

01;10

## Изменение поляризации пучков частиц в накопительных кольцах с помощью продольного магнитного поля

© А.Я. Силенко

Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,  
Минск  
E-mail: silenko@inp.minsk.by

Поступило в Редакцию 15 октября 2003 г.

Предлагается использовать продольное магнитное поле для изменения поляризации частиц пучка (электронов, позитронов и мюонов) в накопительных кольцах. Рассматривается преобразование вертикальной поляризации в продольную путем однократного или многократного включения продольного магнитного поля на определенный промежуток времени.

Актуальной является проблема изменения поляризации пучков частиц в накопительных кольцах. В частности, таким путем можно получить пучки продольно поляризованных электронов, вектор поляризации которых коллинеарен импульсу [1,2]. Если пучок поляризован вертикально (в направлении однородного магнитного поля  $B_z$ ), то ему можно придать продольную поляризацию, проведя частицы сквозь область горизонтального магнитного поля на прямолинейном участке траектории. После прохождения частицами определенного расстояния их спин поворачивается на угол  $90^\circ$  и ориентируется в направлении импульса. В дальнейшем делается обратное преобразование спина для восстановления вертикальной поляризации [1,2]. Для придания пучку продольной поляризации используется также „Сибирская змейка“ [3]. При нерелятивистских энергиях для управления поляризацией может эффективно использоваться поперечное электрическое поле, поскольку оно легко вращает вектор скорости и почти не воздействует на спин [4]. Ориентацией спинового ансамбля можно также управлять с помощью радиочастотного поля, находящегося в резонансе со свободной прецессией спина частиц [5]. В этих и ряде других работ успешно решена задача получения стационарной замкнутой спиновой орбиты

с фиксированным направлением вектора поляризации на заданном азимуте.

В настоящей работе предлагается еще один метод преобразования поляризации пучков частиц. Такое преобразование поляризации может осуществляться для пучков поляризованных электронов, позитронов и мюонов при помощи продольного магнитного поля  $B_\phi$ . Это поле может действовать на протяжении всей траектории, что имеет значение для накопительных колец, имеющих форму окружности. По всей вероятности, таким путем можно получать пучки с высокой степенью поляризации. Магнитное поле  $B_\phi$  может быть создано тороидальным соленоидом.

Отметим, что, в отличие от указанных выше методов, в данном случае поляризация всех частиц пучка одинакова и ее изменение происходит одновременно. В этом случае проекции вектора поляризации на оси цилиндрической системы координат не зависят от азимута.

Важно, что продольное магнитное поле, касательное к траектории частиц, не влияет на их движение.<sup>1</sup> Это поле или включается на определенный промежуток времени, или включается и выключается несколько раз. В результате вектор поляризации (т. е. удвоенный средний спин) поворачивается на заданный угол. Движение вектора поляризации можно характеризовать вектором  $\mathbf{o}$ , представляющим собой угловую скорость прецессии спина в системе отсчета, связанной с движущейся частицей. Этот вектор характеризует ориентацию подвижной оси квантования спина (см. [6]). При наличии вертикального  $B_z$  и продольного  $B_\phi$  магнитных полей и фокусирующего электрического или магнитного поля он лежит в плоскости векторов  $\mathbf{e}_\phi$  и  $\mathbf{e}_z$  и равен [7]:<sup>2</sup>

$$\mathbf{o} = -\frac{e}{2m} \left[ \frac{g}{\gamma} B_\phi \mathbf{e}_\phi + (g - 2) B_z \mathbf{e}_z \right], \quad (1)$$

где  $\gamma$  — лоренц-фактор. Угол  $\theta$  между вектором  $\mathbf{o}$  и осью  $z$  определяется выражением [7]:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{g}{|g - 2|\gamma} \cdot \left| \frac{B_\phi}{B_z} \right|. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Наличие бетатронных колебаний приводит к воздействию продольного магнитного поля на траекторию частиц, которое в целом носит фокусирующий характер.

<sup>2</sup> В работе используется релятивистская система единиц  $\hbar = c = 1$ .

Период прецессии в данном случае равен

$$T = \frac{2\pi}{|\mathbf{o}|} = \frac{4\pi m}{|e|\sqrt{\frac{g^2}{\gamma^2} B_\phi^2 + (g-2)^2 B_z^2}}. \quad (3)$$

Для электронов, позитронов и мюонов  $g/(g-2) \gg 1$ .

Вертикальная поляризация пучка наиболее просто преобразуется в продольную путем использования дополнительного поля такой напряженности, при которой угол  $\theta$  равен  $45^\circ$ :

$$B_\phi = \pm \frac{(g-2)\gamma}{g} B_z.$$

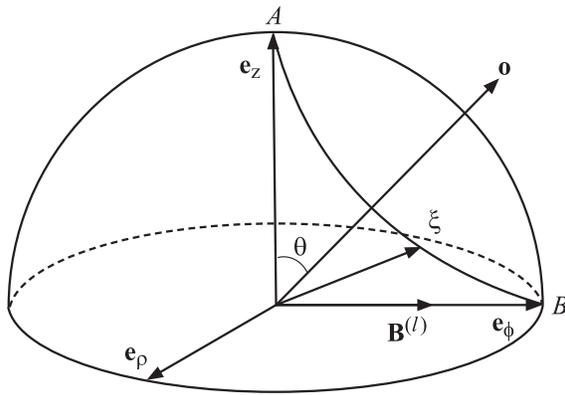
В этом случае период прецессии определяется выражением

$$T = \frac{4\sqrt{2}\pi m}{|e(g-2)B_z} = \frac{\sqrt{2}\pi}{|\mu'|B_z},$$

где  $\mu'$  — аномальный магнитный момент.

Для описания эволюции поляризации пучка используем то обстоятельство, что в цилиндрической системе координат, связанной с движущейся частицей, вектор поляризации  $\xi$  описывает окружность на сфере единичного радиуса (поскольку  $|\xi| = 1$ ). Положение сферы определяется единичными векторами  $\mathbf{e}_\rho$ ,  $\mathbf{e}_\phi$  и  $\mathbf{e}_z$ . Плоскость окружности перпендикулярна вектору  $\mathbf{o}$  (рис. 1). В рассматриваемом случае магнитное поле  $B_\phi$  включается на промежуток времени  $\Delta t = T/2$ , равный полупериоду прецессии. В момент выключения поля пучок частиц, первоначально поляризованный вдоль оси  $\mathbf{e}_z$  (точка  $A$ ), приобретает продольную поляризацию вдоль оси  $\mathbf{e}_\phi$  (точка  $B$ ).

Придать пучку частиц продольную поляризацию можно и в том случае, если напряженность поля  $B_\phi$  недостаточна для отклонения вектора  $\mathbf{o}$  на угол  $45^\circ$  от вертикали. Как следует из формулы (2), это имеет место при большой энергии частиц ( $\gamma \gg 1$ ). Пусть вектор  $\mathbf{o}$  образует с вертикалью сравнительно небольшой угол  $\theta$ . После первого включения поля  $B_\phi$  на время  $\Delta t_1 = T/2$ , где  $T$  определяется формулой (3), положение вектора поляризации характеризуется точкой  $A_1$  на сфере (рис. 2). Угол между вектором поляризации и осью  $z$  становится равным  $\theta_1 = 2\theta$ . Затем поперечное магнитное поле выключается, и на пучок действует только вертикальное магнитное поле  $B_z$  в течение



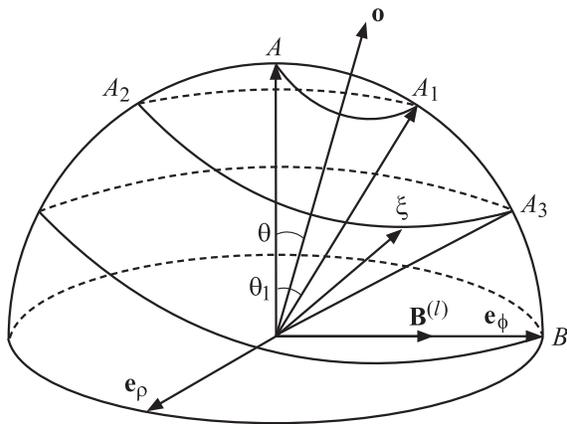
**Рис. 1.** Преобразование вертикальной поляризации пучка в продольную путем однократного включения продольного магнитного поля:  $\xi$  — вектор поляризации,  $\mathbf{B}^{(l)}$  — вектор магнитной индукции продольного магнитного поля,  $\mathbf{o}$  — вектор угловой скорости прецессии спина при включении поля,  $\theta$  — угол между векторами  $\mathbf{o}$  и  $\mathbf{e}_z$ ,  $A$  и  $B$  — точки на сфере единичного радиуса, характеризующие положение вектора  $\xi$  в моменты включения и выключения поля.

промежутка времени  $\Delta t_2 = T_0/2$ , где  $T_0$  — соответствующий период прецессии:

$$T_0 = \frac{2\pi}{|\omega_z|} = \frac{4\pi m}{|e(g-2)|B_z} = \frac{\pi}{|\mu'|B_z}.$$

Под воздействием поля  $B_z$  происходит прецессия вектора поляризации вокруг оси  $z$ , в результате которой вектор поляризации приобретает положение, характеризуемое точкой  $A_2$ . После этого на время  $\Delta t_3 = T/2$  вновь включается поперечное магнитное поле. В результате положение вектора поляризации определяется точкой  $A_3$  на сфере. В дальнейшем процесс может быть повторен до приобретения пучком продольной поляризации, характеризуемой точкой  $B$ . Легко видеть, что для этого угол  $\theta$  должен удовлетворять условию  $\theta = 45^\circ/n$ , где  $n$  — целое число, равное числу включений поперечного магнитного поля на один и тот же промежуток времени  $\Delta t = T/2$ .

Поворот вектора поляризации, вызванный быстрым включением/выключением продольного магнитного поля, пренебрежимо мал.



**Рис. 2.** Преобразование вертикальной поляризации пучка в продольную путем трехкратного включения продольного магнитного поля: угол  $\theta_1$  определяет изменение ориентации вектора  $\xi$  за время первого включения поля, точки  $A$  и  $A_1$  характеризуют положение вектора  $\xi$  в моменты первого включения и выключения, точки  $A_2$  и  $A_3$  — в моменты второго включения и выключения поля, а точка  $B$  — в момент, когда пучок приобретает продольную поляризацию. Остальные обозначения соответствуют рис. 1.

Влияние колебательного движения частиц в накопительных кольцах на их поляризацию исследовано в [8,9]. В рассматриваемом случае это влияние невелико.

Как следует из формулы (5), при  $\text{tg } \theta \sim 1$ ,  $|B_\phi/B_z| \leq 1$  изменение поляризации пучков электронов, позитронов и мюонов может производиться при значениях лоренц-фактора до  $\gamma \sim 10^3$ .

Угловая скорость вращения частиц на 3 порядка больше, чем угловая скорость прецессии спина. Поэтому за время одного оборота частицы вокруг кольца вектор поляризации поворачивается на очень малый угол. Этот угол не изменится, если заменить тороидальный соленоид одним или несколькими прямыми соленоидами, которые создают такое же среднее поле  $\langle B_\phi \rangle$ . Использование прямых соленоидов может быть более удобно технически, поскольку их суммарная длина может быть значительно меньше длины накопительного кольца. Однако при этом имеет место небольшое нарушение синхронности изменения поляризации частиц.

Продольное магнитное поле можно использовать практически для любого преобразования поляризации пучка. Однако в отличие от существующих ротаторов спина [1,2,10] его применение ограничено областью малых и промежуточных энергий.

Автор выражает благодарность И.А. Коопу и Б.И. Хазину за сделанные замечания и обсуждение полученных результатов.

## Список литературы

- [1] *Barber D.P., Boge M., Bremer H.D.* et al. // *Phys. Lett.* 1995. V. 343B. P. 436–443.
- [2] *Barber D.P.* // Preprint DESY-98-096B (1998); E-Print Archive: physics/9901041.
- [3] *Derbenev Yu.S., Kondratenko A.M., Serebnyakov S.I.* et al. // *Part. Accel.* 1978. V. 8. P. 115–126.
- [4] *Koop I., Pozdeev E., Shatunov Yu.* et al. // *Nucl. Instr. Meth.* 1999. V. 427A. P. 36–40.
- [5] *Vasserman I.B., Vorobiev P.V., Gluskin E.S.* et al. // *Phys. Lett.* 1987. V. 198B. P. 302–306.
- [6] *Дербенев Я.С., Кондратенко А.М.* // *ЖЭТФ.* 1973. Т. 64. С. 1918–1929.
- [7] *Силенко А.Я.* // *ЖЭТФ.* 1998. Т. 114. С. 1153–1161.
- [8] *Farley F.J.M.* // *Phys. Lett.* 1972. V. 42B. P. 66–68.
- [9] *Orlov Yu.F.* // *Proceedings of the 13th International Symposium on High Energy Spin Physics (Spin98, 1998, Protvino, Russia)* / Ed. by N.E. Tyurin. Singapore: World Scientific, 1999. P. 509–511.
- [10] *Buon J., Steffen K.* // *Nucl. Instr. Meth.* 1986. V. 245A. P. 248.