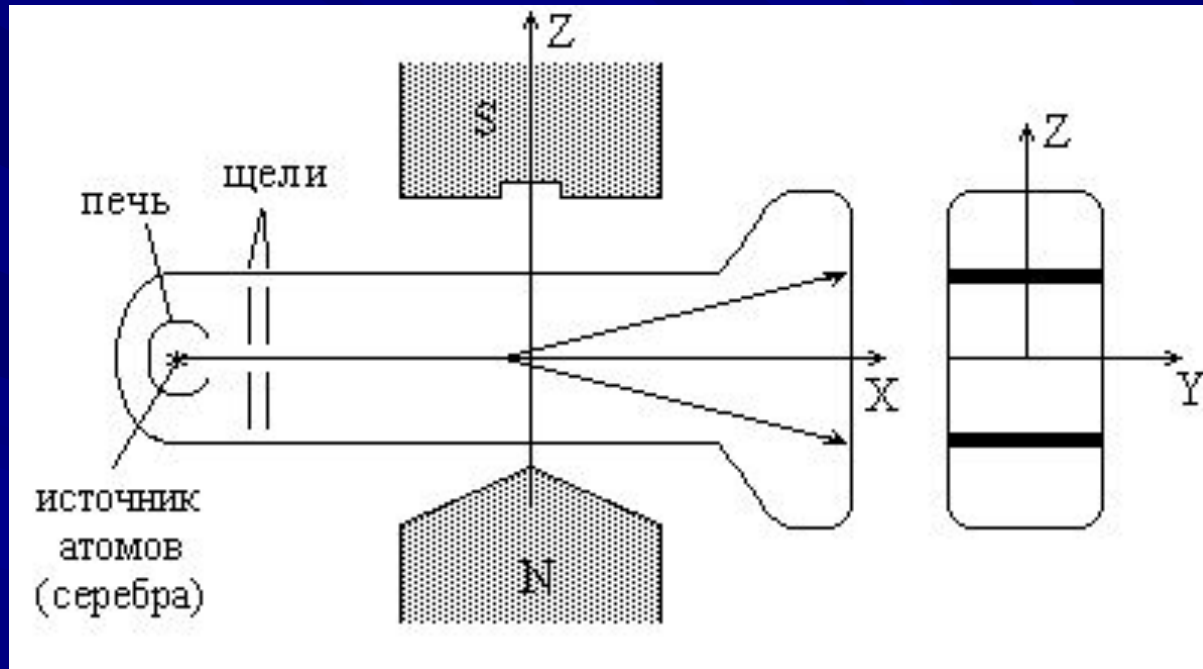


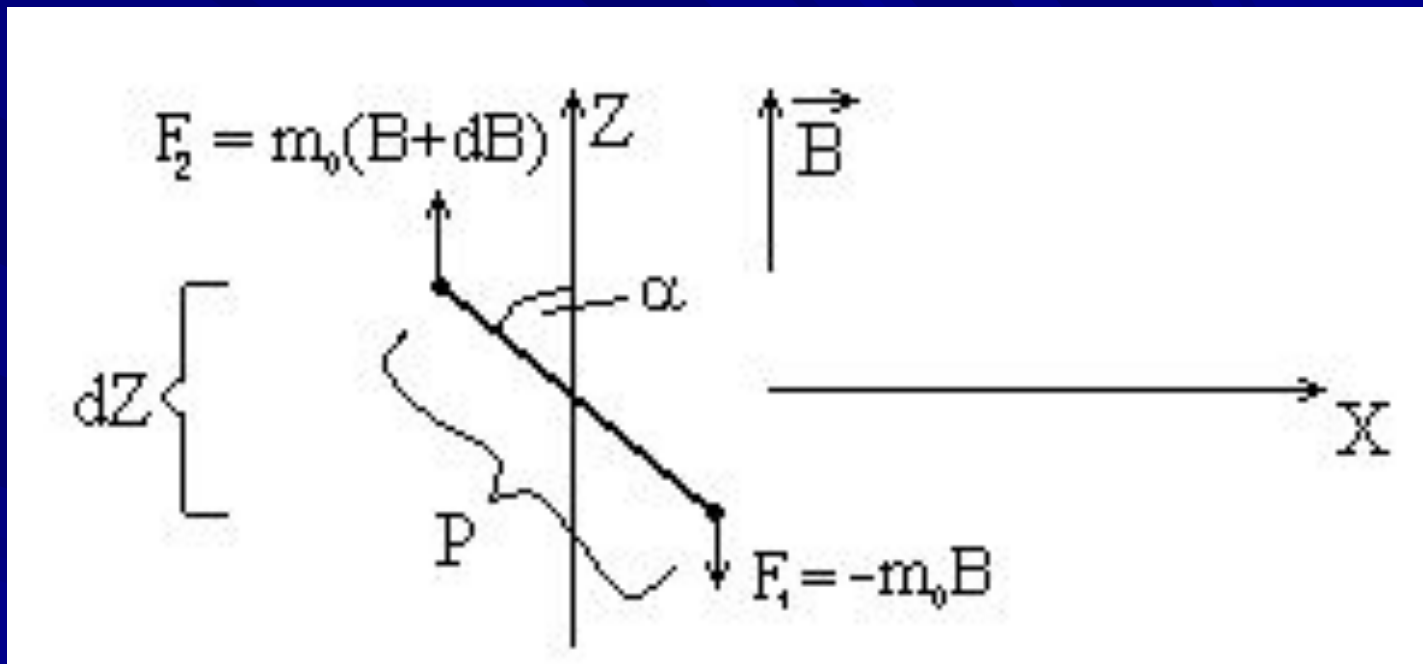
Кислицын А.А.  
Физика атома, атомного  
ядра и элементарных  
частиц

16 (1). Экспериментальные  
доказательства существования спина  
и магнитного момента электрона.

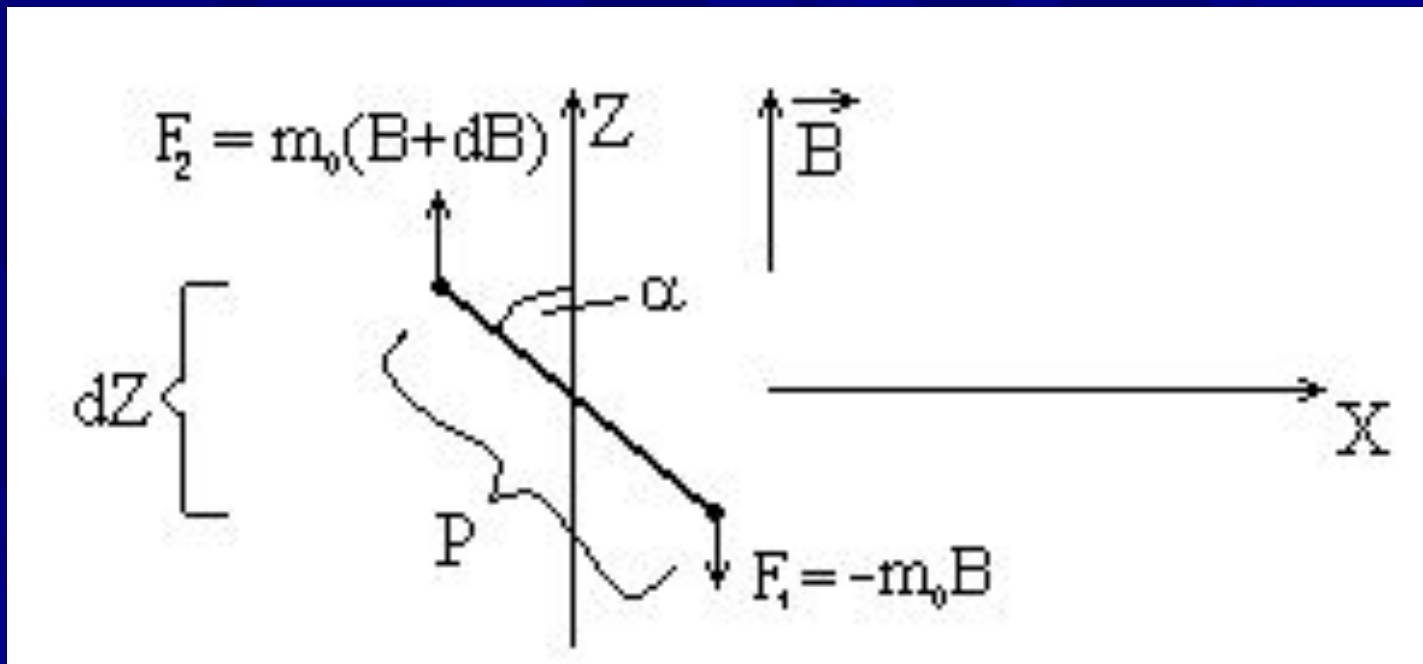
# Опыт Штерна и Герлаха (Stern O., Gerlach W., 1921-1922гг).



В вакуумной трубке находится маленькая печь, которая нагревает источник серебра. Атомы серебра при испарении вылетают из отверстия печи. Система щелей формирует узкий параллельный пучок атомов, который проходит через неоднородное магнитное поле между полюсами магнита и попадает на экран.



Рассмотрим силы, действующие на атом в неоднородном магнитном поле. Если атом имеет магнитный момент  $\mu$ , то его удобно представить в виде  $\mu = m_0 p$  – магнитного диполя, где  $m_0$  – фиктивный “магнитный заряд”, сосредоточенный в каждом из полюсов диполя,  $p$  – расстояние между “магнитными зарядами”.



Сила, действующая на диполь в направлении  $Z$  равна:

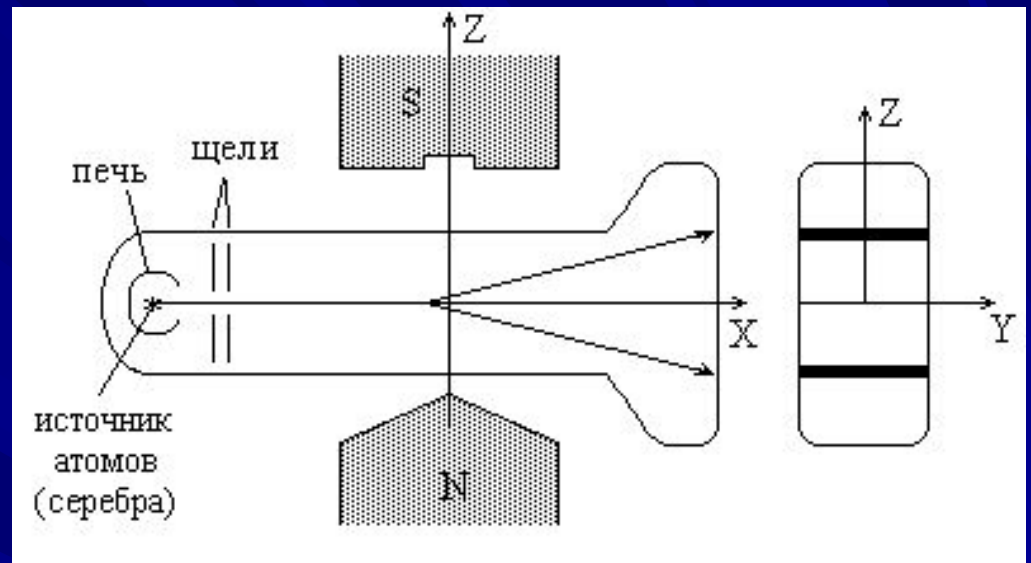
$$F_Z = F_2 - F_1 = m_0 \cdot (B + dB) - m_0 B = m_0 dB =$$

$$m_0 \frac{dB}{dZ} dZ = m_0 \frac{dB}{dZ} p \cos \alpha = \mu \frac{dB}{dZ} \cos \alpha$$

Итак,

$$F_Z = \mu \frac{dB}{dZ} \cos \alpha$$

так что в зависимости от ориентации вектора  $\mu$  (т.е. от угла  $\alpha$ ) диполь будет смещаться вдоль  $Z$  либо в сторону увеличения, либо в сторону уменьшения индукции внешнего поля. Измеряя отклонение пучка атомов можно не только доказать существование магнитного момента атома, но и измерить его, а также проверить правила квантования. Главная техническая трудность опыта состояла в создании такого поля, чтобы его неоднородность была заметна на расстояниях порядка размера атома. Такую неоднородность удалось создать специальным выбором формы полюсных наконечников магнита.



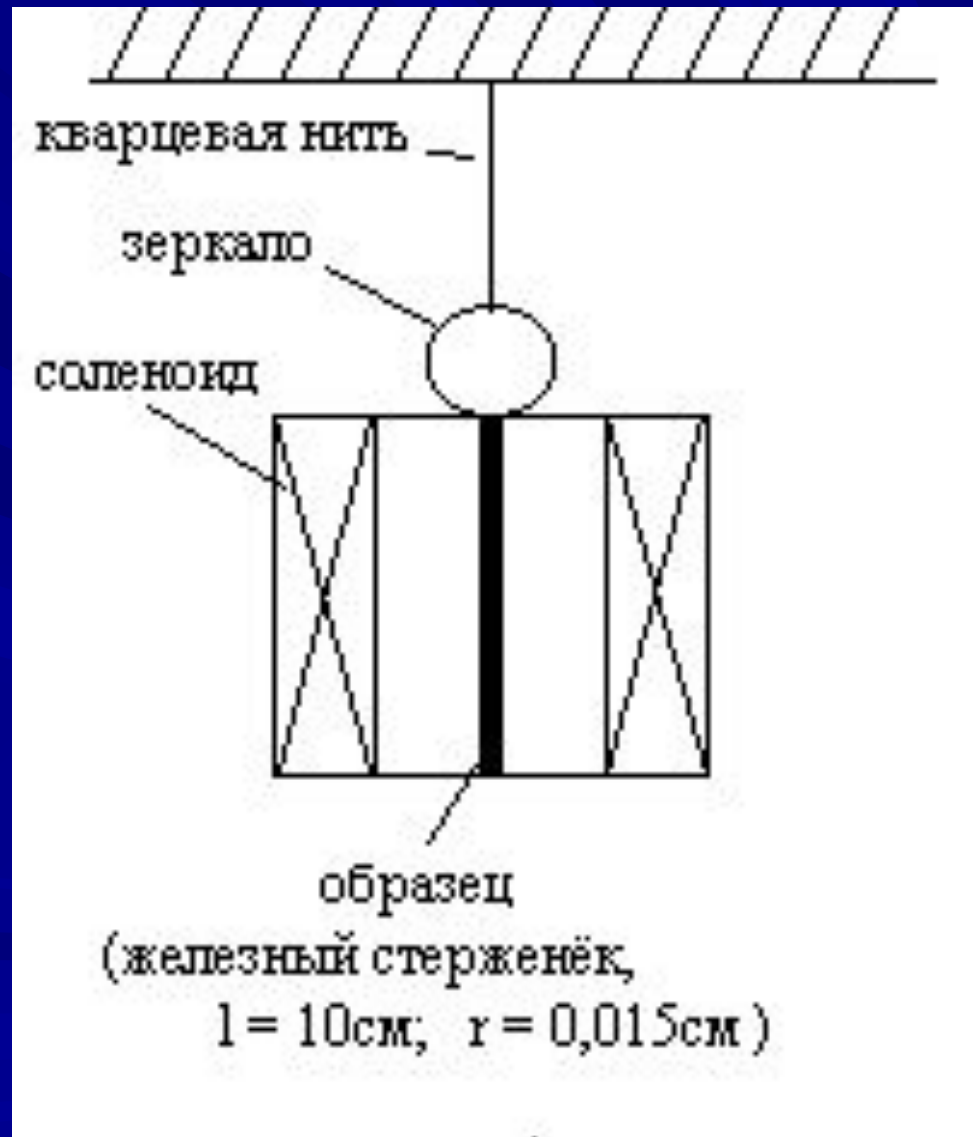
Если атомы могут ориентироваться произвольно относительно внешнего поля, то узкий первоначальный пучок растянется в широкую полосу в соответствии с произвольным значением  $\cos \alpha$  в пределах  $-1 \leq \cos \alpha \leq +1$ . Если же ориентация магнитных моментов подчиняется правилам квантования, т.е. если  $\cos \alpha$  может принимать только определенные дискретные значения, то первоначальный пучок расщепится на несколько пучков. Опыт с серебром показал, что пучок расщепляется на два пучка: на экране возникают две полосы симметрично оси  $Y$ . Позднее подобные опыты были поставлены с водородом и щелочными металлами; их результаты аналогичны.

В основном состоянии  $5s^1$  атом серебра имеет нулевой орбитальный момент, поэтому, если бы не было спина электрона, пучок вообще бы не расщеплялся. Опыт показал, что пучок расщепляется на два пучка; на экране возникают две полосы симметрично оси  $Y$ . Таким образом, опыт свидетельствует, что электрон имеет спин, и проекция спина на направление поля может принимать два значения. По скорости пучка и величине отклонения был измерен собственный магнитный момент электрона. Он оказался равным, как уже говорилось

$$\mu_s = 2\mu_0 \sqrt{s(s+1)}$$

# Опыт Эйнштейна и де-Гааза (Einstein A., de Haas W., 1915г).

Внутри соленоида на тонкой кварцевой нити подвешен металлический стержень (игла). С помощью зеркала измеряется угол поворота иглы.





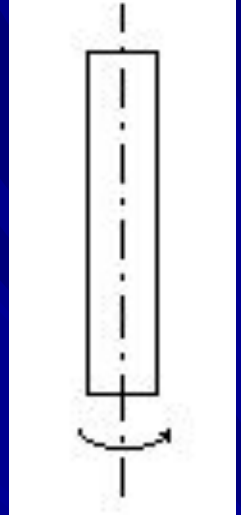
При пропускании через соленоид тока игла намагничивается – магнитные моменты атома ориентируются вдоль поля соленоида. Но магнитный момент связан с механическим, поэтому при намагничивании иглы механические моменты атомов ориентируются в направлении, противоположном направлению  $\mathbf{B}$ . До включения магнитного поля игла покоилась. При намагничивании на иглу не действуют никакие закручивающие внешние силы, поэтому общий момент импульса иглы должен остаться неизменным. Следовательно, механический момент атомов, ориентированный против поля, должен компенсироваться моментом всей иглы, направленным противоположно, т.е. игла должна повернуться, и нить закручивается.

Конечно, этот эффект очень мал. Поэтому для его усиления был использован резонанс: через соленоид пропускался переменный ток с частотой, близкой к собственной частоте крутильных колебаний иглы, подвешенной на нити. При этих условиях эффект был доступен для достаточно точных измерений не только с ферромагнитными веществами, но и с парамагнитными.

Отношение магнитного момента к механическому, определенное из этих опытов, оказалось равным  $e/m_e$ , т.е. вдвое большим, чем для орбитального момента. Этот результат указывает, что намагничивание иглы обусловлено не орбитальными электронными токами, а собственными магнитными моментами электронов.

# Опыт Барнета (Barnett S., 1909 – 1915 гг.)

Опыт Барнета – обратный опыту Эйнштейна – де-Гааза. Железный стержень приводился в быстрое вращение (100 об/сек). Электроны при вращении ориентируются в направлении оси вращения, что приводит к намагничиванию стержня. При вращении стержня в противоположном направлении он перемагничивается. Величина возникающего при вращении стержня магнитного поля очень мала (в 1000 раз меньше магнитного поля Земли). Потребовалось несколько лет работы, чтобы добиться необходимой точности измерения (ок. 1%).



- Итак, наличие спина и собственного магнитного момента электрона доказано прямыми экспериментами.
- В дальнейшем выяснилось, что свойство спина не является исключительной особенностью электронов. Спином обладают протоны, нейтроны и другие элементарные частицы. При этом одни частицы имеют спин, равный полуцелому числу  $\hbar$  ( $1/2\hbar, 3/2\hbar, \dots$ ), к ним принадлежат электроны, протоны, нейтроны и др. Другие частицы имеют спин, равный целому числу  $\hbar$ . Это, например, фотоны, пи-мезоны и др.