

i nostri primi
 $\pi\sqrt{2}\cdot 10^9$ s
giornata per
MARIO CALVETTI ed
ENRICO IACOPINI



$$E = \begin{pmatrix} \cos d - \sin d & 1+i\eta & 0 \\ \sin d + \cos d & 0 & 1-i\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos d & \sin d \\ -\sin d & \cos d \end{pmatrix} \cdot E(B)$$

- Birifrangenza magnetica del vuoto - Quinta forza

Guido Zavattini

Università di Ferrara e INFN-Ferrara

Sommario

• 'Quinta Forza'

- 1986 - La rianalisi di Fischbach *et al.*
- L'esperimento GAL

• Birifrangenza magnetica del vuoto

- 1978 - Le motivazioni e la nascita della tecnica
- I primi tentativi al CERN
- Misure nei gas a Pisa
- L'esperimento PVLAS presso LNL
- L'evoluzione a Ferrara e passi futuri

'QUINTA FORZA'

$$E = \begin{pmatrix} \cos \alpha - \sin \alpha & 1 + i\eta \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot E(B)$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha + \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$G_A = f_a \cdot m a = f_{rc} \cdot m \pi$$

$$f_a \cdot m a = \cos F$$

B. 72873 (Cern) [LH 272 270]

C. 79593

710002

W. 100007 = 1.7510

B. INFN 3352/02

J. Kappelmann 715/6

2940 B. (Mingol) 332405-D.P. Mingolli

10. VILLI 17675710

71865 | su 1430 P.

Centralina 76111

MAIL BOX TS CERN

73851 Amato Bonelli

TS212 4.91.10¹⁰ G. B.

2. class 164592 | L.S.V.P.

VACCHI 0039 040 375 6229

0039 320 92 32 326 Cell

QU. DO 0039 052 979 340

0039 052 979 299

0039 3304 7898 65

72418 = SIKIVG

EMILIO 15848 = (LAD)

73205

66666 + 5142

74592

3. M. 725177 | 74861

2481 Raffelli

58 A. JACOPIA (CERN) 729 24

74411

Amaganti (CERN) 73263

FOCARDI

0039 051209 5142

1986 - Fischbach *et al.*

- Nel 1986 Fischbach *et al.* pubblicano una rianalisi dei dati degli esperimenti di Loránd Eötvös sull'equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale pubblicati nel 1922

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 56

6 JANUARY 1986

NUMBER 1

Reanalysis of the Eötvös Experiment

Ephraim Fischbach^(a)

Institute for Nuclear Theory, Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195

Daniel Sudarsky, Aaron Szafer, and Carrick Talmadge

Physics Department, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907

and

S. H. Aronson

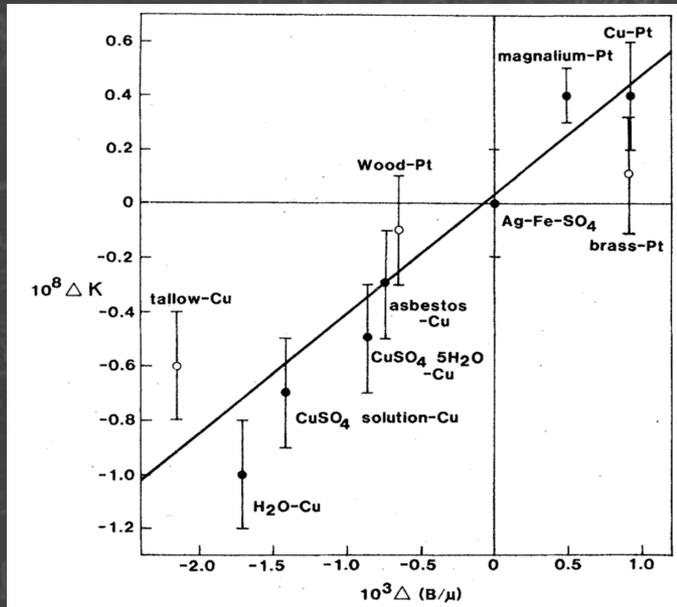
Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

(Received 7 November 1985)

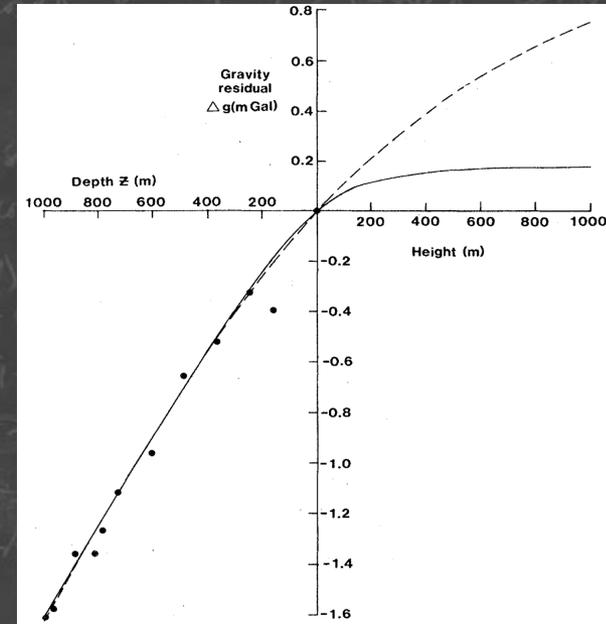
We have carefully reexamined the results of the experiment of Eötvös, Pekár, and Fekete, which compared the accelerations of various materials to the Earth. We find that the Eötvös-Pekár-Fekete data are sensitive to the composition of the materials used, and that their results support the existence of an intermediate-range coupling to baryon number or hypercharge.

1986 - Fischbach et al.

- Sembrava fosse presente una dipendenza di $\frac{\Delta a}{g}$ dal numero di barioni nei nuclei.
- Misure geofisiche del gradiente di g mostravano deviazioni dalla legge di Newton.



$\Delta K = \Delta a/g$ in funzione di $\Delta(B/\mu)$
 Pendenza = $(5.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}$

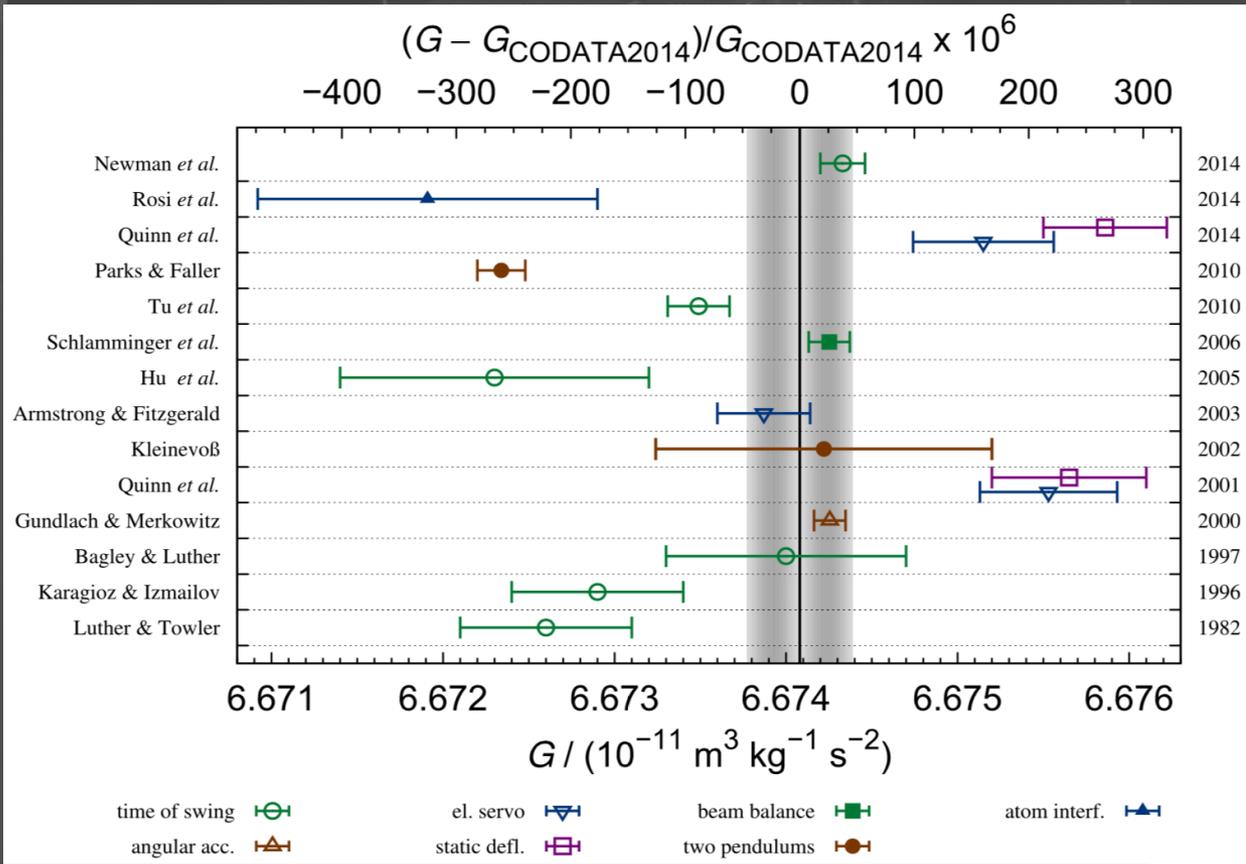


Deviazioni di g dal valore calcolato in funzione dell'altezza dal suolo

- Nel 1987 Stacey conclude: “The geophysical evidence for at least one short-range component of gravity is now much more than just circumstantial, but falls short of being completely convincing. (...) The same must be said of the data from Von Eötvös, Pekar, and Fekete (1922) because, although all of the experimental parameters recognized as being relevant were properly recorded, we now find that we need another one.”

[F. D. Stacey et al., Reviews of Modern Physics, Vol. 59, No. 1, (1987)]

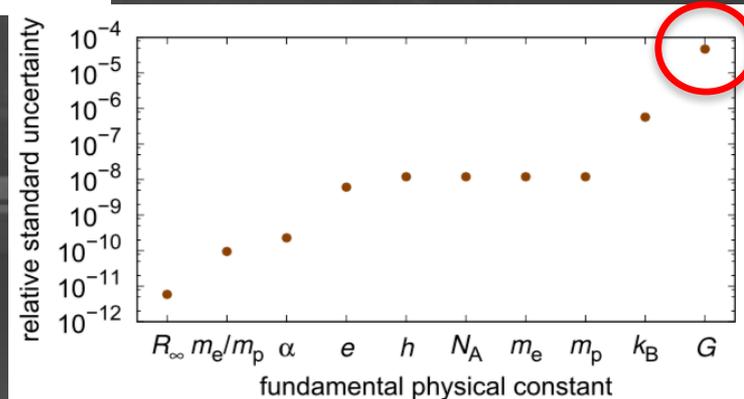
1986 - Fischbach et al.



Ancora oggi le misure di G ottenute con vari metodi sono in disaccordo.

Incertezza relativa di importanti costanti fondamentali

G rimane oggi la costante fondamentale con maggiore incertezza relativa



L'esperimento GAL: 1986 - 1992

L'ipotesi generale era che ci fosse un potenziale gravitazionale modificato

$$V = \frac{G_{\infty} M_1 M_2}{r} \left[1 + \alpha e^{-\frac{r}{\lambda_5}} \right]$$

- Dai dati geofisici risultava $\alpha \lambda_5 \approx 1-10$ m con $\lambda_5 \lesssim 100 \div 1000$ m
- Dalla rianalisi di Fischbach risultava $\frac{\Delta a}{g} = a \Delta \left(\frac{B}{\mu} \right)$.
- Tipicamente $\Delta \left(\frac{B}{\mu} \right) \sim 10^{-3}$ mentre risultava essere $a = (5.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}$
- Per due corpi di materiale diverso in caduta libera si trova $\frac{\Delta a}{g} = \frac{3}{2R_T} \Delta \alpha \lambda_5$
- Ponendo $\frac{\Delta a}{g} \lesssim 10^{-10}$ si ottiene $\Delta \alpha \lambda_5 \lesssim 0.5$ mm
- Esperimenti in caduta libera possono sondare $\lambda_5 \lesssim 1000$ km

Misurare $\frac{\Delta a}{g} \lesssim 10^{-10}$ era lo scopo dell'esperimento GAL

L'esperimento GAL - proposta

- Già in aprile 1986 venne proposta una misura nuova basata sulla caduta libera di un disco composto da due semidischi di materiali diversi

Volume 116, Number 4

PHYSICS LETTERS A

9 June 1986

GALILEO'S EXPERIMENT ON FREE-FALLING BODIES USING MODERN OPTICAL TECHNIQUES

V. CAVASINNI¹, E. IACOPINI², E. POLACCO³ and G. STEFANINI

CERN, Geneva, Switzerland

Received 4 April 1986; accepted for publication 14 April 1986

We propose a method, based on well-known optical techniques, by which possible differences in the free-fall acceleration of bodies of different nuclear composition can be measured. The sensitivity of the method is almost a factor of 10 higher than in the experiment of Eötvös et al.

Reprinted from Nature, Vol. 328, No. 6131, pp. 578-579, 13 August 1987

© Macmillan Magazines Ltd., 1987

Fundamental forces

In pursuit of the fifth force

E. Iacopini

- Tramite un interferometro di Michelson a bracci verticali si proponeva di rivelare un'accelerazione angolare del disco.
- Due retroreflettori garantivano il parallelismo dei due fasci verticali durante la caduta del disco

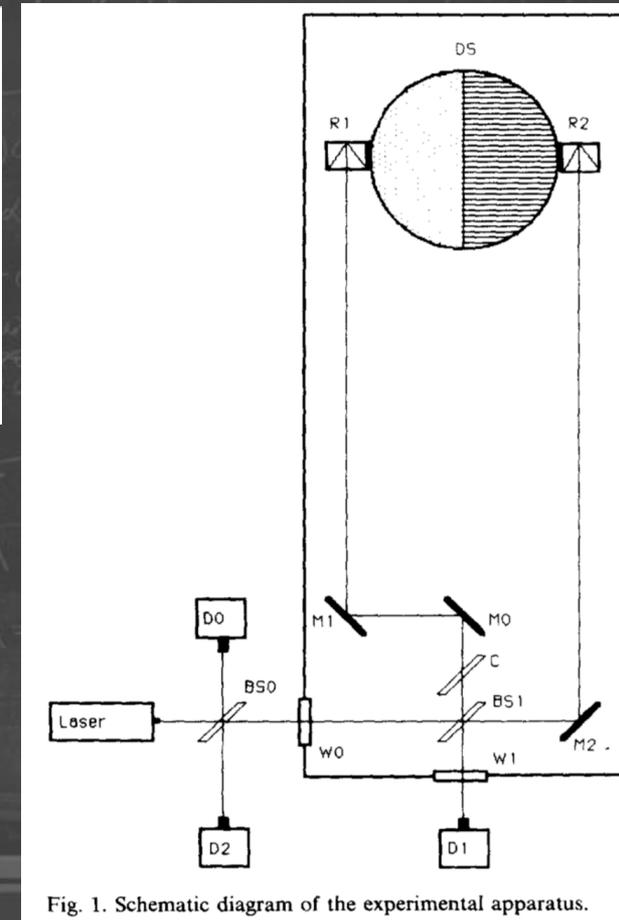


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

L'esperimento GAL - schemi

VOLUME 69, NUMBER 12

PHYSICAL REVIEW LETTERS

21 SEPTEMBER 1992

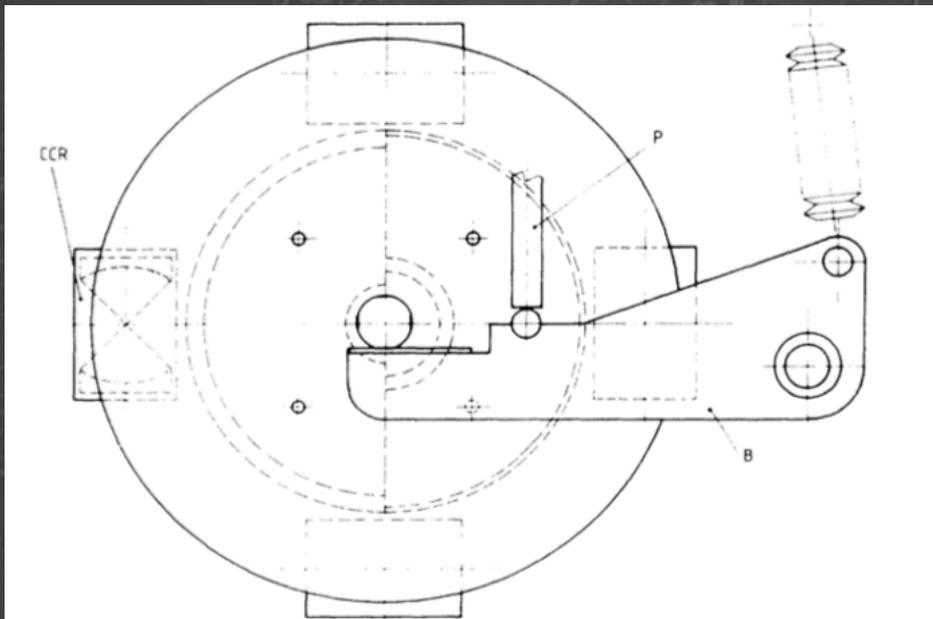


FIG. 1. View of the disk assembly and of the release mechanism. B and P indicate the mechanisms used to keep the disk in the upper position and to release it. CCR indicates corner-cube reflectors.

Portadischi e sistema di sgancio

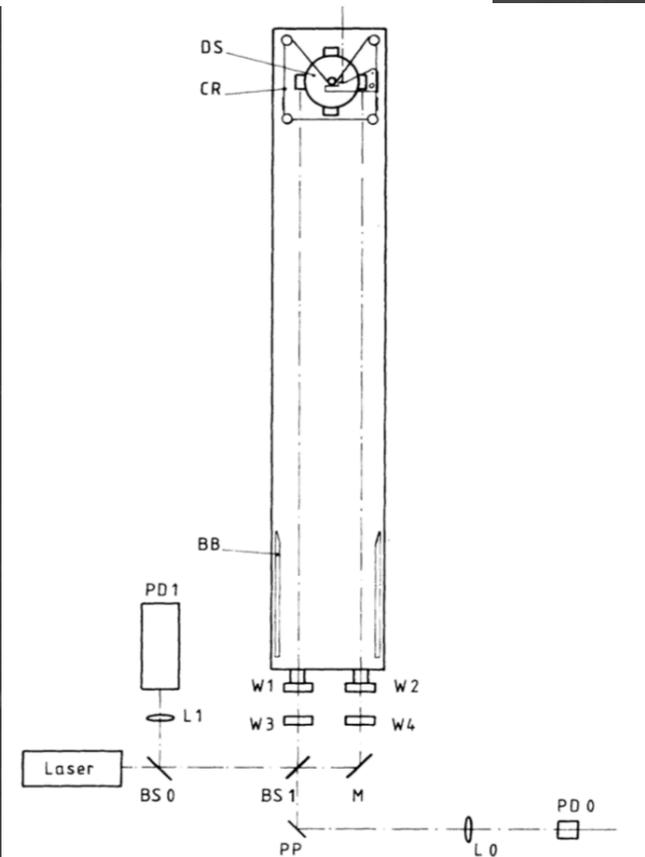
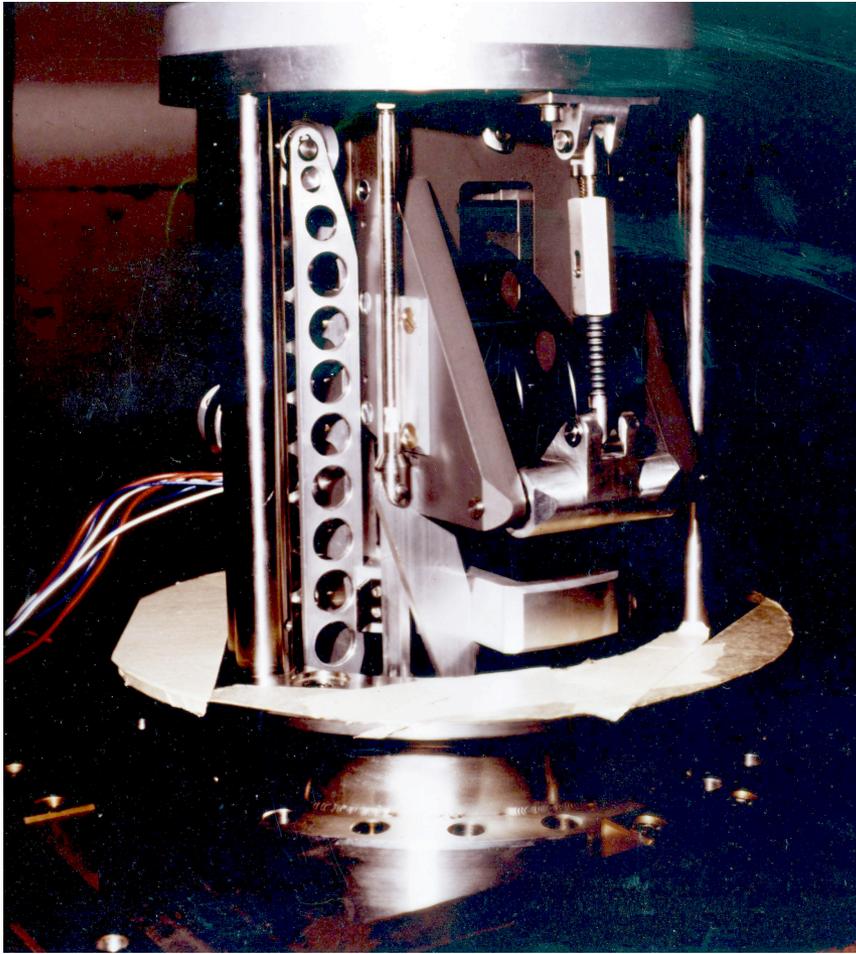


FIG. 2. Schematic view of the apparatus. DS is the disk, CR is the carriage, BB are the breaking bars, W are optical windows, BS are beam splitters, M is a mirror, L are lenses, PP is a pentaprism, and PD are photodiodes.

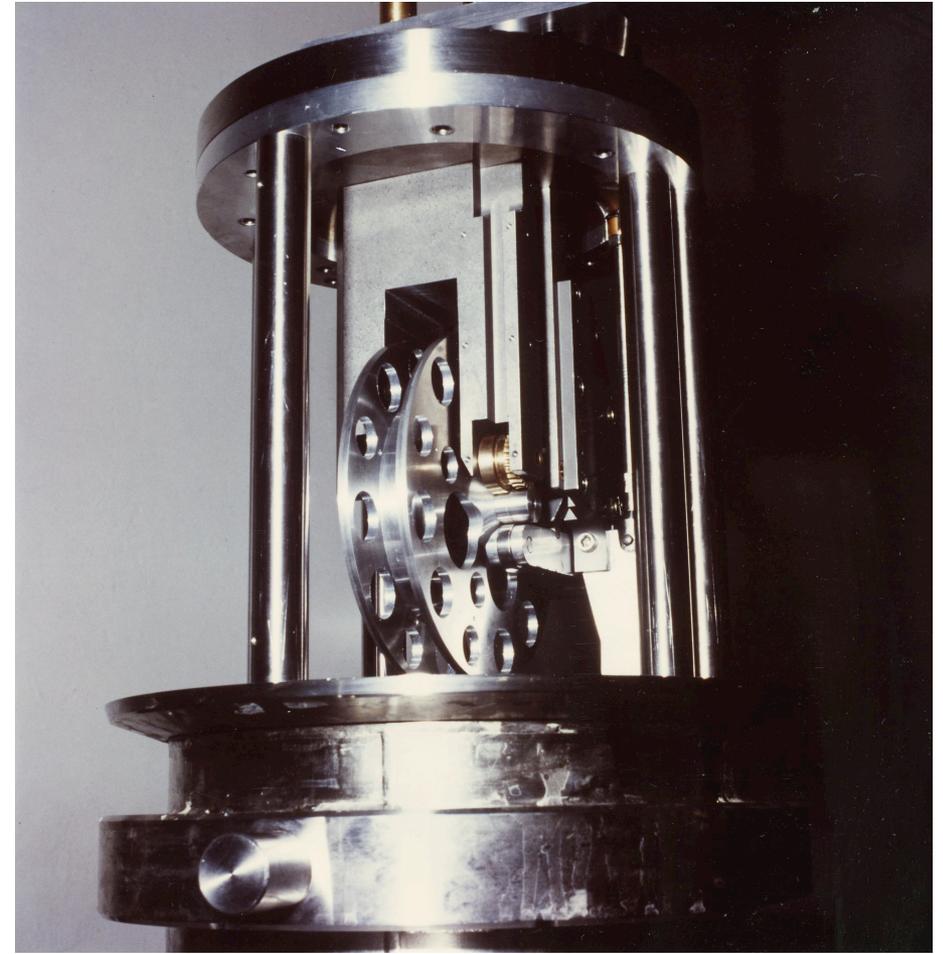
Schema dell'interferometro realizzato

- Un carrello accompagnava il disco durante la caduta.
- Il carrello permetteva di frenare il disco e riportarlo in cima

Foto di GAL - disco + sgancio



Carrello con portadischi e sistema di sgancio

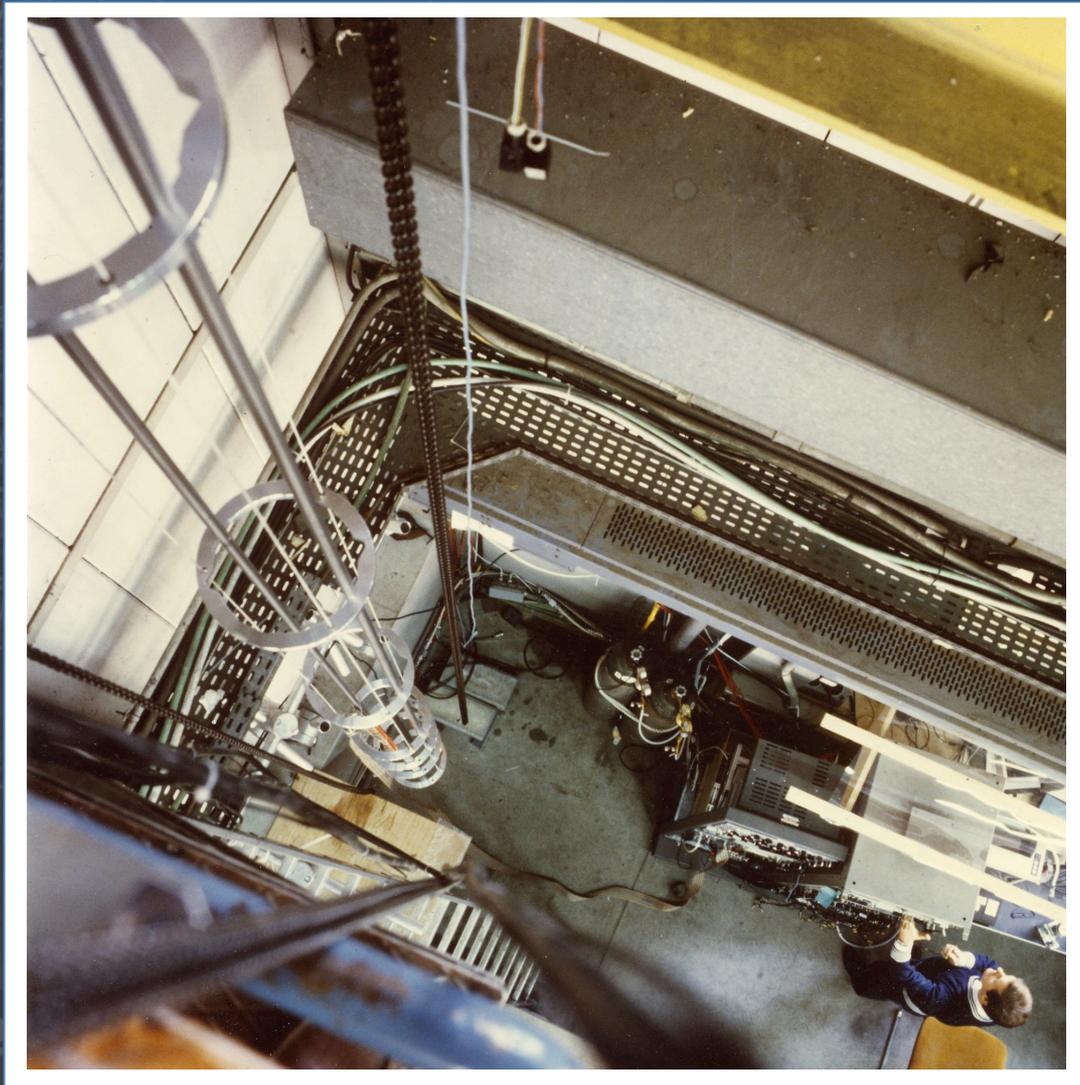


Portadischi con forchetta di posizionamento (modificata in seguito nella zona d'appoggio)

Foto di GAL - CERN

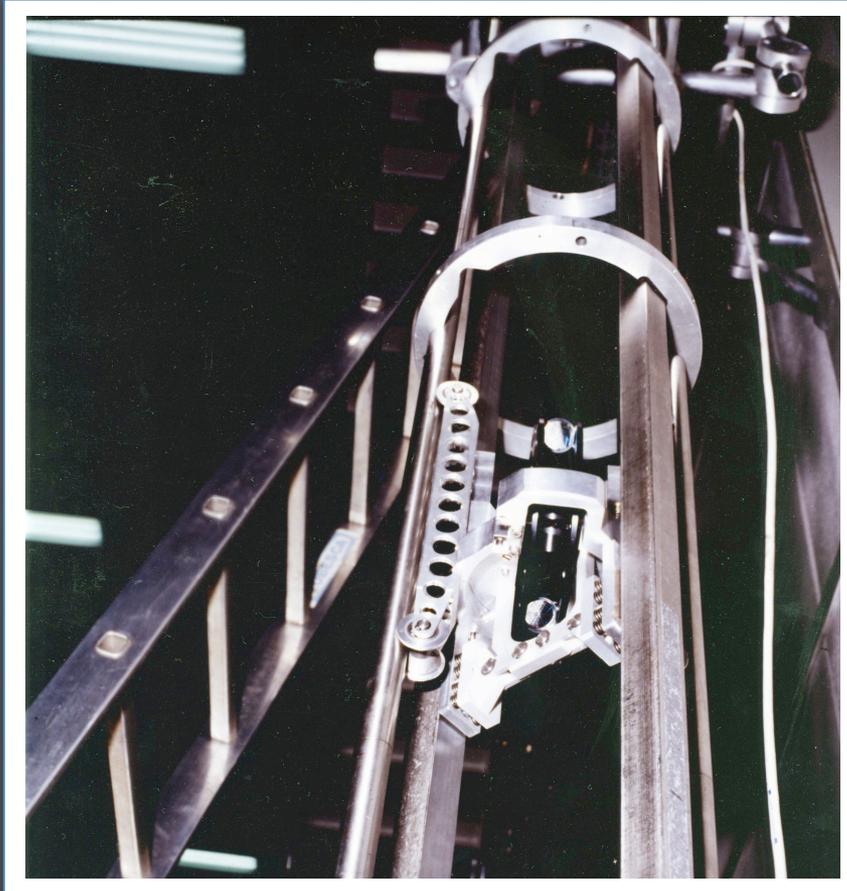


Iacopini che monta le guide per il carrello

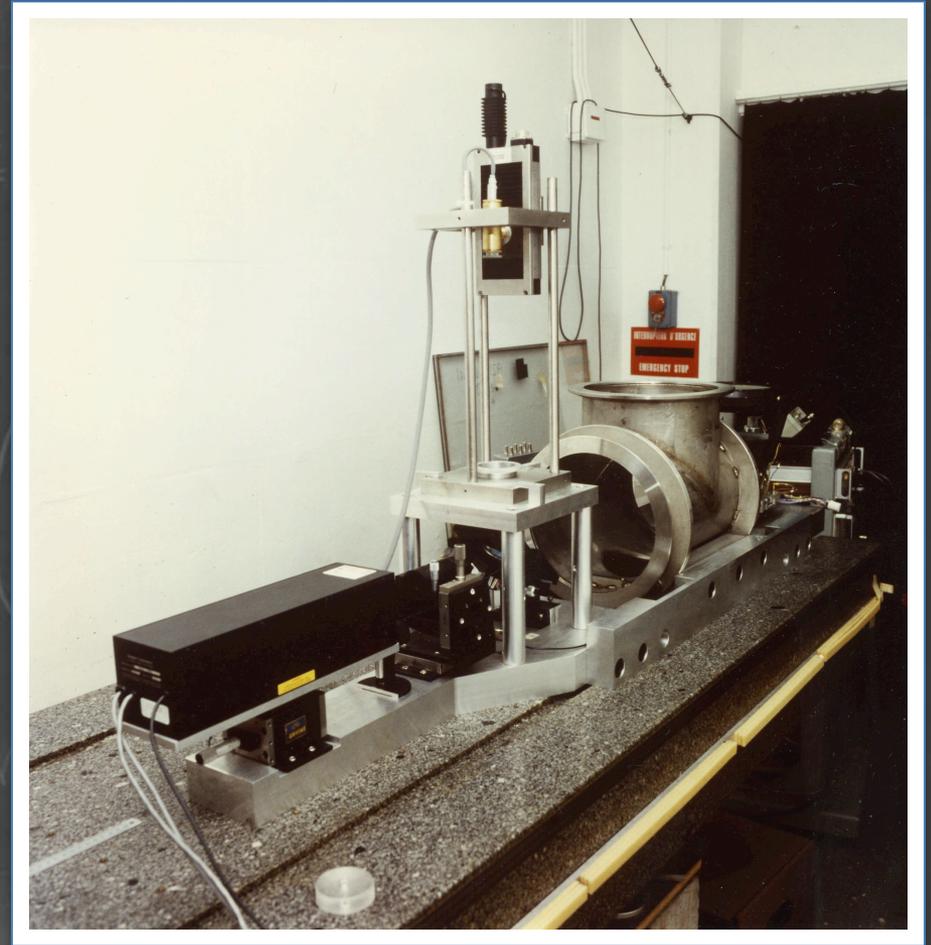


Vista dall'alto. (Mario Moretti?)

Foto di GAL

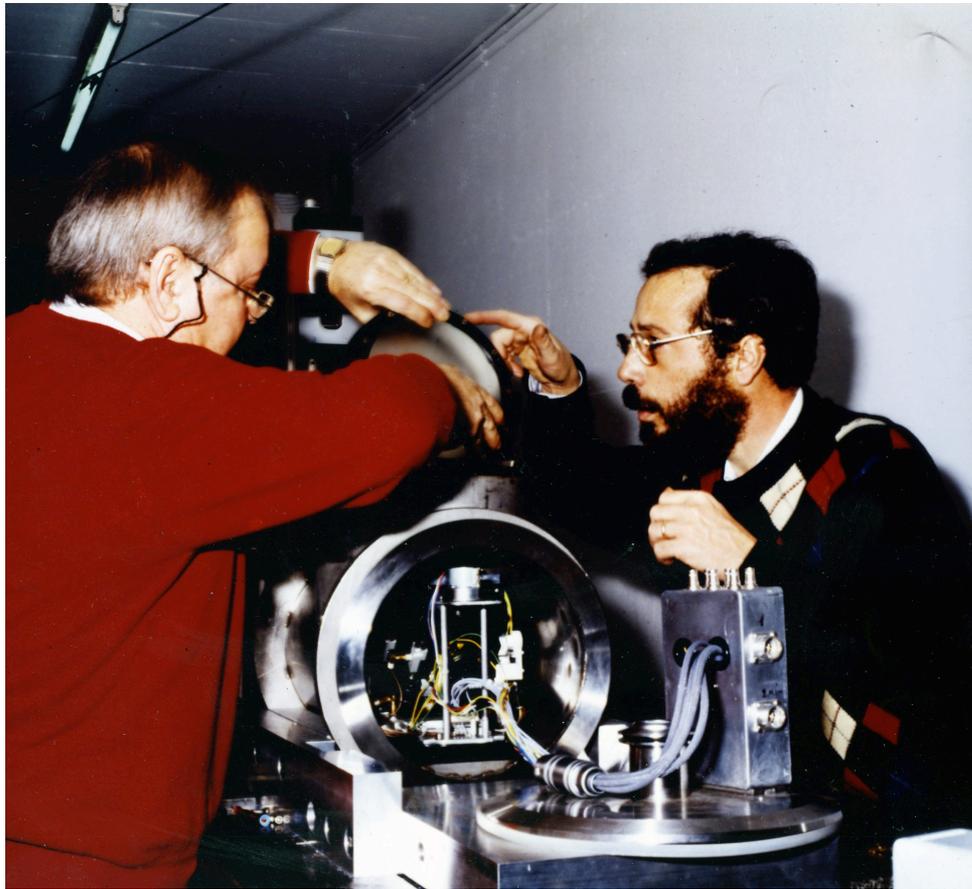


Il carrello con il portadischi e in primo piano I pattini del sistema frenante

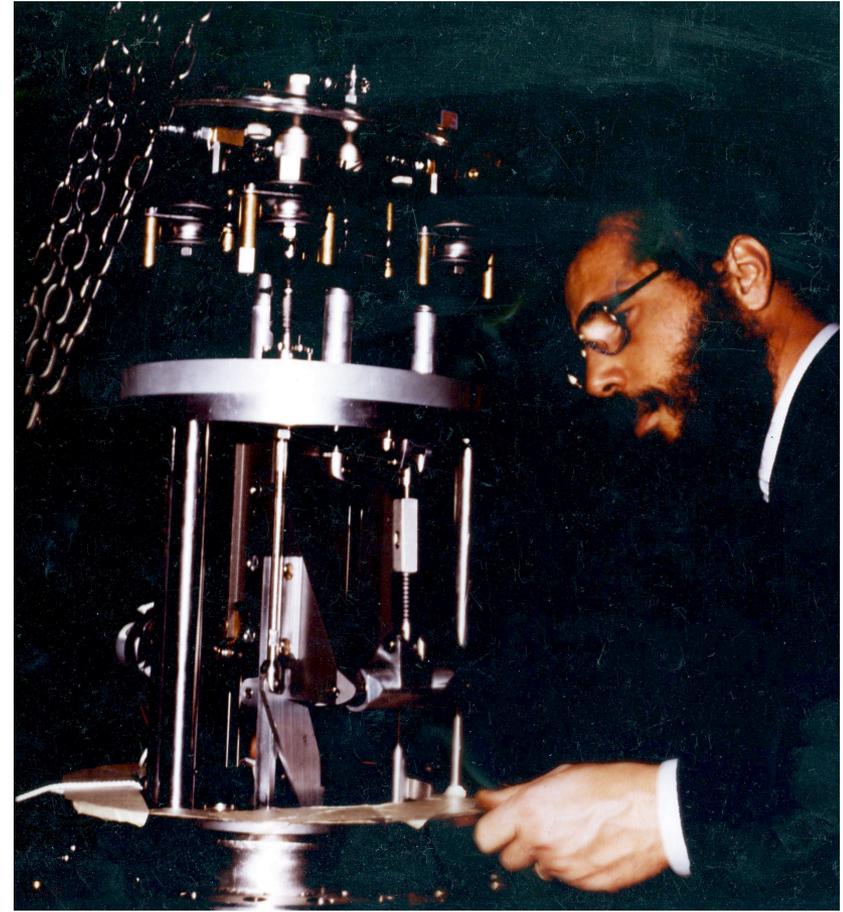


Prove su banco dell'autocollimatore per garantire il parallelismo dei fasci. In vista la camera da vuoto successivamente abbandonata.

Foto di GAL



Mario Del Colletto con Iacopini



Iacopini con aria attenta.

Sistematici di GAL

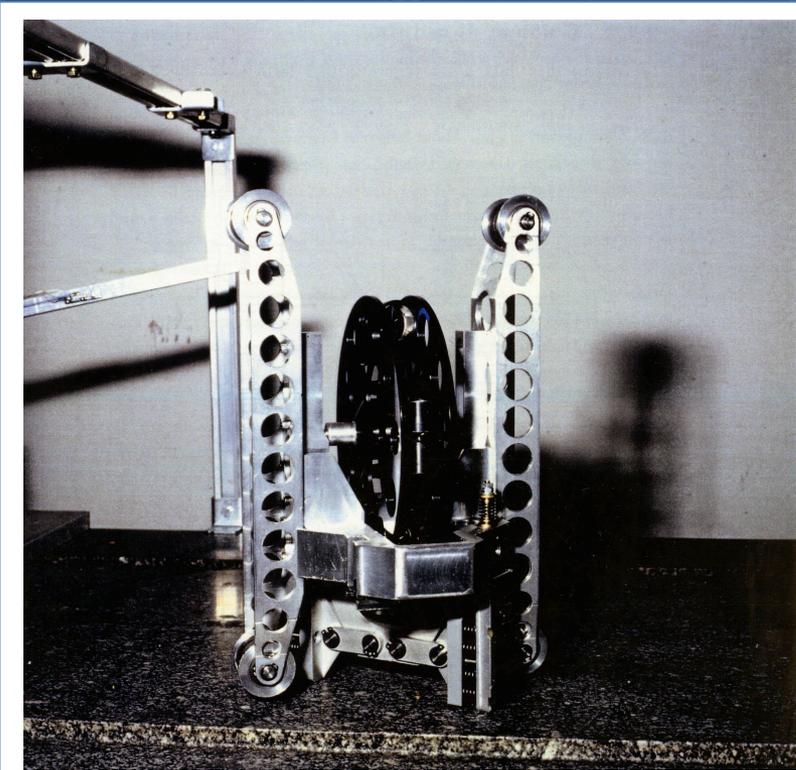
- Durante il mio lavoro di tesi erano emersi due problemi importanti:

- Il moto angolare iniziale del disco perpendicolarmente al suo asse. Dalla tesi di Alessandro Mordacci

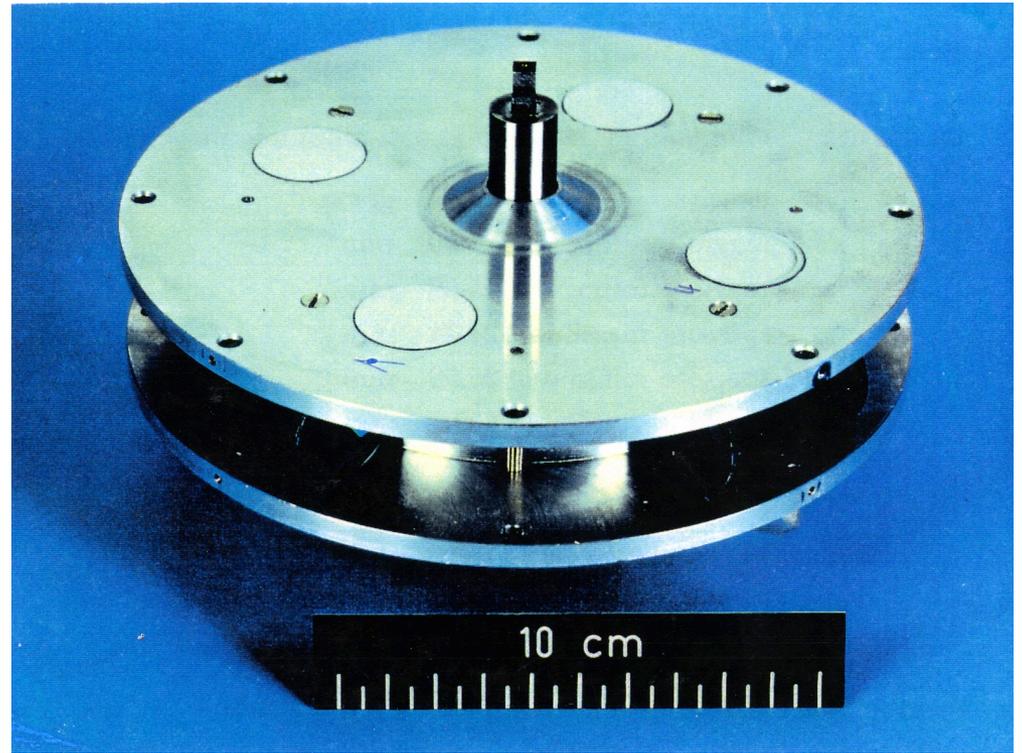
$$\left. \frac{\Delta a}{g} \right|_{\text{sim}} = \frac{3\pi R}{4g} \bar{\omega}_1 \bar{\omega}_2$$

- Con $R = 7 \text{ cm}$ e $\frac{\Delta a}{g} \lesssim 10^{-10}$ risulta $\bar{\omega}_1 \bar{\omega}_2 \lesssim 6 \times 10^{-3} \text{ (mrad/s)}^2$
- La **velocità angolare iniziale del disco andava misurata** e l'effetto sottratto dai dati. Furono allora installati degli specchi sulle superfici del portadisco.
- **Vibrazioni sul segnale dell'interferometro durante l'azione di sgancio.** Nella versione successiva l'interferometro e il sistema di sgancio/caduta furono separati meccanicamente. L'interferometro risultò quindi in aria.

Foto di GAL - versione 2.0



Il carrello con il portadischi

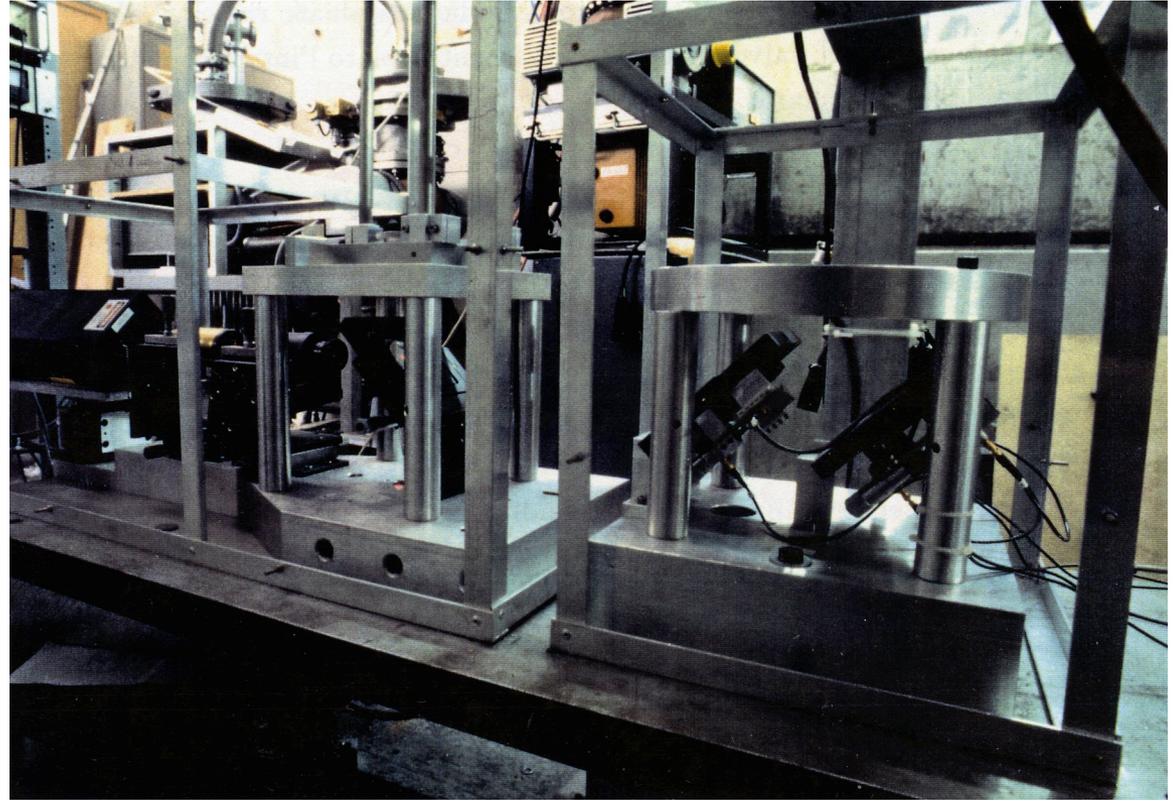


Disco con specchi per la misura della velocità angolare iniziale perpendicolare al suo asse

Foto di GAL - versione 2.0



Iacopini in cima al nuovo sito di GAL



La parte inferiore dell'interferometro

Foto dalla tesi di Alessandro Mordacci

Risultati di GAL

Segnale d'interferenza. M e M' indicano l'acquisizione del moto iniziale del disco. A corrisponde allo sgancio del disco

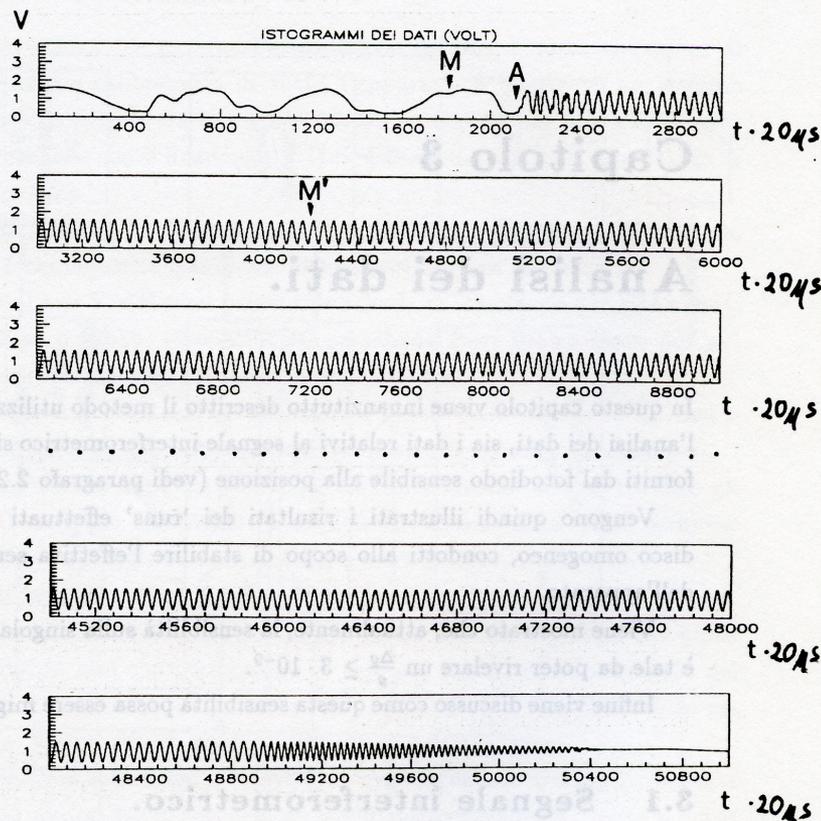


Figura 3.1: Plot del segnale interferometrico (run 7055).

- Lo scopo dell'analisi è la ricerca di un termine proporzionale a t^2 nella frequenza delle frange.
- La sensibilità per ciascuna singola caduta è risultata

$$\frac{\Delta a}{g} \Big|_{\text{sing}} \sim 3 \times 10^{-9}$$

Risultati di GAL

VOLUME 69, NUMBER 12

PHYSICAL REVIEW LETTERS

21 SEPTEMBER 1992

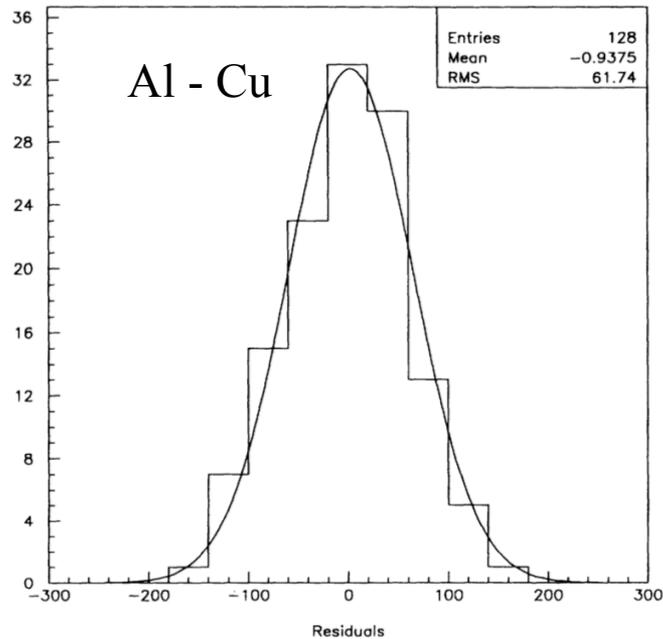


FIG. 3. Histogram of the residuals of the $\Delta g/g$ measurements in units of 10^{-10} , with the best fitting Gaussian curve superimposed on it.

Il limite sperimentale finale è risultato

$$\left. \frac{\Delta a}{g} \right|_{\text{Al-Cu}} = (2.9 \pm 7.2) \times 10^{-10}$$

$$\left. \frac{\Delta a}{g} \right|_{\text{Cu-W}} = (7.1 \pm 9.1) \times 10^{-10}$$

e quindi

$$|\lambda_5 \Delta \alpha|_{\text{Al-Cu}} \leq 0.5 \text{ cm}$$

$$|\lambda_5 \Delta \alpha|_{\text{Cu-W}} \leq 0.6 \text{ cm}$$

Assumendo una dipendenza dal numero barionico e quindi $\Delta \alpha = \alpha \Delta (B/\mu)$

con

$$\Delta \left(\frac{B}{\mu} \right)_{\text{Cu-W}} = 9 \times 10^{-4}$$

$$|\lambda_5 \alpha| \leq 6 \text{ m}$$

LA BIRIFRANGENZA MAGNETICA DEL VUOTO

$$E = \begin{pmatrix} \cos d - \sin d \\ \sin d \cos d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1+i\eta & 0 \\ 0 & 1-i\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos d & \sin d \\ -\sin d & \cos d \end{pmatrix} \cdot E(B)$$

$$\cot \alpha = f_d \cdot m_a = f_{rc} \cdot m \pi$$

$$f_d \cdot m_a = \cos \alpha$$

Le motivazioni - 1978

- La misura della birifrangenza magnetica del vuoto ha una lunga storia che inizia nel 1978 al CERN.
- Un email di Iacopini a Di Lella del 2007 racconta l'inizio:

Io sono venuto al CERN nel 1977 quando lui ed il gruppo di Torelli stavano concludendo la misura Lamb-shift in elio muonico, la cosiddetta "seconda linea", ovvero la $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2}$ (la prima, cioè $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2}$ era stata misurata poco prima che io venissi).

La linea della polarizzazione del vuoto con gli atomi mesici era ormai esaurita, per cui lui iniziò a pensare all'esperimento che è rimasto "incompiuto", cioè a quello che oggi è noto come PVLAS.

Il gruppo era fatto da lui, me e Bjorn Smith, un elettronico che ricorderai, estremamente intelligente e capace, a cui poi, pur senza farne ufficialmente parte, ma dando un contributo notevole, si aggiunse Giorgio Stefanini.

Anche Emilio Picasso era interessato all'inizio, ma poi diventò il capo di LEP e si dilettò altrimenti.

L'idea che iniziammo a studiare con grande determinazione fin dal 1978 era legata alla possibilità di verificare l'esistenza delle non linearità nelle equazioni di Maxwell dovute alla polarizzazione del vuoto, previste nell'ambito della QED.

Le motivazioni

Weisskopf, Euler e Heisenberg avevano mostrato infatti fin dal '36 la necessità di questo effetto, che poteva essere descritto in termini classici aggiungendo alla nota lagrangiana libera del campo e.m. due ulteriori termini, uno proporzionale a $(E^2 - B^2)^2$ e l'altro ad $(EB)^2$ (in una combinazione ben precisa).

L'effetto è al secondo ordine in α (teorema di Furry) ed è drammaticamente piccolo:

come puoi ben immaginare, il fattore che deve moltiplicare gli invarianti di cui sopra, deve avere le dimensioni dell'inverso di una densità di energia e, se il loop della polarizzazione del vuoto, è legato alla coppia elettrone-positrone, non può che essere pari alla lunghezza d'onda Compton dell'elettrone al cubo, divisa per la sua massa.

Con i campi magnetici (quelli elettrici andrebbero altrettanto bene, ma l'equivalente di 1T è $3 \cdot 10^8$ V/m ...) più intensi possibile (10T), l'effetto si traduce in un indice di rifrazione del vuoto che differisce da 1 per una parte in 10^{-21} ...

... continuammo a cercare di capire come misurare questo effetto, e nel 1979 giungemmo ad un disegno dell'apparato, che è, in pratica, rimasto lo stesso fino ad oggi.

(2007)

... e il disegno è rimasto lo stesso ancora oggi, 2018

H. Euler, B. Kockel (1935)

Essi scrissero una densità di Lagrangiana effettiva per i campi liberi in presenza del mare di coppie virtuali elettrone-positrone come discusso da Dirac alcuni anni prima.

$$\mathcal{L}_{\text{EK}} = \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right) + \frac{A_e}{\mu_0} \left[\left(\frac{E^2}{c^2} - B^2 \right)^2 + 7 \left(\frac{\vec{E}}{c} \cdot \vec{B} \right)^2 \right] + \dots$$

$$A_e = \frac{2}{45\mu_0} \frac{\alpha^2 \lambda_e^3}{m_e c^2} = 1.32 \times 10^{-24} \text{ T}^{-2}$$

H Euler and B Kockel, *Naturwissenschaften* **23**, 246 (1935)
W Heisenberg and H Euler, *Z. Phys.* **98**, 714 (1936)
H Euler, *Ann. Phys.* **26**, 398 (1936)
V Weisskopf, *Mat.-Fis. Med. Dan. Vidensk. Selsk.* **14**, 6 (1936)
J. Schwinger, *Phys. Rev.*, **82**, 664 (1951)

Tale Lagrangiana prevede una birifrangenza magnetica ma nessun dicroismo

$$\Rightarrow \Delta n_B = 3A_e B^2 \quad \Delta \kappa_B \simeq 0$$

EXPERIMENTAL METHOD TO DETECT THE VACUUM BIREFRINGENCE INDUCED BY A MAGNETIC FIELD

E. IACOPINI and E. ZAVATTINI
CERN, Geneva, Switzerland

Received 28 May 1979

In this letter a method of measuring the birefringence induced in vacuum by a magnetic field is described: this effect is evaluated using the non-linear Euler–Heisenberg–Weisskopf lagrangian. The optical apparatus discussed here may detect an induced ellipticity on a laser beam down to 10^{-11} .

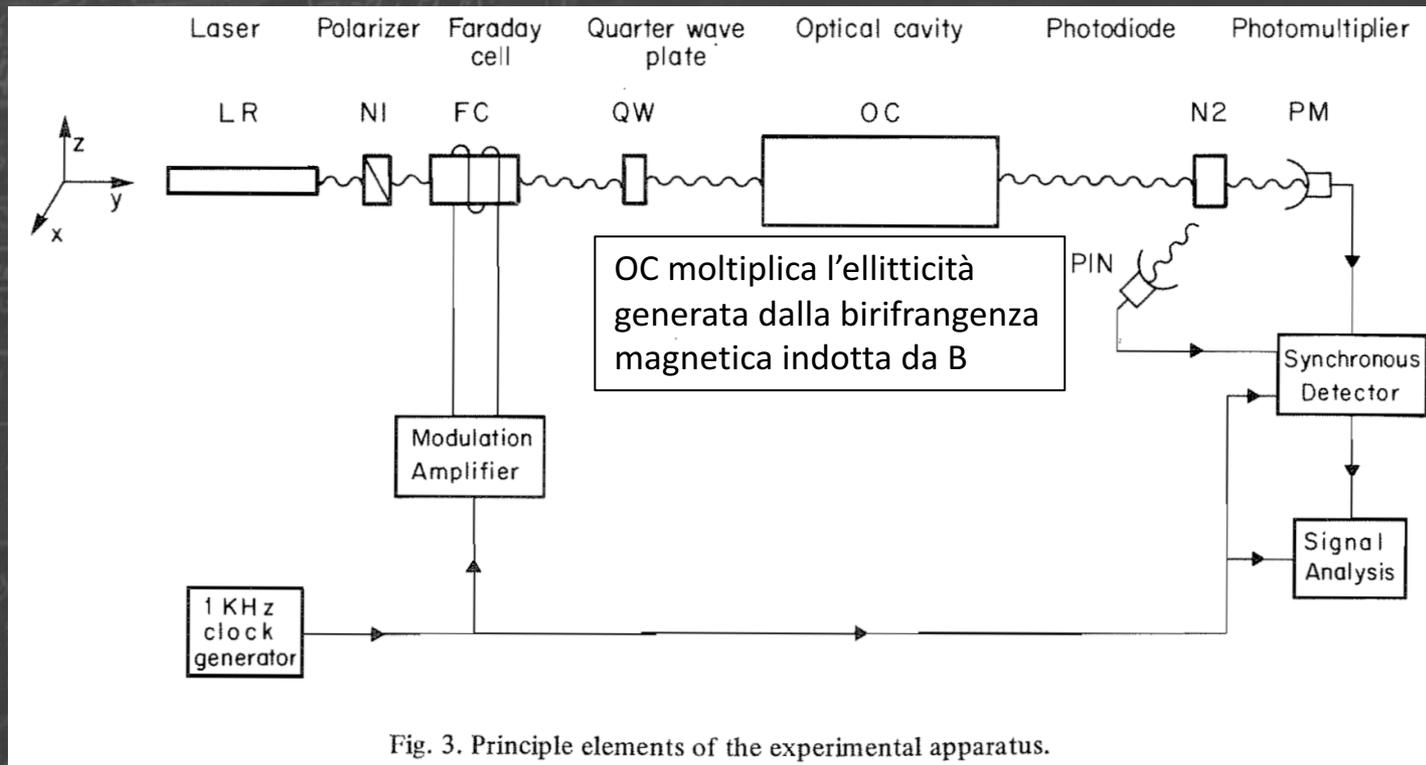


Fig. 3. Principle elements of the experimental apparatus.

Per ottenere una buona sensibilità è necessario sia modulare l'effetto generato nella cavità OC sia avere una portante FC con cui linearizzare l'ellitticità da osservare.

Primi tentativi al CERN

IL NUOVO CIMENTO

Vol. 61 B, N. 1

11 Gennaio 1981

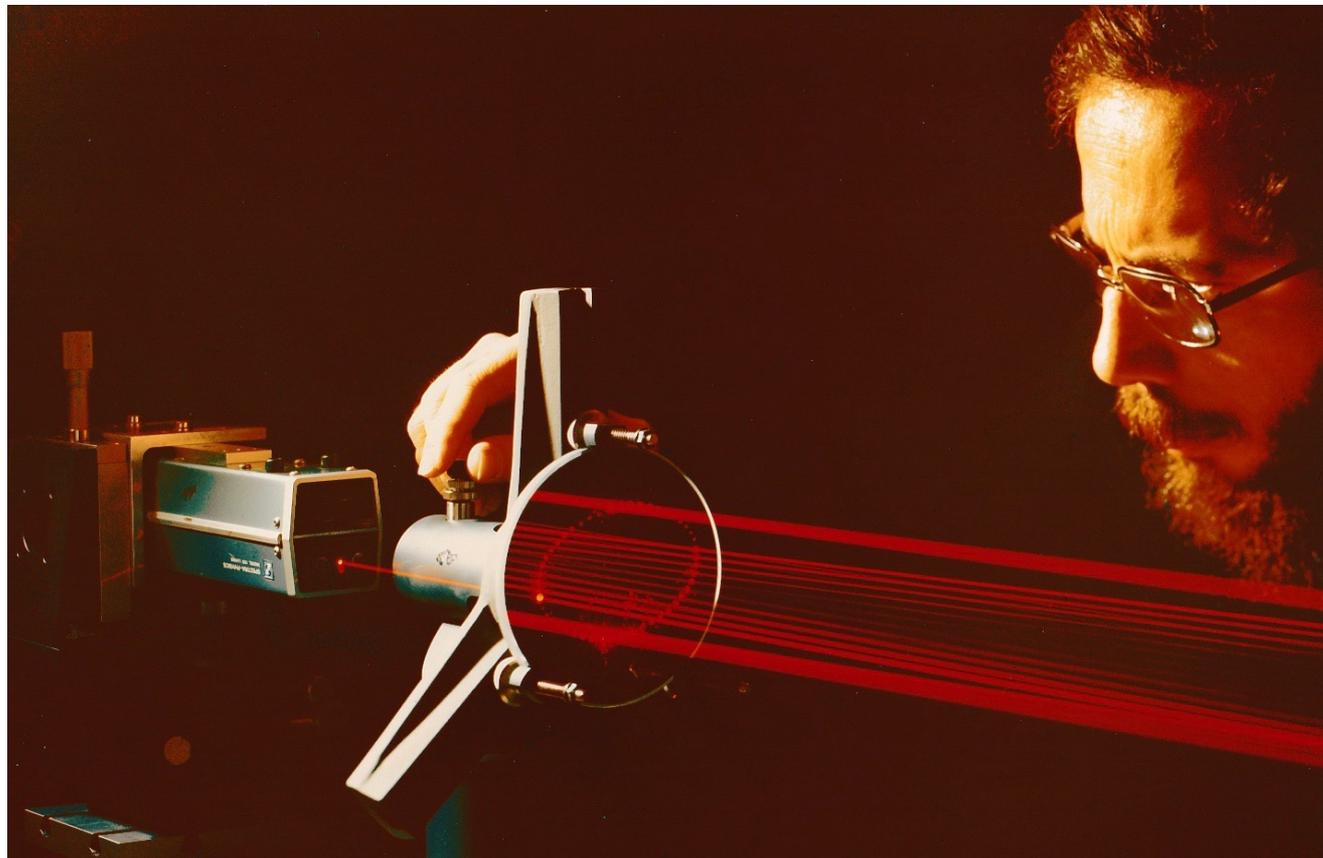
On a Sensitive Ellipsometer to Detect the Vacuum Polarization Induced by a Magnetic Field.

E. IACOPINI, B. SMITH, G. STEFANINI and E. ZAVATTINI

CERN - Geneva, Switzerland

(ricevuto il 13 Agosto 1980)

- Come cavità ottica, per aumentare il cammino ottico all'interno del campo magnetico, venne usata una cavità multi-pass con specchi dielettrici deformati



Primi tentativi al CERN

On a Sensitive Ellipsometer to Detect the Vacuum Polarization Induced by a Magnetic Field.

E. IACOPINI, B. SMITH, G. STEFANINI and E. ZAVATTINI

CERN - Geneva, Switzerland

(ricevuto il 13 Agosto 1980)

- Come cavità ottica, per aumentare il cammino ottico all'interno del campo magnetico, venne usata una cavità multi-pass con specchi dielettrici deformati

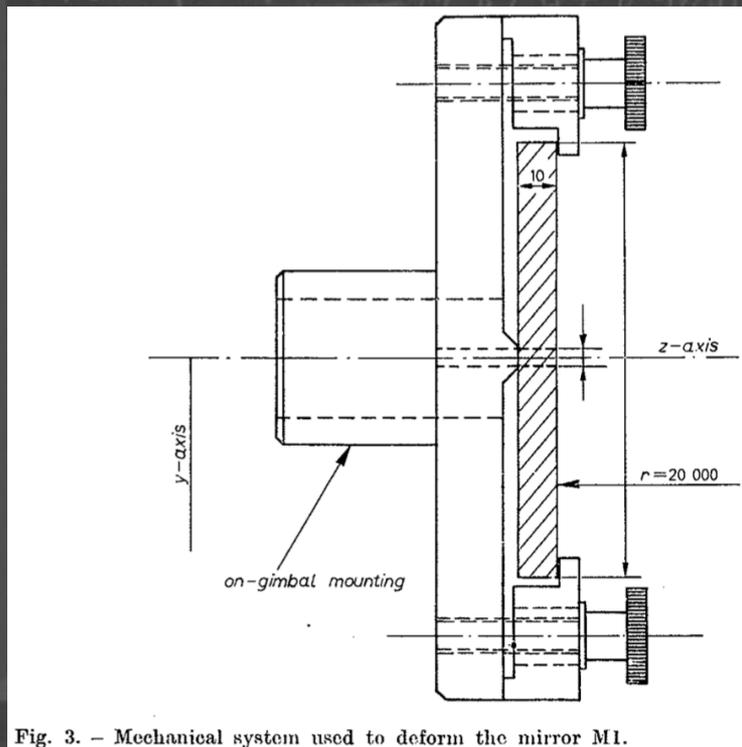
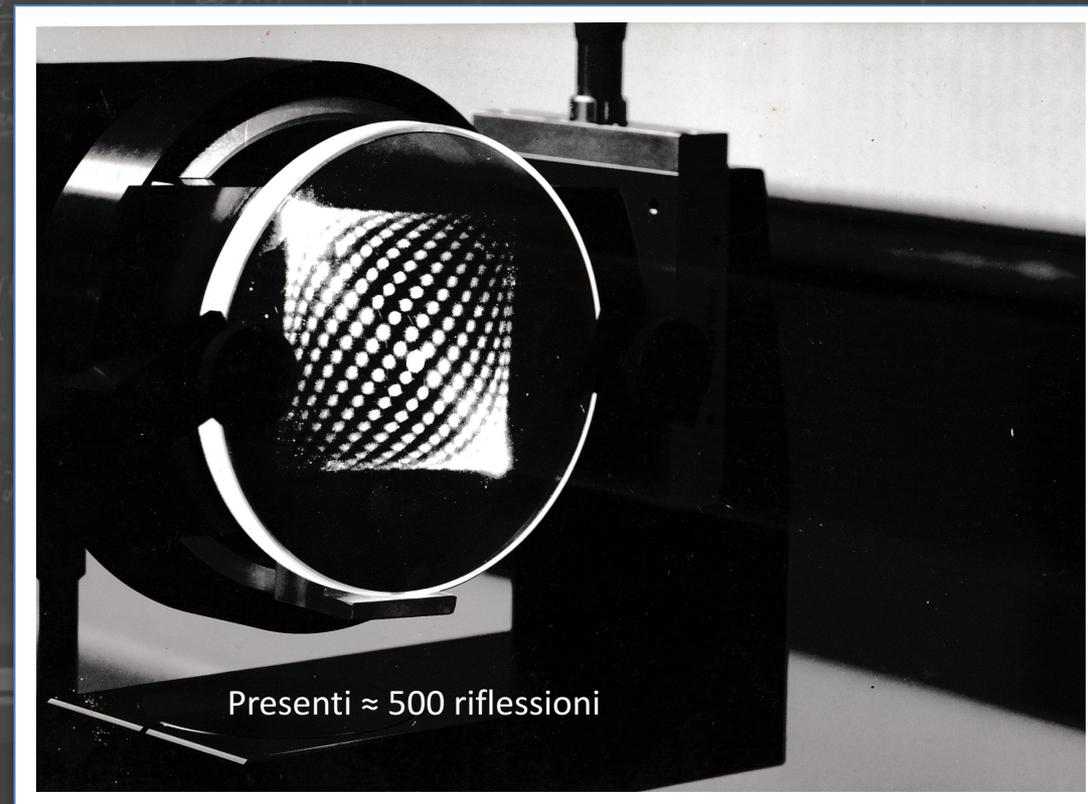


Fig. 3. - Mechanical system used to deform the mirror M1.



Presenti ≈ 500 riflessioni

Primi tentativi al CERN

On a Sensitive Ellipsometer to Detect the Vacuum Polarization Induced by a Magnetic Field.

E. IACOPINI, B. SMITH, G. STEFANINI and E. ZAVATTINI

CERN - Geneva, Switzerland

(ricevuto il 13 Agosto 1980)

- Test sull'elettronica e sul rumore portarono ad una previsione per la misura dell'effetto.

TABLE II. - *Expected measuring times.*

W_0 (W)	B_0 (T)	l (m)	$m = 2n_0$	ψ_0 (rad)	T (h)
1	4	5	660	$0.13 \cdot 10^{-11}$	140
1	8	6	660	$0.67 \cdot 10^{-11}$	6

We are, therefore, studying the feasibility of a 6 m long superconducting magnet with $B_0 = 8$ T, modulated at $f_M = 0.005$ Hz.

At present we are setting up the apparatus outlined in fig. 1 with a superconducting dipole of 4 T, 5 m long, now available at CERN, which can also be turned on and off at a frequency of about 5 mHz. This set-up will allow us to study the influences of a time variable strong magnetic field on the optical parts and on the electronics and to understand the limits of the method.

$$\Delta n^{(\text{QED})} L_{\text{mag}} = 1.6 \times 10^{-21} \text{ m}$$

- La cavità multi-pass richiedeva un foro piuttosto grande. Un prototipo di magnete con foro di 7 cm e lunghezza 1 m fu realizzato da Mario Morpurgo arrivando a 8 T al primo colpo.
- Il magnete fu poi regalato all'INFN e usato in PVLAS presso i Laboratori INFN di Legnaro fino al 2009 circa.

Sistematici

Negli anni seguenti, demmo la caccia a vari effetti sistematici possibili, dalla birifrangenza indotta nei gas (per stabilire la pressione a cui si doveva lavorare) agli effetti di birifrangenza indotti dal campo sugli specchi (per capire a che livello era necessario schermare il campo ...): quasi sempre questi dati non esistevano in letteratura, per cui li dovevamo misurare.

Volume 42, number 2 OPTICS COMMUNICATIONS 15 June 1982

MEASUREMENT OF THE MAGNETIC BIREFRINGENCE IN OXYGEN AND NITROGEN GASES

S. CARUSOTTO and E. POLACCO

*Istituto di Fisica dell'Università, Pisa, Italy
INFN, Sezione di Pisa, Pisa, Italy
GNEQP, Unità di Ricerca di Pisa, Pisa, Italy*

E. IACOPINI, G. STEFANINI and E. ZAVATTINI
CERN, Geneva, Switzerland

The magnetic field is produced by a CERN standard MNP18 dipole and is time modulated so that

$$B(t) = B_1 + B_2 \cos(2\pi f_M t),$$

with $B_1 \gtrsim B_2 \approx 1500$ G and $f_M = 0.397$ Hz.

Sensibilità differenza cammino ottico con singolo passaggio

$$\Delta nL = 2.4 \times 10^{-14} \frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

Measurement of the magnetic birefringence of noble gases

S. Carusotto

Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Pisa, Italy

E. Iacopini

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, Pisa, Italy

E. Polacco

Gruppo Nazionale Elettronica Quantistica Pisa, Pisa, Italy

F. Scuri, G. Stefanini, and E. Zavattini

European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

Under these conditions, at 1.8 Hz of frequency signal, the sensitivity [Eq. (2)] steadily obtained with the apparatus was five times higher than the statistical limit.

Sensibilità differenza cammino ottico con singolo passaggio

$$\Delta nL = 8 \times 10^{-15} \frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}} @ 1.8 \text{ Hz}$$

(magneti rotanti)

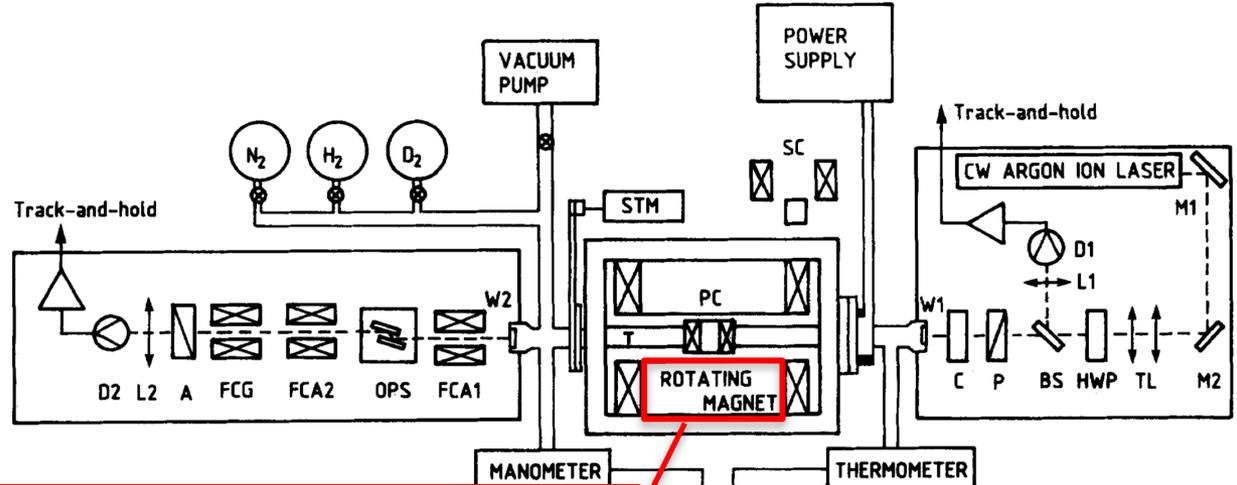
Rotazione magnete

Fu in quel periodo che si passò anche dall'idea di modulare il campo magnetico (per poter migliorare il rapporto segnale/rumore, per mezzo della detezione sincrona con il segnale) a quella di ruotario. Si cominciò con un magnetino di fascio da 4kG, la cui rotazione era davvero uno spettacolo da vedere e con cui misurammo la birifrangenza in vari gas. Mimmo all'inizio non era d'accordo: preferiva la soluzione pulsata, Funzionò e fu chiaro che quella era la soluzione anche per il futuro set-up per la QED.

J. Chem. Phys. **85** (4), 15 August 1986

Magnetic birefringence measurement in hydrogen and deuterium gases

F. Scuri,^{a)} G. Stefanini,^{a)} E. Zavattini,^{a)} S. Carusotto,^{b)} E. Iacopini,^{c)} E. Polacco^{b)}
 European Laboratory for Particle Physics, CERN CH-1211 Geneve 23, CERN Site de Preveessin, F-01621
 CERN Cedex, Switzerland



Frequenza di rotazione = 1.3125 Hz

La rotazione del magnete permetteva di modulare il segnale a frequenze più elevate riducendo il rumore di tipo 1/f.

FIG. 1. Experimental apparatus: optical layout. A: analyzer prism; BS: beam splitter; C: compensator; D1, D2: photodiodes; FCA1, FCA2: air Faraday cells; FCG: glass Faraday cell; HWP: half-wave plate; L1, L2: lenses; M1, M2: mirrors; OPS: optical phase shifter; P: polarizer prism; PC: pick-up coil; SC: synchronizing coil; STM: stepping motor; T: gases tube; TL: telescope; W1, W2: windows.

$$\Delta n L = 6 \times 10^{-15} \frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}} @ 2.6 \text{ Hz}$$

Pausa

Va detto che, nonostante non si fosse ancora alle restrizioni di oggi, già a quei tempi non c'era più molto spazio al CERN per attività come queste. Io rientrai a Pisa come ricercatore nel 1984 e Mimmo, credo nel 1985, vinse la cattedra a Trieste.

L'esperimento PVLAS dormiva sotto la cenere e riprese quando fu portato a Legnaro, dove è tutt'ora installato. IL CERN regalò il magnete disegnato da Morpurgo mentre il criostato e tutti gli annessi e connessi furono costruiti ad hoc da Petrucci.

- Dal 1984 al 1991 l'attività fu sospesa avendo raggiunto al CERN con 500 passaggi

$$\Delta nL = 7 \times 10^{-18} \frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}} @ \nu > 50 \text{ mHz}$$

- Durante questo periodo il metodo del **magnete rampato con una cavità multi-pass** fu sfruttato presso BNL per la ricerca di un segnale di Assione.
- Nel 1991 venne approvato dall'INFN l'esperimento PVLAS.
- Così si aprì una seconda fase nella quale fui coinvolto di persona anche io (dal 93).
- **Si cercò di mettere insieme l'idea della rotazione del magnete con un campo da magnete superconduttore. Fu il primo criostato + magnete superconduttore in rotazione in corrente persistente.**

Fabry-Perot

- Durante la prima riunione di PVLAS a Trieste, dopo la sua approvazione dall'INFN, Iacopini propose l'utilizzo di una cavità Fabry-Perot che avrebbe permesso un maggiore numero di passaggi equivalenti all'interno del campo magnetico.
- Rimaneva il problema dell'aggancio in fase di un laser ad una cavità, problema che nessuno di noi aveva mai affrontato.

Verbale Riunione PVLAS - Trieste, 25/10/91

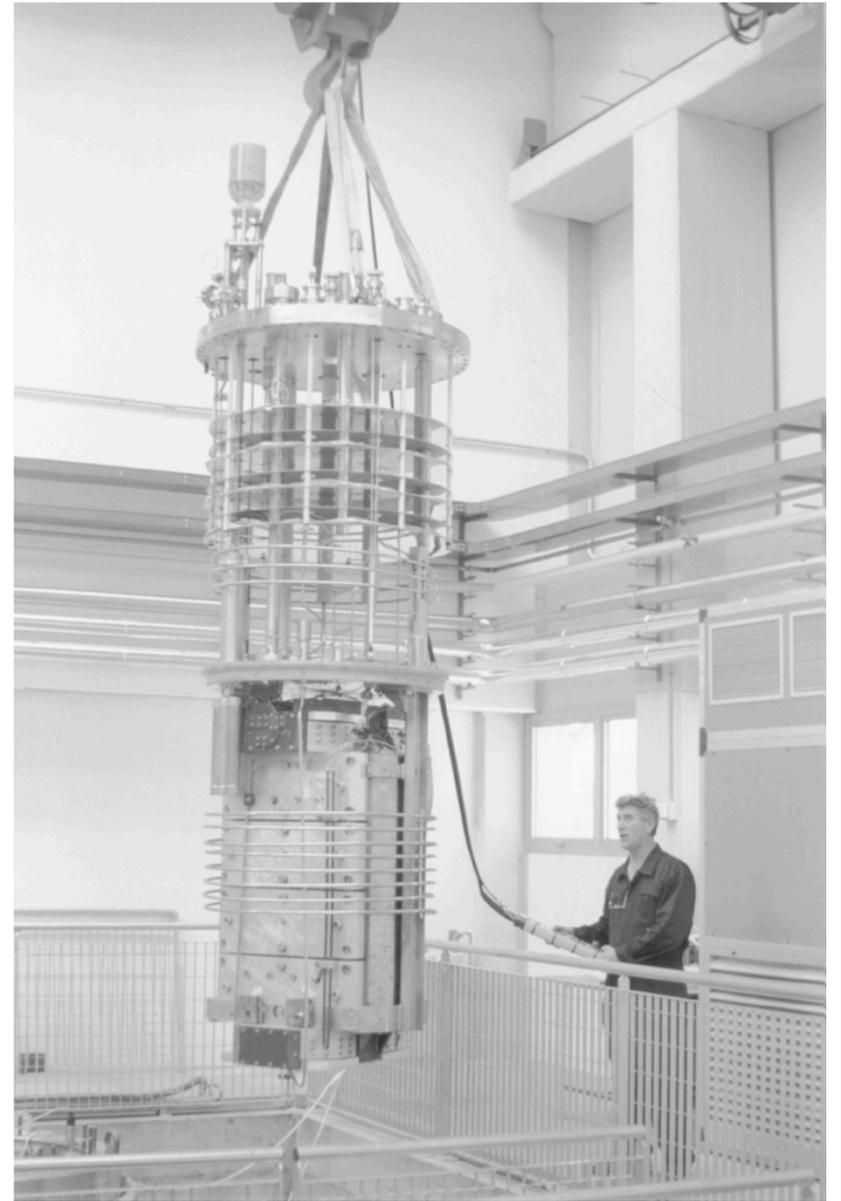
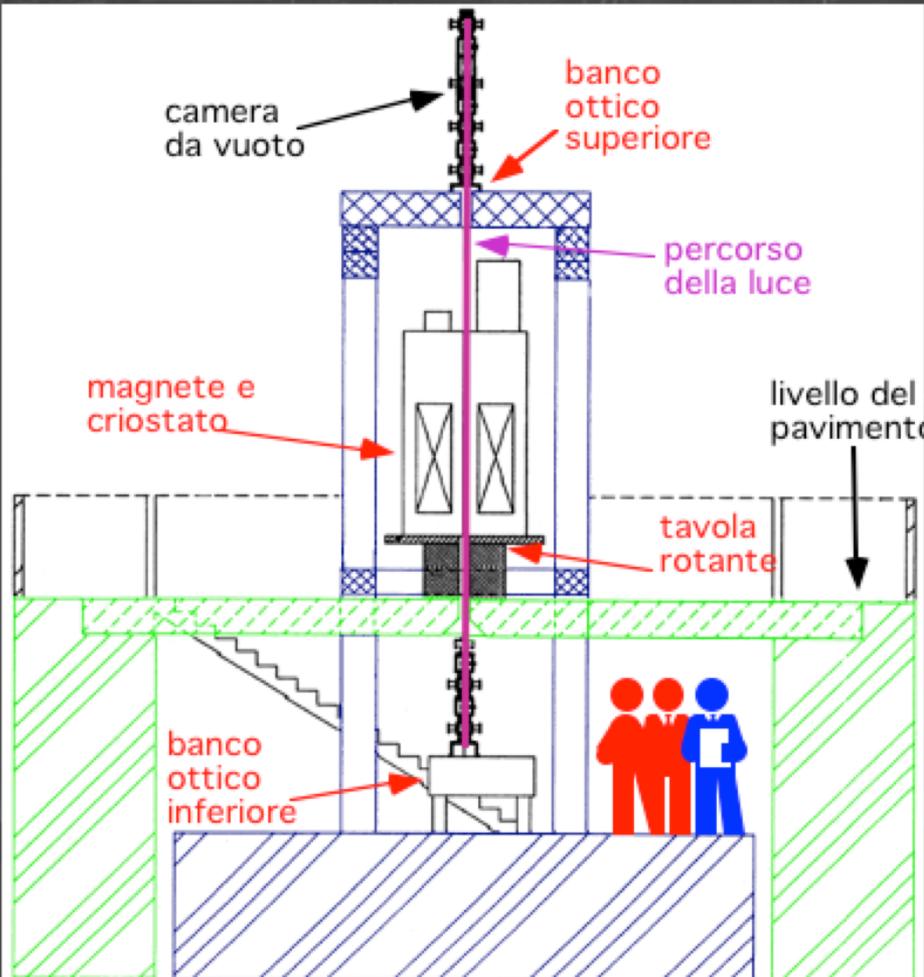
4. possibile utilizzo di un Fabry-Perot

E. Iacopini ha parlato del possibile utilizzo di una cavità di Fabry-Perot da utilizzare invece della solita cavità. Tra gli altri suoi vantaggi l'uso di un etalon di FP permetterebbe di ridurre il diametro del "buco caldo" del magnete. L'idea è senz'altro molto interessante, e si è deciso di discuterne ancora in futuro. Comunque a questo stadio non si vuole condizionare la costruzione del magnete con un'ipotesi di lavoro ancora da verificare, e la richiesta continua ad essere quella di un buco caldo di circa 7-8 cm di diametro.

Il magnete di Morpurgo + schema

Istallazione magnete di Morpurgo a
Legnaro

Schema PVLAS



Il criostato - 4 K

Contatto multi-lama per modo persistente di corrente: fino a 4000 A

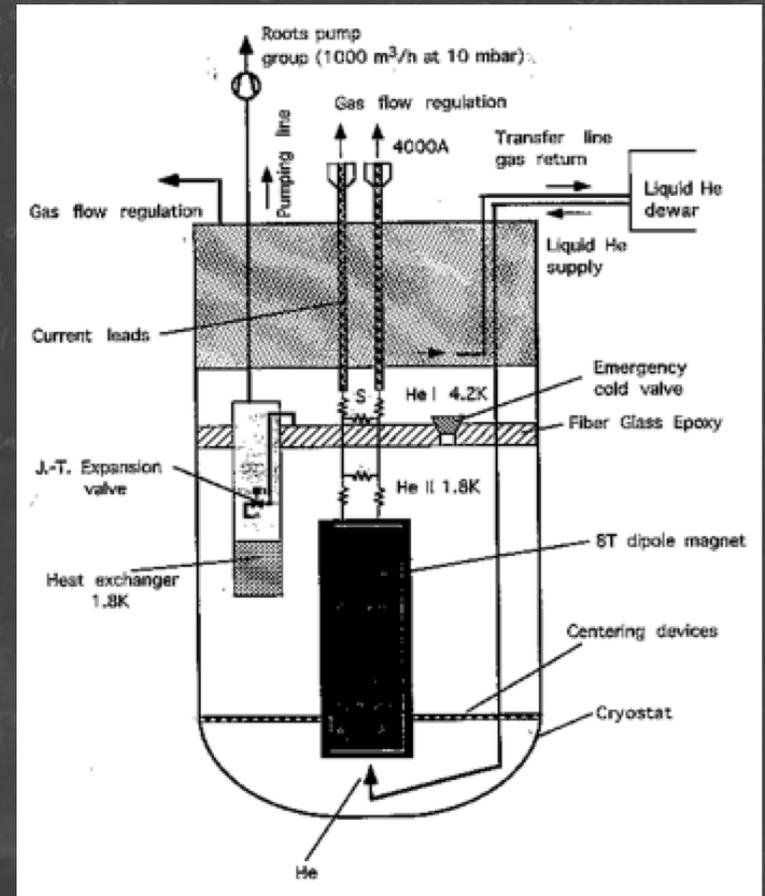
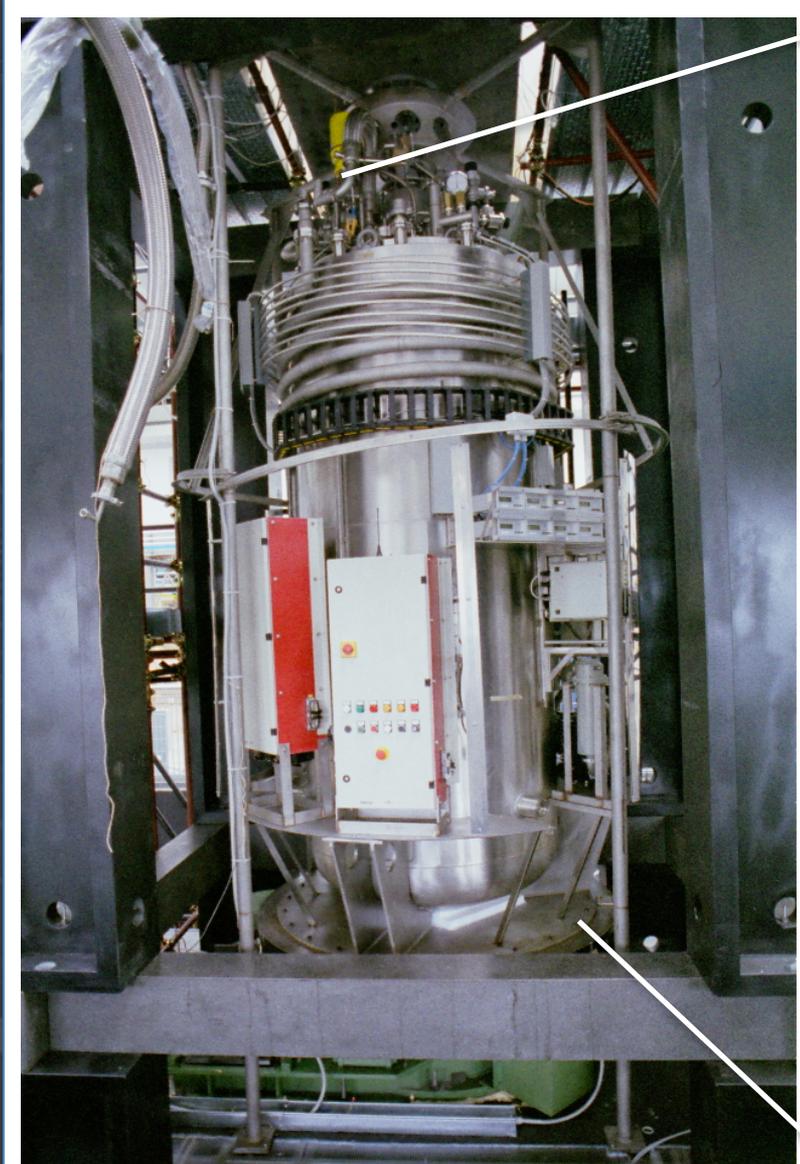
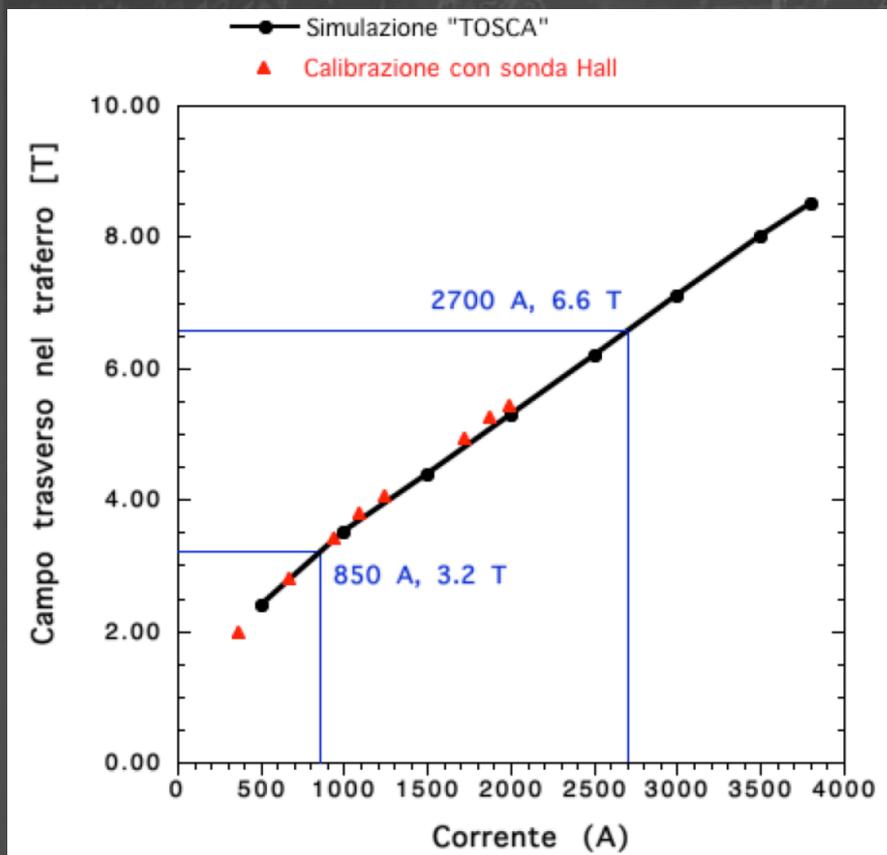


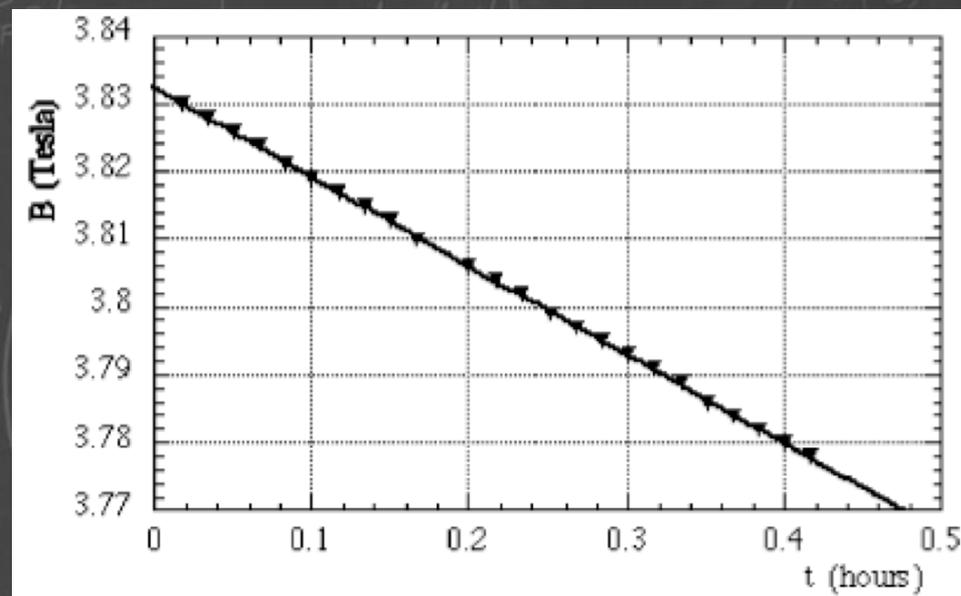
Tavola rotante per la rotazione criostato +
magnete: tipicamente 0.3 Hz

Magnete in funzione

- Si optò per un contatto ohmico multilama per mettere in corto il magnete.
- Nessuno garantiva un interruttore superconduttore capace di reggere 4000 A.



Corrente per 5.5 T era 2100 A



Decadimento del campo $\approx 3\%$ /ora dovuto alla resistenza del contatto ohmico

La durata dei run era determinata dal livello di elio liquido nel criostato, non dal magnete.

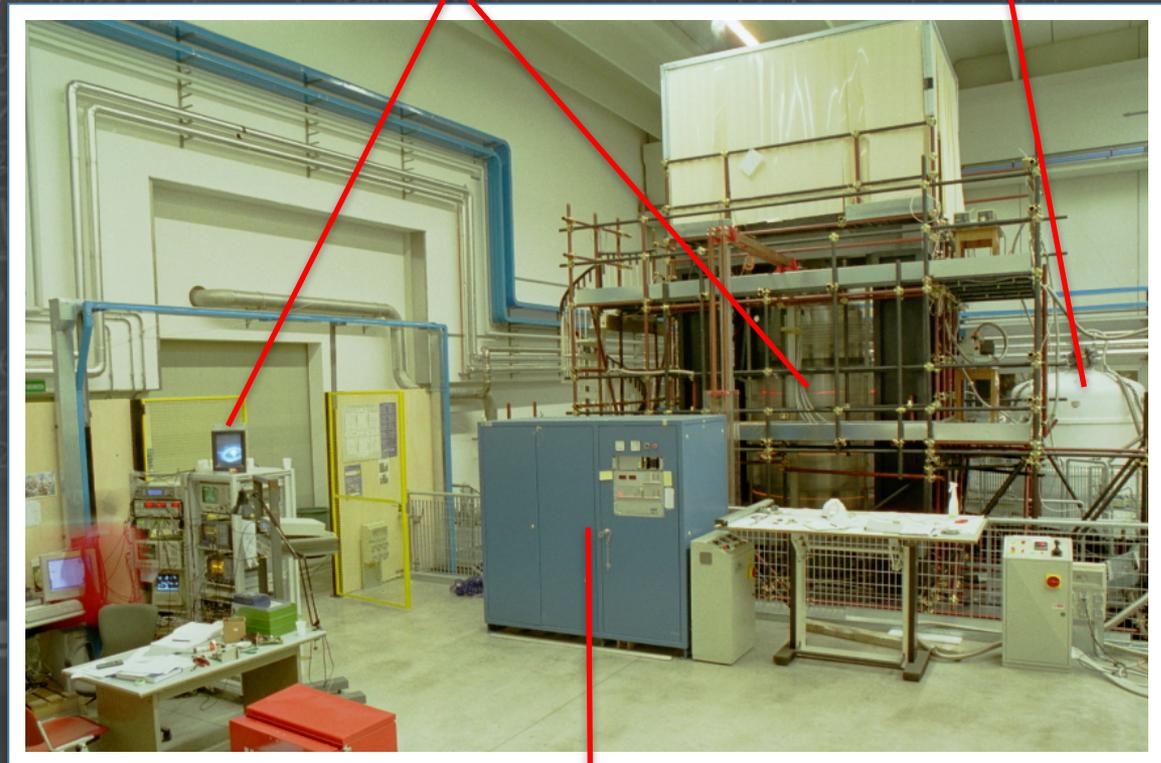
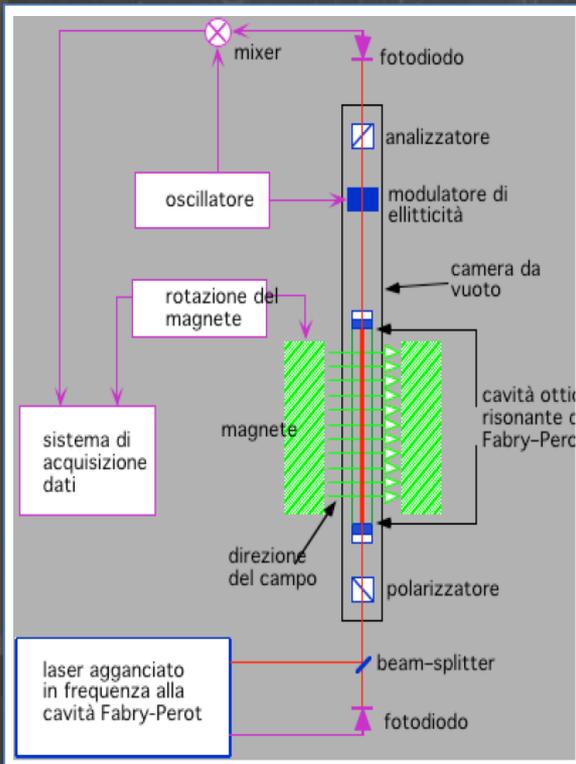
PVLAS in funzione

- Dopo alcuni anni di lavoro, nel 2000 l'apparato iniziò a prendere dati.
- Passaggi $N \approx 44000$, campo magnetico $B = 5.5$ T, rotazione ≈ 0.3 Hz, peso ≈ 6 t.
- A questo punto E. Iacopini aveva già preso altre strade.

Schema era sostanzialmente identico a quello del 1979 di Iacopini e Zavattini

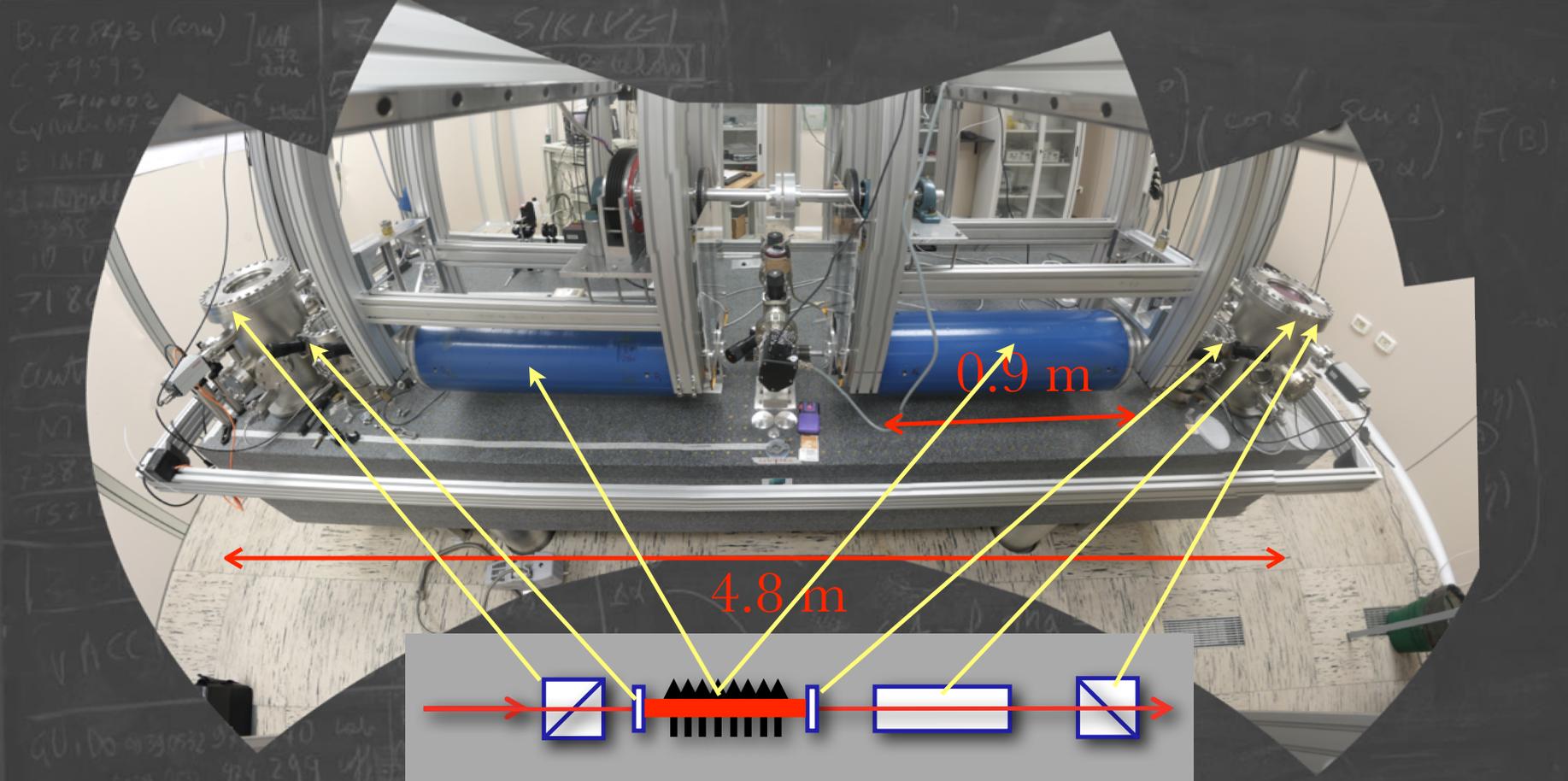
Aggancio con
magnete in rotazione

Dewar elio liquido



Power supply

Dopo alcuni anni... a Ferrara

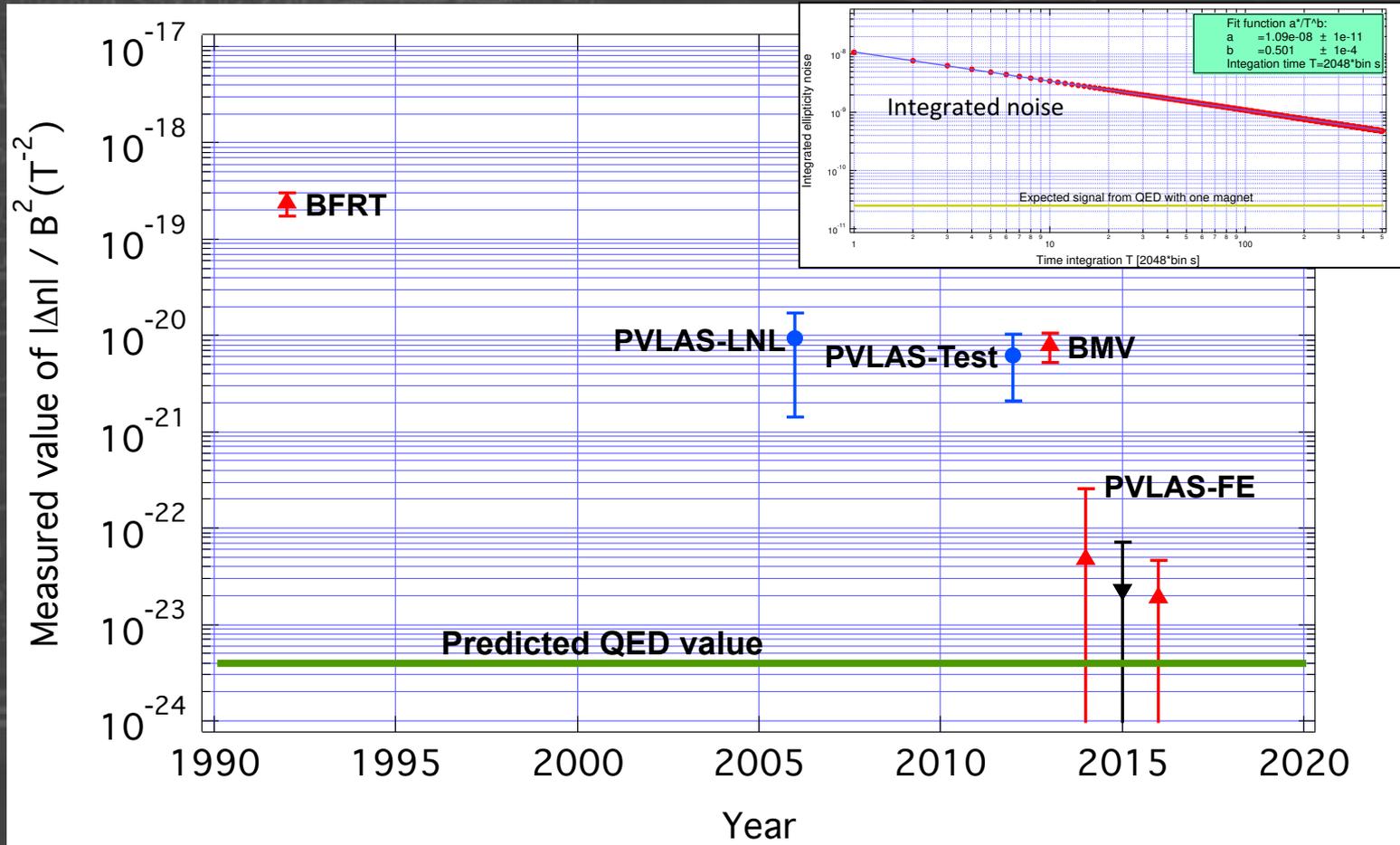


Passaggi $\approx 500'000$, $B^2L = 10 \text{ T}^2\text{m}$, rotazione $\approx 20 \text{ Hz}$

$$\Delta n L = 2.5 \times 10^{-19} \frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}} @ 30 \text{ Hz} \text{ con } \Delta n^{(\text{QED})} L_{\text{mag}} = 2.5 \times 10^{-23} \text{ m}$$

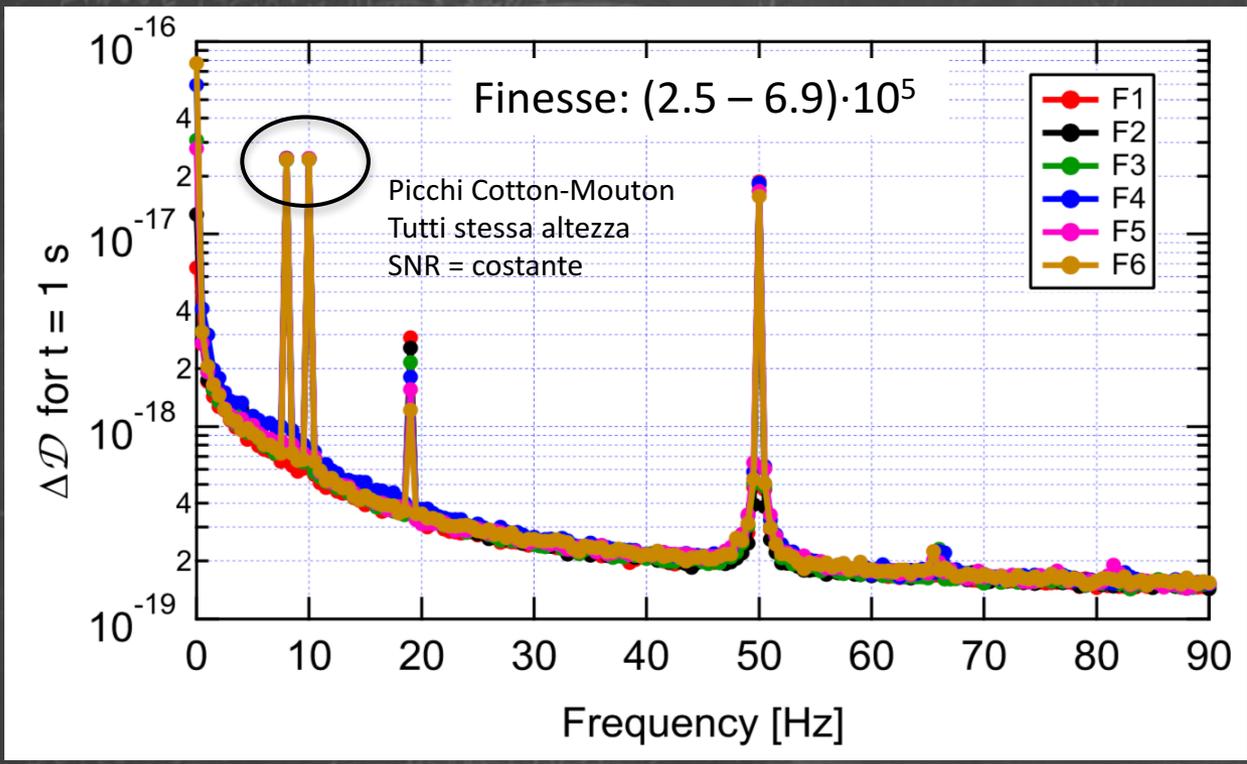
Storico delle misure della birifrangenza magnetica del vuoto

- L'ultimo dato del 2016 di PVLAS corrisponde ad un tempo di integrazione di $T \approx 5 \cdot 10^6$ s.
- Errori a 1σ .
- Inutile integrare più a lungo per colmare il fattore mancante
- L'utilizzo di magneti permanenti ha permesso lo studio dettagliato dei sistematici.



Fattore mancante - battere il rumore?

- Rumore in ellitticità normalizzato per il numero di passaggi: **rumore termico dagli specchi?**
- Test in corso per raffreddare gli specchi della cavità.



Inutile aumentare troppo il numero di passaggi.

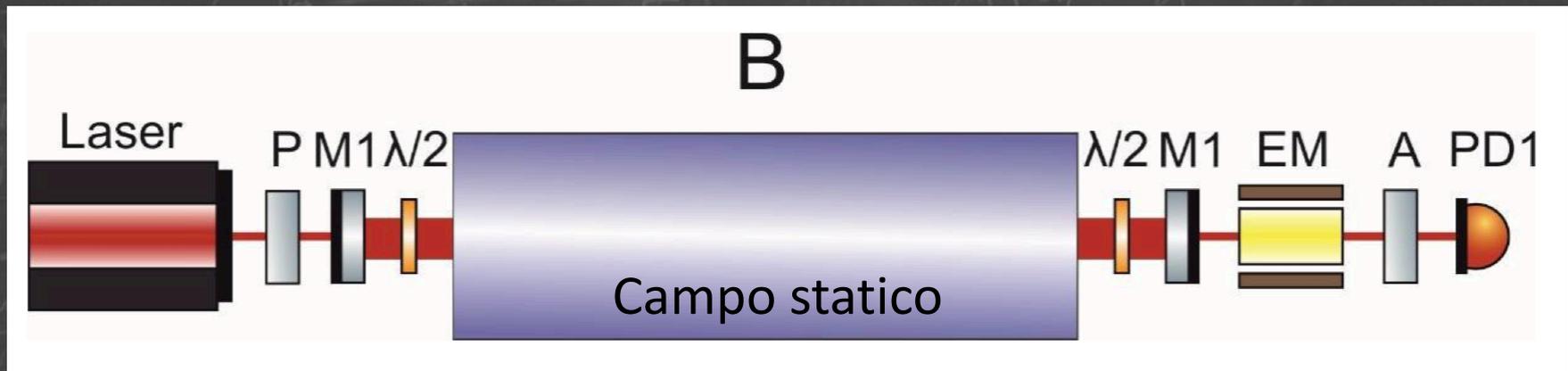
Shot noise

$$\mathcal{F}_{\max} = \sqrt{\frac{e}{I_{\parallel} q} \frac{\lambda}{2\Delta\mathcal{D}}}$$

$$\mathcal{F}_{\max} \approx 5 \times 10^4$$

con $I_{\parallel} \approx 1 \text{ mW}$

Nuovo schema con lamine rotanti



Due lamine mezz'onda co-rotanti dentro la cavità: polarizzazione ruota all'interno del magnete ma non sugli specchi. Birifrangenza statica degli specchi non è più un problema

Esempio LHC: $\int B^2 dL = 1000 \text{ T}^2 \text{ m}$; $S_{D_n} = 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 3 \text{ Hz}$

$$\Rightarrow T = 62500 \text{ s}$$

..... Chissà

