

10.4 Магнитные моменты легких ядер

Описание работы: В работе вычисляются магнитные моменты протона, дейтрона и ядра фтора на основе изменения их g -факторов методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Полученные данные сравниваются с вычислениями магнитных моментов на основе кварковой модели адронов и одночастичной оболочечной модели ядер.

Теория:

Полный момент ядра:

$$\mathbf{I} = \mathbf{L} + \mathbf{S},$$

где \mathbf{L} - полный орбитальный момент нуклонов, \mathbf{S} - собственная часть момента количества движения, спин. (Для четного числа нуклонов I целое, для нечетного полуцелое.)

Отношение дипольного момента μ ядра к механическому моменту называется гиромагнитным соотношением:

$$\gamma = g\gamma_0,$$

где g - фактор Ланде, а за единицу γ_0 принимается гиромагнитное отношение для орбитального движения электрона в атоме:

$$\gamma_0 = -\frac{e}{2m_e c}$$

- Аналогично, в ядерной физике:

$$\gamma_n = \frac{e}{2Mc}$$

- Магнитный момент ядра:

$$\mu = \gamma_n \hbar I = g_{\text{я}} \mu_{\text{я}} I$$

Ядерный магнитный резонанс. ЯМР - это резонансное поглощение электромагнитной энергии в веществах, обусловленное ядерным переманчиванием. ЯМР наблюдается в постоянном магнитном поле \mathbf{H}_0 при одновременном воздействии на образец радиочастотного магнитного поля, перпендикулярного \mathbf{H}_0 , и обнаруживается по поглощению излучения.

В магнитном поле ядерные уровни расщепляются и под действием внешнего высокочастотного поля могут происходить электромагнитные переходы между компонентами расщепившегося уровня, это явление носит резонансный характер. Различие по энергии между двумя соседними компонентами:

$$\Delta E = g \mu_{\text{я}} B_0 = h f_0$$

Частота квантов:

$$f_0 = \frac{\Delta E}{h} = \frac{g_{\text{я}} \mu_{\text{я}} B_0}{h}$$

Константы:

$$h = 6.626070040 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}$$
$$\mu_{\text{я}} = 0.505 \cdot 10^{-23} \text{ эрг} \cdot \text{Гс}^{-1}$$

In [8]:

Out[8]:

0.342268278052223

In [22]:

```
import numpy as np
import scipy
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from scipy.optimize import minimize
from IPython.display import display
```

Результаты:

In [29]:

```
B = [231, 230, 241]
f = [9.7981, 9.77, 9.81]
h = 6.626
u = 0.505
table = pd.DataFrame.from_dict({'Материал': ['Вода', 'Резина', 'Тефлон'],
                                'Ядра': ['Водород', 'Водород', 'Фтор'],
                                '$B_0$ мТл': B,
                                '$f_0$ МГц': f
                                })
display(table)
```

	Материал	Ядра	B_0 мТл	f_0 МГц
0	Вода	Водород	231	9.7981
1	Резина	Водород	230	9.7700
2	Тефлон	Фтор	241	9.8100

Посчитаем g факторы для каждого материала.
Протон и фтор могут находиться только в двух состояниях ($I = 1/2$).

In [40]:

```
g = [float('{:.4f}'.format(f_i * h / (H_i*u) * 10)) for H_i, f_i in zip(H, f)]
mu = list(map(lambda x: f'{x / 2}$\mu_я$', g))
mu_t = ['2.79276$\mu_я$', '2.79276$\mu_я$', '']
res = pd.DataFrame.from_dict({'Материал': ['Вода', 'Резина', 'Тефлон'],
                              'Ядра': ['Водород', 'Водород', 'Фтор'],
                              '$g$': g,
                              '$\mu$': mu,
                              '$\mu_t$': mu_t
                              })

display(res)
```

	Материал	Ядра	g	μ	μ_t
0	Вода	Водород	5.5895	$2.79475\mu_я$	$2.79276\mu_я$
1	Резина	Водород	5.5735	$2.78675\mu_я$	$2.79276\mu_я$
2	Тефлон	Фтор	5.3409	$2.67045\mu_я$	

Вывод:

- Методом ядерного агнитного резонанса измерили магнитный момент протона и фтора.
- Для протона получили значения очень похожие на табличные. Можно сделать вывод, что этим методом можно узнавать информацию о ядре с очень хорошей точностью.

In []: