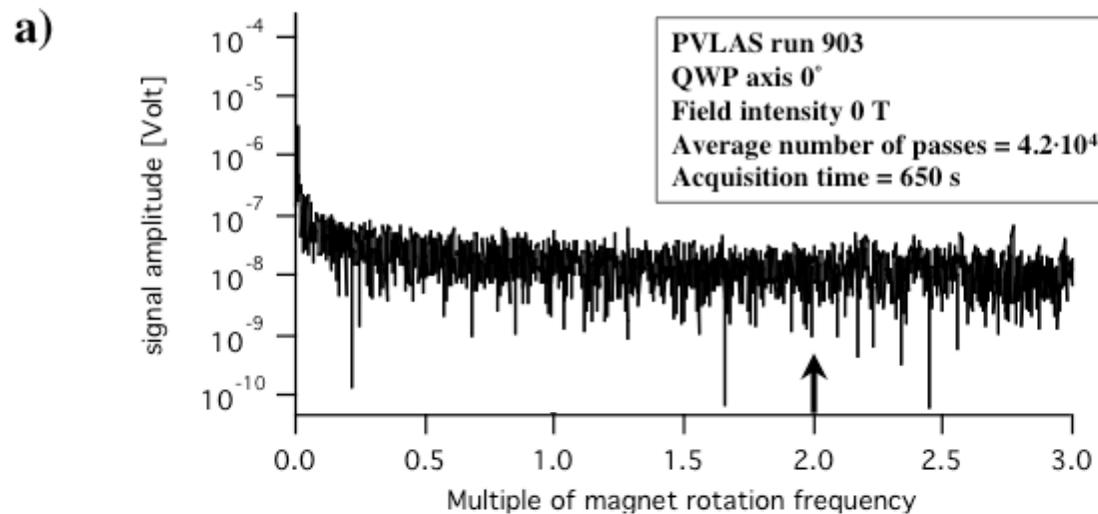
# Controllo delle fasi

- Plot polare ampiezza fase dei picchi ottenuti dal CME (Cotton-Mouton Effect) in Ne ed N<sub>2</sub> a varie pressioni (< mbar per N<sub>2</sub>; 1-20 mbar per Ne)
- Notare l'allineamento sull'asse fisico (come dev'essere dalla geometria dell'apparato)
- I segnali "fisici" devono giacere sull'asse a 15°



# Misure in vuoto - ampiezze

- Spettri demodulati in vuoto ( $P < 10^{-7}$  mbar, cavità con 50000 passaggi)
- Misure di rotazione
  - a) campo  $B = 0$
  - b) campo  $B = 5.5$  T
- Il picco alla frequenza 2.0 (in unità di freq. di rotazione del magnete) corrisponde ad una rotazione osservata in vuoto di  $\sim 2 \times 10^{-7}$  rad



# Misure in vuoto - fasi

- Si fa un fit per ciascuno di 205 records da 100 s e si ottengono fase ed ampiezza del picco di rotazione

- Il plot riporta

QWP  $0^\circ$  = vettore media pesata con asse QWP a  $0^\circ$

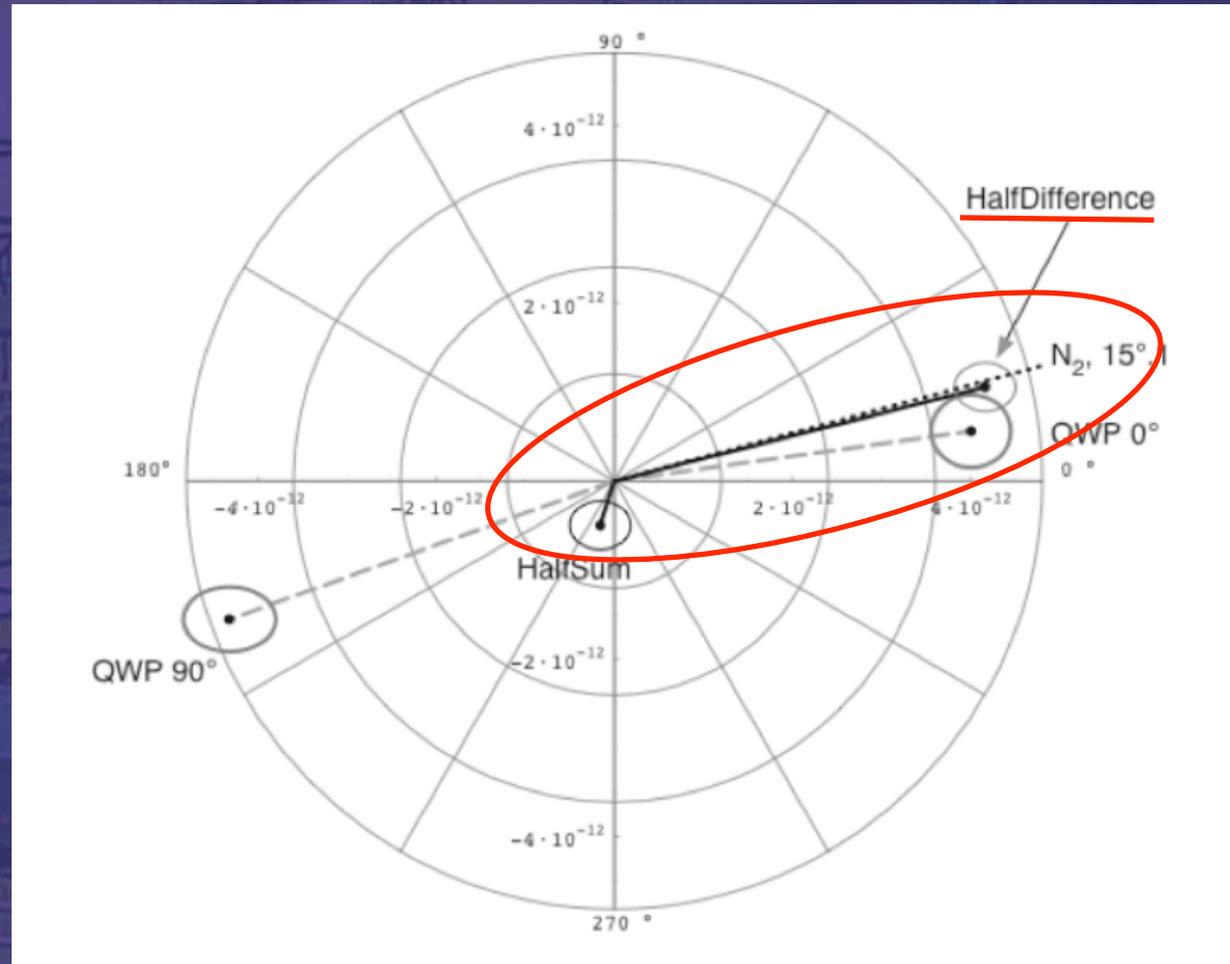
QWP  $90^\circ$  = vettore media pesata con asse QWP a  $90^\circ$

HalfDifference = parte che cambia segno per inversione degli assi della lamina

HalfSum = parte spuria

- Gli ellissi danno l'incertezza

- Il vettore HalfDifference, che corrisponde ad una vera rotazione, giace lungo l'asse fisico



# Risultati in vuoto

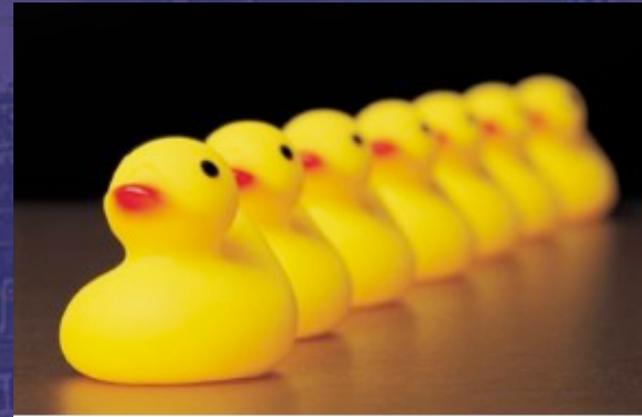


- Riassumendo

- si osserva una rotazione in vuoto che dipende dalla presenza del campo magnetico
- con 5.5 T e 50000 passaggi la sua ampiezza è  $(2.2 \pm 0.3) \times 10^{-7}$  rad
- la rotazione è generata all'interno della cavità
- la fase è quella che ci si aspetta dalla geometria dell'apparato

# Interpretazione

I. artefatto strumentale  
nuove misure a 532 nm



II. origine fisica del segnale  
assorbimento selettivo di fotoni:

1. photon splitting (-> soppresso da  $B \ll B_{crit}$ )
2. oscillazione di fotoni in bosoni leggeri

# Modello oscillazioni fotoni-bosoni



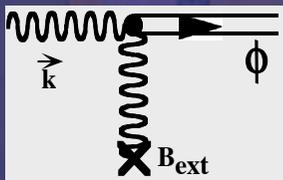
Rotazione (dicroismo) ed ellitticità indotti si possono legare ai parametri caratteristici della particella: massa e costante inversa di accoppiamento a due fotoni

Rotazione ed ellitticità si misurano indipendentemente e si ottiene l'identificazione diretta della particella attraverso i suoi parametri (equazioni in unità Heaviside-Lorentz):

[L.Maiani, R. Petronzio, E. Zavattini, Phys. Lett B, Vol. 173, no.3 1986]  
 [E. Massò and R. Toldrà, Phys. Rev. D, Vol. 52, no. 4, 1995]

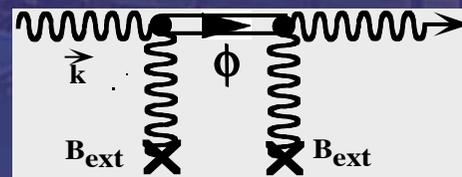
$$\varepsilon = \frac{1}{M^2} \frac{2FB_{ext}^2 \omega^2}{\pi m_a^4} \left[ \sin\left(\frac{m_a^2 l}{2\omega}\right) \right]^2$$

Rotazione (dicroismo)



$$\psi = \frac{1}{M^2} \frac{FB_{ext}^2 \omega^2}{\pi m_a^4} \left[ \frac{m_a^2 l}{2\omega} - \sin\left(\frac{m_a^2 l}{2\omega}\right) \right]$$

Ellitticità



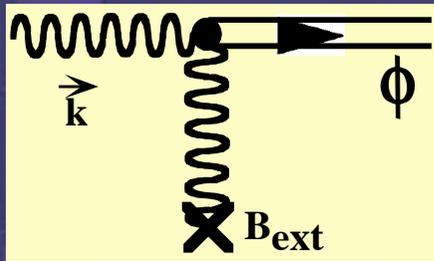
$m_a$  = massa  
 $M$  = costante di accoppiamento inversa  
 $F$  = fattore di amplificazione  
 $\omega$  = energia dei fotoni sonda  
 $l$  = lunghezza della regione di interazione

Si noti che le particelle sono prodotte e rivelate in un laboratorio terrestre, in maniera indipendente da modelli astrofisici e cosmologici)

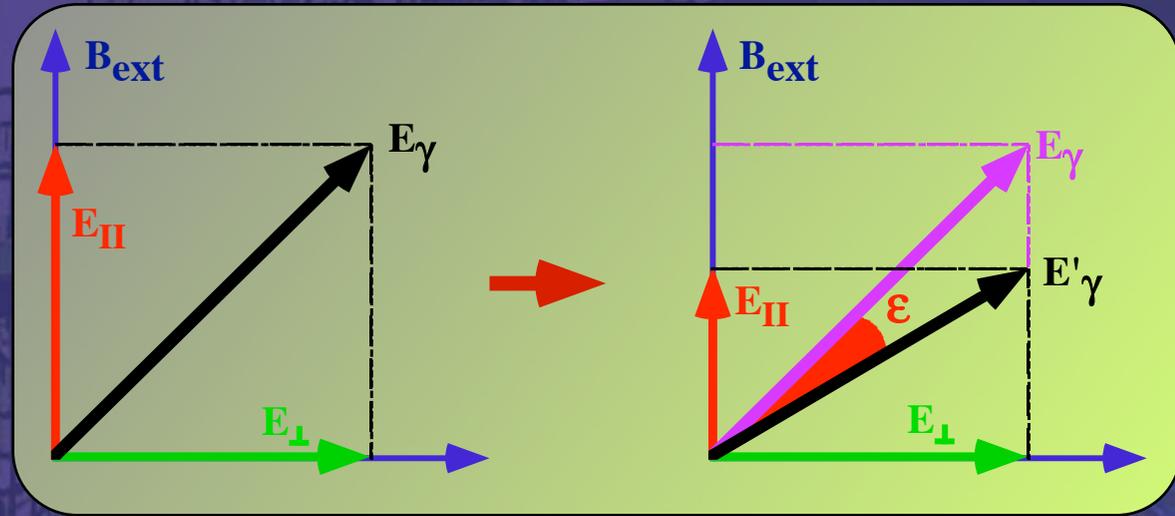
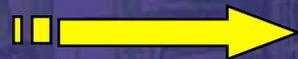
# Effetto osservabile in ottica

- Effetto osservabile nel caso pratico di luce linearmente polarizzata in campo magnetico trasverso

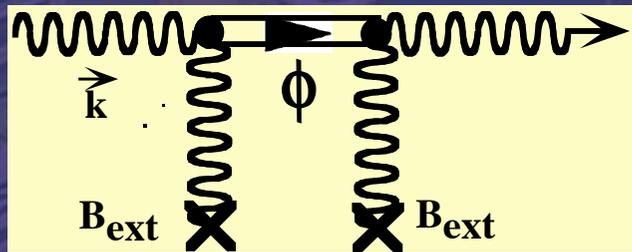
## Produzione reale



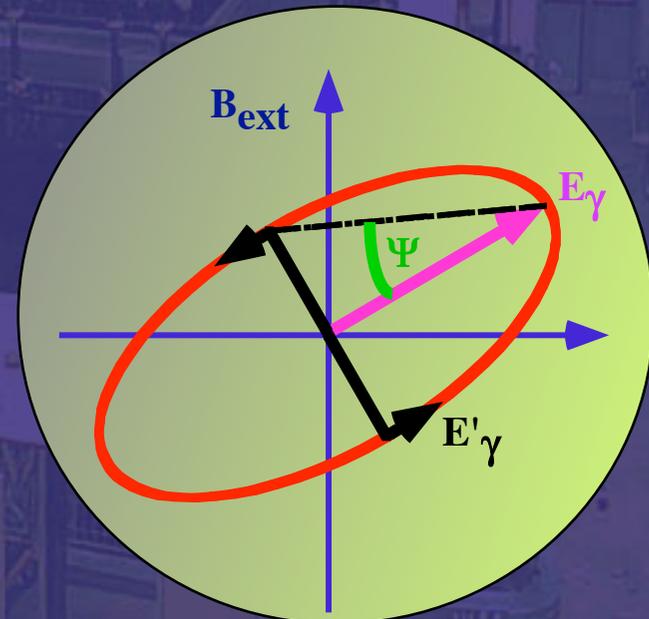
rotazione  $\epsilon$



## Produzione virtuale

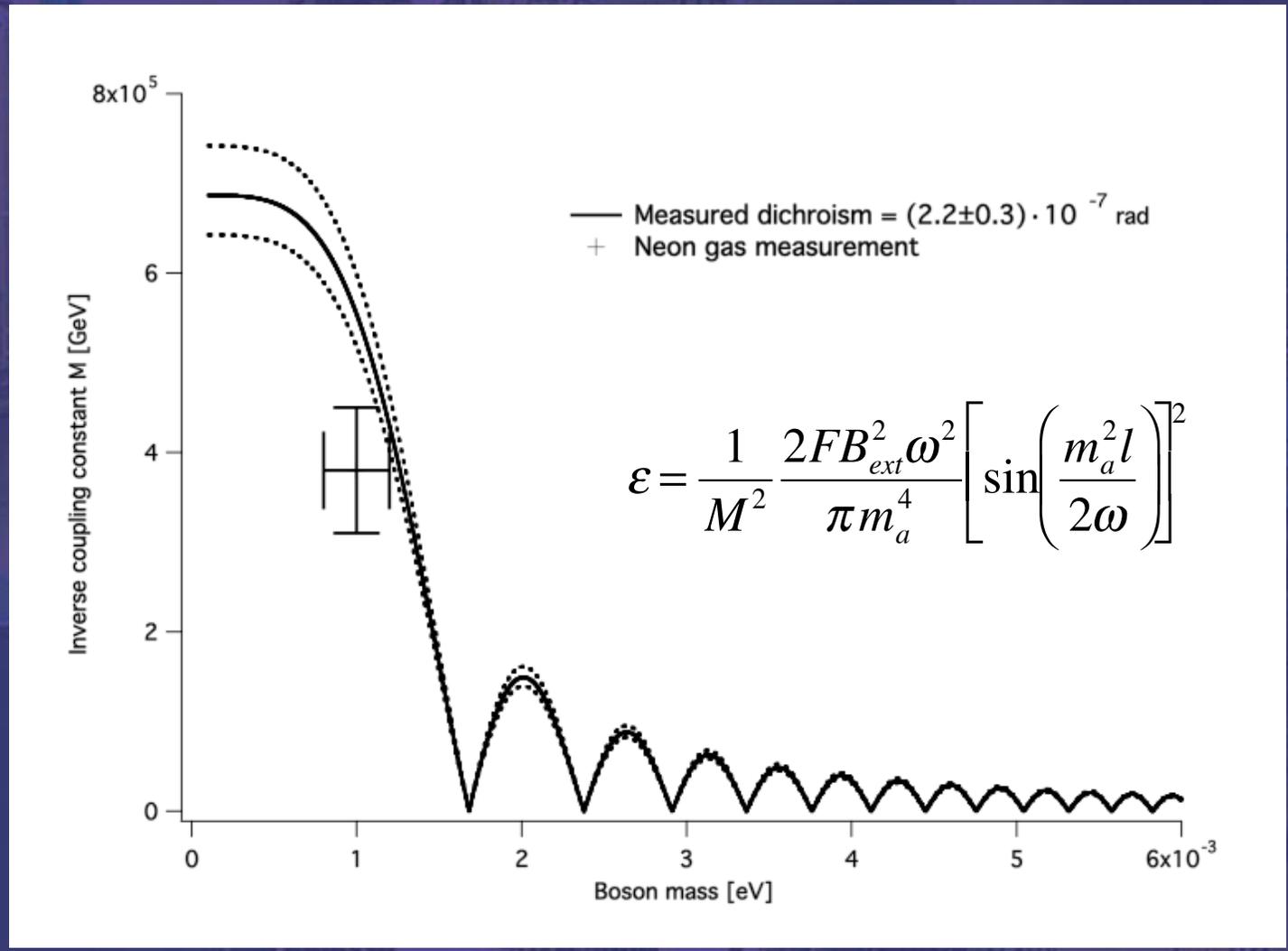


ellitticità  $\psi$



# Oscillazioni in vuoto

- Curva nel piano  $m$ - $M$  corrispondente alla rotazione misurata
- Le possibili coppie di valori  $(m, M)$  devono giacere sulla curva

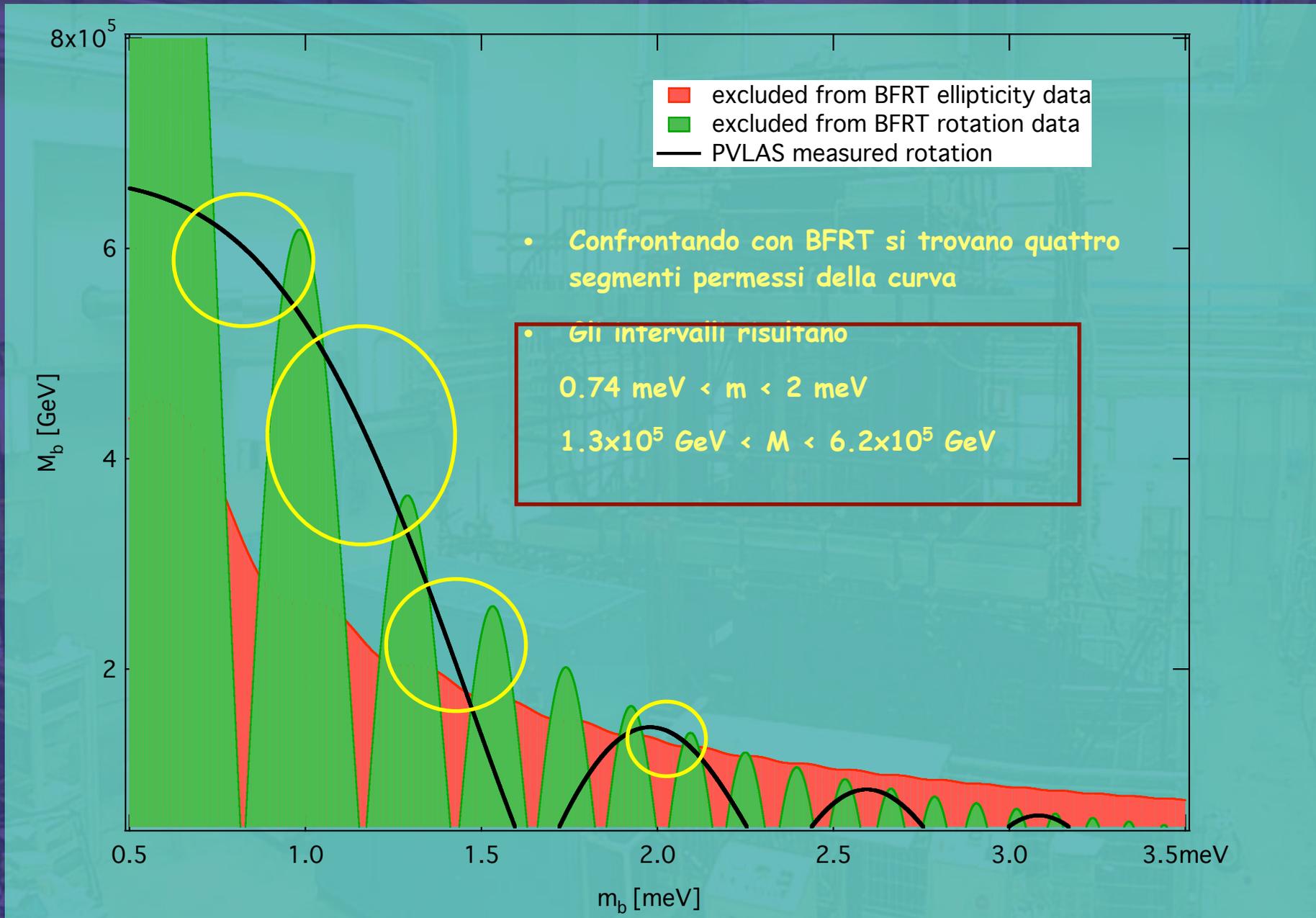


# Determinazione della massa



- È possibile fissare un punto sulla curva?
- In due modi
  - prendo i risultati già pubblicati da BFRT
  - misure di rotazione con una (piccola) pressione di gas nella zona di interazione

# Confronto con BFRT



# Produzione reale in mezzo gassoso



Il dicroismo indotto da produzione reale di particelle è dato da

$$\varepsilon = -\sin 2\alpha \left( \frac{BL}{4M} \right)^2 N \left( \frac{\sin x}{x} \right)^2$$

dove

$$x = \frac{L}{2} \left[ \frac{k_m^2}{2k} + (n-1)k \right]$$
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad N = \frac{2F}{\pi}; \quad k_m = \frac{mc}{\hbar}$$

indice di rifrazione del mezzo in cui avviene la produzione reale

Gli zeri della curva che dà il dicroismo in funzione della massa si trovano quando

$$k_m^2 = \frac{4\pi^2}{L} - 2(n-1)k^2$$

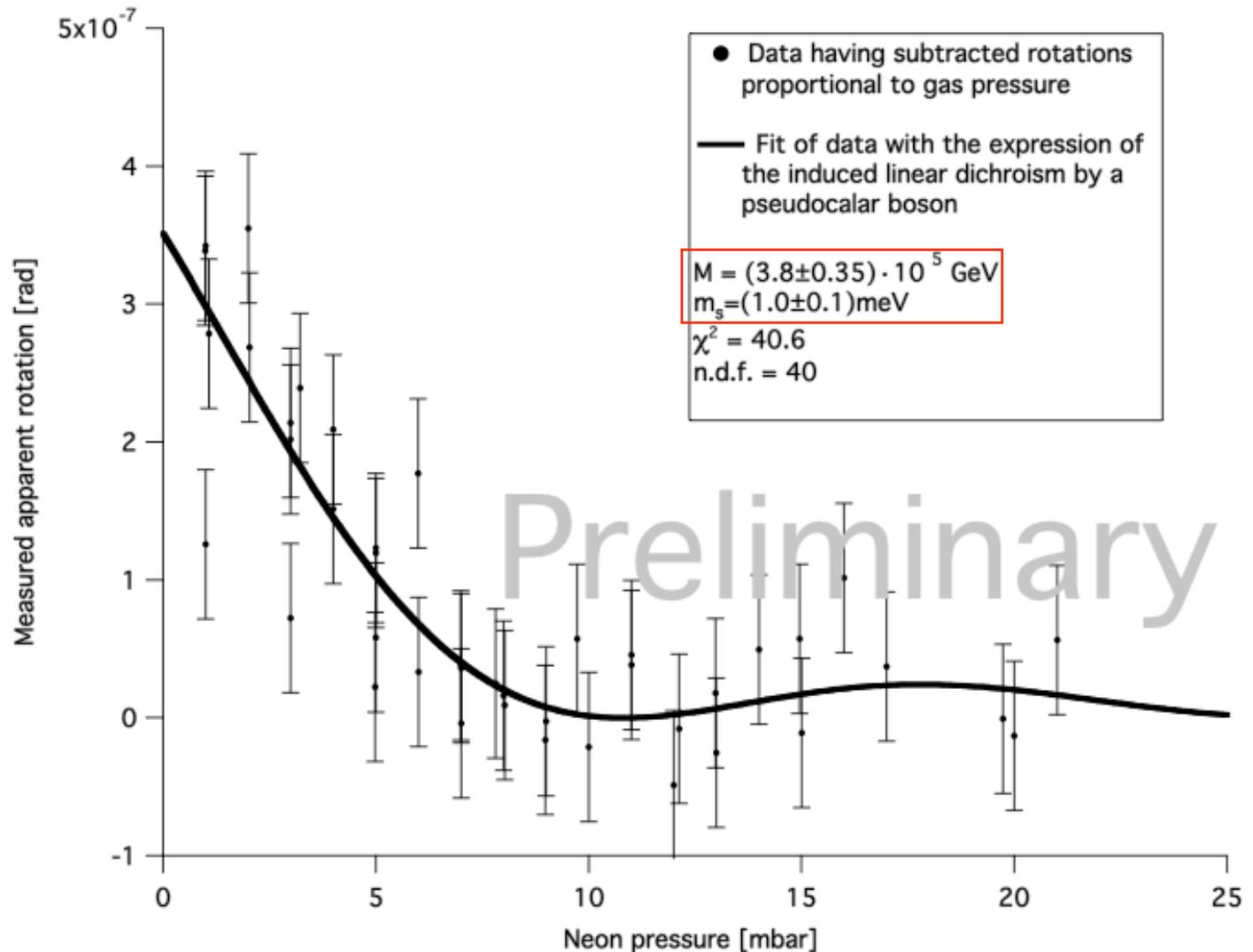
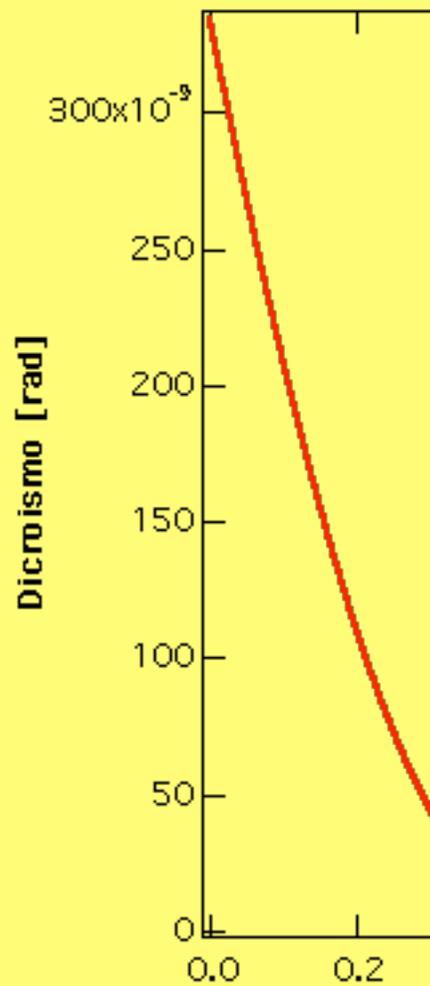
Ne segue che, fissati gli altri parametri inclusa M, inserendo nella zona di interazione un gas a pressione crescente gli zeri della curva che dà il dicroismo in funzione della massa si spostano verso valori più piccoli della massa stessa

**vuoto**  $n = 1 \Rightarrow k_m^2 = \frac{4\pi^2}{L}$

**gas**  $n > 1 \Rightarrow k_m^2 < \frac{4\pi^2}{L}$

# Rotazione in funzione della pressione

- Inserendo gas (Neon) nella zona di interazione e cambiando la pressione il dichroismo deve variare seguendo delle oscillazioni



# Conclusioni ... per ora

I. artefatto strumentale  
nuove misure ed altro

II. origine fisica del segnale

assorbimento selettivo di fotoni:

1. photon splitting (-> soppresso da  $B \ll B_{\text{crit}}$ )
2. oscillazione di fotoni in bosoni leggeri

massa  $\sim 1 \text{ meV}$

costante di acc. inversa  $M \sim 5 \times 10^5 \text{ GeV}$

# Conclusione (... della premessa)

- In ogni caso (segnale "buono" o "spurio intelligente"):
  - PVLAS ha il dovere di spremere al massimo l'apparato e la tecnica sperimentale attuali
    - passi già previsti
      - nuova struttura di accesso
      - laser verde
    - estensioni a medio termine
      - magneti permanenti
  - è necessario pensare e preparare nuove linee di ricerca in modo da sfruttare i parametri a disposizione
    - energia
    - campo magnetico
    - lunghezza della zona di interazione

# Idee

- Sorgenti più energetiche e più intense
  - FEL
  - (raggi  $\gamma$  da backscatter)
- Rigenerazione dei fotoni

# Cosa studiare

## ◉ Diffusione fotone-fotone in QED

- ◉ in PVLAS l'effetto atteso dalla sola QED è  $10^4$  volte più piccolo di quello osservato → isolare!

## ◉ Produzione di bosoni leggeri

- ◉ validare le misure ( $m_b \approx 1 \text{ meV}$ ,  $M_b \approx 10^5 \text{ GeV}$ )
- ◉ studiare le oscillazioni  $\gamma \rightarrow b$  in funzione di:
  - ◉ energia del  $\gamma$
  - ◉ lunghezza della zona di campo

## Equazioni base (in unità H-L)

$$\Psi_{QED} = \frac{3\alpha^2 B^2 \omega L}{45m_e^4}$$

diffusione fotone-fotone

$$R_{ell} = \left( \frac{6\alpha^2 B^2 M_b^2 m_b^4}{45m_e^4} \right) \left( \frac{L}{\omega} \right) \left[ \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) \right]$$

$$\Psi_b = \frac{1}{2} \left( \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \right) \left[ \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) \right]$$

produzione virtuale

$$R_b = \frac{\epsilon_b}{\Psi_b} = \frac{2 \sin^2 \left( \frac{m_b^2 L}{4\omega} \right)}{\left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right)}$$

$$\epsilon_b = \left( \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \right) \sin^2 \left( \frac{m_b^2 L}{4\omega} \right)$$

produzione reale

# Diffusione fotone-fotone in QED

- L'effetto cresce sia con l'energia sia con la lunghezza

● Quindi:

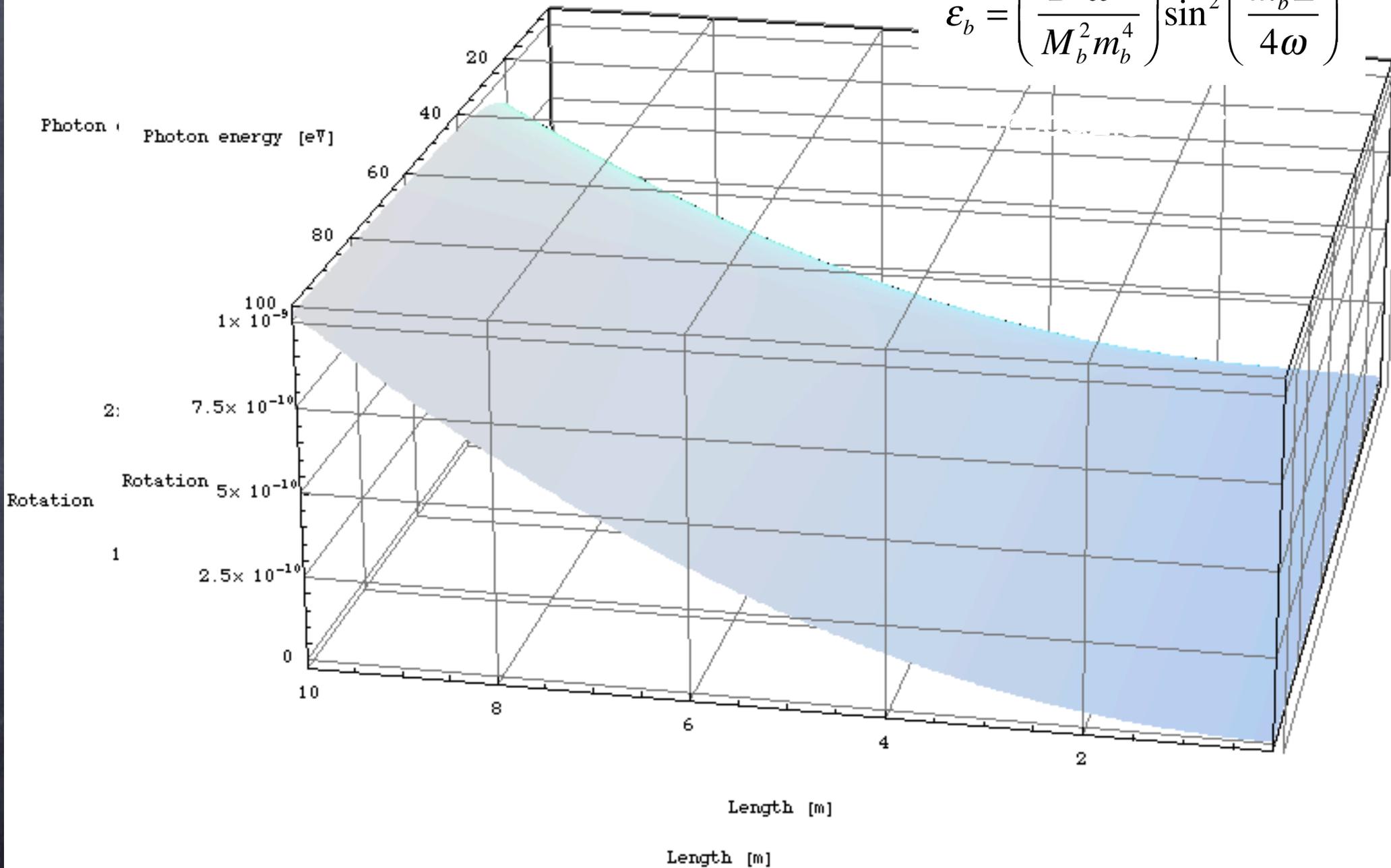
- corte lunghezze d'onda
- magneti lunghi
- (fasci poco divergenti!)

$$\Psi_{QED} = \frac{3\alpha^2 B^2 \omega L}{45m_e^4}$$

diffusione fotone-fotone

# Produzione reale di bosoni

$$\epsilon_b = \left( \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \right) \sin^2 \left( \frac{m_b^2 L}{4\omega} \right)$$



# Produzione reale di bosoni

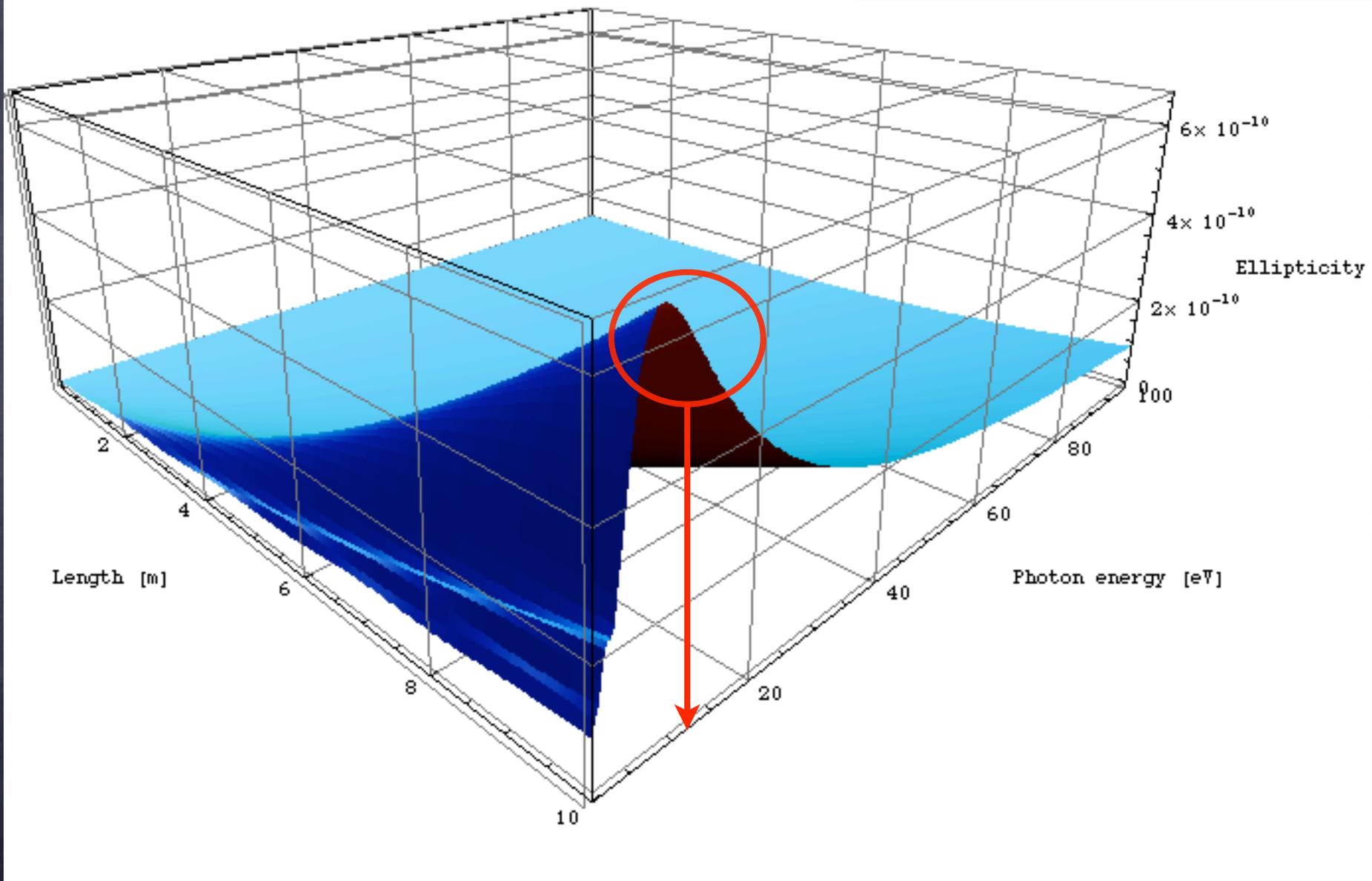
$$\varepsilon_b = \left( \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \right) \sin^2 \left( \frac{m_b^2 L}{4\omega} \right)$$

produzione reale

- A bassa energia (1-2 eV) trovo massimi per L circa 2.5 m o 7.5 m
  - Si parla sempre di  $10^{-11}$  rad per il singolo passaggio
- Ad energie più alte (100 eV)
  - le oscillazioni in funzione di L si appiattiscono
  - si guadagna con l'energia e con la lunghezza

# Produzione virtuale di bosoni

$$\Psi_b = \frac{1}{2} \left( \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \right) \left[ \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) \right]$$



# Produzione virtuale di bosoni

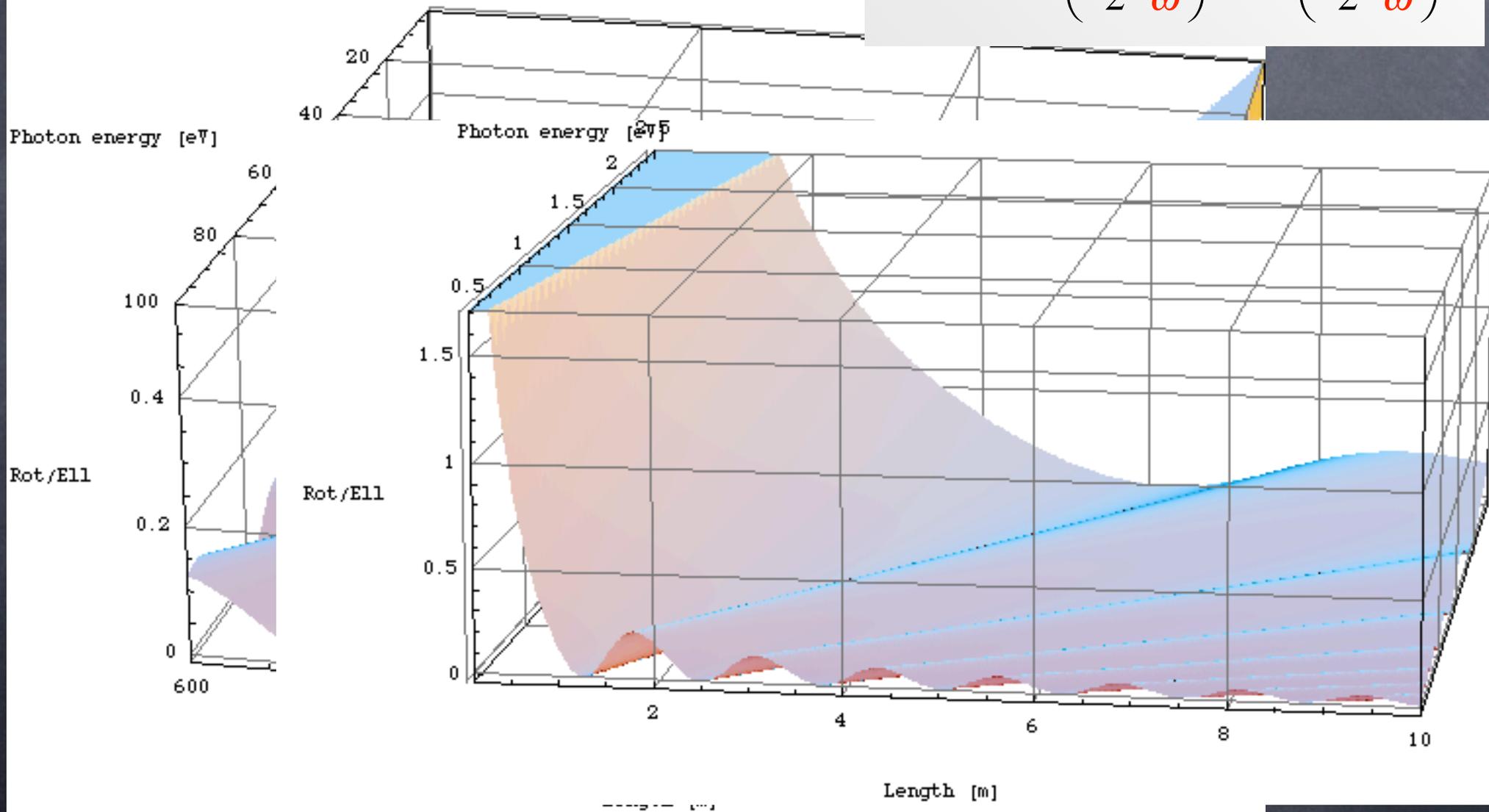
$$\Psi_b = \frac{1}{2} \left( \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \right) \left[ \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) \right]$$

produzione virtuale

- C'è un'energia ottimale di circa 15 eV
  - Si parla sempre di  $10^{-9}$  rad per il singolo passaggio
- Si guadagna con la lunghezza L

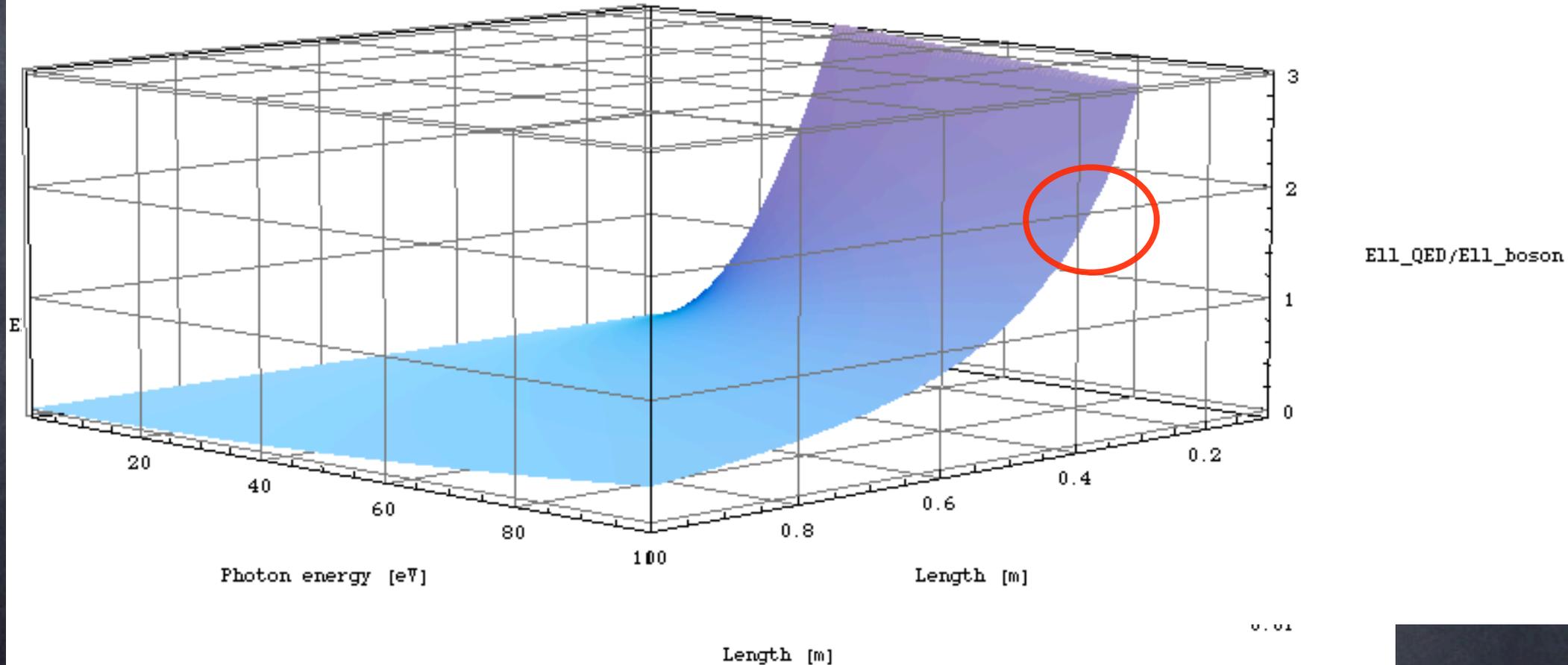
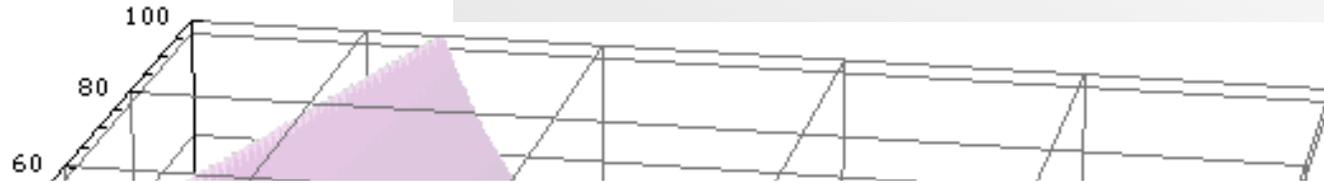
# Rapporto reale/virtuale

$$R_b = \frac{\varepsilon_b}{\Psi_b} = \frac{2 \sin^2 \left( \frac{m_b^2 L}{4 \omega} \right)}{\left( \frac{m_b^2 L}{2 \omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2 \omega} \right)}$$



# Rapporto QED/bosone

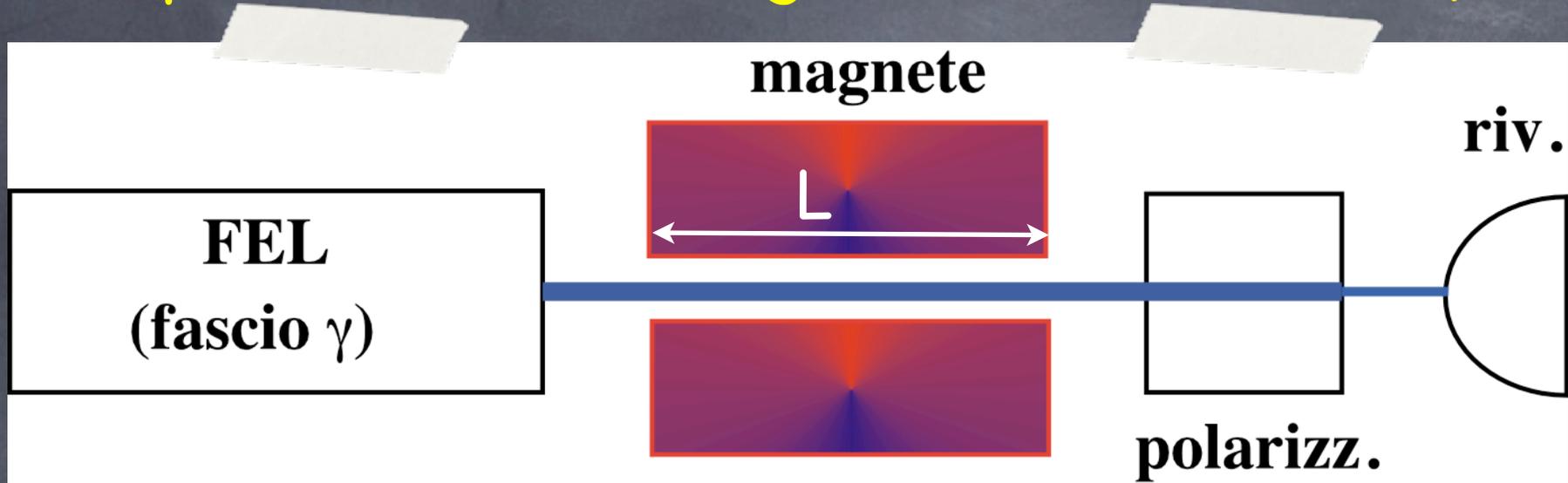
$$R_{ell} = \left( \frac{6\alpha^2 B^2 M_b^2 m_b^4}{45m_e^4} \right) \left( \frac{L}{\omega} \right) \left[ \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) - \sin \left( \frac{m_b^2 L}{2\omega} \right) \right]$$



# In sintesi

- Rapporto produzione reale/produzione virtuale:
  - Ad alta energia (100 eV)
    - per sopprimere la produzione reale rispetto alla virtuale bisogna arrivare a lunghezze di 250 m o di 500 m!
  - A bassa energia (1-2 eV)
    - ci sono vari zeri tra 1 m e 10 m di lunghezza -> operazione possibile
- Rapporto QED/Produzione virtuale di bosoni
  - a 100 eV con lunghezze di circa 40 cm si ottiene un rapporto 2 tra effetto QED e produzione virtuale di bosoni

# Esperimento con sorgente FEL (o fascio $\gamma$ )



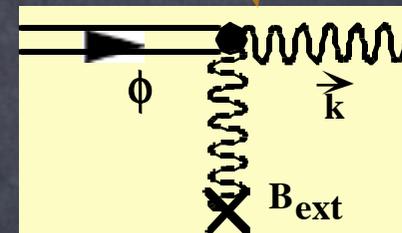
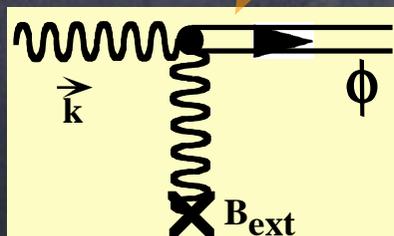
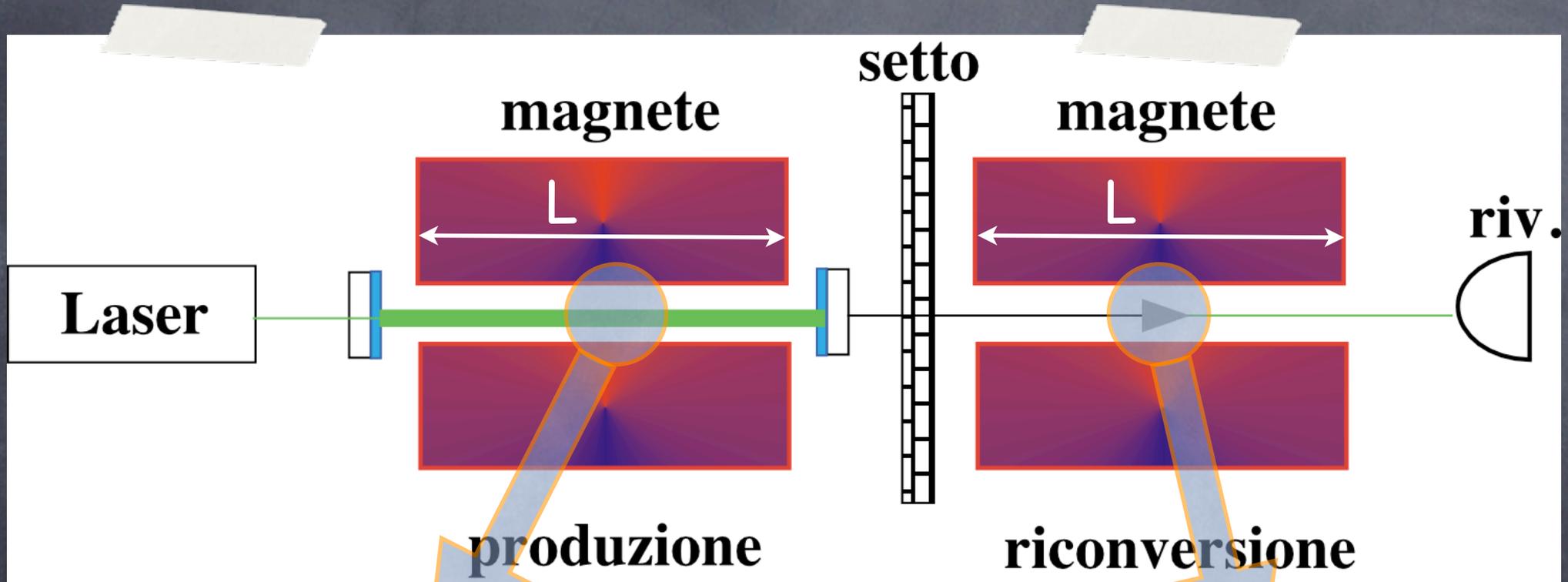
## • Caratteristiche desiderabili del fascio:

- accordabilità in energia
- polarizzazione ben definita
- alta brillantezza
- alta collimazione (traferro stretto...)

## • Sfide aperte

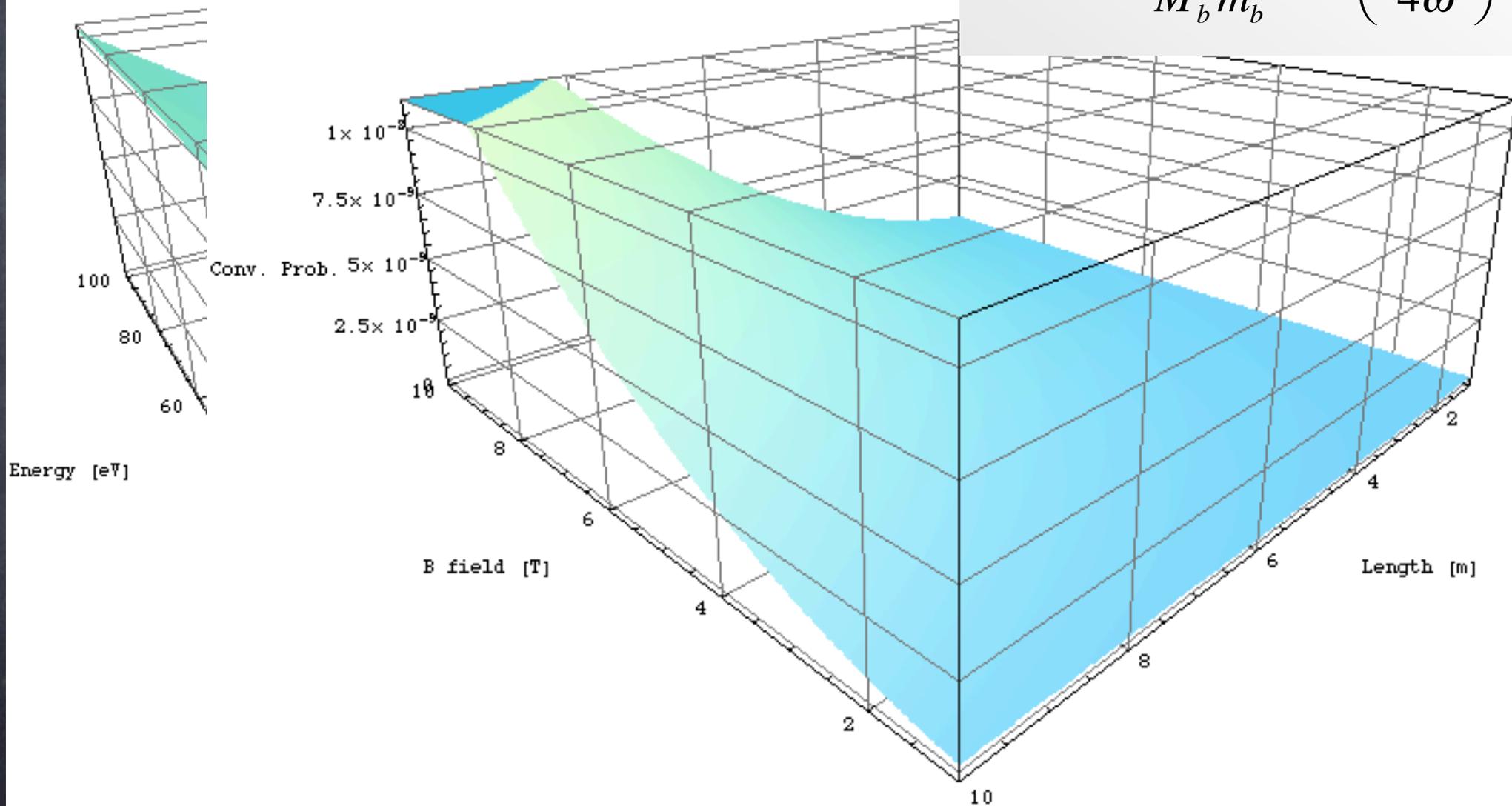
- misura della polarizzazione in uscita (a frequenze visibili si arriva ad una parte in  $10^7$ !!)

# Rigenerazione dei fotoni



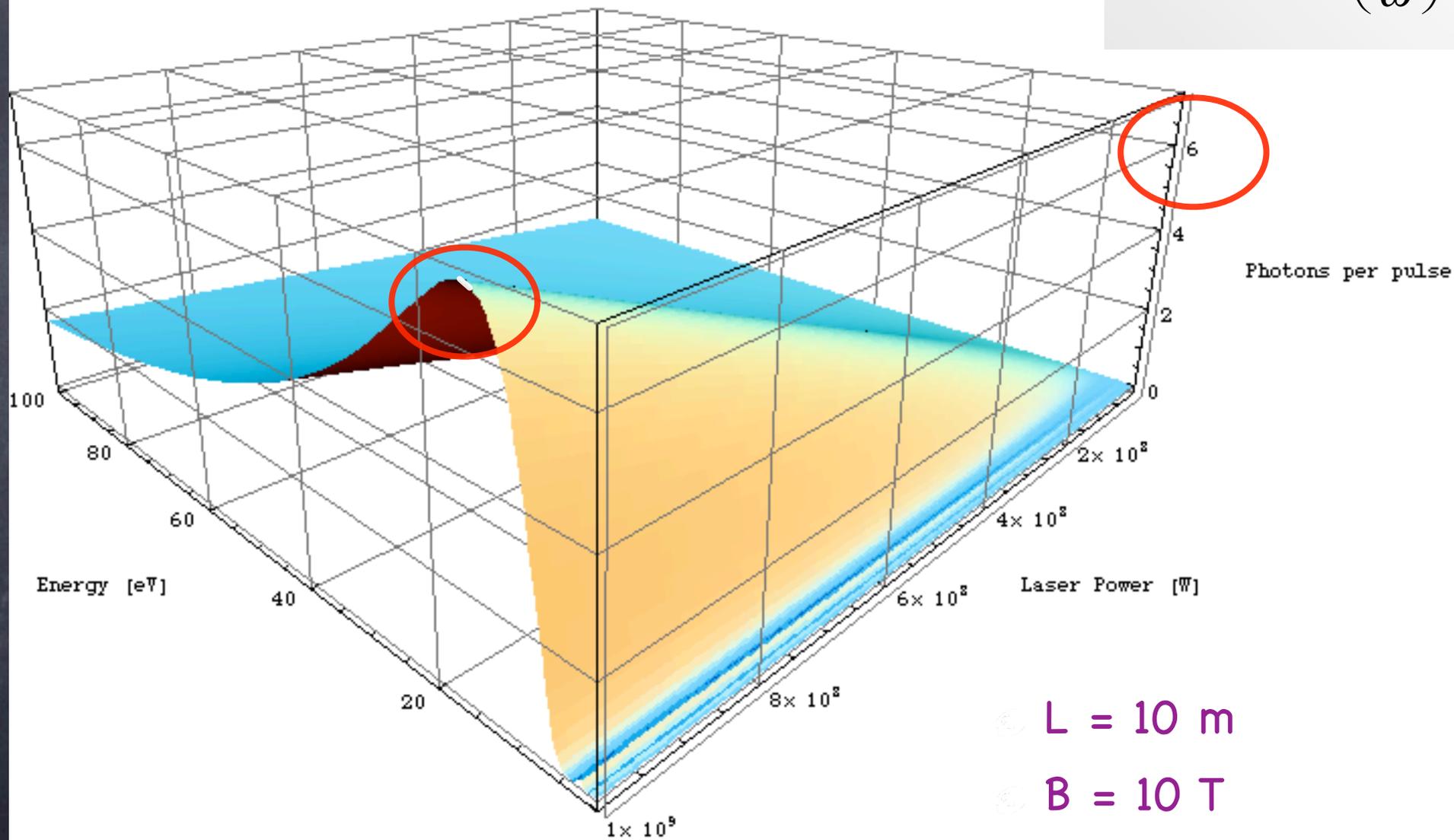
# Probabilità di transizione fotone-bosone

$$P_{\gamma \rightarrow b} = 4 \frac{B^2 \omega^2}{M_b^2 m_b^4} \sin^2 \left( \frac{m_b^2 L}{4\omega} \right)$$



# Rate di conteggi per impulso

$$R = \left( P_{\gamma \rightarrow b} \right)^2 \left( \frac{P_l}{\omega} \right) \eta$$



- ☉ L = 10 m
- ☉ B = 10 T
- ☉ 1 GW/impulso

# Rigenerazione

- La probabilità di transizione fotone→bosone cresce con energia e lunghezza di zona di campo
- Ragionando sul rate di fotoni visibili dal rivelatore, con 10 T e 10 m ed un FEL impulsato da 1GW/impulso, si ottiene che:
  - l'energia ottimale è circa 15 eV → 6 conteggi per impulso (OK!!!)
  - a 100 eV si hanno 2 conteggi/impulso (va ancora bene...)

# Conclusioni ... per ora

- Con lunghezze d'onda corte (da 1 eV  $\rightarrow$  100 eV) si possono studiare le proprietà dell'elemento vuoto esaltando il contributo della "pura" QED
- Un esperimento di rigenerazione dei fotoni a corte lunghezze d'onda è molto interessante per validare le attuali misure, fatte ad 1 eV, sulla produzione di bosoni leggeri accoppiati a due fotoni
  - si ottimizza il rate di conteggio
  - si gioca sulla lunghezza del magnete

# Prossime "mosse"

- PVLAS

- progetto nuova sorgente di campo (magneti permanenti)

- Nuove idee

- studio della misura di precisione della polarizzazione per fotoni con  $E >$  visibile
- studio di fattibilità per un esperimento di rigenerazione dei fotoni