



**Возможность проверки
сохранения СРТ-симметрии в
гравитационном взаимодействии
с помощью электрон-позитронных
пучков в накопительных кольцах**

Ю.Н. Обухов (ИТФ, Кёльн, Германия)

А.Я. Силенко (НИИЯП БГУ, Минск, Беларусь)

О.В. Теряев (БЛТФ ОИЯИ, Дубна, Россия)

**Всероссийское совещание по прецизионной физике и
фундаментальным физическим константам**

Дубна 2011

СОДЕРЖАНИЕ

- Спин в гравитационных полях и неинерциальных системах отсчета
- Первое ограничение на аномальный гравитомагнитный момент
- Сравнение движения спина частиц и античастиц
- Возможность проверки сохранения СРТ-симметрии в гравитационном взаимодействии
- Выводы

■ **A.J. Silenko and O.V. Teryaev.** *Semiclassical limit for Dirac particles interacting with a gravitational field.* Phys. Rev. D **71**, 064016 (2005).

Дираковские частицы в слабом гравитационном поле со статической метрикой. Доказано отсутствие дипольной спин-гравитационной связи, найдены уравнения движения

■ **A.J. Silenko and O.V. Teryaev.** *Equivalence principle and experimental tests of gravitational spin effects.* Phys. Rev. D **76**, 061101(R) (2007).

Экспериментальное тестирование взаимодействия спина с гравитационным полем

■ **Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev.** *Motion of Spin in the Gravitational Field of a Rotating Body.* Grav. Cosmol. **15**, 171 (2009).

■ **Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev.** *Spin dynamics in gravitational fields of rotating bodies and the equivalence principle.* Phys. Rev. D **80**, 064044 (2009).

■ **Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev.** *Spin in stationary gravitational fields and rotating frames.* AIP Conf. Proc. **1205**, 112 (2010).

Дираковские частицы в слабом гравитационном поле со стационарной метрикой. Найдены уравнения движения, в том числе для релятивистского эффекта Лензе-Тирринга

■ **Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev.** *Dirac fermions in strong gravitational fields.* Phys. Rev. D **84**, 024025 (2011).

Дираковские частицы в произвольном сильном гравитационном поле. Использована пространственно изотропная метрика. Доказана эквивалентность взаимодействия спина с электромагнитными и гравитационными полями. Найдены уравнения движения



Спин в гравитационных полях и неинерциальных системах отсчета

- The Equivalence Principle manifests in the general equations of motion of classical particles

$$\frac{Du^{\mu}}{d\tau} = 0$$

- and their spins:

$$\frac{DS^{\mu}}{d\tau} = 0$$

- Motion of gyroscopes and particle spins in curved spacetimes is the same - Classical and quantum theories are in the best compliance!

Влияние спина на траекторию частиц приводит к нарушению принципа эквивалентности

Equivalence principle and experimental tests of gravitational spin effects

Alexander J. Silenko*

Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk 220080, Belarus

Oleg V. Teryaev†

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

(Received 27 December 2006; revised manuscript received 15 March 2007; published 28 September 2007)

The experimental tests of the Kobzarev-Okun relations are lacking and are therefore of great importance. The problem of the existence of the dipole spin-gravity coupling in a static gravitational field has been discussed for a long time (see Refs. [4,5,8] and references therein). Evidently, this coupling given in the form of $\mathbf{S} \cdot \mathbf{g}$ ($\mathbf{g}$ is the acceleration) contradicts the theory [4,6] and violates both the CP invariance and the relation predicting the absence of the gravitoelectric dipole moment [1].

Существование гравитозлектрического дипольного момента нарушает соотношения Кобзарева-Окуня и принцип эквивалентности

■ Kobzarev – Okun relations

I.Yu. Kobzarev, L.B. Okun, Gravitational Interaction of Fermions.
ЖЭТФ **43**, 1904 (1962) [Sov. Phys. JETP **16**, 1343 (1963)].

These relations define form factors at zero momentum transfer

$$f_1 = g_1 = 1$$

gravitational and inertial masses are equal

form factors

$$f_2 = 1$$

anomalous gravitomagnetic
moment is equal to zero

$$f_3 = 0$$

gravitoelectric dipole
moment is equal to zero

Classical and quantum theories are in the best
compliance!



Первое ограничение на аномальный гравитомagnetный момент

■ The absence of the anomalous gravitomagnetic moment has been extracted from experimental data:

■ B.J. Venema, P.K. Majumder, S.K. Lamoreaux, B.R. Heckel, and E.N. Fortson, Phys. Rev. Lett. **68**, 135 (1992).

■ by the analysis in A.J. Silenko and O.V. Teryaev, Phys. Rev. D **76**, 061101(R) (2007).

$$\left| \chi(^{201}\text{Hg}) + 0.369\chi(^{199}\text{Hg}) \right| < 0.042$$

(95% C.L.)

Let us reconsider the earlier results [15] as restrictions on the AGM rather than on the dipole spin-gravity coupling. Recall that the latter violates not only the Kobzarev-Okun relation for the gravitoelectric dipole moment but also CP invariance, and may be neglected. The spin-dependent Hamiltonian for atoms in S states may be obtained by the modification of the coefficient of the term defining the spin-rotation coupling and has the form

$$\mathcal{H} = -g\mu_N \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} - \zeta \hbar \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{S}, \quad \zeta = 1 + \chi, \quad (7)$$

where g is the nuclear g factor, μ_N is the nuclear magneton, and χ is the AGM. The measured ratio of energy differences in neighboring Zeeman levels, $R = |\nu_2|/|\nu_1|$, depends on the AGMs. The difference of these ratios for two opposite directions of the magnetic field is given by

$$R_+ - R_- = \pm \frac{2f \cos\theta}{|\nu_1|} (\zeta_2 - \mathcal{G}\zeta_1), \quad \mathcal{G} = \frac{g_2}{g_1}, \quad (8)$$

where θ is the angle between the directions of the magnetic field and the Earth's rotation axis, $f = \omega/(2\pi) = 11.6 \mu\text{Hz}$ is the Earth's rotation frequency, and $|\nu_1|$ is the Zeeman frequency for atoms of the first kind. The experimental conditions of [15] for ^{199}Hg and ^{201}Hg atoms correspond to $\theta \approx 0$, $\mathcal{G} = -0.369139$. Reconsidering the bound for $R_+ - R_-$ obtained in that reference, we drop the contribution of the CP -violating gravitoelectric dipole moment, but account for the possibility for nonzero AGM, which makes a difference between (8) and their Eq. (4). As a result, their data lead to the following restriction:

$$|\chi(^{201}\text{Hg}) + 0.369\chi(^{199}\text{Hg})| < 0.042 \quad (95\% \text{ C.L.}).$$

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 68

13 JANUARY 1992

NUMBER 2

Search for a Coupling of the Earth's Gravitational Field to Nuclear Spins in Atomic Mercury

B. J. Venema, P. K. Majumder, S. K. Lamoreaux, B. R. Heckel, and E. N. Fortson

Physics Department, FM-15, University of Washington, Seattle, Washington 98195

(Received 25 September 1991)

We have measured the ratio of nuclear spin-precession frequencies of ^{199}Hg and ^{201}Hg atoms for two orientations of magnetic field relative to the Earth's gravitational field. We find that the spin-dependent component of gravitational energy is less than 2.2×10^{-21} eV, a substantial improvement over previous limits. Our result provides a test of the equivalence principle for nuclear spins, and sets limits on the magnitude of possible scalar-pseudoscalar interactions which would couple to the spins.

We report here the results of an experimental search for an interaction of the form $\sigma \cdot \hat{r}$, where σ is the spin operator for the nucleus of a mercury atom, and $\hat{r}$ is a vector pointing towards the center of the Earth. Such an interaction violates both parity and time-reversal symmetry and could result, for example, from a breakdown of the equivalence principle for spin-polarized matter. It could also arise as a consequence of a new macroscopic-range interaction.

Полученные экспериментальные данные позволяют установить ограничение не только на гравитоэлектрический дипольный, но и на аномальный гравитомагнитный моменты

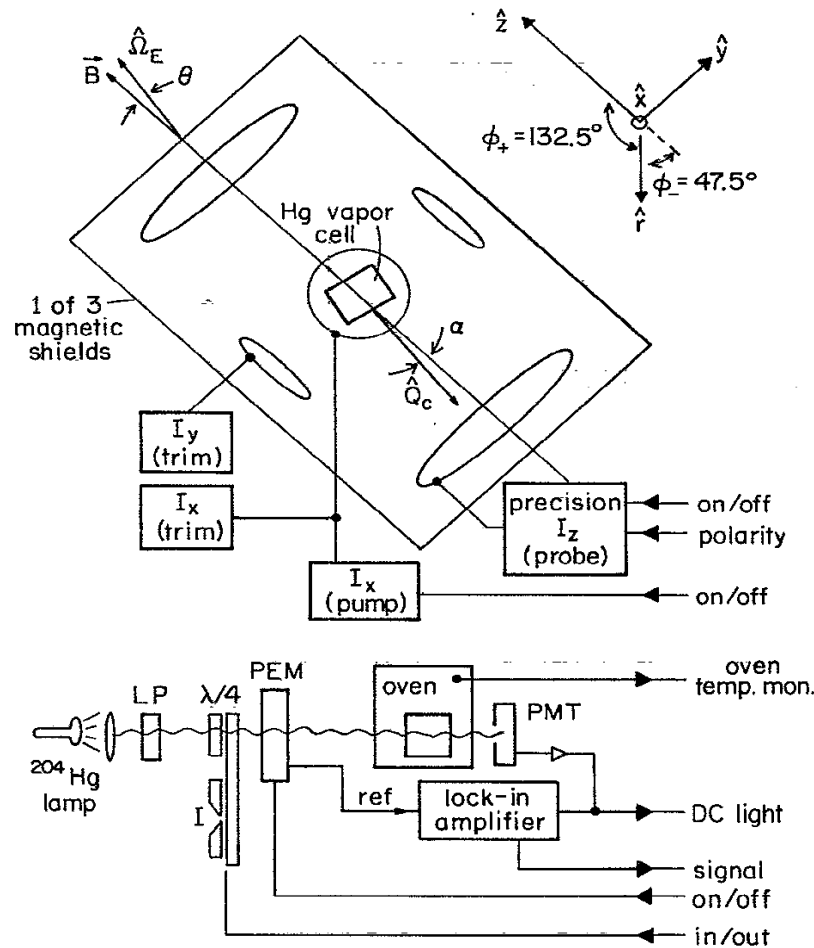


FIG. 1. Schematic of the apparatus. Abbreviations are defined as follows: LP, linear polarizer; $\lambda/4$, quarter-wave plate; I, adjustable iris; PMT, photomultiplier tube; PEM, photoelastic modulator. Arrows on the right-hand side of the figure indicate control lines from, and data lines into the computer (not shown). I_x and I_y "trim" current sources are designed to cancel residual transverse magnetic fields in the vicinity of the cell. The I_x "pump" supply is disconnected during the precession phase of the experiment, while a highly stable current supply, I_z , is turned on with a given polarity. $\cos\phi_+$ and $\cos\phi_-$ represent the projection of the unit vector $\hat{r}$ along the quantization axis for these two probe field polarities. $\hat{\Omega}_E$ refers to the axis of the Earth's rotation while $\hat{Q}_C$ is the effective cell quadrupole axis.



Сравнение движения спина частиц и античастиц

The above-mentioned experiments do not solve the important problem of the equivalence of gravitational effects for particles and antiparticles which may be tested in storage rings. The corresponding equation of spin motion in a cylindrical coordinate system [25] with the addition of a gravitational correction is given by

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{S}, \quad \boldsymbol{\omega}_a = \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}} + \boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\Omega}_g, \quad (9)$$


 $\boldsymbol{\Omega}_g \perp \boldsymbol{\Omega}$

where $\boldsymbol{\Omega}$ and $\boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}}$ are angular velocities of spin rotation caused by magnetic and electric dipole moments, respectively. The (pseudo)vectors $\boldsymbol{\Omega}$ and $\boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}}$ are oppositely directed for particles and antiparticles. The gravitational corrections to the angular velocity of spin rotation in Cartesian and cylindrical coordinates are $-\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\Omega}_g$ and $\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\Omega}_g$, respectively.

A.J. Silenko and O.V. Teryaev, Phys. Rev. D **76**, 061101(R) (2007).



Возможность проверки сохранения СРТ-симметрии в гравитационном взаимодействии

Equation of spin motion in storage rings in the cylindrical coordinate system

Alexander J. Silenko

Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University, 220080 Minsk, Belarus

(Received 23 January 2004; revised manuscript received 14 December 2004; published 29 March 2006)

After neglecting the small terms, the equation for the angular velocity of the $g - 2$ precession with allowance for the EDM takes the form

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}} = & -\frac{e}{m} \left\{ a\mathbf{B} - \frac{a\gamma}{\gamma + 1} \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{B}) + \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - a \right) (\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}) \right. \\ & \left. + \frac{1}{\gamma} \left[\mathbf{B}_{\parallel} - \frac{1}{\beta^2} (\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E})_{\parallel} \right] + \frac{\eta}{2} (\mathbf{E} + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B}) \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Без учета
вращения
Земли

Магический γ -фактор равен $\gamma_m = \sqrt{(1+a)/a}$, $a = (g - 2)/2$.

При обычной схеме эксперимента с вертикальным магнитным полем в качестве основного и электрической фокусировкой определяемая магнитным полем частота вращения оказывается значительно больше частоты вращения Земли. Необходимо измерять малую разность больших частот прецессии спина электронов и позитронов в магнитном поле.

Равенство g -факторов электрона и позитрона:

R. S. Van Dyck, Jr., P. B. Schwinberg, and H. G. Dehmelt,
Phys. Rev. Lett. **59**, 26 (1987).

H. Dehmelt, R. Mittleman, R. S. Van Dyck, Jr., and P. Schwinberg,
Phys. Rev. Lett. **83**, 4694 (1999).

$\Omega + \Omega_{EDM}$ имеет разные знаки для частиц и античастиц (e^+ и e^-)

ω имеет один и тот же знак для частиц и античастиц (e^+ и e^-)

$$\omega_a(e^+) \neq \omega_a(e^-)!$$

Различие частот прецессии спина частиц и античастиц (электронов и позитронов) во вращающейся системе отсчета однозначно свидетельствовало бы о нарушении или СРТ-симметрии, или эквивалентности гравитационного поля и неинерциальных систем отсчета, которая недавно была подтверждена экспериментальным наблюдением эффекта Лензе-Тирринга



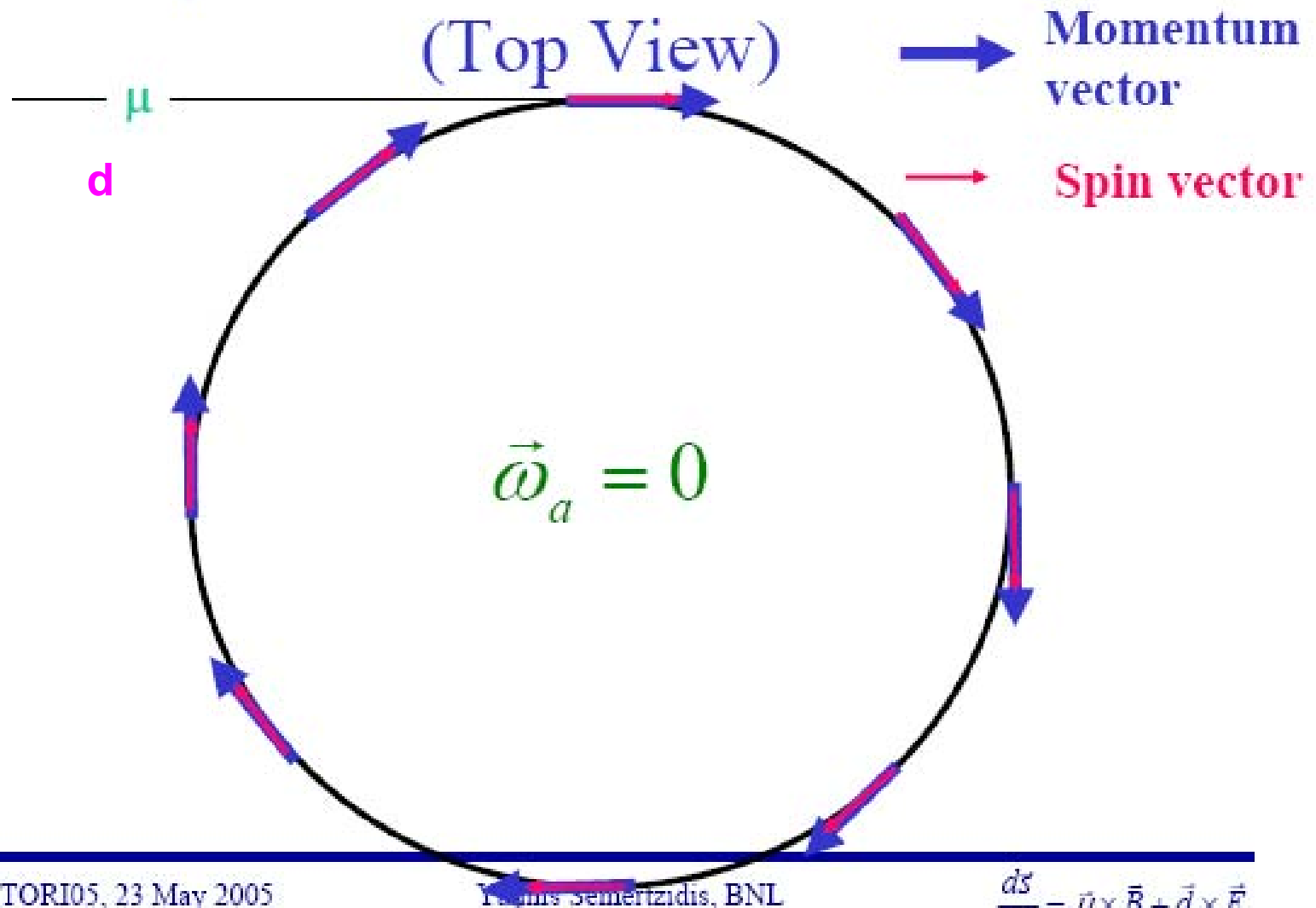
**Новое экспериментальное предложение
базируется на новых разработках,
сделанных в рамках подготовки ЭДМ-
эксперимента в накопительных кольцах**

Метод замораживания спина:

**Радиальное электрическое поле в
качестве основного**

Storage Ring Electric Dipole Moment Collaboration

Spin Precession in EDM Ring (Top View)



Spin Coherence Time

$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left(a - \left(\frac{m}{p} \right)^2 \right) \vec{\beta} \times \vec{E}$$

$$d\omega_a \approx \left(\frac{dP}{P} \right)^2 \times 10^7 \text{ rad/s}$$

- Due to beam momentum spread dP/P there is spread in the horizontal spin precession.
- The linear part of the spread is canceled by using RF-cavity. The quadratic part by using compensating sextupole magnets.
- We expect to demonstrate (with simulation) $\sim 10^3\text{s}$ by end of 2010 using realistic fields.

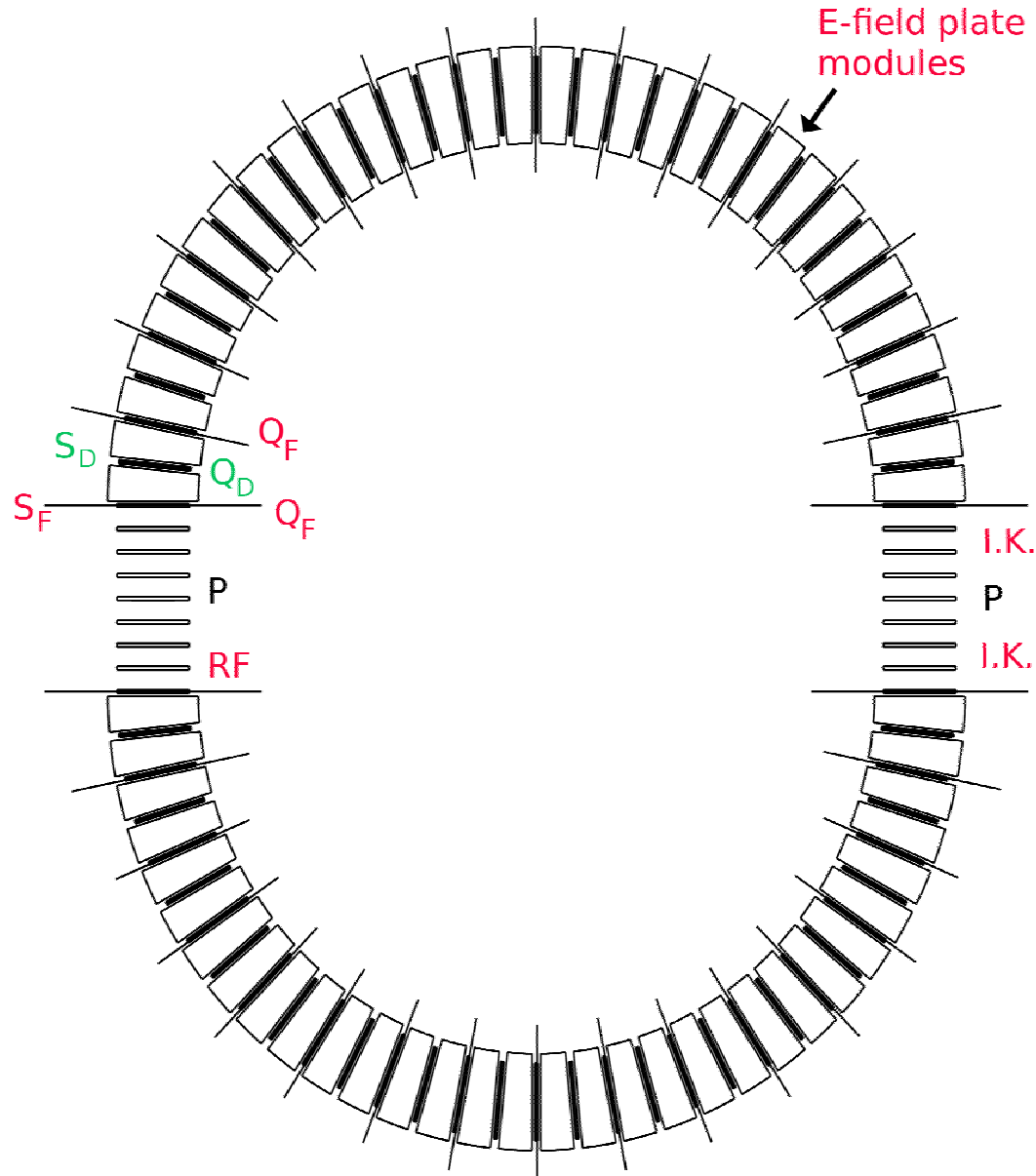
Cancelling the 2nd order effects with sextupoles

$$\Delta\omega_a \approx a_x A_x^2 + a_y A_y^2 + a_p \left(\frac{dP}{P} \right)_{\text{max}}^2$$

- Strategically placed sextupoles around the ring will cancel the effect from dp/p, horizontal and vertical betatron oscillations. Method applied at Novosibirsk. Our case is analyzed by Y. Orlov who estimated SCT of 10^3s should be possible.

**A possible magic proton ring lattice:
~240m circumference with ES-separators.**

Storage ring EDM experiment.
A Magic Proton Ring for $10^{-29}\text{e}\cdot\text{cm}$.
Yannis K. Semertzidis



I.K.: Injection Kickers
P: Polarimeters
RF: RF-system
S: Sextupoles
Q: Quadrupoles
BPMs: ~70 Beam
Position Monitors

Magic Proton EDM ring includes:

- Injection
- Bunch capture with RF
- Vertical to horizontal spin precession
- Slow extraction onto an internal target for polarization monitoring
- Use RF-feedback from polarimeter to keep spin longitudinal

Для протонов время когерентности спина $\sim 10^3$ с
является вполне достижимым

Для электронов и позитронов результат
должен быть не хуже

За время 10^3 с спин повернется на угол 4°

Использование метода замораживания спина
позволяет практически исключить
электромагнитное воздействие на спин

Для e^+, e^- $\gamma_m = 29.38$, $E_m \approx 15$ MeV, $a = 0.001\ 159\ 652\ 181$.

Выводы

- Отсутствие аномального гравитомagnetного и гравитоэлектрического дипольного моментов может быть подтверждено экспериментально
- Спины частиц и античастиц вращаются в противоположных направлениях в электромагнитных полях и в одинаковых направлениях – в гравитационных полях и в неинерциальных системах отсчета (при условии сохранения CPT-симметрии)
- Сохранение CPT-симметрии в гравитационном взаимодействии с достаточно высокой точностью может быть проверено для пучков электронов и позитронов в накопительных кольцах при использовании метода замораживания спина



Спасибо за внимание