

# Misura del momento di dipolo elettrico (EDM) delle particelle elementari ( $\mu, p, d$ ) ad un anello di accumulazione

G. Venanzoni - LNF

Seminario a Roma 3

20/7/05

# Indice

- Misura di EDM e **sensibilità** verso nuova fisica
- Panorama delle misure esistenti di EDM
- Proposta per la misura di EDM ad uno storage ring:
  - deuterio a  $10^{-27}$  e·cm (syst)
  - deuterio a  $10^{-29}$  e·cm (stat e syst)
  - $\mu$  a  $10^{-24}$  e·cm (stat)  $10^{-27}$  e·cm (syst)
- Conclusioni

# Perché cercare EDM?

- Se esiste, il dipolo elettrico (intrinseco) di una particella è diretto lungo lo spin:

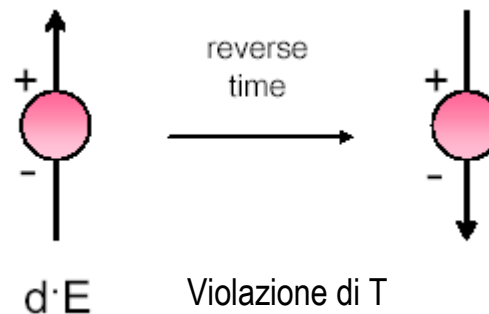
$$\vec{d} = \eta \frac{e}{4mc} \vec{s} \quad (\vec{\mu} = g \frac{e}{2mc} \vec{s}); \quad s_z = \pm \frac{\hbar}{2}$$

- In presenza di un campo elettrico:

$$H = -\vec{d} \cdot \vec{E} = -\eta \frac{e}{4mc} \vec{s} \cdot \vec{E}$$

Per inversione temporale:  $T(\vec{s} \cdot \vec{E}) = -\vec{s} \cdot \vec{E}$   
(cambia la direzione di spin, ma non E)

$d \neq 0 \Leftrightarrow T (P)$  è violato



Assumendo CPT  $\Rightarrow$  una nuova sorgente di violazione di CP (qualcosa che e' richiesto per spiegare l'attuale asimmetria materia/Anti materia nell'universo) (Argomento di Sakharov)

# Limiti sperimentali di edm e sensibilità a nuova fisica

Non solo Susy

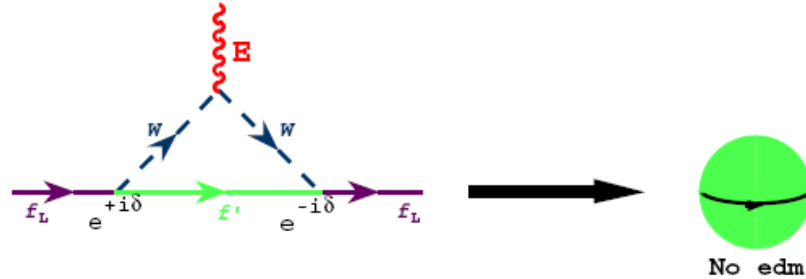
particle	limit [e · cm]	system	SM [e · cm]	New Physics [e · cm]
electron	$1.9 \times 10^{-27}$	$^{205}\text{Tl}$ atom	$\sim 10^{-38}$	$10^{-27}$
muon	$9.3 \times 10^{-19}$	rest frame E field	$\sim 10^{-35}$	$10^{-22}$
tau	$2.5 \times 10^{-17}$	$(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-\gamma^*)$	$\sim 10^{-34}$	$10^{-20}$
proton	$5.4 \times 10^{-24}$	$^{199}\text{Hg}$ atom	$\sim 10^{-31}$	$5 \times 10^{-26}$
neutron	$7.4 \times 10^{-26}$	ultra cold neutrons	$\sim 10^{-31}$	$5 \times 10^{-26}$
$^{199}\text{Hg}$	$2.1 \times 10^{-28}$	$^{199}\text{Hg}$ atom	$\sim 10^{-33}$	$10^{-28}$

1. Il contributo del SM a EDM è almeno **5** ordini di grandezza inferiori ai valori sperimentali
2. Susy predice valori di EDM di 1-2 ordini di grandezza inferiori ai valori sperimentali
3. EDM e' sensibile a scale di energia beyond LHC

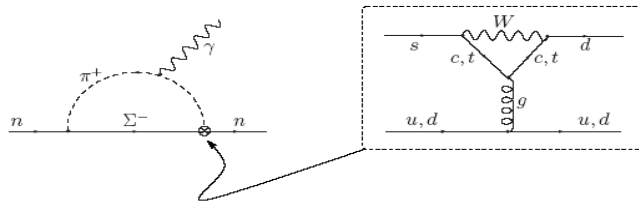
Perché EDM è così soppresso nel SM?

# Perchè nel Modello Standard EDM è “nullo”...

- Settore EW:
  - Lo SM (attraverso la CKM) non permette la violazione di CP ad un loop per interazioni che **conservano il sapore**

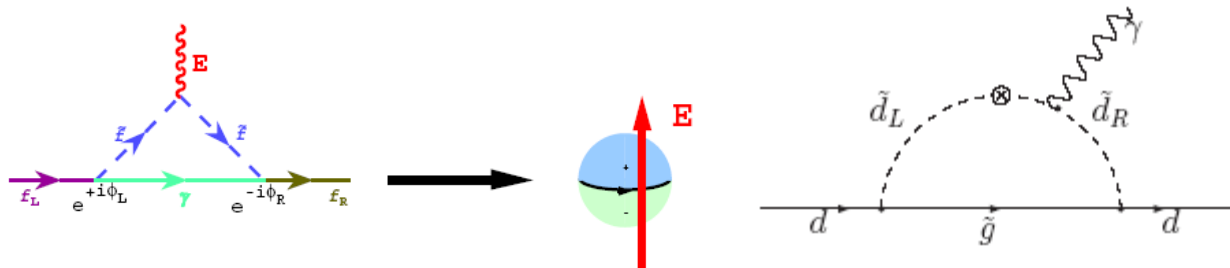


- In effetti



$$d_n^{\text{CKM}} \sim 10^{-31} \text{ ecm}$$

SUSY da' EDM ad un loop!

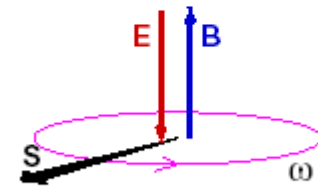
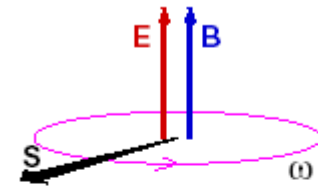


# Come si misura EDM per neutroni o atomi pesanti (Hg,Tl) ?

- Si tratta di esperimenti da laboratorio
- Il metodo standard si basa sull'utilizzo di un campo elettrico molto intenso ( $\sim 2 \text{ MV/m}$ ) e di un campo magnetico debole ( $\sim 1 \mu\text{T}$ ):

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} + \vec{d} \times \vec{E}$$

- La frequenza di precessione è misurata con il campo elettrico parallelo e antiparallelo al campo magnetico: il segnale di EDM provoca una variazione della frequenza di precessione ( $\sim 10^{-7} \text{ Hz}$  se  $E=1 \text{ MV/m}$ ;  $d=10^{-26} \text{ ecm}$ )
- Fattori limitanti: controllo di B ed E ( $10^{-7} \text{ Hz} \leftrightarrow \Delta B \sim 10^{-10} \text{ Gauss}$ ;  $B_{\text{Terra}} = 0.5 \text{ Gauss}$ )



$$d = \frac{\hbar(\omega_{\uparrow\uparrow} - \omega_{\uparrow\downarrow})}{4E}$$

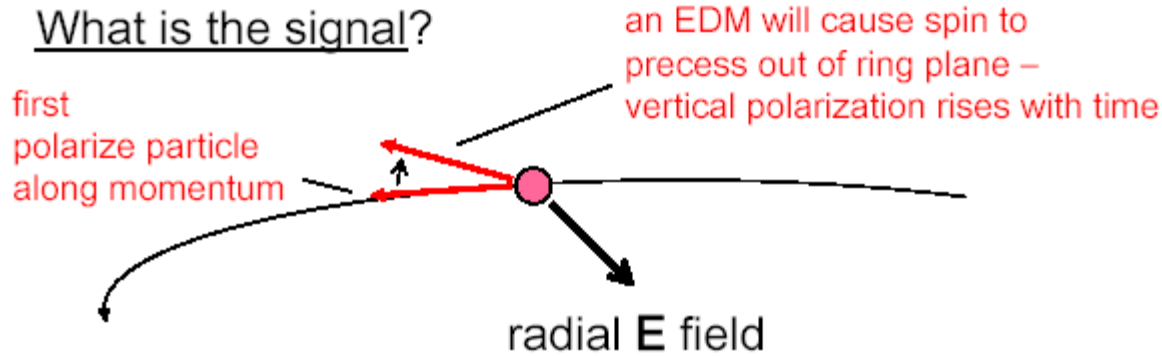
$$\omega = \frac{2\mu B}{\hbar} \pm \frac{2dE}{\hbar}$$

$$\delta d \sim \frac{\hbar}{2ET\sqrt{N}}$$

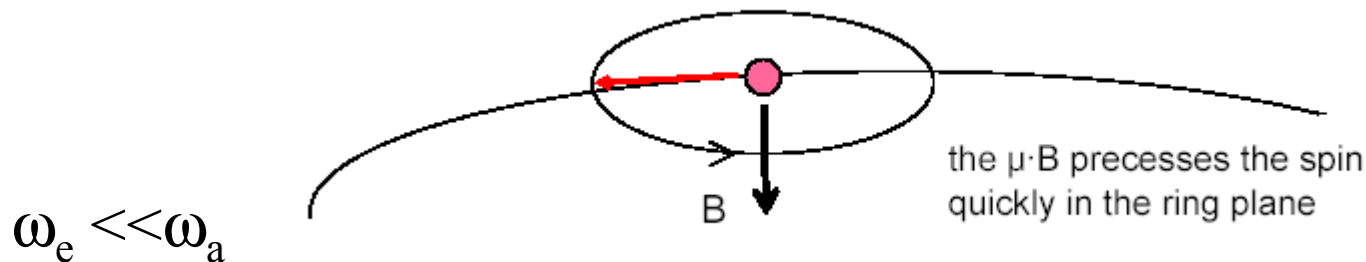
# Perché misurare EDM un anello di accumulazione?

- ☺ Il campo elettrico nel sistema della particella ( $v \times B$ ) 10-100 volte più forte che quello prodotto in laboratorio (GV/m) ( $\omega_e \sim E$ )
- ☺ Apre la possibilità di misurare EDM di particelle cariche
- ☺ Misura di polarizzazione ricavata dall'interazione/decadimento della particella (Polarimetri o Calorimetri)
- ☹ Sistematiche differenti e dagli esperimenti “usuali”
  - Tempi di coerenza di spin  $\sim 10-100$  s
- ☹ Il segnale di EDM è “dominato” dalla precessione di (g-2) ( $\omega_a = aeB/mc$ )

# Principio di funzionamento



C'e' comunque un problema:



Difficile da osservare

*In effetti il limite su  $d_\mu < 10^{-18} e \cdot cm$  e' stato ottenuto in questo modo e risale all'esperimento di Farley e Picasso (...)*

## The 'parasitic' way

From  $\omega = \sqrt{a^2 + (\eta\beta/2)^2} B$ :

need to know  $a$  precisely

⇒ only leptons

⇒ large model sensitivity

From tilt in  $\vec{\omega}$ :  $\phi \simeq \eta\beta/2a$

large systematic from geometry

For both:

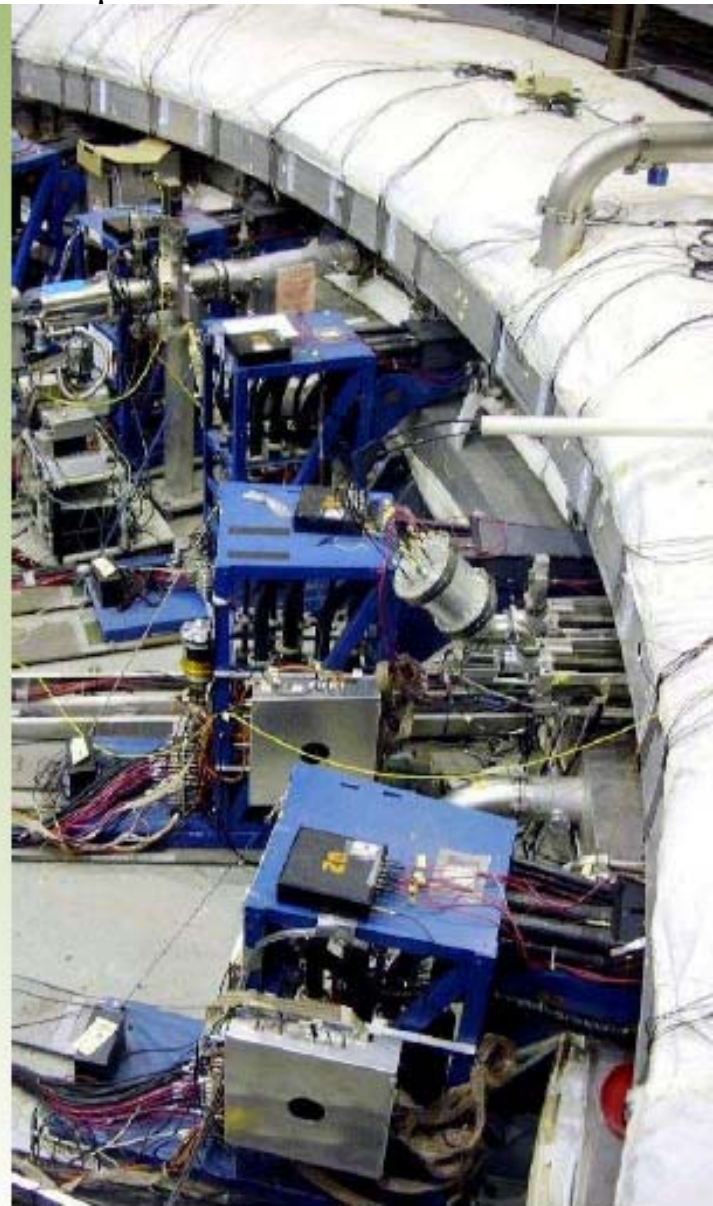
sensitivity  $\propto \beta$

⇒ no traps ....

$$\|d_\mu\| < 2.8 \times 10^{-19} \text{e} \cdot \text{cm} = 10^{16} \times d_\mu^{\text{SM}}$$

J. Bailey *et al.*, J. Phys. G : Nucl. Phys., Vol. 4, No. 3, 1978.

R. McNabb, <http://www.arxiv.org/abs/hep-ex/0407008>.



# Per aumentare la sensitività a EDM occorre “rallentare” o bloccare la precessione $\omega_a$ di (g-2):

## •Metodo 1:

utilizzo di un campo elettrico radiale  $E_r$  per “congelare” il moto di spin di (g-2):  
nel sistema a riposo  $B' = B - v \times E$  (approx.)

$$\omega_a = \frac{e}{m} \left( aB + \left( \frac{1}{\gamma^2 - 1} - a \right) \frac{\beta E_r}{c} \right)$$

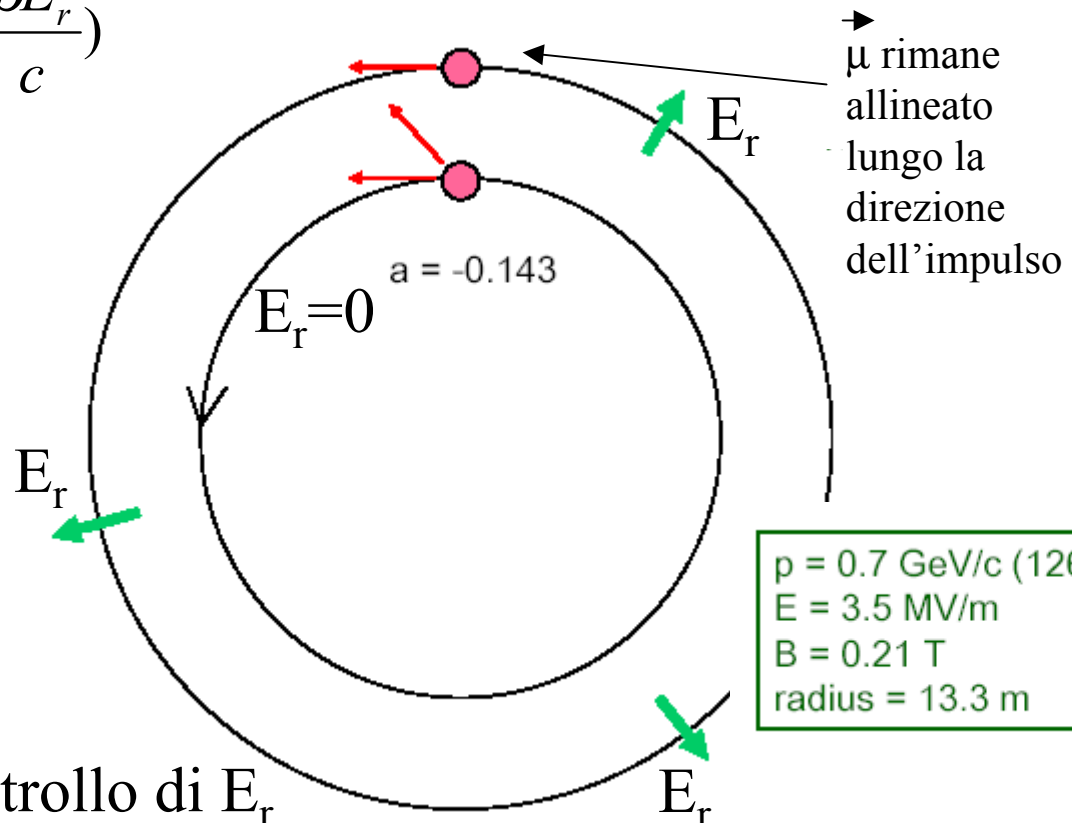
$$\omega_a \cong 0 \text{ se } E_r \cong aBc\gamma^2$$

$$\omega_e = d \frac{c}{\hbar} \beta B; \quad s_V = \omega_e t$$

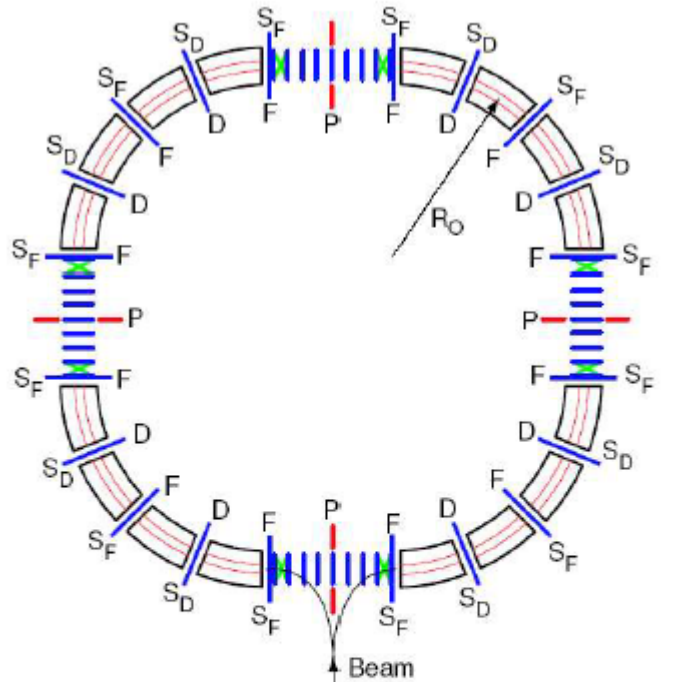
La polarizzazione verticale si accumula nel tempo

adatto se il momento anomalo è piccolo,  
richiede un anello “grande”

Issue: controllo di  $E_r$



# Un disegno più realistico (per il deuterio)



- P Polarimeter
- F Focusing Quadrupole
- D Defocusing Quadrupole
- Electric Plates
- Quadrupoles inside straight sections
- $S_D$  Sextupoles placed next to defocusing quadrupoles
- $S_F$  Sextupoles placed next to focusing quadrupoles
- X Position of sextupoles inside straight sections

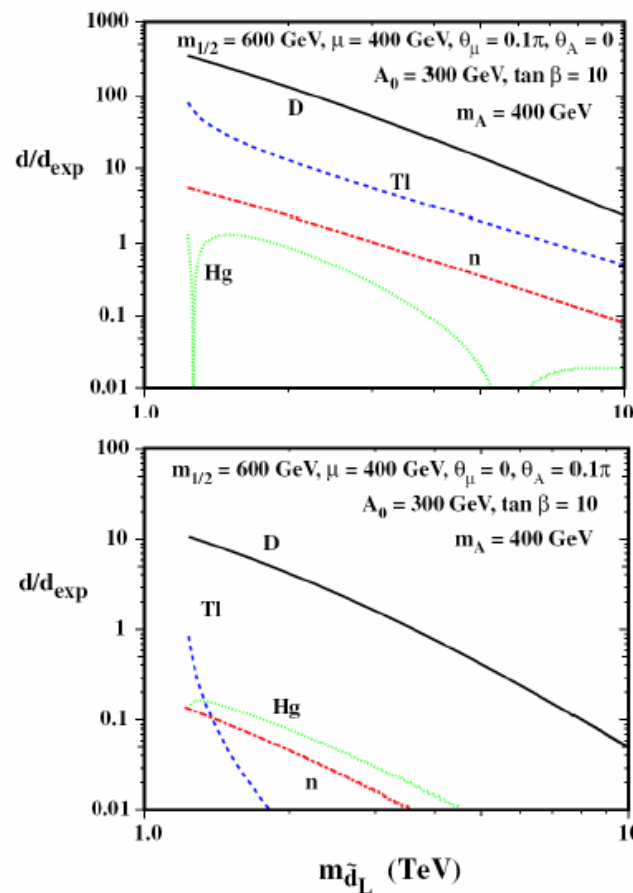
Table 1: Deuteron EDM ring parameters

Deuteron Momentum	0.7 GeV/c
Rigidity, $(B - E/\beta)R$	2.335 Tm
Electric field, $E_{R_0}$ for $2a_{gr} = 5\text{cm}$	3.5MV/m (0.011667 T)
Magnetic field, $B_V$	0.2089 T
Length of orbit, L	155.28 m
$BE$ - section radius, $R_0$	13.302 m
Length of the $BE$ - section, $l_{BE}$	5.224 m
Number of regular periods, N	8
Horizontal tune, $\nu_x = \frac{L}{L_c}$	6.195
Vertical tune, $\nu_y = \frac{L}{L_c}$	5.810
Betatron amplitude functions, $(\beta_{x,y})_{max}$	19.56 m; 21.91 m
Admittances, $\epsilon_{x,y} = \pi a_{gr}^2 / (\beta_{x,y})_{max}$	$32\pi$ mm mrad; $28.5\pi$ mm mrad
Momentum compaction factor, $\alpha$	0.162
$(\Delta p/p)_{max}$ at $x = 2.5$ cm	$4.48 \times 10^{-3}$
Quadrupole gradient, $B_q'$ , for $l_q = 0.15$ m	311 Gauss/cm
Quadrupole focal length, $f_q$	5 m
Sextupole field derivatives, $B_F''$ , $B_D''$ , for $l_s = 0.3$ m	45 Tm <sup>-2</sup> , 44.2 Tm <sup>-2</sup>
Spin tune, $\nu_{sp}$	$\sim 10^{-7}$
Number of Long Straight Sections, $N_{s.s.}$	4
Number of Free Intervals in One Straight Section	8
Length of a Free Interval, $l_{s.s.}$	1.2 m
Quadrupole gradients, $B_{qs}'$ in s. Sections, for $l_{qs} = 0.366$ m	628.5 Gauss/cm
Sextupole derivatives, $B_{ss}''$ , for $l_{s,sect} = 0.9$ m	-50.1 Tm <sup>-2</sup>

# Perché il deuterio?

- Piccolo momento anomalo ( $a = -0.14$ )
- Facilmente polarizzabile
- Producibile con alta intensità ( $10^{10-11}$  particelle/bunch)
- Alta sensibilità verso nuova fisica (EDM può nascere nel settore dei quark o nelle interazioni forti tra nucleoni)

$d_D$  a  $3 \times 10^{-27}$



# Deuteron EDM Proposal: Search for a Permanent Deuteron Electric Dipole Moment at the $10^{-27}$ e-cm Level.

M. Aoki<sup>13</sup>, M. Bai<sup>4</sup>, G. Bennett<sup>4</sup>, A. Bravar<sup>4</sup>, H.N. Brown<sup>4</sup>, G. Cantatore<sup>14</sup>,  
A. Caracappa<sup>4</sup>, R.M. Carey<sup>3</sup>, P.T. Debevec<sup>8</sup>, H. Denizli<sup>1</sup>, F.J.M. Farley<sup>4</sup>, C. Guchu<sup>10</sup>,  
R. Hackenburg<sup>4</sup>, S. Hoblit<sup>4</sup>, H. Huang<sup>4</sup>, K.P. Jungmann<sup>7</sup>, M. Karuza<sup>14</sup>, D. Kaway<sup>4</sup>,  
B. Khazin<sup>5</sup>, I.B. Khriplovich<sup>5</sup>, B. Kirk<sup>4</sup>, I.A. Koop<sup>5</sup>, Y. Kuno<sup>13</sup>, R. Larsen<sup>4</sup>,  
D.M. Lazarus<sup>4</sup>, L.B. Leipuner<sup>4</sup>, C.P. Liu<sup>7</sup>, V. Logashenko<sup>3,5</sup>, M. Lowry<sup>4</sup>, W.W. MacKay<sup>4</sup>,  
K.R. Lynch<sup>3</sup>, W. Marciano<sup>4</sup>, W. Meng<sup>4</sup>, J.G. Messchendorp<sup>7</sup>, L. Miceli<sup>4</sup>,  
J.P. Miller<sup>3\*</sup>, W.M. Morse<sup>4</sup>, G. Noid<sup>9</sup>, C.J.G. Onderwater<sup>7</sup>, Y. Orlov<sup>6</sup>, C.S. Ozben<sup>10</sup>,  
R. Prigl<sup>4</sup>, S. Redin<sup>5</sup>, S. Rescia<sup>4</sup>, B.L. Roberts<sup>3</sup>, G. Ruoso<sup>11</sup>, T. Russo<sup>4</sup>,  
A.M. Sadorfi<sup>4</sup>, A. Sato<sup>13</sup>, N. Shafer-Ray<sup>12</sup>, Y. Shatunov<sup>5</sup>, Y.K. Semertzidis<sup>4\*</sup>, A. Silenko<sup>2</sup>,  
E. Stephenson<sup>9\*</sup>, R.G.E. Timmermans<sup>7</sup>, C.E. Thorn<sup>4</sup>, X. Wei<sup>4</sup>, H.W. Wilschut<sup>7</sup>, M. Yoshida<sup>13</sup>

1. Abant Izzet Baysal University, Golkoy, BOLU 14280, Turkey

2. Belarusian State University, Belarus

3. Boston University, Boston, MA 02215, USA

4. Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA

5. Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

6. Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA

7. Kernfysisch Versneller Instituut, NL 9747 AA, Groningen, The Netherlands

8. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL 61801, USA

9. Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA

10. Istanbul Technical University, Maslak, Istanbul 34168, Turkey

11. Legnaro National Laboratories of INFN, Legnaro, Italy

12. University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA

13. Osaka University, Japan

14. University and INFN Trieste, Italy

August 6, 2004

Requesting  $4 \times 10^{11}$  vector polarized, bunched, 0.7 GeV/c deuterons per 10 s cycle.  
Total running time 5000 hours.

## Lettera di intenti presentata al PAC di BNL

•Metodo 2 : modulare la velocità della  
particella con frequenza di sincrotone  $\omega_s = \omega_a$

adatto per una classe più ampia di particelle

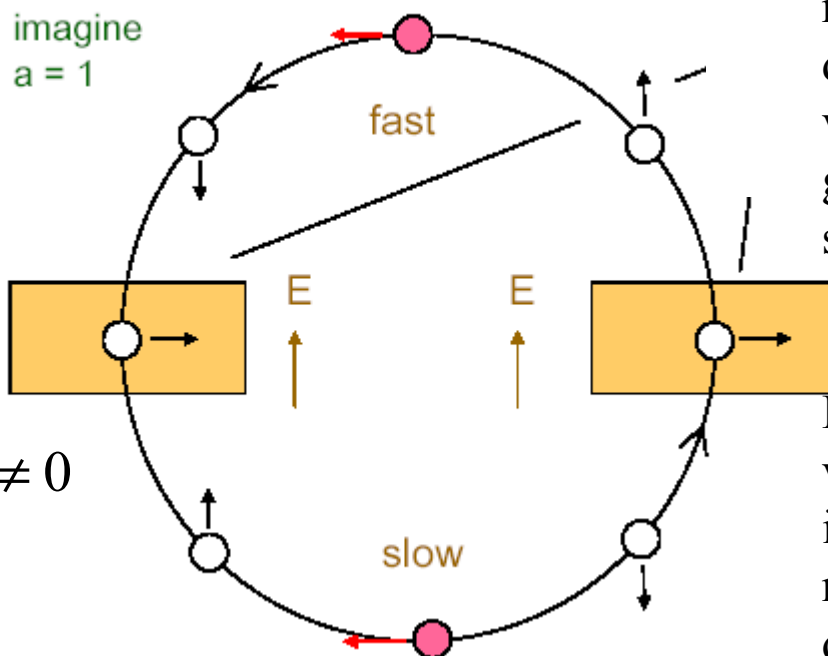
$$\frac{ds_V}{dt} = -\omega_e s_L = \frac{d}{\hbar} v B s_L$$

$$s_L = \cos \omega_a t$$

$$se v = v_0 + \Delta v_0 \cos \omega_a t$$

$$\Rightarrow \left\langle \frac{ds_V}{dt} \right\rangle \approx \left\langle \cos^2 \omega_a t \right\rangle \neq 0$$

segnale



for protons, operate at  $\omega_{sync} = \omega_a - 2$

Due cavità a radiofrequenza, così da cambiare la velocità due volte per giro (oscillazione di sincrotone)

La polarizzazione verticale si accumula in direzione opposta nelle zone opposte dell'anello. La variazione della velocità fa sì che non si cancelli

Richiede un anello di dimensioni ridotte

# Un disegno più realistico

## Resonance EDM Ring

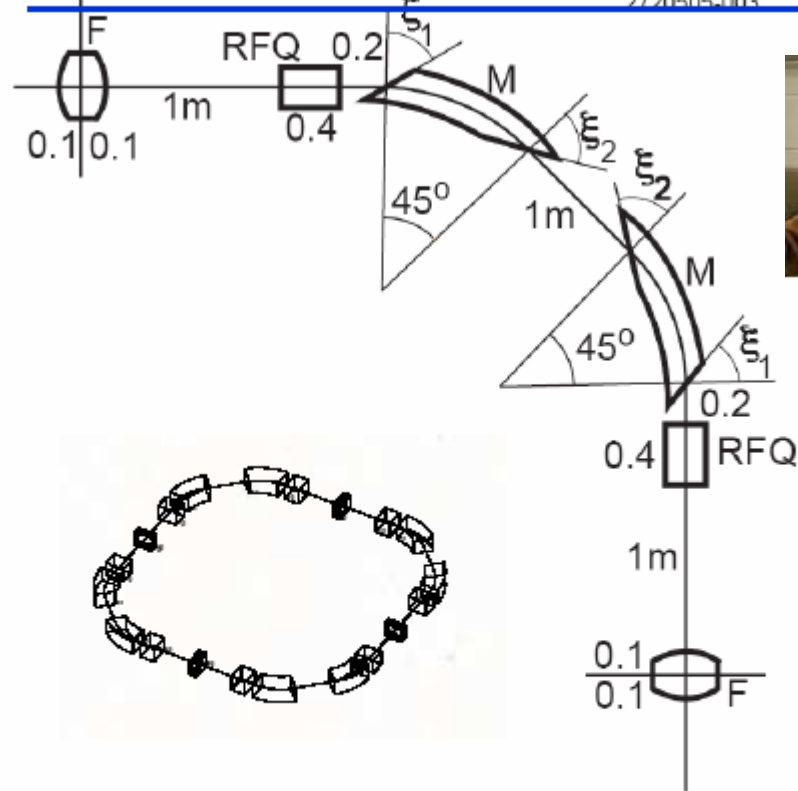
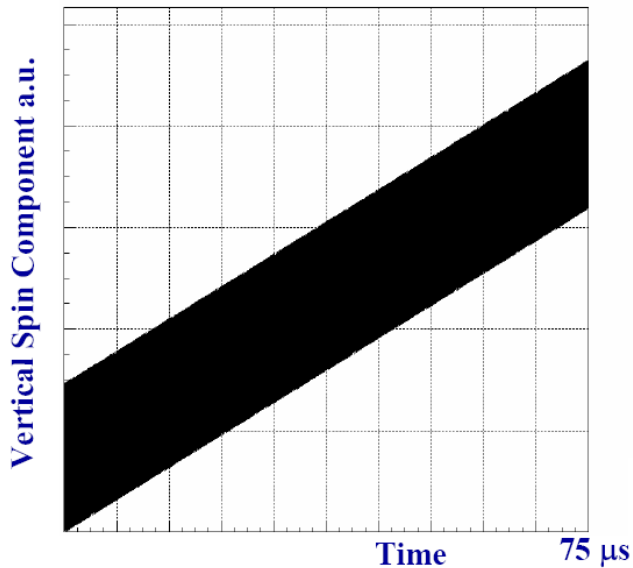
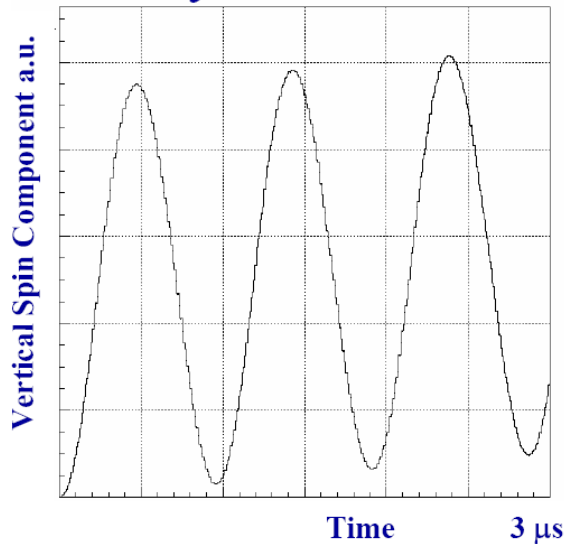


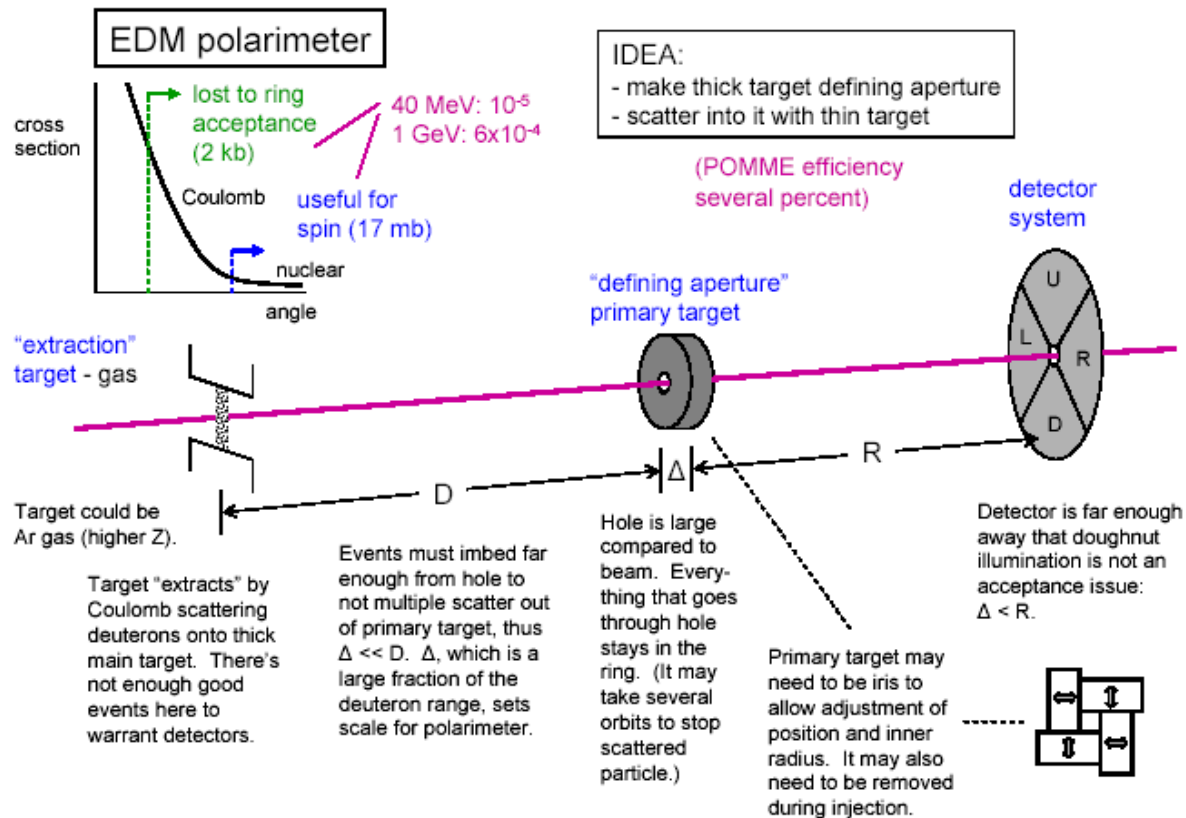
Fig. 1

$\frac{1}{4}$  of an EDM ring

- M - Magnets (focusing edges, homogeneous B)
- RFQ - RF quadrupoles,  $(\partial B / \partial x)_{\max} \sim 20$  gauss/cm
- F - usual focusing quadrupoles
- R = 1.167488m (for B = 2T)

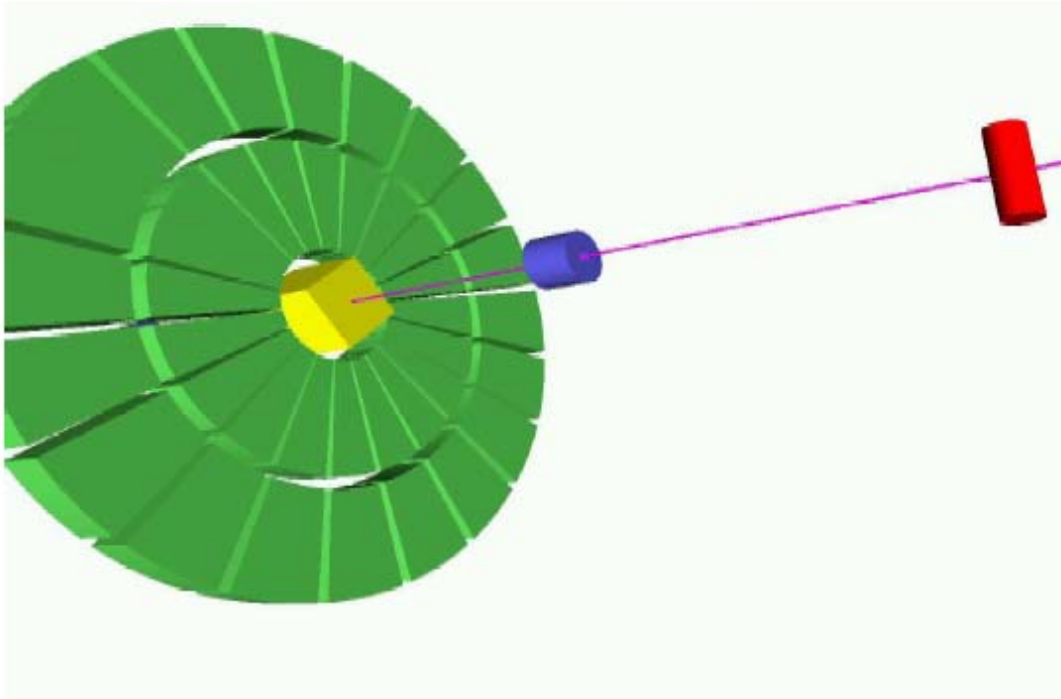
# Come si misura il segnale ?

Si misura l'asimmetria LR ( $\propto P_V$ ) prodotta dall'interazione di D su targhetta di Carbonio



1. Campionamento del segnale col tempo
2. Misura di altre asimmetrie

# Disegno del Polarimetro



# Sensibilità statistica

- Metodo 1: Pochi giorni per raggiungere  $10^{-27}$
- Metodo 2: Qualche mese per  $10^{-29}$

E le sistematiche ?

# Sistematiche

- Metodo 1:
  - Allineamento e controllo di  $E_r$
  - Tempo di coerenza della polarizzazione (10-100 s)
- Metodo 2:
  - Controllo dei campi di RF (cavità superconduttrici?)
  - Tempo di coerenza della polarizzazione
  - Tempo di coerenza nello spazio delle fasi
- Le sistematiche del metodo 1 sono state analizzate dettagliatamente. Una serie di accorgimenti (iniezione oraria e antioraria, uso di Fabry-Perot per monitorare  $E_r$ , ecc...) ed asimmetrie permette di controllare gli errori a  $10^{-27}$ .
- Il secondo metodo non richiede la presenza di  $E_r$  (il cui allineamento è la sorgente principale di errore). Questo permette di poter scendere a  $10^{-29}$ . Le sistematiche sembrano promettenti, anche se sono ancora in fase di studio

## Cosa si puo' (deve) fare

- Il secondo metodo è quello meno costoso e più promettente. In questo caso il disegno dell'anello è solo all'inizio...
- Simulazione dettagliata dell'anello EDM
  - Trasporto di spin
  - Tempo di coerenza dello spin
  - Perturbazioni con gli elementi dell'anello (cavità RF, sestupoli, polarimetro)
- La conclusione porterà al disegno “ingegneristico” dell'anello
- Test e sviluppo del Polarimetro, elettronica di read-out, analisi del segnale, ecc...

# Dove (se) si farà ?

- Ad oggi non è chiaro. Attualmente I seguenti laboratori sono stati considerati:
  - BNL
  - COSY (Germania)
  - IUCF (Indiana)
  - KVI

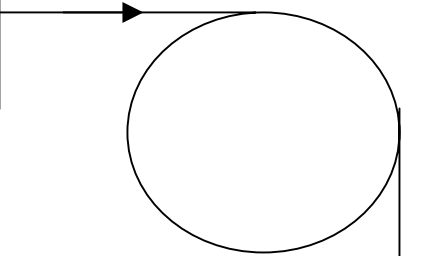
COSY sembra in vantaggio rispetto agli altri laboratori. Hanno fasci polarizzati. Il direttore ha chiesto per la fine dell'anno una lettera di intenti.

E in Italia? Abbiamo 3 Laboratori Nazionali in cui si usano tecniche di acceleratori....

Ci vogliamo pensare? Se sì, occorre agire subito.

# Schema dell'acceleratore

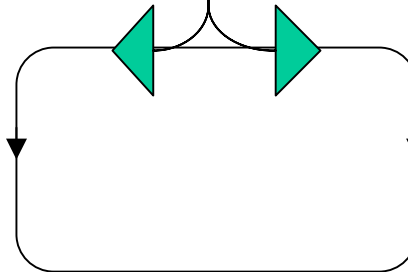
Sorgente di ioni polarizzati



Accumulatore



Spin "flipper"



Anello EDM

Si sta esplorando l'idea di utilizzare lo stesso anello per accumulare e misurare EDM

Una stima dei costi indica un costo complessivo tra intorno ai 15 M€ per il secondo metodo

# Conclusioni (personali, ma non troppo)

- La misura di EDM ha un “caso” di fisica da frontiera. Se scoperto significa fisica fuori del SM. Inoltre è sensibile a scale di energia beyond LHC
- Nuova tecnica: Utilizzo di un anello di accumulazione. (Almeno) due ordini di grandezza rispetto ai valori correnti
- Alto rapporto “Potenzialità di scoperta/Costi”.
- Limitato negli anni (se approvato 2-5 anni per test, costruzione, commissioning, 1-2 anni di run)
- Misura di deuterio, protone, forse  $^3\text{He}$
- Base per poter misurare EDM del muone in futuro (limite sperimentale e'  $10^{16} d_{\mu}^{\text{SM}}$ )
- Collaborazione internazionale di alta esperienza (g-2, ecc..)
- Esperimento a misura d'uomo
- Possibilità di entrare con un peso rilevante nella collaborazione
- Possibilità di farlo in Italia ?

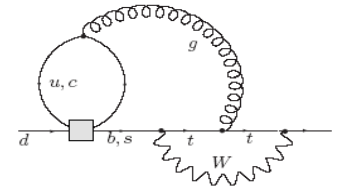
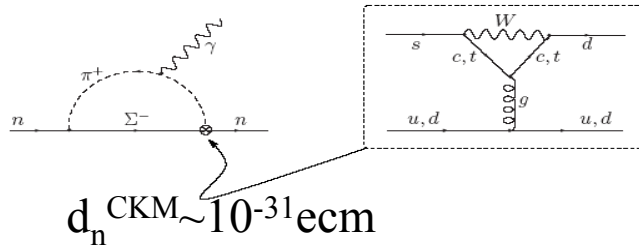
Perché non discuterne?

# Perchè nel Modello Standard EDM è “nullo”...

- Settore EW:

- Lo SM (attraverso la CKM) non permette la violazione di CP ad un loop per interazioni che **conservano** il sapore nel settore ew.
- Non solo! Si può verificare che EDM dei quark nello SM sopravvive solo a **3 loop!**

- In effetti il contributo principale e' dai diagrammi a pinguino:



$$d_d^{CKM} \sim 10^{-34} ecm$$

- QCD:

- La lagrangiana di QCD ammetterebbe un termine di violazione di CP, caratterizzato da un parametro  $\theta$ . I limiti più stringenti su  $\theta$ , vengono proprio dalla misura di EDM del neutrone che dà  $\theta < 10^{-9}$ . Un valore così piccolo di  $\theta$  non ha una spiegazione “naturale” (“Strong CP problem”).

SUSY da' EDM ad un loop!

$$d_{SUSY} \gg d_{SM}$$

