

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗ44.1А  
Н-623

12/411-73

P3 - 7379

4531/2-73

Ю.В.Никитенко, Ю.В.Таран

СИСТЕМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТНОМ  
РЕЗОНАНСНОМ СПЕКТРОМЕТРЕ НА УХН

**1973**

**ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ**

Ю.В.Никитенко,\* Ю.В.Таран

СИСТЕМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТНОМ  
РЕЗОНАНСНОМ СПЕКТРОМЕТРЕ НА УХН

---

\* Харьковский государственный университет.

## S u m m a r y

Proceeding from the necessity to obtain the sensitivity of  $10^{25}$ - $10^{27}$  cm, when measuring the EDM of a neutron, the requirements were determined for the system of creation of oscillating magnetic field in a magnetic resonance storage spectrometer using polarized ultracold neutrons.

Two systems are calculated consisting of rectangular coils (curved on cylindrical surface) and thin metallic plates. The latter system is preferred as one providing the best homogeneity of the field in the storage system of the spectrometer. The topography of the field is measured using the model of this system that has 1/4 of necessary dimensions, and the obtained results are compared with calculations.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитный резонансный спектрометр для измерения электрического дипольного момента /ЭДМ/ на поляризованных ультрахолодных нейтронах /УХН/ <sup>1/</sup> в плане необходимости применения постоянных магнитного  $\vec{H}$  и электрического  $\vec{E}$  и осциллирующего  $\vec{H}_1$  полей идентичен спектрометру пучкового типа <sup>2/</sup>. Однако в так называемом накопительном варианте спектрометра на УХН /установка "Тристом" / <sup>3/</sup>, в отличие от спектрометров "точного" <sup>4, 5/</sup> или пучкового типа, нужно создавать осциллирующее поле во всем объеме, занятом постоянными полями, а не только на входе и выходе из него. Для получения достаточно высокой чувствительности спектрометра на УХН /в диапазоне  $10^{-25} + 10^{-27}$  е см/ однородность этого поля должна удовлетворять определенным требованиям.

Целью настоящей работы является определение этих требований, выбор подходящей системы для создания осциллирующего поля в установке "Тристом", определение оптимальных параметров системы и ее моделирование.

## 2. ТЕОРИЯ

В случае произвольной ориентации вектора осциллирующего поля  $\vec{H}_1$  резонансный переворот спина нейтрона будет создавать перпендикулярная  $\vec{H}_0$  компонента  $H_{\perp}$ , а параллельная компонента  $H_{\parallel}$  будет модулировать  $H_0$ . В методе отдельных осциллирующих полей Рамзея /общее рассмотрение его дано в <sup>6/</sup>, а применительно к накопительному варианту спектрометра на УХН в <sup>3/</sup> /вероятность переворота равна /вблизи точного резонанса/:

$$p(t_0, t) = \sin^2 \bar{\omega}'_I t_0 \cdot \cos^2 \frac{1}{2} [(\bar{\omega}'_0 - \omega)t - \delta], \quad /1/$$

где  $\bar{\omega}'_0$  - средняя ларморовская частота вдоль траектории индивидуального нейтрона,  $\omega$  - частота осциллирующего поля,  $t_0$  - длительность импульса осциллирующего поля с амплитудой  $H_{I\perp}$ ,  $\bar{\omega}'_I = \gamma_n \bar{H}'_{I\perp}$ ,  $\gamma_n$  - гиромагнитное отношение нейтрона,  $\delta$  и  $t$  - фаза и интервал времени между двумя импульсами осциллирующего поля, соответственно,  $\bar{H}'_{I\perp}$  - среднее значение осциллирующего поля вдоль траектории нейтрона.

Траектории нейтронов в камере спектрометра носят случайный характер, поэтому можно применить разработанную в /5/ методику усреднения вероятности  $p(t_0, t)$  по ансамблю частиц. Результат простых вычислений следующий:

$$P(t_0, t) = \left[ \sin^2 \bar{\omega}'_I t_0 + \frac{1}{2} (\cos^2 \bar{\omega}'_I t_0 - \sin^2 \bar{\omega}'_I t_0) (1 - e^{-2\bar{\psi}^2}) \right] \times \\ \times \cos^2 \frac{1}{2} [(\bar{\omega}'_0 - \omega)t - \delta], \quad /2/$$

где  $\bar{\omega}'_I = \gamma_n \bar{H}'_{I\perp}$ ,  $\bar{H}'_{I\perp}$  - среднее значение осциллирующего поля по объему камеры,  $\bar{\psi}^2 = 2\gamma_n^2 (\Delta H_{I\perp})^2 r_c t_0$ ,  $r_c$  - время корреляции /в нашем случае отождествляемое с временем пролета длины свободного пробега УХН в камере/,  $(\Delta H_{I\perp})^2 = \overline{H_{I\perp}^2} - (\bar{H}_{I\perp})^2$  - дисперсия осциллирующего поля по объему камеры.

Вероятность переворота максимальная при  $\bar{\omega}'_I t_0 = \frac{\pi}{2}$ . Чувствительность спектрометра к ЭДМ при этом условии также максимальна, так как модуляция интенсивности УХН при изменении расстройки  $\bar{\omega}'_0 - \omega$  проявляется максимальным образом. Для осциллирующего поля с малой неоднородностью вероятность переворота оказывается пропорциональной  $(1 - \bar{\psi}^2)$ .

Если определить величину ухудшения чувствительности спектрометра  $m$ , как отношение точностей измерения ЭДМ при  $\bar{\psi} \neq 0$  и  $\bar{\psi} = 0$ , то получим требование на однородность осциллирующего поля:

$$\overline{(\Delta H_{I\perp})^2} \approx \frac{m-1}{2\gamma_n^2 \tau_c t_0} \quad /3/$$

Вводя относительную среднеквадратичную неоднородность поля  $\delta = \sqrt{\overline{(\Delta H)^2}/H}$ , получим:

$$\delta_{\perp} \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{(m-1) \frac{2t_0}{\tau_c}} \quad /4/$$

Например, для спектрометра на УХН с параметрами, определенными в <sup>/7/</sup> установка "Тристом",  $\tau_c = 0,03$  сек,  $t_0 = 1$  сек,  $H_{I\perp} = 10^{-4}$  Э, получим требование на однородность поля, допуская 1% ухудшения чувствительности установки,  $\delta_{\perp} \leq 0,2$ .

Что касается требований на степень однородности параллельной компоненты  $H_{I\parallel}$  осциллирующего поля, то наиболее жестким будет условие, когда средний по объему камеры квадрат этой компоненты будет меньше требуемой дисперсии постоянного поля  $(\Delta H_0)^2$ . Согласно <sup>/3/</sup>, последняя должна удовлетворять условию:

$$\overline{(\Delta H_0)^2} \leq (m^2 - 1) / 2\gamma_n^2 \tau_c t \quad /5/$$

Для ранее рассмотренного примера, при  $m = 1,1$  /10%-ухудшение чувствительности / и  $t = 30$  сек, имеем

$$\sqrt{\overline{(\Delta H_0)^2}} \leq 2 \cdot 10^{-5} \text{ э и, если сделать } H_{I\parallel} \leq 2 \cdot 10^{-5} \text{ э}$$

/в этом случае модуль вектора  $H_I \approx H_{I\perp}$  и  $H_{I\parallel} \leq 0,2 H_I$ , то влияние неоднородности  $H_{I\parallel}$  будет заведомо малым по сравнению с влиянием неоднородности  $H_0$ .

### 3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ПОЛЯ

Камера установки /3/, в объеме которой нужно создать осциллирующее поле, представляет собой цилиндр диаметром  $D_k$  и длиной  $h_k$ .

Постоянное магнитное поле  $H_0$  направлено вдоль оси цилиндра и обладает аксиальной симметрией. Установка окружена цилиндрическим многослойным экраном /8/. При такой геометрии установки устройство для создания осциллирующего поля /"петля"/ должно иметь такую форму, чтобы оно вписывалось в минимально возможный зазор между экраном и камерой. Из техники магнитного резонанса наиболее подходящими для нашего случая являются "петли" в виде пары тонких прямоугольных катушек /9/. /рис. 1а, "петля" ПК/ и пары тонких металлических пластин /10/ /рис. 1б, "петля"

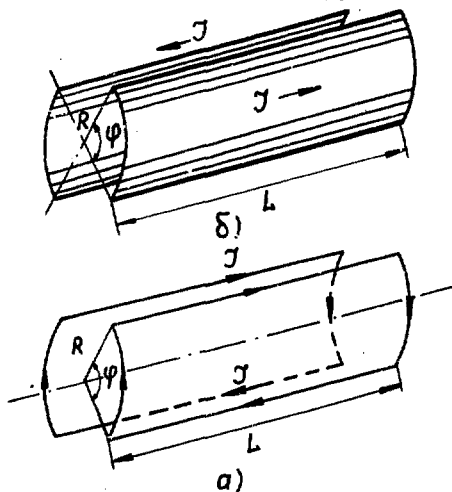


Рис. 1. Устройства для создания осциллирующего магнитного поля: а - пара изогнутых прямоугольных катушек /"петля" ПК/; б - пара изогнутых металлических пластин /"петля" ПП/.

ПП/, изогнутых по поверхности цилиндра, радиусом  $R$ . Расчету плоских "петель" посвящен ряд работ /см., например, /11-15/.

Расчетов для изогнутых "петель" в литературе нами не найдено. Для определения оптимальных размеров "петель" и выбора наилучшей были произведены расчеты на ЭВМ БЭСМ-6 относительной среднеквадратичной неоднородности  $\delta$  осциллирующего поля, создаваемого переменным током, текущим по "петле". Мы здесь не приводим методики расчета компонент поля в заданной точке пространства, так как она основана на стандартных формулах теории электричества. Для "петли" ПП распределение тока предполагалось равномерным.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 и 3 приведены зависимости среднеквадратичной неоднородности  $\delta_{\perp}$  для "петель" ПК и ПП от угла раствора  $\phi$  при фиксированном  $R$  и  $L$  и от длины  $L$  при фиксированном  $R$  и  $\phi$ , соответственно /значения  $R$  взяты близким к требуемому для установки "Тристом"/.

Усреднение производилось по объему камеры с  $D_k = 50$  см и  $h_k = 10$  см. Из рис. 2 видно, что  $\delta_{\perp}$  имеет минимум в интервале углов  $110 \div 120^\circ$ . Положение этого минимума слабо зависит от длины "петли"  $L$ . Значения же  $\delta_{\perp}$  при фиксированном  $\phi$  зависят от  $L$  по-разному для рассматриваемых "петель". Для "петли" ПП однородность поля улучшается с ростом  $L$  и при  $L \geq 5R$  практически выходит на асимптотику. Для "петли" ПК  $\delta_{\perp}$  имеет слабо выраженный минимум при  $L \approx 2R$ , при этом форма катушки приближается к квадратной: изогнутая сторона катушки имеет длину  $R\phi$ , где  $\phi$  - в радианах, что для случая, изображенного на рис. 3, дает  $R\phi \approx L/2$ . Соотношение размеров "петли" ПК в минимуме  $\delta_{\perp}$  соответствует хорошо известному условию Гельмгольца для плоских круглых и квадратных пар катушек. С ростом  $L$  величина  $\delta_{\perp}$  для "петли" ПК стремится к асимптотике, даваемой четырьмя бесконечно длинными тонкими проводниками.



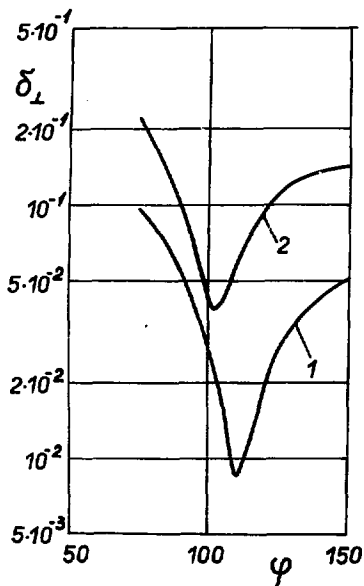


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной неоднородности  $\delta_{\perp}$  перпендикулярной компоненты осциллирующего магнитного поля от угла раствора  $\varphi$ : 1 - "петля" ПП, 2 - "петля" ПК. Радиус и длина обеих "петель" 35 и 200 см, соответственно. Усреднение производилось по цилиндрическому объему диаметром 50 см и длиной 10 см.

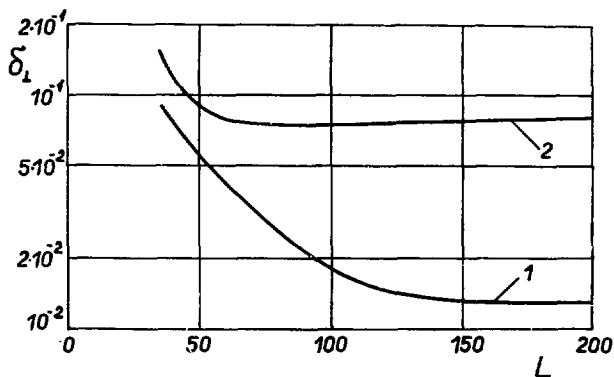


Рис. 3. Зависимость  $\delta_{\perp}$  от длины "петли"  $L$  при  $\phi = 115^{\circ}$ : 1 - "петля" ПП, 2 - "петля" ПК. Остальные параметры такие же, как для рис. 2.

Для демонстрации зависимости  $\delta_{\perp}$  от  $R$  на рис. 4 и 5 приведены топологические поверхности  $\delta_{\perp}^2(\phi, L)$  при  $R = 35$  и  $70$  см. Для  $R = 35$  см поверхность "петли" ПП лежит ниже поверхности "петли" ПК во всем интервале и менения величин  $L$  и  $\phi$ . Это дает нам основание выбрать для установки "Тристом" для создания осциллирующего поля "петлю" ПП. Для  $R = 70$  см поверхности пересекаются. В общем случае выбор "петли" не является однозначным и в каждом конкретном случае определяется допустимыми параметрами системы.

Расчеты параллельной компоненты  $H_{\parallel}$  показали, что во всех случаях ее среднеквадратичное значение  $\sqrt{H_{\parallel}^2}$  значительно меньше  $\overline{H_{\perp}}$ , а тем самым и меньше  $\sqrt{(\Delta H_0)^2}/\text{см. } \S 2/$ , и поэтому ее влиянием можно пренебречь.

Таким образом, с помощью пары изогнутых длинных тонких металлических пластин можно получить относительную среднеквадратичную неоднородность осциллирующего поля не хуже 3 - 5%, что с большим запасом

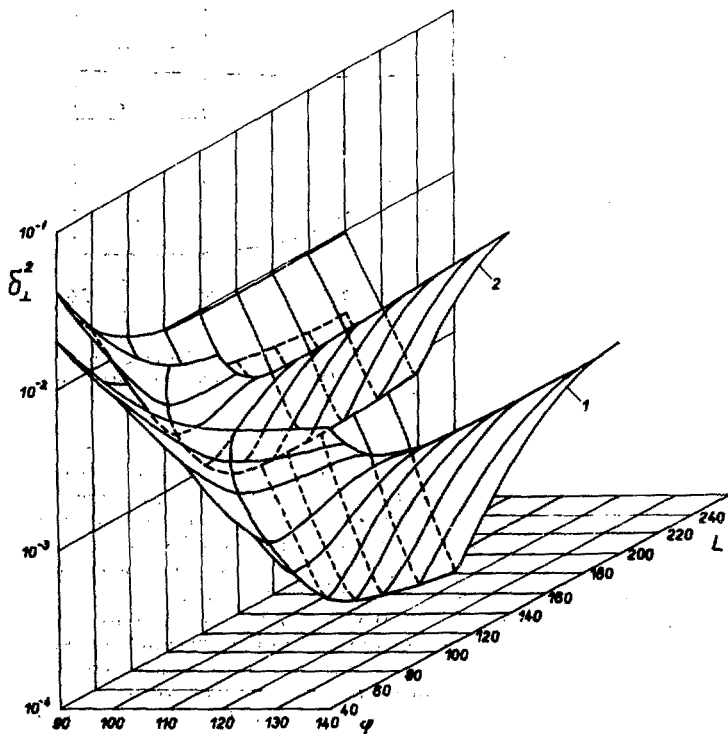


Рис. 4. Зависимость  $\delta_1$  от  $\phi$  и  $L$  при  $R = 35$  см для "петли" ПП /поверхность 1/ и "петли" ПК /поверхность 2/. Область усреднения такая же, как и для рис. 2.

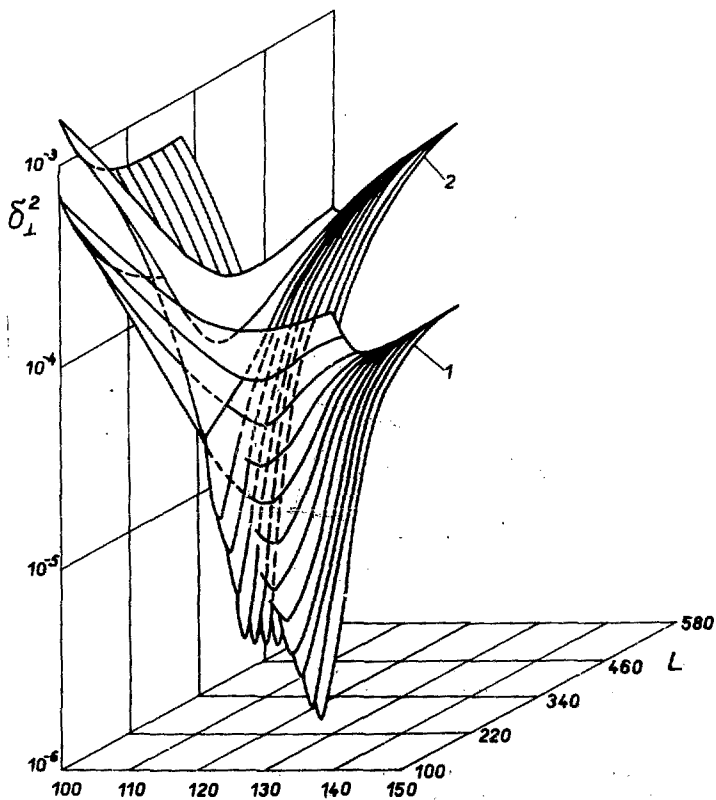


Рис. 5. Зависимость  $\delta l$  от  $\phi$  и  $L$  при  $R = 70$  для "петли" ПП /поверхность 1/ и "петли" ПК /поверхность 2/.

удовлетворяет нашим требованиям. При этом допуски на точность механического изготовления "петли" должны быть в пределах 1% от расчетных размеров, что легко достигается.

### 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕТЛИ" ПП

В реальной установке внутри "петли" будет находиться камера, имеющая два торцевых металлических диска для создания электрического поля и металлический нейтронотвод /рис. 6/. Для проверки полученных

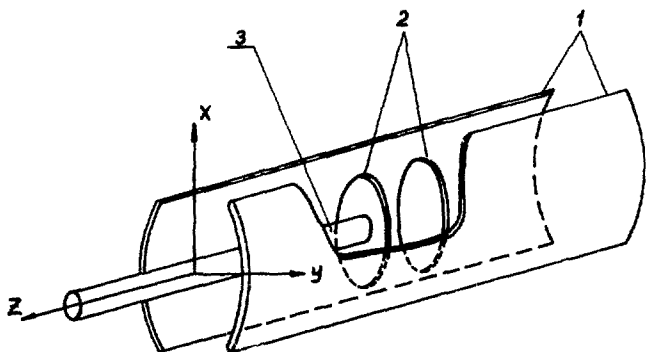


Рис. 6. Схематическое изображение модели "петли" ПП: 1 - "петля", 2 - металлические торцы камеры, 3 - нейтронотвод.

результатов, изучения влияния подводящих проводов к "петле" и металлических частей камеры было проведено моделирование в 1/4 необходимых размеров /модель "петли" имела:  $2R = 18,5$  см,  $L = 60$  см,  $\phi = 136,3^\circ$ , модель камеры:  $D_k = 12,5$  см,  $h_k = 5$  см; диаметр модели нейтронотвода 4 см/. С помощью индукционной катушки измерялась компонента  $H_{Гк}$  /см. рис. 6/ по объему камеры с определенным шагом, затем производилось

усреднение экспериментальных данных. На данной модели не была предусмотрена возможность измерения  $H_{Iy}$ , но расчеты показывают, что  $|\bar{H}_{Iy}| \ll |\bar{H}_{Ix}|$ . Полученные результаты и их сравнение с расчетом приведены в таблице 1. Небольшая разница экспериментального и расчетного параметров объясняется, во-первых, влиянием подводящих проводов, во-вторых, недостаточной точностью механической сборки "петли". Введение камеры внутрь "петли" не ухудшает однородность поля.

### Литература

1. Ф.Л.Шапиро. УФН, 95, 145, 1968.
2. J.K.Vaird, P.D.Miller, W.B.Dress, N.F.Ramsey. Phys.Rev., 179, 1285, 1969.  
П.Д.Миллер. ЭЧАЯ, 2, 961, 1972.
3. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ РЗ-7149, Дубна, 1973
4. В.М.Лобашев, Г.Д.Порсев, А.П.Серебров. Препринт ЛИЯФ АН СССР №37, Ленинград, 1973.
5. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ РЗ-7147, Дубна, 1973.
6. Н.Рамзей. Молекулярные пучки, ИЛ, Москва, 1960.
7. Ю.В.Таран. Депонированное сообщение ОИЯИ Б1-3-7151, Дубна, 1973.
8. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ РЗ-7377, Дубна, 1973.
9. Ю.П.Борисова и др. Геофизическая аппаратура, 23, 16, Изд-во "Недра", Москва, 1965.
10. J.T.Eisinger et al. Phys.Rev., 86, 73, 1952.
11. G.J.Vene. Helv.Phys.Acta, 24, 367, 1951.
12. R.K.Сарак, J.R.Craif. Rev.Sci.Instr., 40, 1468 (1969).
13. M.E.Rudd, J.R.Craif. Rev.Sci.Instr., 39, 1372, 1968.
14. F.R.Crownfield. Rev.Sci.Instr., 35, 240, 1964.
15. W.Franzen. Rev.Sci.Instr., 33, 933, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 августа 1973 года.

Таблица I. Параметр  $\delta_x$  (в %)

Система	Эксперимент	Теория
"Петля" III	$4,8 \pm 1,5$	3,3
III + камера	3,5	-
III + камера + нейтронпровод	3,7	-