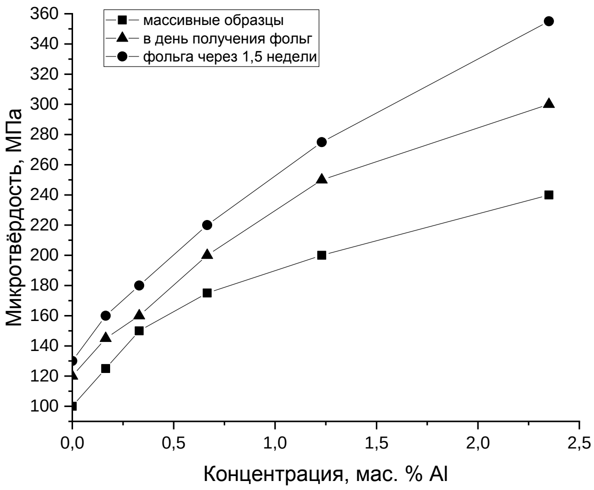

Рисунок 2 – Микротвёрдость фольг Sn-Al

Таким образом, быстрозатвердевшие фольги Sn-0,6 мас. % Al испытывают предкристаллизационное переохлаждение не менее 100 °С. Для них характерно формирование дисперсной микрокристаллической структуры. Термическая обработка приводит к распаду пересыщенного твёрдого раствора.

Список использованных источников

1. Zernitsa, D. A. Study of the Structure and Properties of Rapidly Solidified Tin–Zinc Eutectic Alloys Doped with Antimony / D. A. Zernitsa, V. G. Shepelevich // Inorganic Materials : Applied Research. – 2023. – Vol. 14, № 1. – P. 86–95.

2. Васильев, В. А. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) / В. А. Васильев, Б. С. Митин, И. Н. Пашков. – М. : Интермет инжиниринг, 1998. – 400 с.

3. Судзуки, К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Дудзимори, К. Хасимото. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.

УДК 539.12

А. В. ИВАШКЕВИЧ[1], А. В. БУРЫЙ[1], Е. М. ОВСИЮК[2],
В. В. КИСЕЛЬ[3], В. М. РЕДЬКОВ[1]

[1] Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Беларусь)
[2] Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина (г. Мозырь, Беларусь)
[3] Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)

НЕРЕЛЯТИВИСТСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ В 39-КОМПОНЕНТНОЙ ТЕОРИИ ДЛЯ ЧАСТИЦЫ СО СПИНОМ 2

Известная теория Паули – Фирца [1, 2] для поля со спином 2 основана на уравнениях второго порядка. Ф. И. Федоровым была развита эквивалентная теория на основе уравнений первого порядка, при этом использовалась 39-компонентная полевая функция [3]; см. также [4]. Позднее им с соавторами была предложена более сложная 50-компонентная теория, которая описывает массивную частицу со спином 2, обладающую помимо электрического заряда аномальным магнитным моментом [5–16]. В 50-компонентной теории используется набор тензоров: скаляр, два вектора, симметричный тензор второго ранга, симметричный тензор третьего ранга и антисимметричный по одной паре индексов тензор третьего ранга.

Целью сделанной работы является анализ нерелятивистского приближения в 39-компонентной теории частицы со спином 2. Следует отметить, что ранее этот вопрос уже исследовался [11]. Было выведено нерелятивистское уравнения для 6-компонентной волновой функции и показано, что соответствующие связанные между собой 6 уравнений содержат только 5 независимых. В работе [11] применялся метод обобщенных символов Кронекера и формализм элементов полной матричной алгебры; кроме того, предполагалось использование ict-метрики Минковского. К сожалению, все эти три подхода редко применяются в настоящее время.

В настоящей работе этот вопрос исследован заново. Используется вещественный метрический тензор, и не применяются два указанных формализма. При этом мы используем явный вид основных матриц размерности 39 основного уравнения, записанного в декартовых координатах с учетом внешних электромагнитных полей. Для выделения в полной волновой функции больших и малых переменных (с точки зрения нерелятивистского приближения) используются проективные операторы, строящиеся на основе минимального полинома для матрицы Γ^0. Разбиение на большие и малые переменные проведено в явном виде, в каждой группе найдены независимые переменные, а остальные выражены через них. В частности, среди больших переменных независимыми являются только 5.

После выполнения необходимых приближений выведено нерелятивистское уравнение для 5-компонентной волновой функции; в нем выделен член, описывающий взаимодействие магнитного момента частицы с внешним магнитным полем. Этот дополнительный член взаимодействия строится из проекций оператора спина и компонент внешнего магнитного поля.

$$iD_0\Psi = -\frac{1}{2M}(D_1^2 + D_2^2 + D_3^2)\Psi - \frac{ie}{2M}(F_{23}S_1 + F_{31}S_2 + F_{12}S_3)\Psi, \tag{1}$$

где

$$\Psi = \begin{vmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{vmatrix}, \quad S_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{vmatrix}, S_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad S_3 = \begin{vmatrix} 0 & -2 & 0 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \tag{2}$$

Используется обозначение $D_a = \partial_a + ieA_a, a = 0,1,2,3$; выполняются коммутационные соотношения для компонент оператора спина:

$$S_1S_2 - S_2S_1 = S_3, \quad S_2S_3 - S_3S_2 = S_1, \quad S_3S_1 - S_1S_3 = S_2. \tag{3}$$

Этот результат следует обобщить на 50-компонентную теорию [10] для частицы со спином 2 и аномальным магнитным моментом. Это позволит найти в явном виде вклад аномального магнитного момента в полный магнитный момент частицы со спином 2.

Список использованных источников

1. Pauli, W. Uber relativistische Feldleichungen von Teilchen mit beliebigem Spin im elektromagnetishen Feld / W. Pauli, M. Fierz // Helv. Phys. Acta. – 1939 – Vol. 12. – P. 297–300.

2. Fierz, M. On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field / M. Fierz, W. Pauli // Proc. Roy. Soc. London. A. – 1939. – Vol. 173. – P. 211–232.

3. Fedorov, F. I. On the theory of the spin 2 particle / F. I. Fedorov // Proceedings of Belorussian State University. Ser. phys.-math. – 1951. – Vol. 12. – P. 156–173.

4. Regge, T. On properties of the particle with spin 2 / T. Regge // Nuovo Cimento. – 1957. – Vol. 5, no. 2. – P. 325–326.

5. Bogush, A. A. On matrices of equations for spin 2 particles / A. A. Bogush, B. V. Krylov, F. I. Fedorov // Proceedings of NAS of Belarus. Ser. phys.-math. – 1969. – Vol. 1. – P. 74–81.

6. Kisel, V. V. On relativistic wave equations for a spin 2 particle / V. V. Kisel // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series. – 1986. – Vol. 5. – P. 94–99.

7. Bogush, A. A. On describing the anomalous magnetic moment of the massive spin 2 particle in the theory of relativistic wave equations / A. A. Bogush, V. V. Kisel // Russian Physics Journal. – 1988. – Vol. 3. – P. 11–16.

8. On equations for spin 2 particle in external electromagnetic and gravitational fields / A. A. Bogush [et al.] // Proceedings of NAS of Belarus. Ser. phys.-math. – 2003. – Vol. 1. – P. 62–67.

9. Red'kov, V. M. Graviton in a curved spacetime background and gauge symmetry / V. M. Red'kov, N. G. Tokarevskaya, V. V. Kisel // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2003. – Vol. 6, no. 3. – P. 772–778.

10. Анализ вклада калибровочных степеней свободы в структуру тензора энергии-импульса безмассового поля со спином 2 / В. В. Кисель [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2015. – № 2. – С. 58–63.

11. Нерелятивистский предел в теории частицы со спином 2 / В.В. Кисель [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 3. – С. 21–27.

12. Редьков, В. М. Поля частиц в римановом пространстве и группа Лоренца / В. М. Редьков. – Минск : Белорусская наука, 2009. – 495 с.

13. Ovsiyuk, E. M. Maxwell Electrodynamics and Boson Fields in Spaces of Constant Curvature / E. M. Ovsiyuk, V. V. Kisel, V. M. Red'kov. – New York : Nova Science Publishers, Inc., 2014. – 486 p.

14. On new form of the 50-component theory for spin 2 particle with anomalous magnetic moment in the basis of tensors of 2-nd and 3-rd ranks / A. V. Ivashkevich [и др.] // Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Thirty Anniversary Seminar NPCS'2023, Minsk, June 19–23, 2023 = Нелинейная динамика и приложения: труды XXX Междунар. семинара, Минск, 19–23 июня 2023 г. / редкол.: В. А. Шапоров [и др.] ; под ред. В. А. Шапорова, А. Г. Трифонова ; Объед. ин-т энергетических и ядерных исслед. – «Сосны» НАН Беларуси. – Vol. 29. – 2023. – P. 289–330.

15. 50-component theory for spin 2 particle, plane wave solutions, massive and massless cases / A.V. Ivashkevich [и др.] // Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Thirty Anniversary Seminar NPCS'2023, Minsk, June 19–23, 2023 = Нелинейная динамика и приложения : труды XXX Международного семинара, Минск, 19–23 июня 2023 г. / редкол.: В. А. Шапоров [и др.] ; под ред. В. А. Шапорова, А.Г. Трифонова; Объединенный институт энергетическихи ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси. – Vol. 29. – 2023. – 331–343.

16. Spin 2 particle with anomalous magnetic moment in presence of uniform magnetic field, exact solutions and energy spectra / A. V. Ivashkevich [et al.] // Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Thirty Anniversary Seminar NPCS'2023, Minsk, June 19–23, 2023 = Нелинейная динамика и приложения: труды XXX Междунар. семинара, Минск, 19–23 июня 2023 г. / редкол.: В. А. Шапоров [и др.] ; под ред. В. А. Шапорова, А. Г. Трифонова; Объед. ин-т энергетических и ядерных исслед. – «Сосны» НАН Беларуси. – Vol. 29. – 2023. – P. 344–391.

UDK 539.12

A. V. IVASHKEVICH
B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

STUECKELBERG PARTICLE IN THE UNIFORM ELECTRIC FIELD

The Stueckelberg particle [1, 2] in presence of external uniform electric field is described by the following 11-component equation [3–5]

$$[\Gamma^0(\frac{\partial}{\partial t}+iEz)+\Gamma^1\frac{\partial}{\partial r}+\Gamma^2\frac{\partial_\phi + j^{12}}{r}+\Gamma^3\frac{\partial}{\partial z}-\mu]\Psi = 0. \tag{1}$$

We apply the following substitution for the wave function

$$\bar\Psi = e^{-imt}e^{im\phi}\begin{vmatrix}\bar H(r,z)\\ \bar H_1(r,z)\\ \bar H_2(r,z)\end{vmatrix}, \bar H = h(r,z), \bar H_1 = \begin{vmatrix}h_0(r,z)\\ h_1(r,z)\\ h_2(r,z)\\ h_3(r,z)\end{vmatrix}, \bar H_2 = \begin{vmatrix}E_i(r,z)\\ B_i(r,z)\end{vmatrix}. \tag{2}$$

After simple calculation, we derive the system of 11 equations in partial derivatives. With notations

$$a_m = \frac{d}{dr}+\frac{m}{r},\ a_{m+1} = \frac{d}{dr}+\frac{m+1}{r},\ b_m = \frac{d}{dr}-\frac{m}{r},\ b_{m-1} = \frac{d}{dr}-\frac{m-1}{r}, \tag{3}$$

it reads

$$i(m-Ez)h_0+\frac{d}{dz}h_2-b_{m-1}h_1+a_{m+1}h_3=\mu h,\quad -i(m-Ez)h-\frac{d}{dz}E_2+b_{m-1}E_1-a_{m+1}E_3=\mu h_0,$$

$$-a_m h+a_{m+1}B_2-\frac{d}{dz}B_3+i(m-Ez)E_1=\mu h_1,\quad \frac{d}{dz}h+i(m-Ez)E_2-a_{m+1}B_1-b_{m-1}B_3=\mu h_2,$$

$$b_m h+b_m B_2+\frac{d}{dz}B_1+i(m-Ez)E_3=\mu h_3,\ a_m h_0-i(m-Ez)h_1=\mu E_1,\quad -\frac{d}{dz}h_0-i(m-Ez)h_2=\mu E_2,$$

$$-b_m h_0-i(m-Ez)h_3=\mu E_3, -b_m h_2+\frac{d}{dz}h_3=\mu B_1,\ b_{m-1}h_1+a_{m+1}h_3=\mu B_2, -\frac{d}{dz}h_1-a_m h_2=\mu B_3.$$

To resolve the last system, we will apply the Fedorov – Gronskiy method [6]. To this end, let us consider the 11-dimensional spin operator $Y=-i\bar J^{12}$; we verify that it satisfies the minimal equation, $Y(Y-1)(Y+1)=0$. This permits us to introduce three projective operators, with the use of them the complete wave function may be decomposed into the sum of three parts; we readily find explicit form of them. Besides, according to Fedorov – Gronskiy method, dependence of each projective constituent on the variable r should be determined by only one function:

$$\Psi_1(r,z)=\begin{vmatrix}0\\0\\h_1(z)\\0\\0\\E_1(z)\\0\\0\\0\\0\\B_3(z)\end{vmatrix}f_1(r),\quad \Psi_2(r,z)=\begin{vmatrix}0\\0\\0\\0\\h_3(z)\\0\\0\\E_3(z)\\B_1(z)\\0\\0\end{vmatrix}f_2(r),\quad \Psi_3(r,z)=\begin{vmatrix}h(z)\\h_0(z)\\0\\h_2(z)\\0\\0\\E_2(z)\\0\\0\\B_2(z)\\0\end{vmatrix}f_3(r). \tag{4}$$

For the case under consideration, these function are determined by equations