

Применение ловушки Пеннинга в исследовании возможности построения квантового компьютера на источниках ионизирующего излучения

—

The use of the Penning trap in the study of the possibility of building a quantum computer on a source of ionizing radiation

И.А.Юхновский, Ю.И.Аношкин

сентябрь 2020

Аннотация

Рассматривается перспективность применения ловушки Пеннинга в исследовательской деятельности и лабораторном практикуме. Отмечается перспективность интеграции квантового компьютера с ядерным топливным циклом.

Brief

The prospects of using the Penning trap in research activities and laboratory practice are considered. The prospects of integrating a quantum computer with a nuclear fuel cycle are noted.

1 Введение

Видится перспективным исследовать возможность реализации квантового компьютера в близости с ядерным реактором. Использование частиц ионизирующего излучения в качестве носителей кубитов может

дать синергетический эффект в инфраструктуре ядерного топливного цикла.

Кубит - сокращение термина «квантовый бит» (quantum bit) – минимальная информационная единица квантового мира [1, 2]. При физическом построении квантовых компьютеров используют измеряемые состояния частицы. Выбор измеряемых характеристик произволен. В приложении к изучению возможности построения квантового компьютера на источниках ионизирующего излучения - это могут быть координаты пространства-времени, заряд, энергия, спин, сечения реакций. Для того чтобы построить кубит на спине - надо иметь инструмент для его измерения. Цель этой статьи - рассмотреть применение ловушки Пеннинга для изучения перспективных частиц для квантового компьютера.

«Ловушка Пеннинга — устройство, использующее однородное статическое магнитное поле и пространственно неоднородное электрическое поле для хранения заряженных частиц. Этот тип ловушек часто используется при точных измерениях свойств ионов и стабильных субатомных частиц, обладающих электрическим зарядом. В недавнем прошлом подобная ловушка успешно использовалась при физической реализации квантового компьютера и квантовых вычислений.» [9]

2 Устройство

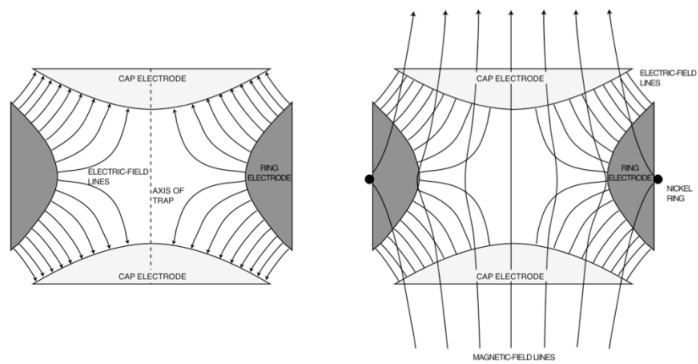
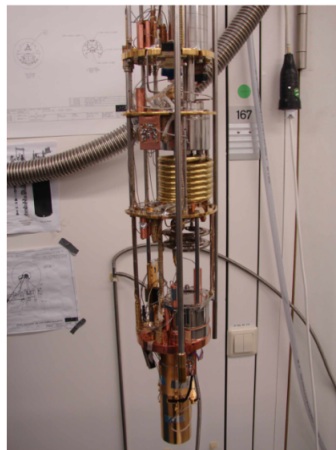
Внешний вид установки в сборе и схемы полей представлены на рисунке ниже:

Ядро стенда состоит из двух чашек электродов и ферромагнитного никелиевого кольца. Электрическая схема и модели измерения представлены на Рис.2 [4, 6]

3 Принцип действия

Принцип измерений приведен на Рис.2

В пустой ловушке три электрода образуют емкостную сеть, которая передает сигнал переменного тока, генерируемый генератором. Захваченный электрон вносит в эту цепь дополнительную емкость-индуктивность. Таким образом, амплитуда передаваемого сигнала как функция частоты



P. Ekstrom and D. Wineland, The Isolated Electron, Sci. Am. 243 (1980) 90

Рис. 1: Внешний вид и схема ловушки Пеннинга [4, 6]

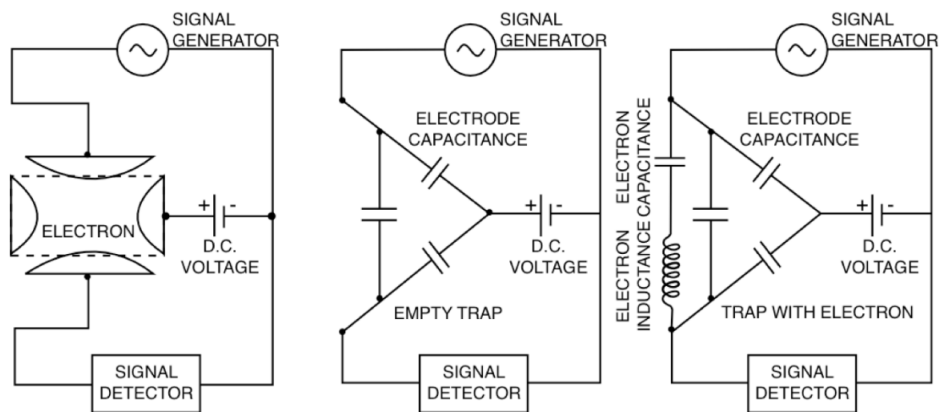


Рис. 2: Электрическая схема и модель измерений [4, 6]

указывает количество электронов в устройстве и сдвиг частоты $\Delta\omega$, из чего можно вычислить g_e (13).

Результаты измерений приведены на Рис.3.

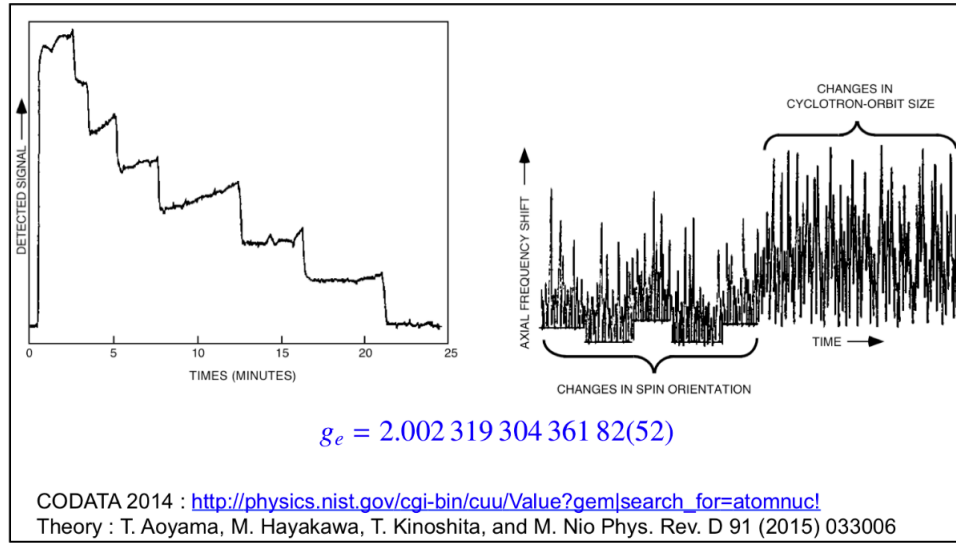


Рис. 3: Результаты измерений [4, 6]

4 Расчет движения электронов

Рассчитаем движение электронов в ловушке [4]. Принебрежем незначительной неоднородностью магнитного поля, вызванное ферромагнитным никелиевым кольцом.

Пусть ось z сонаправлена вектору \vec{B} , тогда:

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} \quad (1)$$

вектор потенциала:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -B_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Гамильтониан такой системы с минимальной заменой:

$$H = \frac{1}{2m}(\vec{p} - e\vec{A})^2 = \frac{1}{2m}(p^2 + 2e\vec{p}\vec{A} + e^2 A^2) = \frac{1}{2m}(p^2 + 2ep_x y B + e^2 B^2 y^2) \quad (3)$$

Так как:

$$\omega = \frac{eB}{m} \quad (4)$$

то, подставляя в (3) получим:

$$H = \frac{1}{2m}(p^2 + 2m\omega y p_x + m^2 \omega^2 y^2) = \frac{1}{2m}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) + \omega y p_x + \frac{m}{2} \omega^2 y^2 \quad (5)$$

Подставляем граничные условия

$$y_0 = \frac{p_x}{m\omega} \quad (6)$$

в (5):

$$H = \frac{p_z^2}{2m} + \frac{p_y}{2m} + \frac{m\omega^2}{2}(y - y_0)^2 \quad (7)$$

Первое слагаемое $\frac{p_z^2}{2m}$ описывает движение электрона вдоль оси z , которое ограничено электродами.

Второе и третье слагаемое $\frac{p_y}{2m} + \frac{m\omega^2}{2}(y - y_0)^2$ описывают гармонические колебания электрона в экваториальной плоскости xy

Энергетические уровни будут:

$$E = \omega(n + \frac{1}{2}) \quad (8)$$

Теперь учтем спин электрона в виде слагаемого:

$$\vec{\mu}_s \vec{B} \quad (9)$$

, где:

$\vec{\mu}_s$ - вектор магнитного момента электрона;

\vec{B} - вектор магнитного поля.

Тогда, Гамильтониан (7) запишется в виде:

$$H = \frac{1}{2m}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) + \omega y p_x + \frac{m}{2} \omega^2 y^2 + \vec{\mu}_s \vec{B} \quad (10)$$

Таким образом это даст дополнительное разделение на:

$$\pm g_e \frac{eB}{4m} = \pm \frac{g_e}{4} \omega \quad (11)$$

И в итоге Гамильтониан будет:

$$H = \frac{1}{2m}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) + \omega y p_x + \frac{m}{2} \omega^2 y^2 \pm \frac{g_e}{4} \omega \quad (12)$$

Последний член в 4 раза больше той частоты, которую мы определили ранее.

Энергии E_s , соответствующие двум направлениям спина, будут отличаться от E_n на $\pm \frac{g_e}{4} \omega$

Таким образом, два направления спина $s_z = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ разделены той же разностью энергий ω , что и основные уровни, при условии, что g_e точно равно 2. Уровни энергии для сонаправленных и противоположно направленных оси z спинов z сместятся на один шаг ω .

Этого вырождения не было бы, если значение g_e отличалось бы от 2, однако уровни все же слегка смещаются на частоту:

$$\Delta\omega = \omega(g_e - 2)/2 \quad (13)$$

, которую и можно измерить.

Характер движения электрона изображен на Рис.4

5 Модернизация

Для неразрушающего измерения спина, ранее рассмотренный стенд не подходит. В проекте ALPHA разработана модернизированная установка [10]

6 Заключение

Было продемонстрировано использование ловушки Пеннинга для измерения спина заряженных частиц для квантового компьютера. Видится

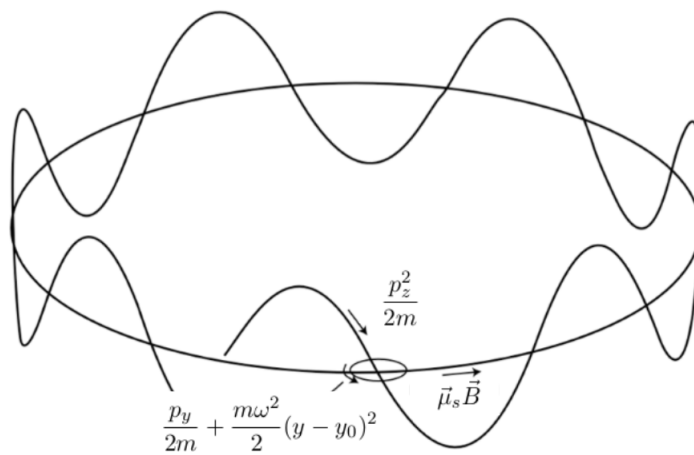


Рис. 4: Сложное движение электрона

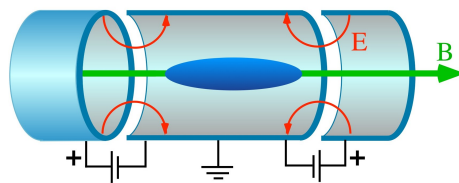


Рис. 5: Внешний вид и схема ловушки Пеннинга [4, 6]

перспективным создание лабораторного стенда ловушки Пеннинга на лабораторной базе Института ядерной энергетики и технической физики. Данный стенд может использоваться не только при исследовательских работах по квантовым вычислениям, но также и в лабораторном практикуме по ядерной физике:

измерении постоянной тонкой структуры [5]:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137}$$

измерении точного значения гиромагнитного отношения для электрона (до 14 знака) [6]:

$$g_e = \frac{\vec{\mu}}{\mu_B J}$$

и других заряженных частиц.

Список литературы

- [1] Сысоев С.С. Введение в квантовые вычисления. Квантовые алгоритмы, стр.35 – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2020
- [2] Сысоев С.С. Квантовые вычисления (Quantum computing) – <https://www.coursera.org/learn/kvantovyye-vychisleniya> : Санкт-Петербургский государственный университет, 2020
- [3] B.R.Martin, G.Shaw Particle physics, Third Edition, p.24 – John Wilye and Sons Ltd, 2008
- [4] Martin Pohl, Anna Sfyrla, Mercedes Paniccia Particle Physics: an Introduction., 4.2 Electromagnetic scattering – <https://www.coursera.org/learn/particle-physics/lecture/Vd0tP/4-2-electromagnetic-scattering> Университет Женевы, 2020
- [5] Л.И.Сарычева Введение в физику микромира. Физика частиц и ядер. стр.17 – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012
- [6] Martin Pohl Particles, Fields, Space-Time: From Thomson’s Electron to Higgs’ Boson – CRC Press, 2020
- [7] P.Ekstrom and D.Wineland The Isolated Electorn – Scientific American, 243, p.90 – 1980

- [8] Douglas C. Giancoli Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Fourth Edition, p.1301 – England: Pearson Education Limited, 2014
- [9] Ловушка Пеннинга – https://en.wikipedia.org/wiki/Penning_trap
- [10] Проект ALPHA – <https://alpha.web.cern.ch/penning-trap>