

# Electric Dipole Moment (EDM) Searches in Storage Rings

**J. Pretz**

RWTH Aachen/ FZ Jülich



Canu Meeting, Bad Honnef, Dec. 2012

# Outline

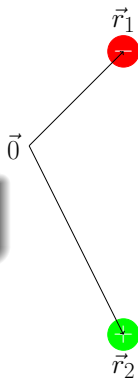
- Introduction & Motivation
- Measurement of charged particle EDMs
- Jülich efforts to measure EDMs  
( **J**ülich **E**lectric **D**ipole Moment **I**nvestigations (**JEDI**)  
collaboration)
- Summary

# Introduction & Motivation

# Electric Dipoles

Classical definition:

$$\vec{d} = \sum_i q_i \vec{r}_i$$





# Order of magnitude

## atomic physics:

$$q_1 = -q_2 = e, \quad |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = 1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$$

$$\rightarrow |\vec{d}| = 10^{-8}e \cdot \text{cm}$$

Water molecule:  $d = 2 \cdot 10^{-9}e \cdot \text{cm}$

# Order of magnitude

## atomic physics:

$$q_1 = -q_2 = e, \quad |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = 1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$$

$$\rightarrow |\vec{d}| = 10^{-8}e \cdot \text{cm}$$

Water molecule:  $d = 2 \cdot 10^{-9}e \cdot \text{cm}$

## hadron physics:

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = 1\text{fm} = 10^{-13}\text{cm}$$

$$\rightarrow |\vec{d}| = 10^{-13}e \cdot \text{cm}$$

Limit on neutron EDM  $< 3 \cdot 10^{-26}e \cdot \text{cm}$

# Operator $\vec{d} = q\vec{r}$

is odd under parity transformation ( $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ ):

$$\mathcal{P}^{-1}\vec{d}\mathcal{P} = -\vec{d}$$

Consequences:

In a state  $|a\rangle$  of given parity the expectation value is 0:

$$\langle a|\vec{d}|a\rangle = -\langle a|\vec{d}|a\rangle$$

If  $|a\rangle = \alpha|P=+\rangle + \beta|P=-\rangle$

in general  $\langle a|\vec{d}|a\rangle \neq 0$

# Order of magnitude

**Molecules** can have large EDM because of degenerated ground states with different parity

# Order of magnitude

**Molecules** can have large EDM because of degenerated ground states with different parity

**Elementary particles** (including hadrons) have a definite parity and cannot possess an EDM

$$P|\text{had}\rangle = \pm 1|\text{had}\rangle$$

# Order of magnitude

**Molecules** can have large EDM because of degenerated ground states with different parity

**Elementary particles** (including hadrons) have a definite parity and cannot possess an EDM

$$P|\text{had}\rangle = \pm 1|\text{had}\rangle$$

unless

$\mathcal{P}$  and time reversal  $\mathcal{T}$  invariance are violated!

# $\mathcal{T}$ and $\mathcal{P}$ violation of EDM

$\vec{d}$ : EDM

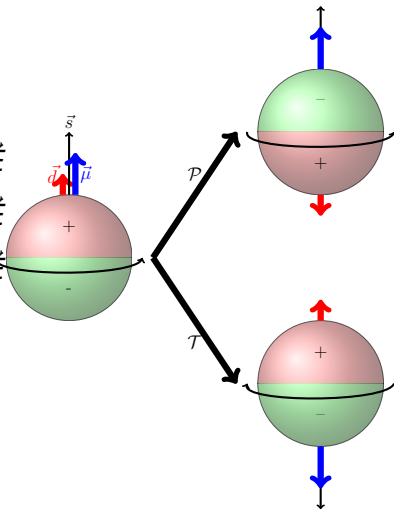
$\vec{\mu}$ : magnetic moment

both  $\parallel$  to spin

$$H = -\mu\vec{\sigma} \cdot \vec{B} - d\vec{\sigma} \cdot \vec{E}$$

$$\mathcal{T}: H = -\mu\vec{\sigma} \cdot \vec{B} + d\vec{\sigma} \cdot \vec{E}$$

$$\mathcal{P}: H = -\mu\vec{\sigma} \cdot \vec{B} + d\vec{\sigma} \cdot \vec{E}$$



$\mathcal{T}$  violation  $\xrightarrow{CPT}$   $C\mathcal{P}$  violation

# $\mathcal{CP}$ violation

- We are surrounded by matter (and not anti-matter)

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = \mathbf{10^{-10}}$$

- Starting from equal amount of matter and anti-matter at the Big Bang, from  $\mathcal{CP}$ -violation in Standard Model we expect only  $\mathbf{10^{-18}}$
- In 1967 Sakharov formulated three prerequisites for baryogenesis. One of these is the combined violation of the charge and parity,  $\mathcal{CP}$ , symmetry.
- New  $\mathcal{CP}$  violating sources outside the realm of the SM are clearly needed to explain this discrepancy of eight orders of magnitude.
- They could manifest in EDMs of elementary particles



durchdringt sein zu  
ast alle Teilchen a  
e dabei. Der An  
n?" sind wir m  
ommer 2012  
duld und v  
gesuchte

td  
er  
t

## Wie symmetrisch ist die Welt?

Symmetrie, wie jeder sie kennt, hat mit Spiegeln oder Drehungen zu  
Physik können mehrere Teilchen zueinander symmetrisch  
auf wenige Eigenschaften gleichen. Indem  
gruppiert, lassen sich auch die Kräfte  
Symmetrie könnte damit der  
Manche Theorien  
Theorie

## Wo ist die Antimaterie geblieben?

Eigentlich müsste das Universum nur aus Energie bestehen un  
ansonsten leer sein – ohne Planeten, Galaxien oder überhaup  
Materie. Denn beim Urknall muss ebenso viel Materie wie Ant  
terier entstanden sein. Beide gleichen sich bis auf ihre Ladun  
verhalten sich auch fast genau gleich. Kommen sie sich zu na  
geschieht Erstaunliches: Sie vernichten sich, übrig bleibt nur  
Unser Universum besteht aber nun aus Materie – von Antima  
keine Spur. In Experimenten wird deshalb nach dem feinen U  
gesucht, aufgrund dessen Materie überlebt hat, Antim  
gesehen ist.

## und Zeit?

he Teilc

# Materie und Antimaterie – Fundamentale Symmetrien

Eigentlich dürfte es die Welt gar nicht geben. Denn im Urknall  
sind aus Energie zu gleichen Teilen Materie und Antimaterie  
entstanden, Teilchen und Antiteilchen. Wenn diese sich trafen,  
zerstrahlten sie wieder zu Energie. Die Erzeugung und Vernich  
tung von Materie und Antimaterie lässt sich noch in der Erdatmo  
sphäre beobachten. Wenn zum Beispiel ein Anti-Elektron auf ein  
mischen Strahlung, ein so genanntes Positron trifft, wird es in  
Lichtteilchen, wobei jedes Teilchen ein Gammaquant erzeugt.  
In einem Teilchenbeschleuniger kann man diese Prozesse auch

moderner physikalischer Forschung und ein wichtiges Arbeits  
gebiet der Teilchenphysik. Laufen Prozesse auf der  
Teilchenebene genauso ab, wenn man sie spie  
geln kann, mit Antiteilchen vertauscht oder die  
Zeit umkehrt? Die Physiker, die sich mit diesen  
Fragestellungen beschäftigen, glauben, dass die  
Symmetrien der Natur unter der Zeitumkehr  
verändert werden. Umso überraschender war  
es, dass beim radioaktiven Zerfall von  
Neutronen, das beim Beta-Zerfall ein Proton, ein Elektron und  
ein Antineutrino entstehen, die Teilchen nicht  
symmetrisch verteilt sind. Das ist ein Hinweis  
darauf, dass die Natur die Symmetrien der  
Physik nicht immer befolgt. Diese Verletzung  
der Symmetrien ist ein zentraler Bestandteil  
der modernen Teilchenphysik und hat  
wichtige Konsequenzen für das Verständnis  
der fundamentalen Kräfte der Natur.

## Forschen für die Zukunft Hadronen- und Kernphysik in Deutschland



STATUS UND PERSPEKTIVEN 2012

KHLK

TEILCHEN  
PHYSIK IN  
DEUTSCHLAND  
Status und Perspektiven 2012

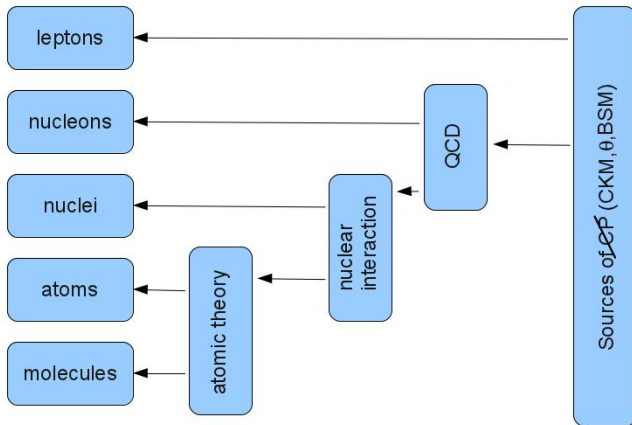


Erweiterung des Standardmodells der Teilchen- und Kernphysik. Hadronen- und Kernphysik, die auf Physik jenseits des Standardmodells abzielt, ist ein zentraler Bestandteil der modernen Teilchenphysik. Ein wichtiges Arbeitsgebiet der Teilchenphysik ist die Erforschung und die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern und Detektoren. Der größte Teilchenbeschleuniger der Welt, der Large Hadron Collider (LHC) am CERN, wurde im Jahr 2009 in Betrieb genommen und hat seitdem eine Reihe von Entdeckungen ermöglicht. Ein Ziel der Experimente am LHC ist es, die Eigenschaften des Higgs-Teilchens, das im Jahr 2012 entdeckt wurde, zu untersuchen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Forschung am LHC ist die Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells. Die Teilchenphysik ist ein zentraler Bestandteil der modernen Physik und hat eine Reihe von wichtigen Entdeckungen ermöglicht. Die Erforschung der Teilchenphysik ist ein wichtiges Arbeitsgebiet der modernen Physik und hat eine Reihe von wichtigen Entdeckungen ermöglicht.

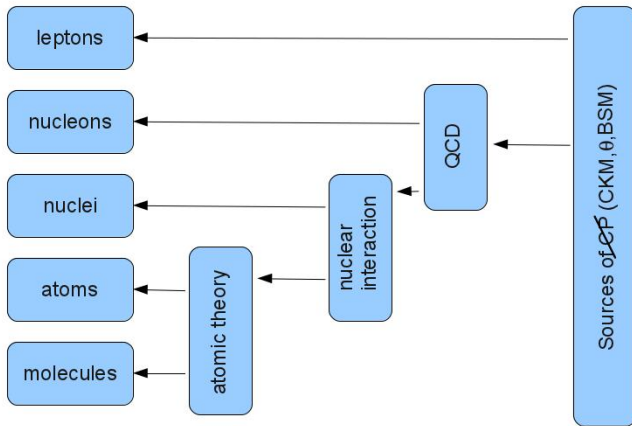
# Sources of $\mathcal{CP}$ violation

- Weak Interaction (unobservably small in EDMs)
- QCD  $\theta$  term (limit set by neutron EDM measurement)  
———— Part of Standard Model ————
- sources beyond SM

# Sources of $\mathcal{CP}$ violation



# Sources of $\mathcal{CP}$ violation



$\Rightarrow$  It is mandatory to measure EDM of many different particles to disentangle various sources of  $\mathcal{CP}$  violation.

# What do we know about (hadron) EDMs?

Particle/Atom	Current Limit/ $e \cdot \text{cm}$
Neutron	$< 3 \cdot 10^{-26}$
$^{199}\text{Hg}$	$< 3.1 \cdot 10^{-29}$
$\rightarrow$ Proton	$< 7.9 \cdot 10^{-25}$
Deuteron	?
$^3\text{He}$	?

- direct measurement only for neutron
- proton deduced from atomic EDM limit
- no measurement for deuteron (or other nuclei)

## What do we know about (hadron) EDMs?

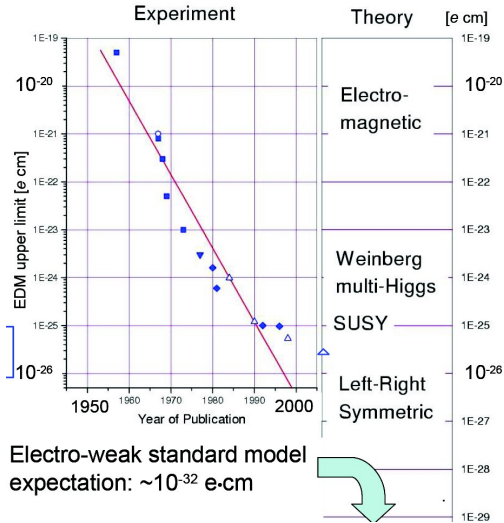
Particle/Atom	Current Limit/ $e \cdot \text{cm}$
Neutron	$< 3 \cdot 10^{-26}$
$^{199}\text{Hg}$	$< 3.1 \cdot 10^{-29}$
$\rightarrow$ Proton	$< 7.9 \cdot 10^{-25}$
Deuteron	?
$^3\text{He}$	?

- direct measurement only for neutron
- proton deduced from atomic EDM limit
- no measurement for deuteron (or other nuclei)

### GOAL of JEDI collaboration:

First measurement of deuteron,  $^3\text{He}$  EDM,  
first direct measurement of proton EDM ultimately with a  
precision of  $10^{-29} e \text{ cm}$

# History of Neutron EDM

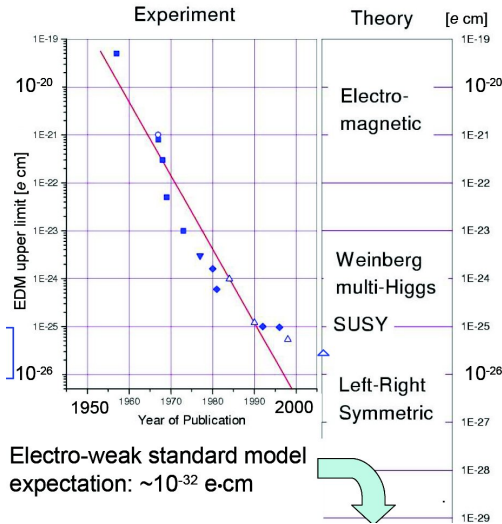


50 years of effort

Extensions of SM allow for large EDMs

from K. Kirch

# History of Neutron EDM



50 years of effort

Extensions of SM allow for large EDMs

**charged particle EDMs:**  
two (parasitic) measurements:

$$d_{\mu} < 1.9 \cdot 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm}$$

G. W. Bennett PRD **80**

(2009) 052008

$$d_{\lambda} = -3.0 \pm 7.4 \cdot 10^{-16} \text{ e}\cdot\text{cm}$$

L. Pondron et al. PRD, Vol.

23 (1981) 814

from K. Kirch



# Measurement of charged particle EDMs

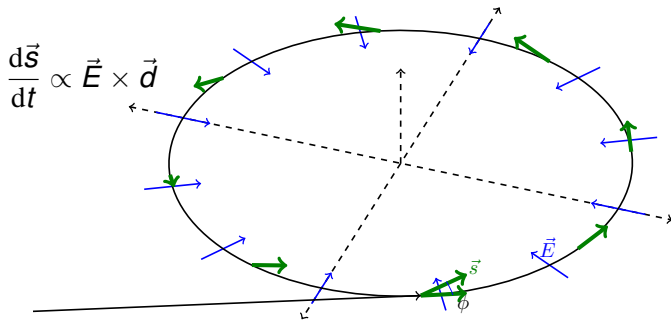
# Measurement of charged particle EDMs

## General Idea:

For **all** edm experiments (neutron, proton, atom, ...):

Interaction of  $\vec{d}$  with electric field  $\vec{E}$

For charged particles: apply electric field in a storage ring:



Wait for build-up of vertical polarization  $s_{\perp} \propto |d|$ , then determine  $s_{\perp}$  using polarimeter

In general:  $\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{s}$

## “Thomas-BMT” formula

$$\vec{\Omega} = \frac{e\hbar}{mc} [\textcolor{green}{G}\vec{B} + \left( \textcolor{green}{G} - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{v} \times \vec{E} + \frac{1}{2} \textcolor{red}{\eta} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})]$$

$$\textcolor{red}{\vec{d}} = \textcolor{red}{\eta} \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S}, \quad \vec{\mu} = 2(\textcolor{green}{G} + 1) \frac{e\hbar}{2m} \vec{S}, \quad \textcolor{green}{G} = \frac{g - 2}{2}, \quad g: g\text{-factor}$$

Several Options:

## “Thomas-BMT” formula

$$\vec{\Omega} = \frac{e\hbar}{mc} \left[ G\vec{B} + \left( G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{v} \times \vec{E} + \frac{1}{2}\eta(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \right]$$

$$\vec{d} = \eta \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S}, \quad \vec{\mu} = 2(G + 1) \frac{e\hbar}{2m} \vec{S}, \quad G = \frac{g - 2}{2}, \quad g: g\text{-factor}$$

Several Options:

### 1 Pure electric ring

with  $\left( G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) = 0$  , works only for  $G > 0$

# “Thomas-BMT” formula

$$\vec{\Omega} = \frac{e\hbar}{mc} \left[ G\vec{B} + \left( G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{v} \times \vec{E} + \frac{1}{2}\eta(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \right]$$

$$\vec{d} = \eta \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S}, \quad \vec{\mu} = 2(G + 1) \frac{e\hbar}{2m} \vec{S}, \quad G = \frac{g - 2}{2}, \quad g: g\text{-factor}$$

Several Options:

1 **Pure electric ring**

$$\text{with } \left( G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) = 0, \text{ works only for } G > 0$$

2 **Combined  $\vec{E}/\vec{B}$  ring**

$$G\vec{B} + \left( G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{v} \times \vec{E} = 0$$

# “Thomas-BMT” formula

$$\vec{\Omega} = \frac{e\hbar}{mc} [\textcolor{green}{G}\vec{B} + \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1}\right) \vec{v} \times \vec{E} + \frac{1}{2}\textcolor{red}{\eta}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})]$$

$$\textcolor{red}{d} = \textcolor{red}{\eta} \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S}, \quad \textcolor{green}{\mu} = 2(\textcolor{green}{G} + 1) \frac{e\hbar}{2m} \vec{S}, \quad \textcolor{green}{G} = \frac{g - 2}{2}, \quad g: g\text{-factor}$$

Several Options:

❶ **Pure electric ring**

$$\text{with } \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1}\right) = 0, \text{ works only for } G > 0$$

❷ **Combined  $\vec{E}/\vec{B}$  ring**

$$G\vec{B} + \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1}\right) \vec{v} \times \vec{E} = 0$$

❸ **Pure magnetic ring**

# Required field strength

	$G = \frac{g-2}{2}$	$p/\text{GeV}/c$	$E_R/\text{MV}/\text{m}$	$B_V/\text{T}$
proton	1.79	0.701	10	0
deuteron	-0.14	1.0	-4	0.16
$^3\text{He}$	-4.18	1.285	17	-0.05

Ring radius  $\approx 40\text{m}$

Smaller ring size possible if  $B_V \neq 0$  for proton

$$E = \frac{GBc\beta\gamma^2}{1 + G\beta^2\gamma^2}$$

# 1. Pure Electric Ring

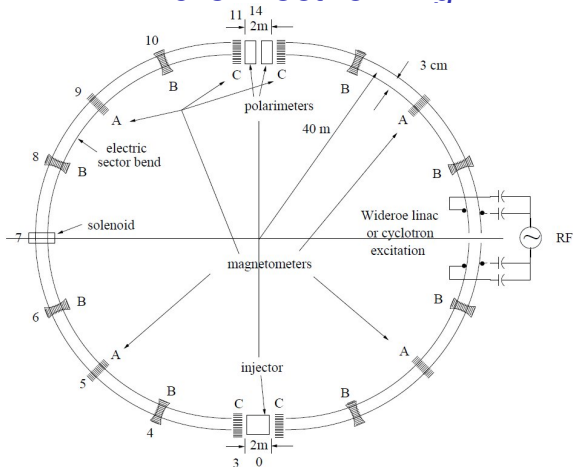


Figure 3: An all-electric storage ring lattice for measuring the electric dipole moment of the proton. Except for having longer straight sections and separated beam channels, the all-in-one lattice of Fig. 1 is patterned after this lattice. Quadrupole and sextupole families, and tunes and lattice functions of the all-in-one lattice of Fig. 1 will be quite close to those given for this lattice in reference[3]. The match will be even closer with magnetic field set to zero for proton operation.



## 2. Combined $\vec{E}/\vec{B}$ ring

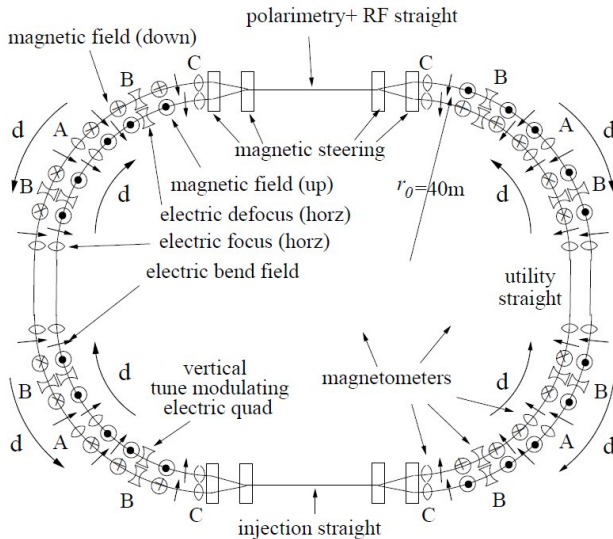


Figure 1: “All-In-One” lattice for measuring EDM’s of protons, deuterons, and helions.

### 3. Pure Magnetic Ring

Main advantage:

Experiment can be performed at the existing (upgraded) COSY (COoler SYnchrotron) in Jülich on a shorter time scale!



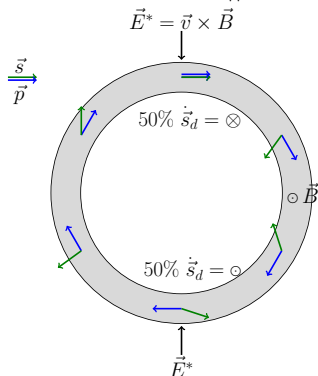
COSY provides (polarized ) protons and deuterons with  
 $p = 0.3 - 3.7 \text{ GeV}/c \Rightarrow$  **Ideal starting point**

### 3. Pure Magnetic Ring

$$\Omega = \frac{e\hbar}{mc} \left( G\vec{B} + \frac{1}{2}\eta\vec{v} \times \vec{B} \right)$$

Problem:

Due to precession caused by magnetic moment, 50% of time longitudinal polarization component is  $\parallel$  to momentum, 50% of the time it is anti- $\parallel$ .

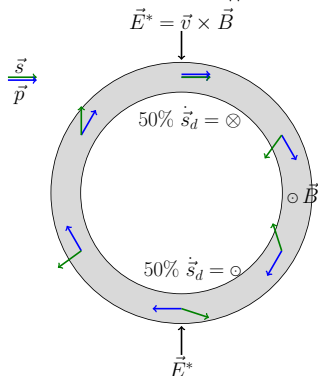


### 3. Pure Magnetic Ring

$$\Omega = \frac{e\hbar}{mc} \left( G\vec{B} + \frac{1}{2}\eta\vec{v} \times \vec{B} \right)$$

Problem:

Due to precession caused by magnetic moment, 50% of time longitudinal polarization component is  $\parallel$  to momentum, 50% of the time it is anti- $\parallel$ .



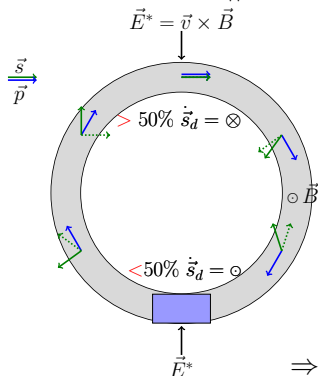
$E^*$  field in the particle rest frame  
tilts spin due to EDM up and down  
 $\Rightarrow$  **no net EDM effect**

### 3. Pure Magnetic Ring

$$\Omega = \frac{e\hbar}{mc} \left( \textcolor{green}{G}\vec{B} + \frac{1}{2}\textcolor{red}{\eta}\vec{v} \times \vec{B} \right)$$

Problem:

Due to precession caused by magnetic moment, 50% of time longitudinal polarization component is  $\parallel$  to momentum, 50% of the time it is anti- $\parallel$ .



$E^*$  field in the particle rest frame tilts spin due to EDM up and down  
 $\Rightarrow$  **no net EDM effect**



Use resonant “magic Wien-Filter” in ring ( $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$ ):

$E^* = 0 \rightarrow$  part. trajectory is not affected but

$B^* \neq 0 \rightarrow$  mag. mom. is influenced

$\Rightarrow$  **net EDM effect can be observed!**

# Summary of different options

		
1.) pure electric ring (BNL)	no $\vec{B}$ field needed	works only for $p$
2.) combined ring (Jülich)	works for $p, d, {}^3\text{He}, \dots$	both $\vec{E}$ and $\vec{B}$ required
3.) pure magnetic ring (Jülich)	existing (upgraded) COSY ring can be used , shorter time scale	lower sensitivity

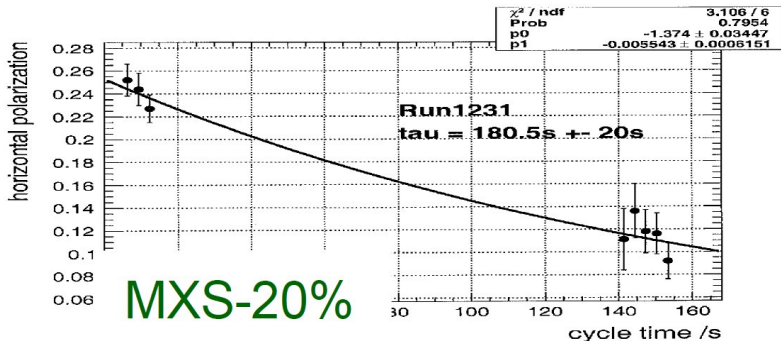
# Statistical Sensitivity

$$\sigma \approx \frac{\hbar}{\sqrt{NfT\tau_p}PEA}$$

$P$	beam polarization	0.8
$\tau_p$	Spin coherence time/s	1000
$E$	Electric field/MV/m	10
$A$	Analyzing Power	0.6
$N$	nb. of stored particles/cycle	$4 \times 10^7$
$f$	detection efficiency	0.005
$T$	running time per year/s	$10^7$

$\Rightarrow \sigma \approx 10^{-29} \text{ e}\cdot\text{cm/year}$  (for magnetic ring  $\approx 10^{-24} \text{ e}\cdot\text{cm/year}$ )  
Expected signal  $\approx 3 \text{ nrad/s}$  (for  $d = 10^{-29} \text{ e}\cdot\text{cm}$ )  
(BNL proposal)

# Results on Spin Coherence Time (SCT)



Spins decohere during storage time  
very preliminary results form Cosy run May 2012 using  
correction sextupole

⇒ SCT increase from a few s to  $\approx 200\text{s}$  already reached

(Ed. Stephenson)



# Systematics

One major source:

Radial  $B$  field mimics an EDM effect:

- Difficulty: even small radial magnetic field,  $B_r$  can mimic EDM effect if  $:\mu B_r \approx dE_r$
- Suppose  $d = 10^{-29} \text{ e}\cdot\text{cm}$  in a field of  $E = 10 \text{ MV/m}$
- This corresponds to a magnetic field:

$$B_r = \frac{dE_r}{\mu_N} = \frac{10^{-22} \text{ eV}}{3.1 \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}} \approx 3 \cdot 10^{-17} \text{ T}$$

(Earth Magnetic field  $\approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ )

Solution: Use two beams running clockwise and counter clockwise, separation of the two beams is sensitive to  $B_r$

# Jülich efforts to measure EDMs

# Stepwise approach of JEDI project in Jülich

JEDI = **J**ülich **E**lectric **D**ipole Moment **I**vestigations

- 1 Spin coherence time studies  
Systematic Error studies
- 2 COSY upgrade  
first direct measurement  
at  $10^{-24} e \cdot \text{cm}$
- 3 Build dedicated ring for  
 $p, d$  and  $^3\text{He}$
- 4 EDM measurement  
at  $10^{-29} e \cdot \text{cm}$

# Storage Ring EDM Efforts

Common R&D work

- Spin Coherence Time
- BPMs
- Spin Tracking
- Polarimetry
- ...

BNL

- all electric ring (p)



Jülich

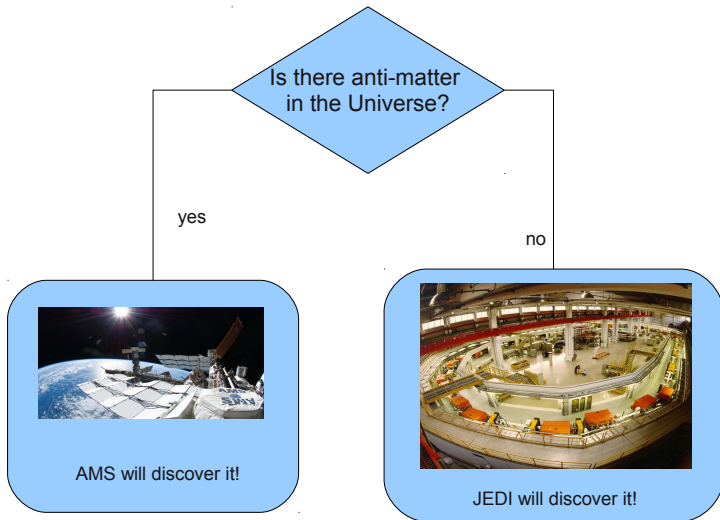
- first direct measurement with upgraded COSY
- all-in-one ring (p,d, $^3\text{He}$ )



# JARA FAME

JARA=Jülich Aachen Research Alliance

New section founded: FAME (=Forces and Matter Experiments)

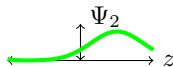
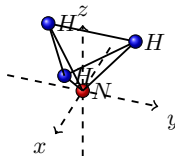
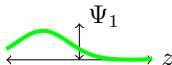
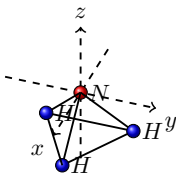


# Summary

- EDM of various hadrons species are of high interest to disentangle various sources of  $\mathcal{CP}$  violation searched for to explain matter - antimatter asymmetry in the Universe
- Up to now only direct measurement for neutron
- EDM of charged particles can be measured in storage rings
- Experimentally very challenging because effect is tiny
- Efforts at Brookhaven and Jülich to perform such measurements

# Spare

# EDM of molecules



ground state: mixture of  $\Psi_s = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_1 + \Psi_2) \quad P = +$

$\Psi_a = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_1 - \Psi_2) \quad P = -$

(almost) degenerated states with different parity:

$$|a\rangle = \alpha|\Psi_s\rangle + \beta|\Psi_a\rangle$$

(Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, Mécanique quantique)



# Main Challenges

- Spin Coherence Time (SCT)  $\approx 1000\text{s}$
- Polarimetry on 1 ppm level (ppm = part per million)
- Beam positioning  $\approx 10\text{nm}$  (relative between CW-CCW)
- Field Gradients  $\approx 10\text{MV/m}$

# Spin Coherence Time (SCT)

Usually we don't care about decoherence of spins



because polarisation with respect to invariant spin axis  $\vec{n}$  is the same.

Situation is different if  $\vec{S} \perp \vec{n}$



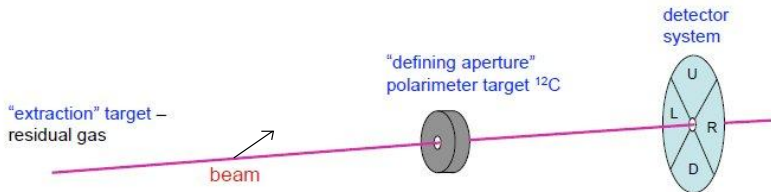
Longitudinal Polarization is lost.

# Polarimeter

Principle: Particles hit a target:

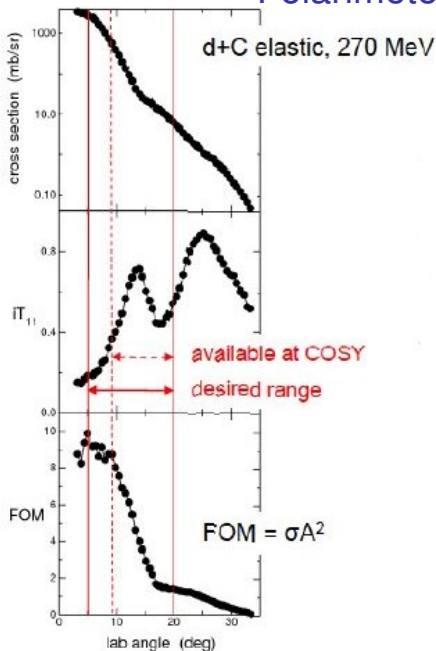
Left/Right asymmetry gives information on EDM

Up/Down asymmetry gives information on g-2



# Polarimeter

Y. Safou, PL B 549, 307 (2002)



Cross Section &  
Analyzing Power  
for deuterons

# Polarimeter

Available at COSY for tests:  
EDDA polarimeter

