

Test niezmienniczości Lorentza przy pomocy ultra zimnych neutronów

Kazimierz Bodek

Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego

Uniwersytet Jagielloński

Abstrakt

W referacie omówiony będzie eksperyment, w którym porównano pomiary czasu wykonywane przy pomocy dwóch zegarów: atomowego, wykorzystującego atomy ^{199}Hg oraz zegara opartego o ultra zimne neutrony. Poszukiwano dobowej modulacji sygnału, która świadczyłaby o istnieniu kosmicznej anizotropii łamiącej niezmienniczość Lorentza. Otrzymano pierwsze bezpośrednie ograniczenie na wielkość takich egzotycznych efektów dla swobodnych neutronów oraz określono górną granicę na wartość grawitacyjnego momentu dipolowego neutronu w jego oddziaływaniu ze Słońcem.



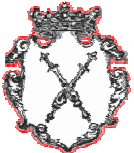
Plan

- Dlaczego badać swobodny neutron?
- Neutron a fundamentalne zagadnienia fizyki
- Niezmienniczość Lorentza i symetrie dyskretne C, P, T
- Sprzężenie spinu i grawitacji
- Elektryczny moment dipolowy (EDM) neutronu
- Eksperymenty porównujące wskazania zegarów
- Zegary oparte na precesji spinu UCN i atomów ^{199}Hg
- Poszukiwanie modulacji dobowych w stosunku częstości precesji
- Wyniki
- Podsumowanie i perspektywy



Dlaczego badać swobodny neutron?

- Główny cel fizyki cząstek elementarnych:
stworzyć spójny obraz fundamentalnych oddziaływań w Naturze
- Front wysokich energii:
 - Operuje w skali TeV (10^{12} eV)
⇒ badania drugiej (s, c, μ , ν_μ) i trzeciej (b, t, τ , ν_τ) rodziny cząstek
- Front niskich energii (neutrony, atomy):
 - Operuje w skali neV (10^{-9} eV)
⇒ badania pierwszej (u, d, e, ν_e) rodziny cząstek
 - Osiągana czułość może budzić respekt:
 - Energia: $\Delta E/E \sim 10^{-11} \div 10^{-13}$ ($\Delta E \sim 10^{-21} \div 10^{-23}$ eV)
 - Pęd: $\Delta p/p \sim 10^{-10} \div 10^{-11}$
 - Polaryzacja spinowa: $\Delta s/s \sim 10^{-7}$
- **Fundamentalna fizyka neutronu dostarcza ponad 20 obserwacji bogatych w informacje trudno dostępne (lub w ogóle niedostępne) w innych sektorach fizyki cząstek**



Neutron a fizyka oddziaływań elementarnych

- **Rozpad beta**

- czas życia

- korelacje kierunkowe

} Unitarność CKM, nukleogeneza



- **Elektryczny Moment Dipolowy**



- Badanie symetrii T-CP („okno” na fizykę poza MS)

- **Oscylacje n - n_{bar}**

- Niezachowanie liczby barionowej

- **Oscylacje n - n' (neutron \leftrightarrow neutron lustrzany)**



- Mieszanie stanów materii zwykłej z hipotetyczną materią lustrzaną

- **Interferometria neutronowa**

- Faza topologiczna Berry'ego

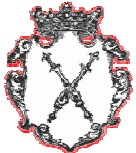
- Stany ściśnięte (Aharonov-Bohm, Aharonov-Casher)

- **Neutrony a grawitacja**

- Skwantowane stany energii neutronu w polu grawitacyjnym Ziemi

- Dodatkowe wymiary

- Sprzężenie spin-grawitacja



Łamanie symetrii Lorentza

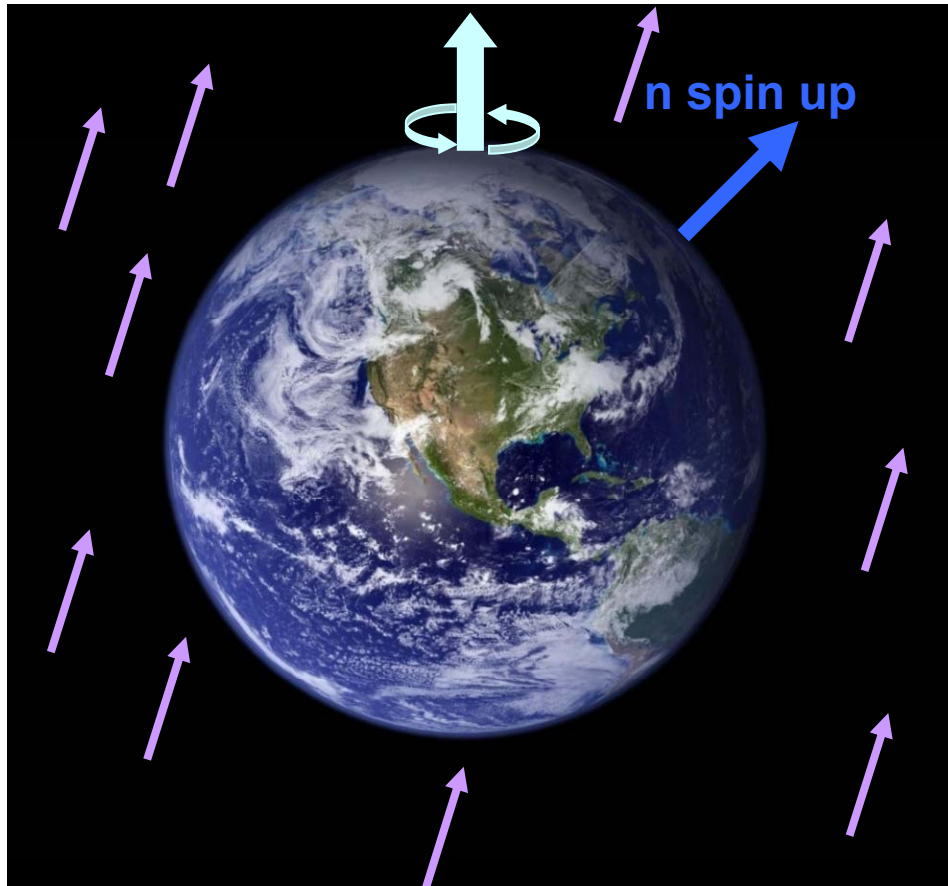
- Symetria Lorentza jest fundamentalną właściwością opisu przyrody zarówno w sektorze cząstek elementarnych (SM), jak i w **Ogólnej Teorii Względności (GR)**
- SM i GR są (prawdopodobnie!) uproszczeniami w granicy niskich energii fundamentalnej „Teorii Wszystkiego” (TW) obowiązującej w skali Plancka
- SM i GR są lorenzowsko niezmiennicze (LI)
- Nawet jeśli TW jest również LI, to mechanizm spontanicznego łamania symetrii może prowadzić do mierzalnych odstępstw od SM i GR
- W praktyce oznacza to, że Wszechświat wypełnia (dodatkowo) pole \mathbf{b} (*cosmic anizotropy field*), z którym sprzęga się spin

$$V = \boldsymbol{\sigma} \cdot \tilde{\mathbf{b}}$$

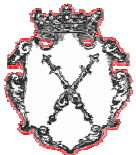


Łamanie symetrii Lorentza

- Może on być wykryty jako zaburzenie precesji wirujących ciał



$$f_n = \frac{\gamma_n}{2\pi} B + \frac{2}{h} \tilde{\mathbf{b}} \cdot \frac{\mathbf{B}}{B}$$



Łamanie symetrii C,P,T w grawitacji

- Istnieje szereg rozszerzeń SM łamiących LI oraz CPT [D. Colladay, V.A. Kostelecky, PRD 55, 6750 (1997); V.A. Kostelecky, R. Potting, PRD 51, 3923 (1995)]
- **OBSERWACJA**: im słabsze oddziaływanie, tym więcej łamanych jest symetrii dyskretnych [J. Leitner, S. Okubo, PR 136, B1542 (1964)]
- **WNIOSEK**: w oddziaływaniu grawitacyjnym (na poziomie kwantowym) powinny być łamane dyskretne symetrie związane z operatorami P, C, T lub ich kombinacjami
- Np., żeby wykryć naruszenie symetrii należy użyć odpowiedniej obserwacji: P – pseudoskalar, T – nieparzysta funkcja operatorów spinu i pędu
- W najniższym rzędzie, w 2-ciałowym potencjale grawitacyjnym powinny się znaleźć człony:

$$U_0(r) = Gm_1m_2/r, \quad (\boldsymbol{\sigma}_1 \pm \boldsymbol{\sigma}_2) \cdot \mathbf{r} U_1(r), \quad (\boldsymbol{\sigma}_1 \times \boldsymbol{\sigma}_2) \cdot \mathbf{r} U_2(r)$$



Łamanie symetrii C,P,T w grawitacji

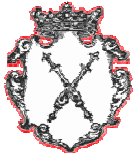
- Dla cząstek elementarnych Gm_1m_2 jest dramatycznie mały, więc
 - $m_2 \rightarrow M$ (masa Ziemi, Słońca, etc.)
 - \mathbf{r} – wektor jednostkowy od m_1 do środka ciała o masie M
 - Na powierzchni Ziemi $r = R$

$$U(R) = U_0 [1 + A\boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{r}}] + c$$

- Najogólniejsza postać potencjału grawitacyjnego, który nie zachowuje C, P i T [parametryzacja [Hari Dass, PRL 36, 393 \(1976\)](#)]

$$U(R) = \alpha_1 \frac{GM}{c} \frac{\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r}}{r^3} + \alpha_2 \frac{GM}{c} \frac{\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{v}}{r^2} + \alpha_3 \frac{GM}{c} \mu \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{r^2}$$

- Rozszczepienie poziomu energetycznego cząstki (i przejścia) w polu grawitacyjnym w zależności od orientacji spinu
- Zaburzenie precesji Larmora spinu cząstek w rytmie dobowym



Łamanie symetrii Lorentza i C,P,T w grawitacji

- Spodziewane odstępstwa są bardzo małe (na poziomie 10^{-20} eV) – należy użyć najdokładniejszych metod
- Najdokładniej umiemy mierzyć częstotliwość: $\Delta f/f \sim 10^{-16}$ (rekord!)
- **WNIOSEK**: porównanie wskazań różnych ale „współmiejscowych” (*co-location*) zegarów zmieniających w kontrolowany sposób swoją orientację w przestrzeni
- Najdokładniejsze zegary wykorzystują sygnały elektromagnetyczne związane z przejściami Zeemana i struktury nadsubtelnej.



EDM cząstek elementarnych

- Niezdegenerowana cząstka o spinie $\frac{1}{2}$:
 - Hamiltoniany dla oddziaływań z polami magnetycznym i elektrycznym:

$$H_M = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = -\boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} \quad H_E = -\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} = -d \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$$

- d jest **T**-nieparzyste i **P**-nieparzyste
 - $d \neq 0 \Rightarrow$ **T** jest łamane i **CP** jest łamane (poprzez twierdzenie **CPT**)
- Przewidywania SM dla d :

$$d_e \simeq 10^{-40} e \cdot \text{cm} \quad d_n \simeq 10^{-31} e \cdot \text{cm}$$

- EDM jest idealnym narzędziem do poszukiwania źródeł łamania T i CP, które nie mieszczą się w SM



EDM neutronu

Obecna granica:

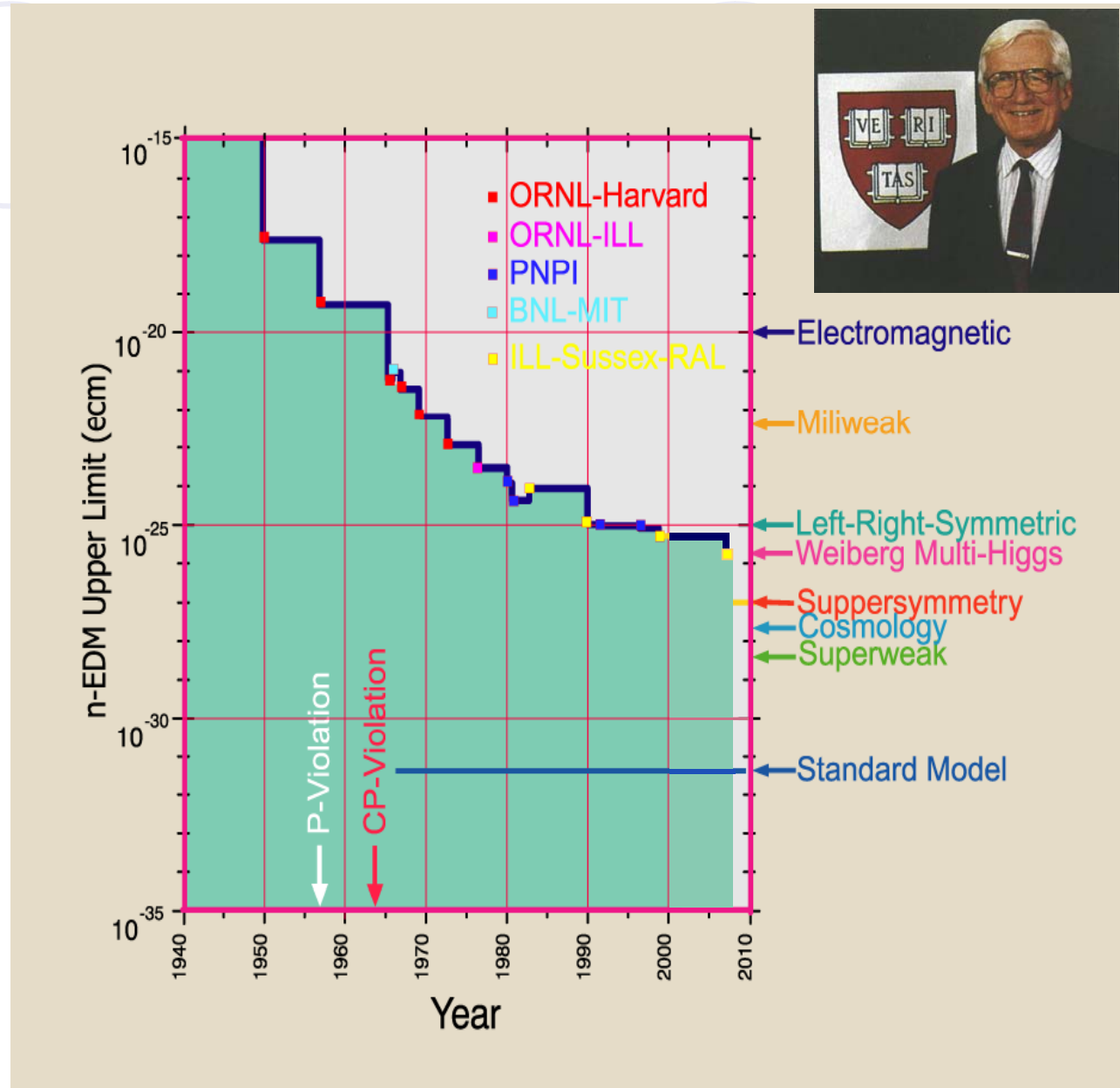
$$d_n < 3 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$$

P.G.Harris et al.,
PRL82(1999)804

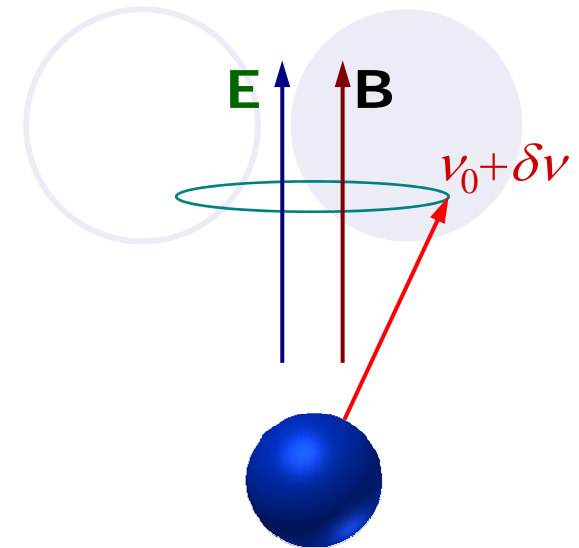
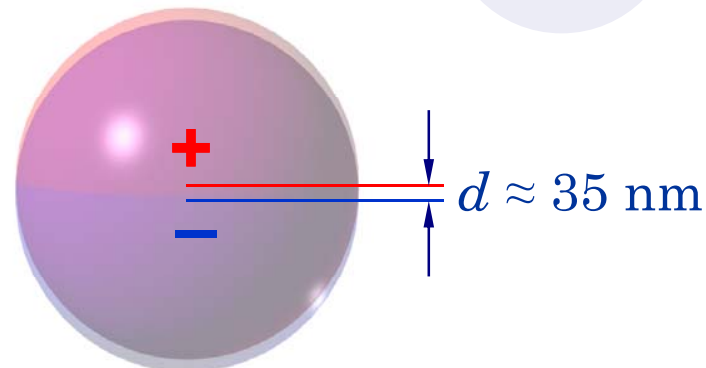
C.A.Baker et al.,
PRL97(2006)0609055

Antycypowana
czułość w nowych
projektach:

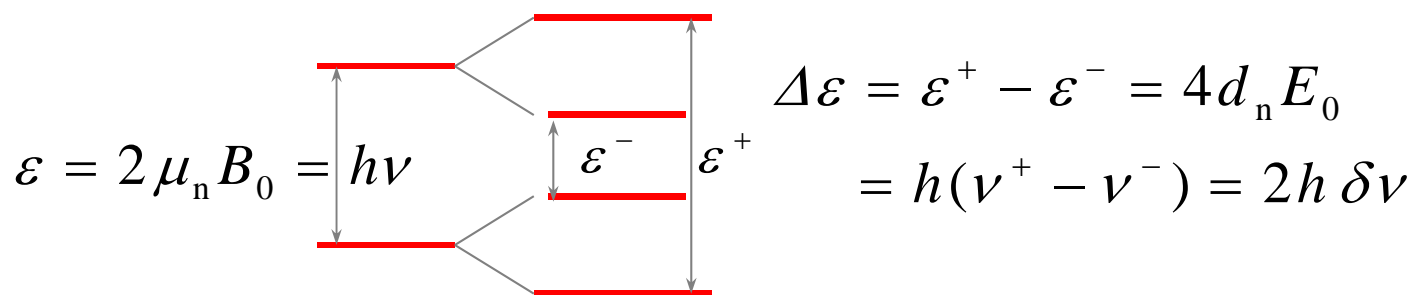
$$\Delta d_n \approx 2 \times 10^{-28} e \cdot \text{cm}$$



Pomiar EDM neutronu

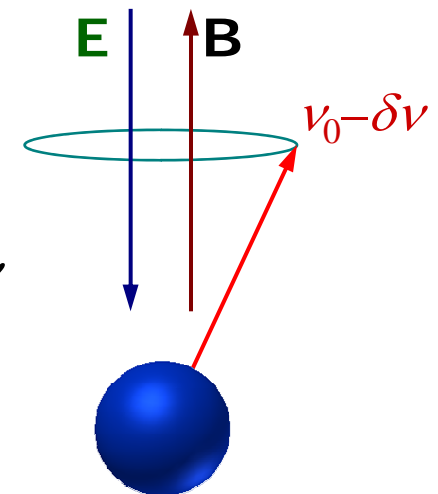


- Zmierzyć rozszczepienie poziomów energii dla pól **B**, **E** zorientowanych równoległe i antyrównoległe



$$d_n = 2 \times 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}, \quad E_0 = 15 \text{ kV/cm}$$

$$\Rightarrow \Delta \varepsilon = 1.2 \times 10^{-23} \text{ eV}$$



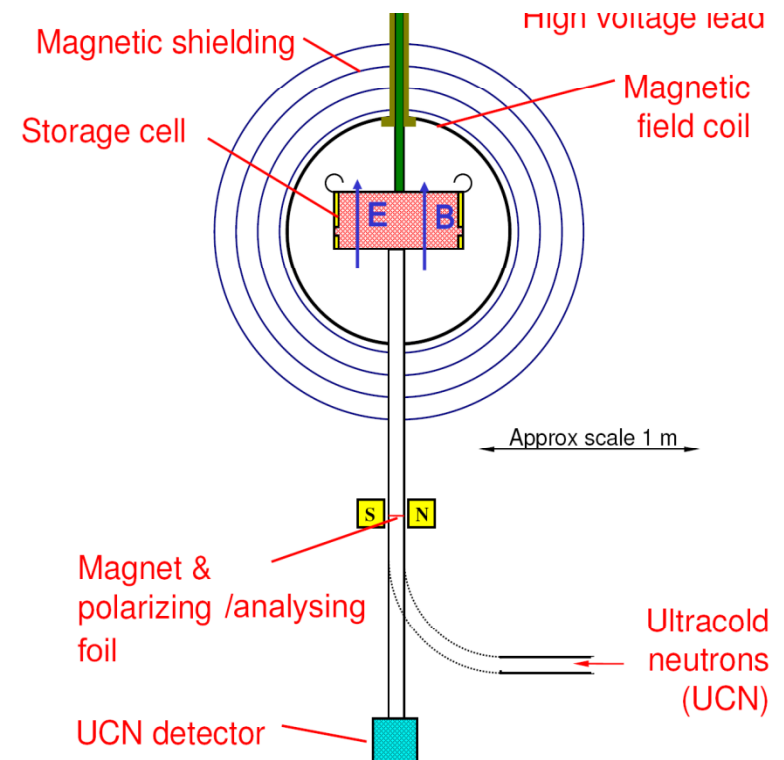
Pomiar EDM neutronu

RAL-Sussex-ILL



- „Współmiejscowe” zegary:
 - UCN w komorze z kwarcu (w próżni)
 - Magnetometr ^{199}Hg w tej samej komorze, co UCN
- O jednym z nich (^{199}Hg) wiemy z niezależnego źródła, że jest nieczuły na poszukiwany efekt
- Obecnie najlepszy rezultat:

$$d_n < 2.9 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$$



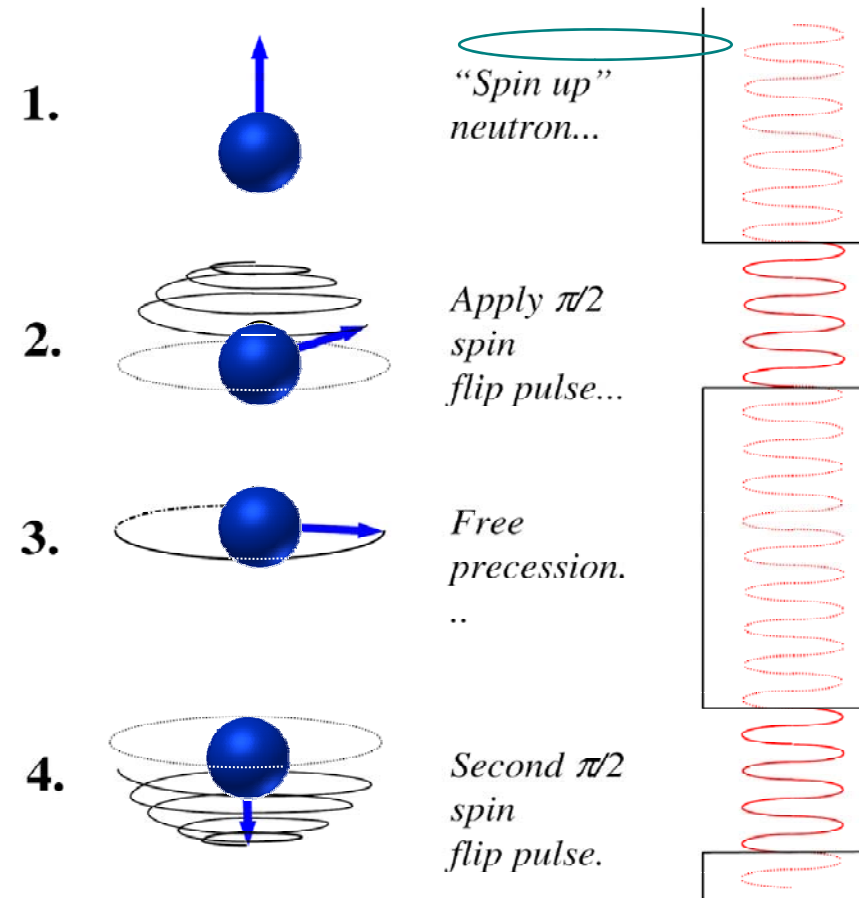
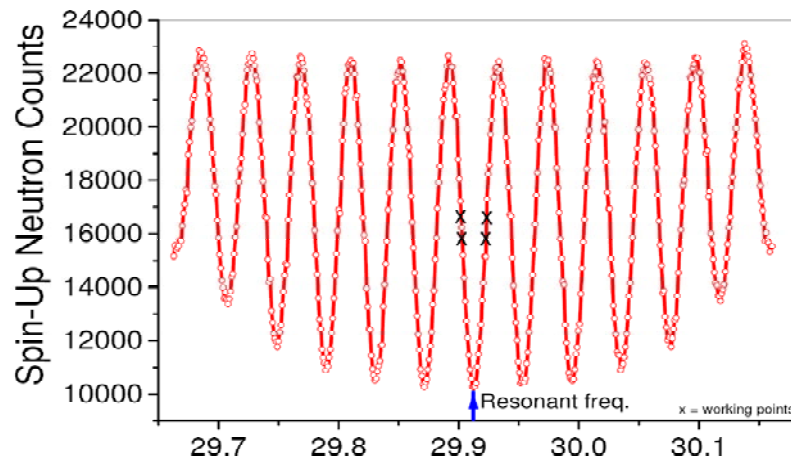
C.A.Baker et al., PRL 97 (2006) 0609055



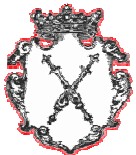
Pomiar EDM neutronu

- Metoda Ramsey'a rozdzielonych pól oscylujących
- Prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy poziomami Zeemana:
- Dla $T \gg \tau$:

$$W(\omega_0 - \omega, T, \delta) \approx \cos^2 \frac{(\omega_0 - \omega)T - \delta}{2}$$

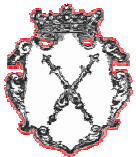
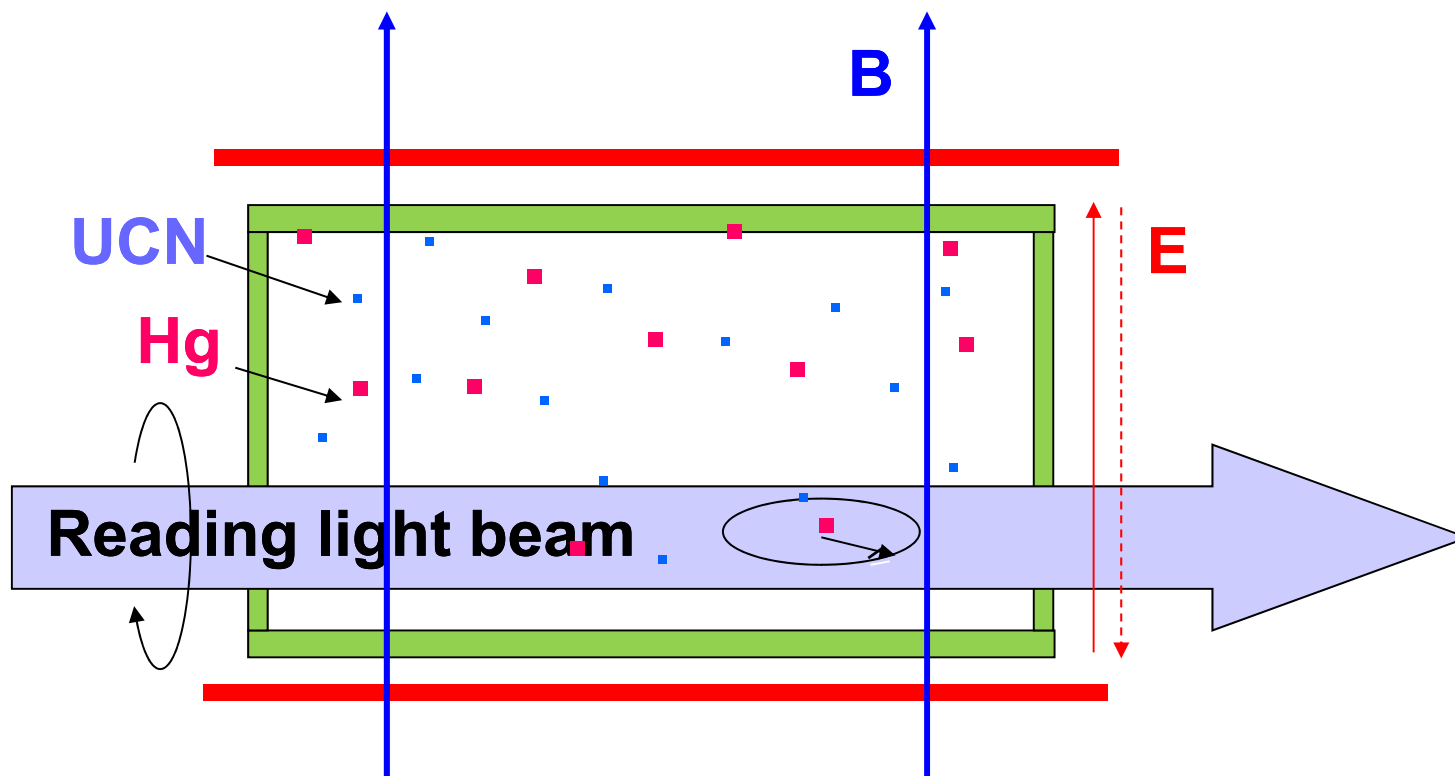


- Analogia do dyfrakcji na dwóch szczelinach



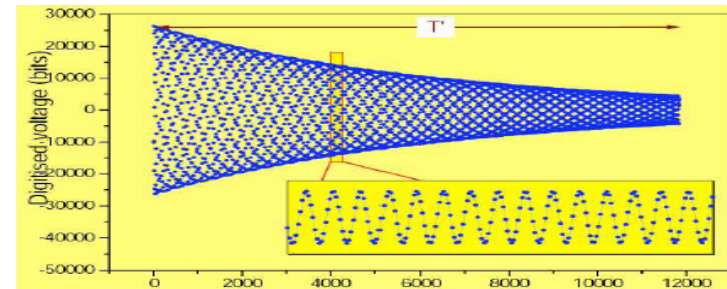
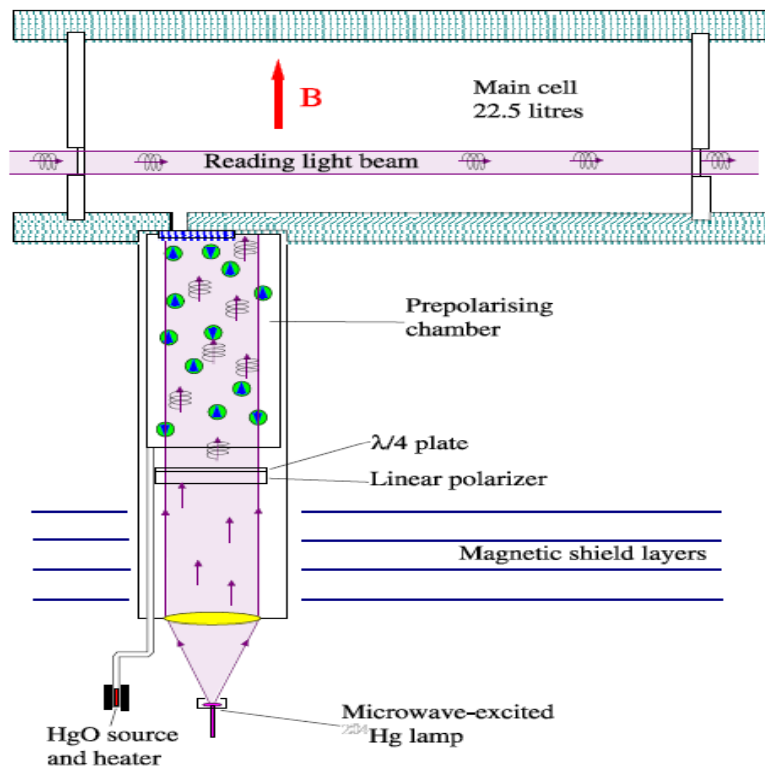
Magnetometr ^{199}Hg

- Wykorzystuje precesję Larmora spolaryzowanych (przez pompowanie optyczne) atomów ^{199}Hg (spin=1/2)



Magnetometr ^{199}Hg

- **Sygnal:** zależna od kierunku spinu absorpcja rezonansowa spolaryzowanego kołowo światła z lampy ^{204}Hg



$$a_s \approx I_0 \times P \times A(1 - A/2)$$

I_0 : light intensity

P : polarization

A : absorption

$$\sigma_f \approx \frac{1}{4T'} \frac{a_n}{a_s} \frac{1}{\sqrt{n}} (1 + e^{2T'/\tau})^{1/2}$$

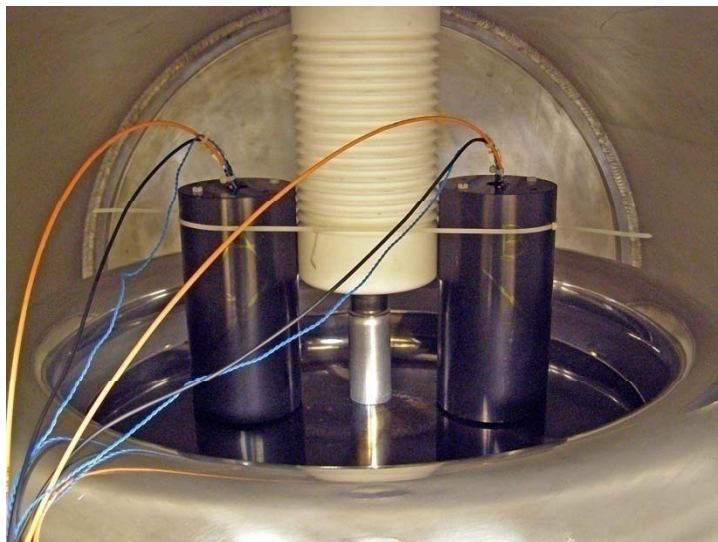
n : number of data points

τ : Hg relaxation time

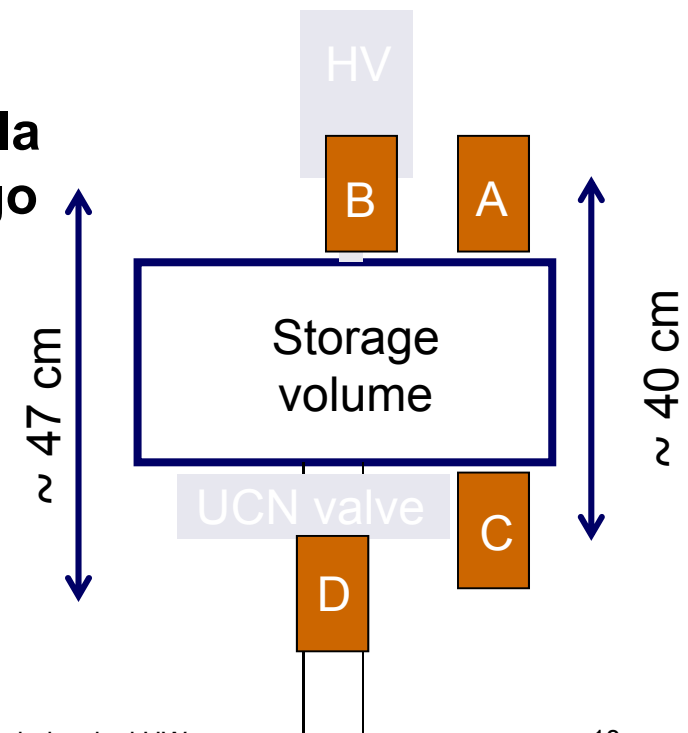


Magnetometry Cs – kontrola efektów systematycznych

	Neutron	^{199}Hg	Cs
Spin (polarization)	Neutron	Nuclear	Electronic
Frequency ($B = 1 \mu\text{T}$)	30 Hz	8 Hz	3.5 KHz
Accuracy	1 pT	100 fT	10 fT



Kontrola gradientów pola magnetycznego



Pomiar

- Aby zminimalizować efekt fluktuacji pola magnetycznego mierzymy stosunek średniej częstości precesji spinów neutronu i atomów ^{199}Hg

$$R \equiv f_n / f_{\text{Hg}} = \left(\frac{\gamma_n B}{2\pi} \right) / \left(\frac{\gamma_{\text{Hg}} B}{2\pi} \right) = \gamma_n / \gamma_{\text{Hg}}$$

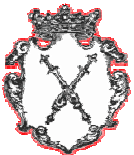
- Poszukujemy harmonicznego modulacji stosunku R

$$R(t) = \left| \frac{\gamma_n}{\gamma_{\text{Hg}}} \right| + A \sin(2\pi t/T + \phi) + \delta R.$$

(T – doba gwiazdowa = 23h 56' 04'')

- δR pochodzi od składowej pola \mathbf{b} równoległej do osi obrotu Ziemi
- Natomiast

$$A = 2b_{\perp} \frac{\cos(\lambda)}{hf_{\text{Hg}}} \quad \lambda = 45^{\circ} 12' 22'' \quad (\text{Grenoble})$$

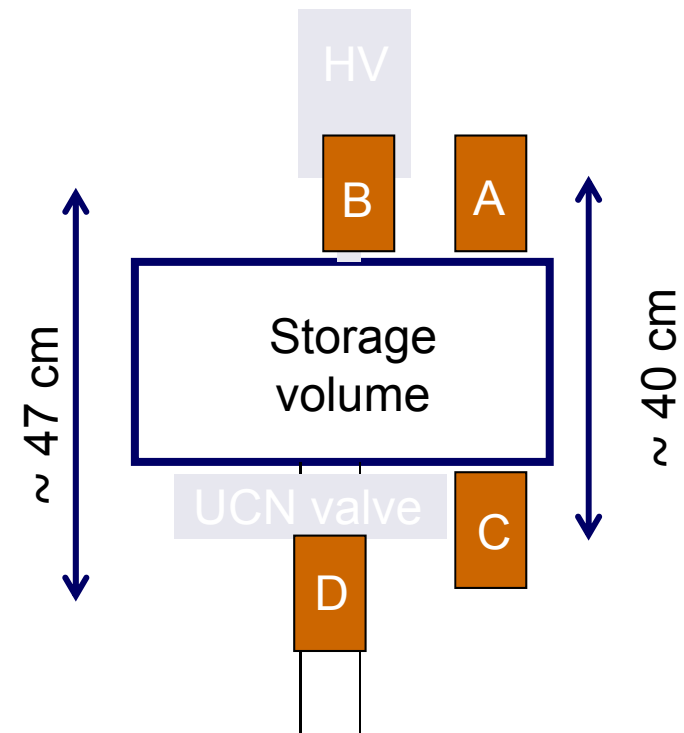


Pomiar

- Efekt uboczny pochodzi od konspiracji przesunięcia środków ciężkości rozkładów gęstości neutronów i atomów ^{199}Hg z ($h = 2.8 \text{ mm}$) z gradientem pola \mathbf{B} , który może się zmieniać w rytmie dobowym

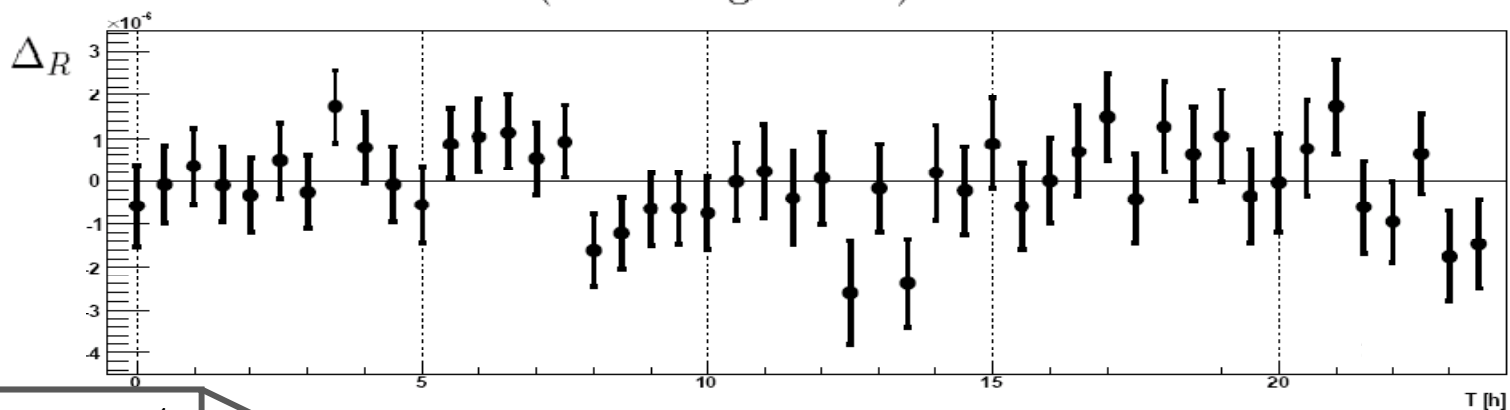
$$R = \left| \frac{\gamma_n}{\gamma_{\text{Hg}}} \right| \left(1 + \frac{(\partial B / \partial z) h}{B} \right).$$

- Gradient był monitorowany przez magnetometrię Cs ($< 20 \text{ pT/m}$)
- Amplituda dobowych modulacji od tego efektu: $< 2 \times 10^{-7}$



Dobowe modulacje sygnału

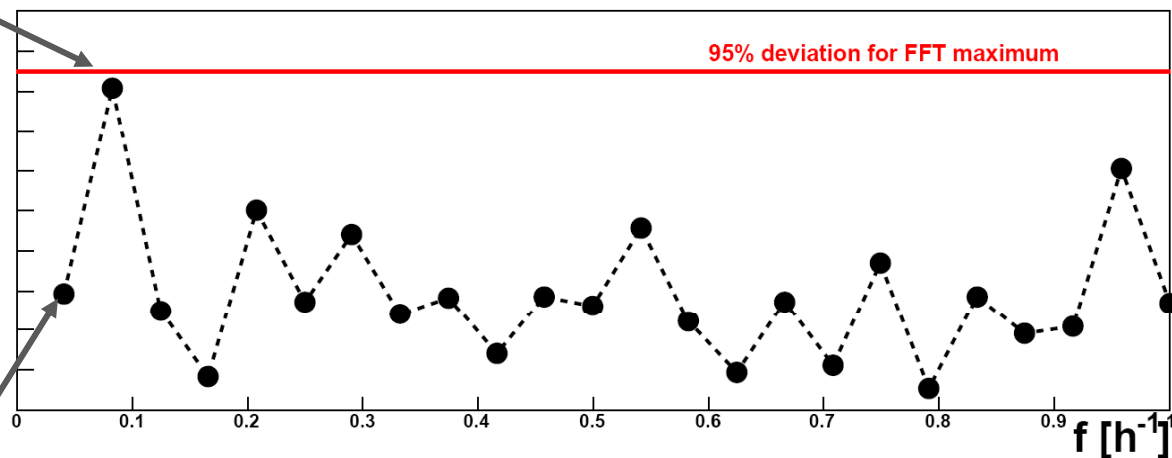
$$\Delta R = R - R_{\text{mean}}(\text{coil configuration})$$



$$f = 1/12 \text{ h}^{-1}$$

$$\chi_{\text{null}}^2 = 0.98$$

Fourier spectrum



Analiza

- Analiza poziomów ufności (porównanie z hipotezą zerową)

$$Q(A, \phi) = \chi_{\text{null}}^2 - \chi_{\text{signal}}^2 \quad \chi_{\text{null}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R[i]}{\Delta R[i]} \right)^2$$

$$\chi_{\text{signal}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R[i] - A \sin(2\pi t[i]/T + \phi)}{\Delta R[i]} \right)^2$$

- Poziom ufności dla hipotezy (A, ϕ) , gdzie rozkłady prawdopodobieństwa ρ (dla obu hipotez) obliczono metodą Monte Carlo, wynosi:

$$\text{C.L.}(A, \phi) = \int_{-\infty}^{Q_{\text{data}}} \rho_{\text{signal}}(Q) dQ.$$

- Wynik:

$$A < 0.8 \times 10^{-6} \quad 95\% \text{C.L.}$$

$$A = 2b_{\perp} \frac{\cos(\lambda)}{hf_{\text{Hg}}}$$

$$b_{\perp} < 2 \times 10^{-20} \text{ eV} \quad 95\% \text{C.L.}$$



Porównanie z innymi wynikami

TABLE I. Results of more restricting upper limits (at 95% C.L.) on $b_{\perp}(e)$, $b_{\perp}(N)$, $b_{\perp}(p)$, $b_{\perp}(\mu)$, $b_{\perp}(n)$ the couplings between a cosmic spin anisotropy field and different particles.

Reference	System	Particle	b_{\perp} (eV)
Bergrlund <i>et al.</i> , [2]	Hg and Cs	bound neutron	9×10^{-22}
		electron	2×10^{-20}
Bear <i>et al.</i> , [3]	Xe and He	bound neutron	2×10^{-22}
Phillips <i>et al.</i> , [17]	H	proton	4×10^{-18}
Heckel <i>et al.</i> , [18]	e	electron	7×10^{-22}
Bennet <i>et al.</i> , [19]	μ	positive muon	2×10^{-15}
		negative muon	3×10^{-15}
This analysis	n and Hg	free neutron	2×10^{-20}



Grawitacyjny moment dipolowy

- Można interpretować, jako ograniczenie na grawitacyjny moment dipolowy neutronu (w oddziaływaniu neutronu ze Słońcem, T – średnia doba słoneczna)

$$U(R) = \alpha_1 \frac{GM}{c} \frac{\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r}}{r^3} + \alpha_2 \frac{GM}{c} \frac{\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{v}}{r^2} + \alpha_3 \frac{GM}{c} \mu \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{r^2}$$
$$V_{\text{GDM}} = g_n \frac{GM}{r^3} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{r}, \quad A = 2g_n \frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}^2} \frac{\cos(\lambda)}{hf_{\text{Hg}}},$$

- Zaniedbując inklinację Ziemi względem ekliptyki (efekt 5%) otrzymujemy:

$$|g_n| < 0.3 \text{ eV}/c^2 \text{ m} \quad 95\% \text{ C.L.}$$



Grawitacyjny moment dipolowy

- Mocniejsze ograniczenie można otrzymać obserwując oddziaływanie neutronu z Ziemią (nie będzie tym razem modulacji)
- Porównamy stosunki R mierzone dla pola \mathbf{B} „do góry” i „w dół” z danych, w których odjęto efekt gradientu pola ($\partial B/\partial z = 0$)

$$|\delta R| = \frac{1}{2} |R_{0\uparrow} - R_{0\downarrow}| < 1.6 \times 10^{-6} \quad 95\% \text{C.L.}$$

$$|g_n| = |\delta R| \frac{hf_{\text{Hg}}}{2} \frac{r_{\oplus}^2}{GM_{\oplus}} < 2.5 \times 10^{-4} \text{ eV}/c^2 \text{ m} \quad 95\% \text{C.L.}$$

- O rząd wielkości mocniejsze ograniczenie otrzymano w eksperymencie porównującym częstości precesji atomów ^{199}Hg i ^{201}Hg , ale dla neutronów związanych w jądrach



Test of Lorentz Invariance with Spin Precession of Ultracold Neutrons

I. Altarev,¹ C. A. Baker,² G. Ban,³ G. Bison,⁴ K. Bodek,⁵ M. Daum,⁶ P. Fierlinger,⁷ P. Geltenbort,⁸ K. Green,^{2,9} M. G. D. van der Grinten,^{2,9} E. Gutsמידl,¹ P. G. Harris,⁹ W. Heil,¹⁰ R. Henneck,⁶ M. Horras,^{7,6} P. Iaydjiev,^{2,*} S. N. Ivanov,^{2,†} N. Khomutov,¹¹ K. Kirch,⁶ S. Kistryn,⁵ A. Knecht,^{6,‡} P. Knowles,¹² A. Kozela,¹³ F. Kuchler,⁷ M. Kuźniak,^{5,6} T. Lauer,¹⁴ B. Lauss,⁶ T. Lefort,³ A. Mtchedlishvili,⁶ O. Naviliat-Cuncic,³ A. Pazgalev,¹² J. M. Pendlebury,⁹ G. Petzoldt,⁶ E. Pierre,^{3,6} G. Pignol,^{15,§} G. Quéméner,³ M. Rebetez,¹² D. Rebreyend,^{15,||} S. Rocca,^{15,¶} G. Rogel,^{3,8} N. Severijns,¹⁶ D. Shiers,⁹ Yu. Sobolev,¹⁰ A. Weis,¹² J. Zejma,⁵ and G. Zsigmond⁶

¹*Technische Universität München, D-85748 Garching, Germany*

²*Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX, United Kingdom*

³*LPC Caen, ENSICAEN, Université de Caen, CNRS/IN2P3, F-14050 Caen, France*

⁴*Department of Neurology, Friedrich-Schiller-University, Jena, Germany*

⁵*Marian Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, 30-059 Cracow, Poland*

⁶*Paul Scherrer Institut (PSI), CH-5232 Villigen PSI, Switzerland*

⁷*Excellence Cluster "Universe," Technische Universität München, D-85748 Garching, Germany*

⁸*Institut Laue-Langevin, F-38042 Grenoble Cedex, France*

⁹*Department of Physics and Astronomy, University of Sussex, Falmer, Brighton BN1 9QH, United Kingdom*

¹⁰*Institut für Physik, Johannes-Gutenberg-Universität, D-55128 Mainz, Germany*

¹¹*JINR, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia*

¹²*University of Fribourg, CH-1700, Fribourg, Switzerland*

¹³*Henryk Niedwodniczański Institute for Nuclear Physics, 31-342 Cracow, Poland*

¹⁴*Institut für Kernchemie, Johannes-Gutenberg-Universität, D-55128 Mainz, Germany*

¹⁵*LPSC, Université Joseph Fourier Grenoble 1, CNRS/IN2P3, Institut National Polytechnique de Grenoble 53, F-38026 Grenoble Cedex, France*

¹⁶*Instituut voor Kern-en Stralingsfysica, Katholieke Universiteit Leuven, B-3001 Leuven, Belgium*

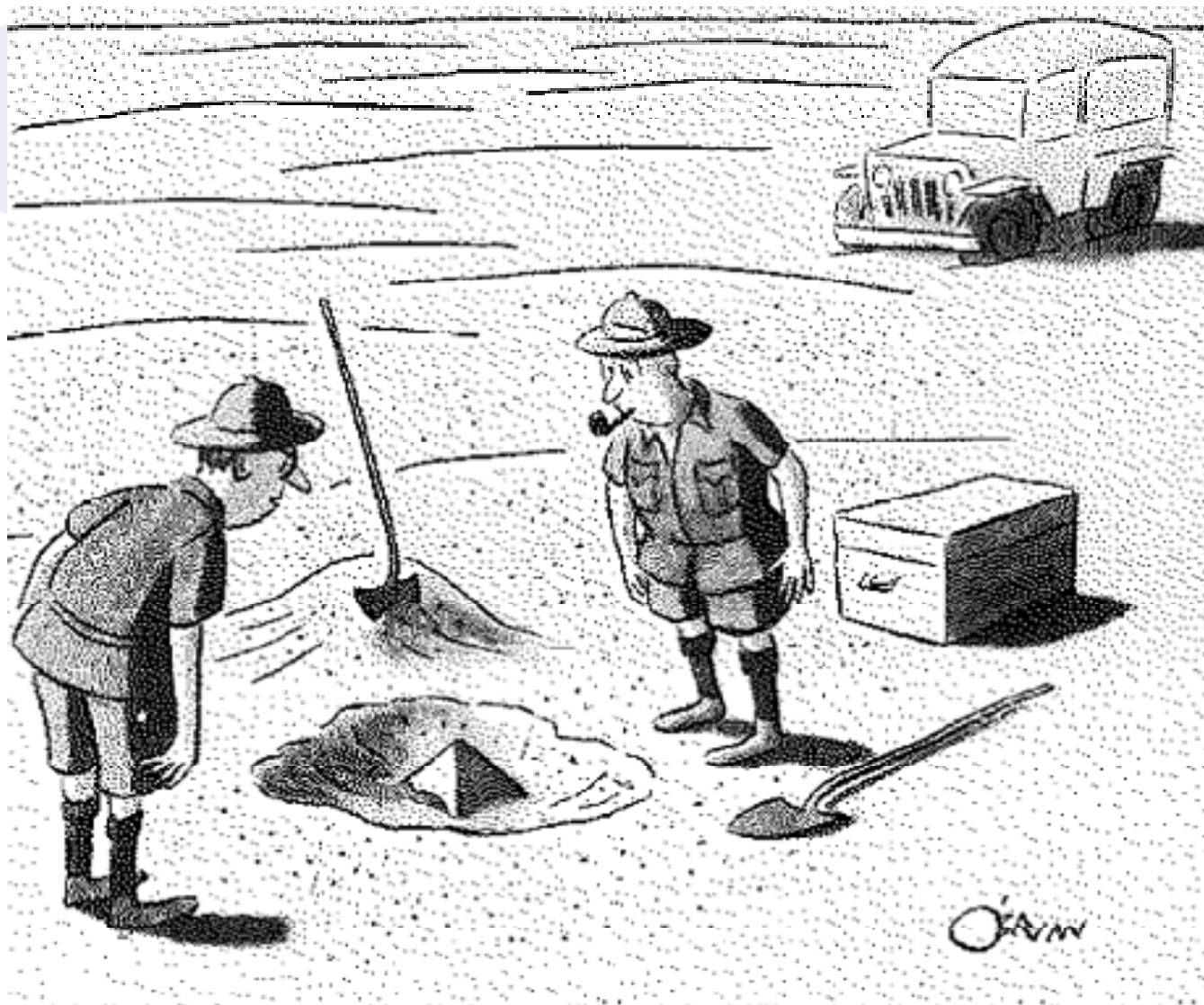
(Received 19 May 2009; published 20 August 2009)



Podsumowanie i perspektywy

- **Precyzyjna aparatura do pomiaru EDM neutronu okazuje się (nieoczekiwanie) przydatna do badania egzotycznych zagadnień:**
 - Sprzężenie spinu z grawitacją
 - Poszukiwanie materii lustrzanej
- **Nowe wyniki z kilku wykonywanych i planowanych eksperymentów są oczekiwane w niedalekiej przyszłości**





"This could be the discovery of the century. Depending, of course, on how far down it goes."





Backup slides



Neutrony: zimne (CN) i ultra-zimne (UCN)

- **CN:** $E_{\text{kin}}^{\text{CN}} \sim 5 \text{ meV}, \quad v^{\text{CN}} \sim 1 \text{ km/s}$

- **UCN** – mogą być przechowywane w pułapkach, jeśli:

$$E_{\text{kin}} < V_{\text{F}} - \boldsymbol{\mu}_{\text{n}} \cdot \mathbf{B} + mgh$$

$$V_{\text{F}} = \frac{2\pi\hbar}{m} bN$$

V_{F} – pseudo-potential Fermiego,
 b – długość rozpraszania,
 N – gęstość materiału ścianek

- | | | |
|-----------------------------------|---|--|
| ○ $V_{\text{F}}(\text{Be})$ | $\leftrightarrow E_{\text{kin}} = 252 \text{ neV},$ | ○ $v^{\text{UCN}} < 8 \text{ m/s},$ |
| ○ $\mu_{\text{n}} B(1 \text{ T})$ | $\leftrightarrow E_{\text{kin}} = 60 \text{ neV},$ | ○ $T^{\text{UCN}} < 4 \text{ mK},$ |
| ○ $mgh(1 \text{ m})$ | $\leftrightarrow E_{\text{kin}} = 100 \text{ neV}$ | ○ $\lambda^{\text{UCN}} > 50 \text{ nm}$ |

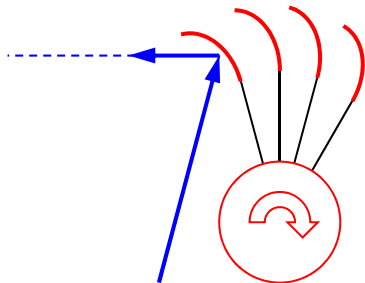
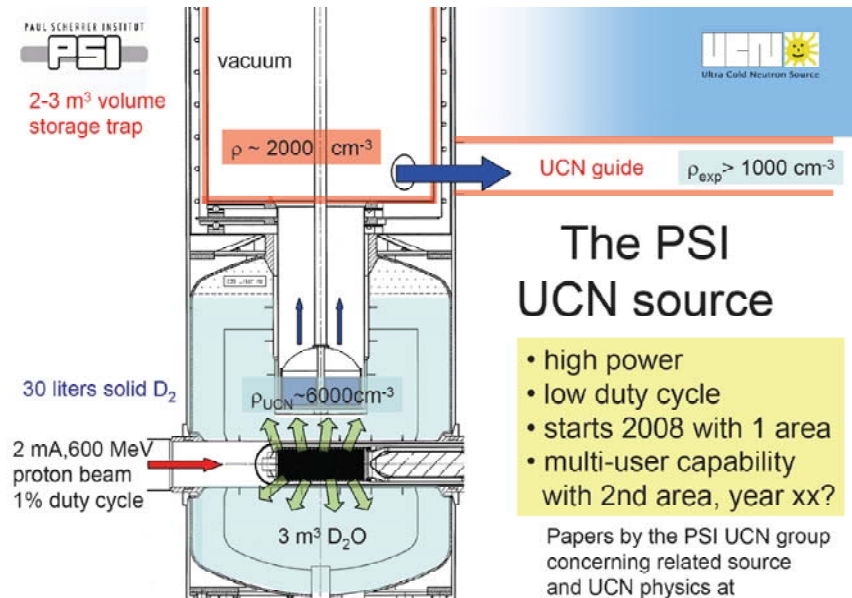
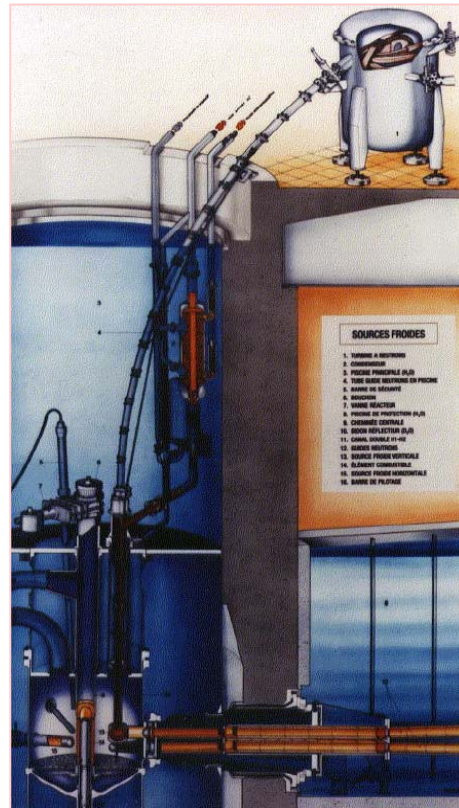
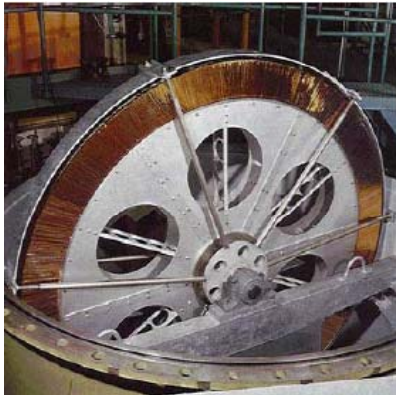


Neutrony ultra-zimne (UCN)

- **UCN** produkuje się spowalniając **CN**:

- Przy pomocy pola grawitacyjnego Ziemi i mechanicznych turbin

- W procesie super-termalnym w zestalonym deuterze i nadciekłym helu



27 listopada 2009

K. Bodek, Seminarium w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej UW



31

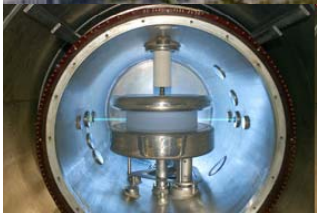


Grenoble, F



CN, UCN Facilities

N, *R*-correlations
SINQ: Cold Neutrons

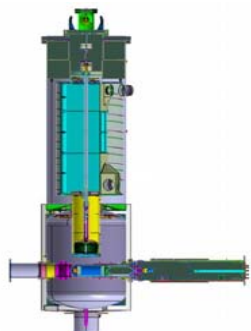
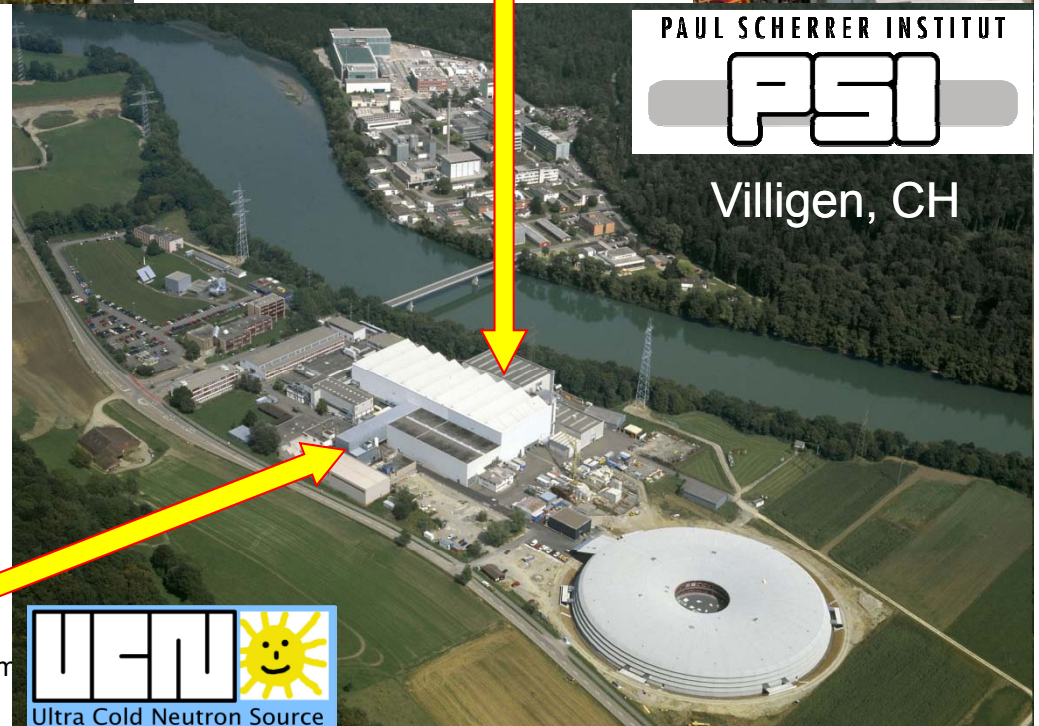


nEDM – phase I
Reactor:

Ultra-Cold Neutrons ($10 \div 40 \text{ cm}^{-3}$)



Villigen, CH



nEDM – phase II, III
Pulsed Spal. Source:

Ultra-Cold Neutrons
($1000 \div 2000 \text{ cm}^{-3}$)

