



I. Спин электрона. Опыт Штерна и Герлаха

03:32:50 Алексей Черепанов <https://cloud.mail.ru/public/Hwwn/DCFYrATeU>

В 1922 году немецкие физики О. Штерн и В. Герлах поставили опыты, целью которых было измерение магнитных моментов P_m атомов различных химических элементов. Для химических элементов, образующих первую группу таблицы Менделеева и имеющих один валентный электрон, магнитный момент атома равен магнитному моменту валентного электрона, т.е. одного электрона.

Идея опыта заключалась в измерении силы, действующей на атом в сильно неоднородном магнитном поле. Неоднородность магнитного поля должна быть такова, чтобы она сказывалась на расстояниях порядка размера атома. Только при этом можно было получить силу, действующую на каждый атом в отдельности.

Схема опыта изображена на рис. 7.9. В колбе с вакуумом, 10^{-5} мм рт. ст., нагревался серебряный шарик K , до температуры испарения.

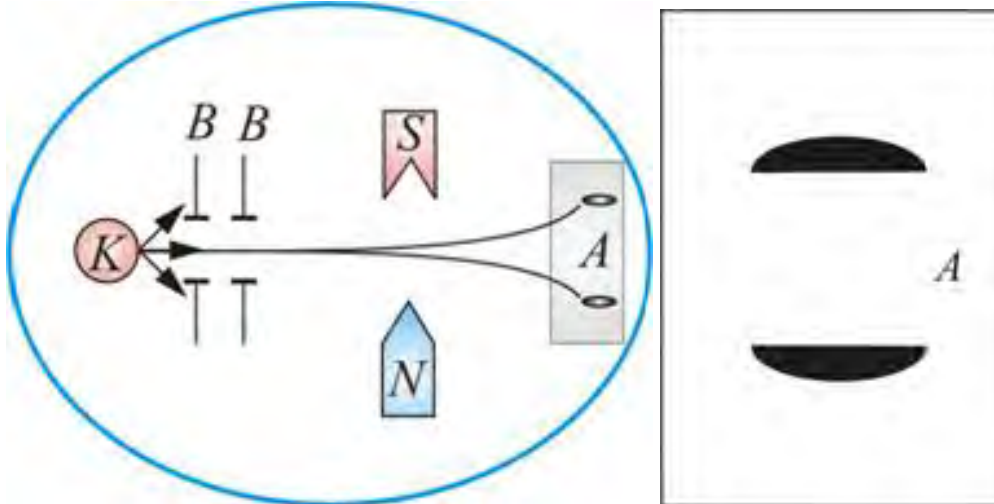


Рис. 7.9 Рис. 7.10

Атомы серебра летели с тепловой скоростью около 100 м/с через щелевые диафрагмы B и, проходя резко неоднородное магнитное поле, попадали на фотопластинку A .

Если бы момент импульса атома $\vec{L}_e$ (и его магнитный момент $\vec{P}_m$) мог принимать произвольные ориентации в пространстве (т.е. в магнитном поле), то можно было ожидать непрерывного распределения попаданий атомов серебра на фотопластинку с большой плотностью попаданий в середине. Но на опыте были получены совершенно неожиданные результаты: на фотопластинке получились две резкие полосы – все атомы отклонялись в магнитном поле двояким образом, соответствующим лишь двум возможным ориентациям магнитного момента (рис. 7.10).

Этим доказывался **квантовый характер магнитных моментов электронов**. Количественный анализ показал, что проекция магнитного момента электрона равна **магнетону Бора**:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$$

Таким образом, для атомов серебра Штерн и Герлах получили, что проекция магнитного момента атома (электрона) на направление магнитного поля численно равна магнетону Бора.

Напомним, что

$$P_z = \frac{e}{2m_e} L = \frac{e\hbar^2}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

Опыты Штерна и Герлаха не только подтвердили **пространственное квантование моментов импульсов в магнитном поле**, но и дали экспериментальное подтверждение тому, что магнитные моменты электронов *тоже* состоят из некоторого числа «элементарных моментов», т.е. имеют

дискретную природу. Единицей измерения магнитных моментов электронов и атомов является **магнетон Бора** ($\hbar$ – единица измерения механического момента импульса).

Кроме того, в этих опытах было обнаружено новое явление. Валентный электрон в основном состоянии атома серебра имеет орбитальное квантовое число $l = 0$ (s -состояние). Но при $l = 0$

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)} = 0$$

(проекция момента импульса на направление внешнего поля равна нулю). Возник вопрос, пространственное квантование *какого* момента импульса обнаружилось в этих опытах и проекция какого магнитного момента равна магнетону Бора.

В 1925 г. студенты Геттингенского университета Гаудсмит и Уленбек предположили существование **собственного механического момента импульса у электрона** L_s (**спина**) и, соответственно, **собственного магнитного момента электрона** P_{ms} .

Введение понятия спина сразу объяснило ряд затруднений, имевшихся к тому времени в квантовой механике. И в первую очередь – результатов опытов Штерна и Герлаха.

Авторы дали такое толкование **спина**: **электрон – вращающийся волчок**. Но тогда следует, что «поверхность» волчка (электрона) должна вращаться с линейной скоростью, равной $300c$, где c – скорость света. От такого толкования спина пришлось отказаться.

В современном представлении – **спин**, как заряд и масса, есть свойство электрона.

П. Дирак впоследствии показал, что существование спина вытекает из решения релятивистского волнового уравнения Шредингера.

Из общих выводов квантовой механики следует, что **спин должен быть квантован**:

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$$

где s – **спиновое квантовое число**.

Аналогично, **проекция спина** на ось z (L_{sz}) (ось z совпадает с направлением внешнего магнитного поля) должна быть квантована и вектор $\vec{L}_s$ может иметь $(2s + 1)$ различных ориентаций в магнитном поле.

Из опытов Штерна и Герлаха следует, что таких ориентаций всего две: $2s + 1 = 2$, а значит $s = 1/2$, т.е. спиновое квантовое число имеет только одно значение.

Для атомов первой группы, валентный электрон которых находится в s -состоянии ($l = 0$), **момент импульса атома равен спину валентного электрона**. Поэтому обнаруженное для таких атомов пространственное квантование момента импульса в магнитном поле является доказательством наличия у спина лишь **двух ориентаций** во внешнем поле. (Опыты с электронами в p -состоянии подтвердили этот вывод, хотя картина получилась более сложной) (желтая линия натрия – дуплет из-за наличия спина).

$$L_s = \frac{\hbar}{2}$$

Численное значение спина электрона:

По аналогии с пространственным квантованием орбитального момента L проекция спина L_{sz} квантуется (аналогично, как $m = \pm l$, то и $m_s = \pm s$). Проекция спина на направление внешнего магнитного поля, являясь квантовой величиной, определяется выражением: $L_{sz} = \hbar m_s$,

где m_s – магнитное спиновое квантовое число, $m_s = \pm 1/2$, т.е. может принимать только два значения, что и наблюдается в опыте Штерна и Герлаха.

Итак, **проекция спинового механического момента импульса на направление внешнего магнитного поля может принимать два значения**:

$$L_{sz} = \pm 1/2 \hbar \quad (7.4.1)$$

Так как мы всегда имеем дело с проекциями, то говоря, что спин имеет две ориентации, имеем в виду две проекции.

Проекция спинового магнитного момента электрона на направление внешнего магнитного поля:

$$P_{\text{мз}} = \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = \frac{e}{m_e} L_{\text{з}}$$

$$\text{Отношение } \frac{P_{\text{мз}}}{L_{\text{з}}} = -\frac{e}{m_e} = \gamma_s \quad - \text{спиновое гиромагнитное отношение.}$$



Рисунок 4: Наблюдаемый рисунок на пластине детектора: слева без магнитного поля, посередине с магнитным полем и справа геометрия пятна луча вблизи края магнита. Поскольку напряженность магнитного поля быстро уменьшается с расстоянием от края магнита (перпендикулярно направлению В-поля), компоненты луча сливаются. (Изображения из частной коллекции слайдов Штерна, Gy-UBFAZ, см. также (Gerlach and Stern, 1922b, стр. 350, 351))

Замечание Черепанова А.И. от 20 октября 2024 года – В качестве детектора в эксперименте Штерна-Герлаха использовалась фотопластина, которая имела фотоэмульсию. Известно что происходит с фотоэмульсией когда на неё падает световая фотонная волна (это знает каждый кто использовал фотопленку в своем фотоаппарате и самостоятельно её потом проявлял). Так что в эксперименте Штерна-Герлаха также на фотопластину падала фотонная волна и исследователи наблюдали её почернение... Их заблуждение состояло в том, что они посчитали, что данное почернение связано было с осаждением на фотопластине атомов серебра, но это было не так.

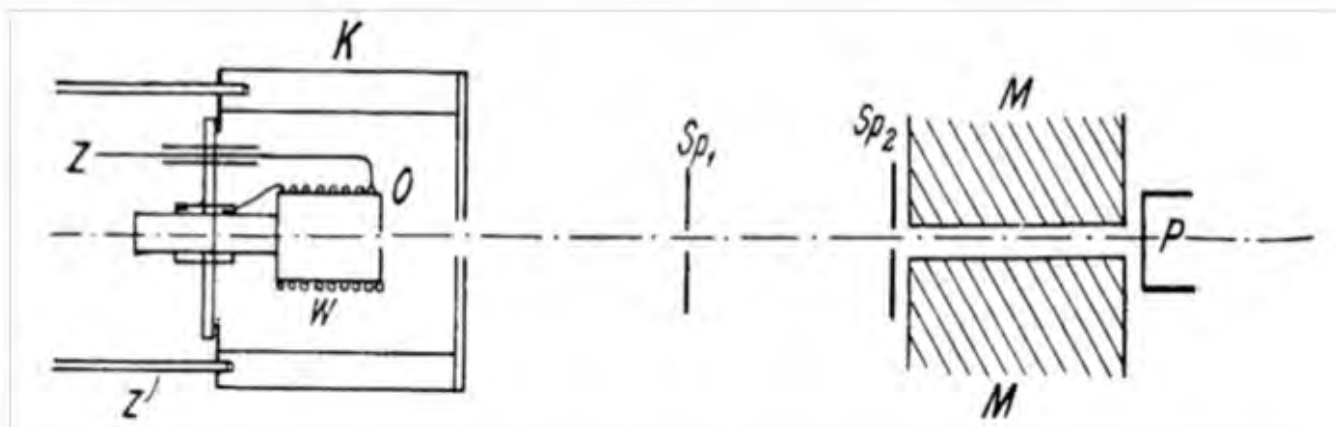


Рисунок 3: Схема оригинального SGE (Герлах и Штерн, 1924, стр. 677). Серебро нагревается в печи, которая электрически нагревается проволокой W с электрическими выводами Z. Печь охлаждается охладителем K, Sp1 и Sp2 — коллиматоры, M — магнит, а P — охлаждаемая детекторная пластина (изображение из частной коллекции слайдов Штерна, Gy-UBFAZ).

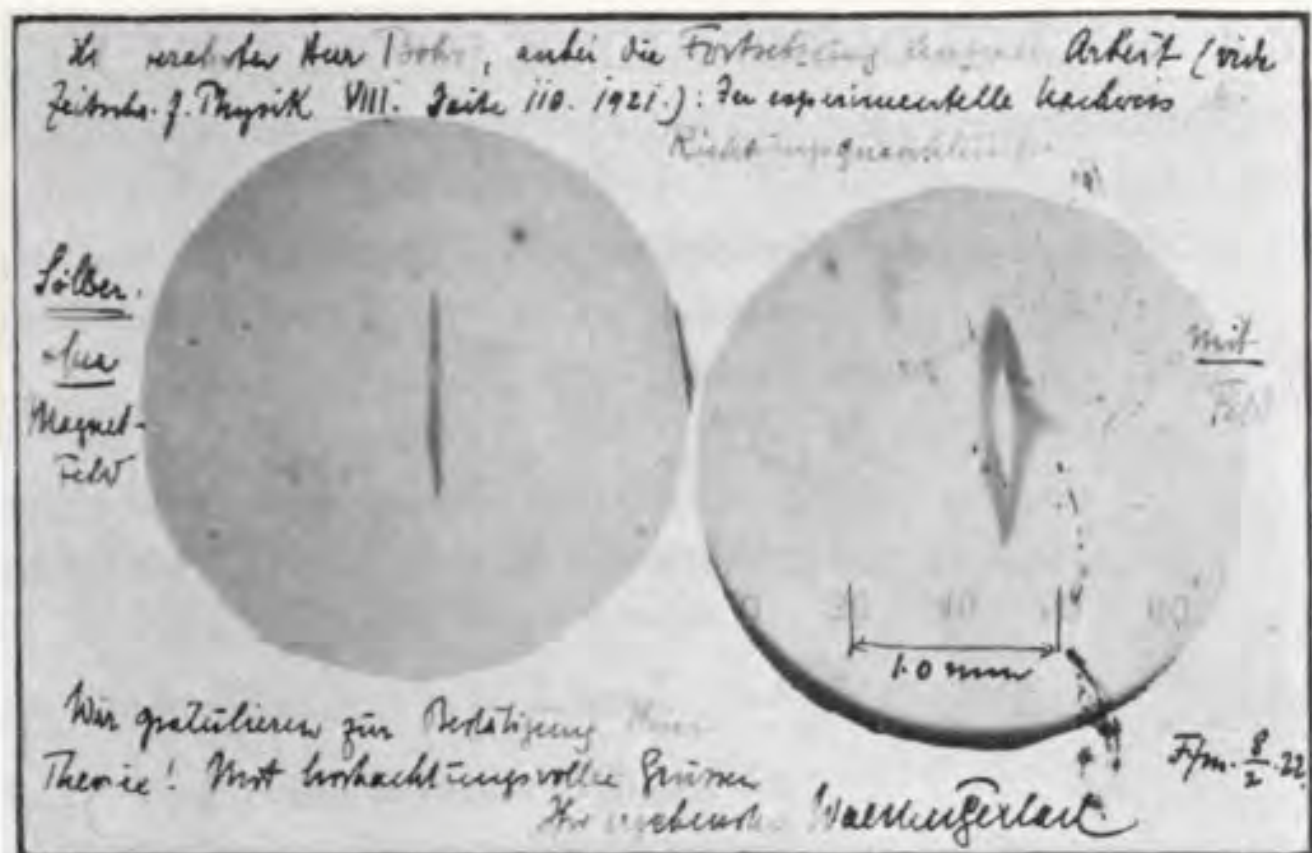


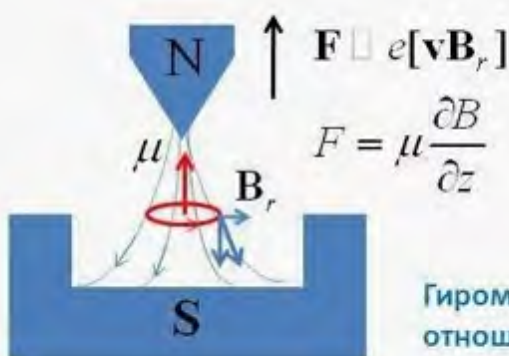
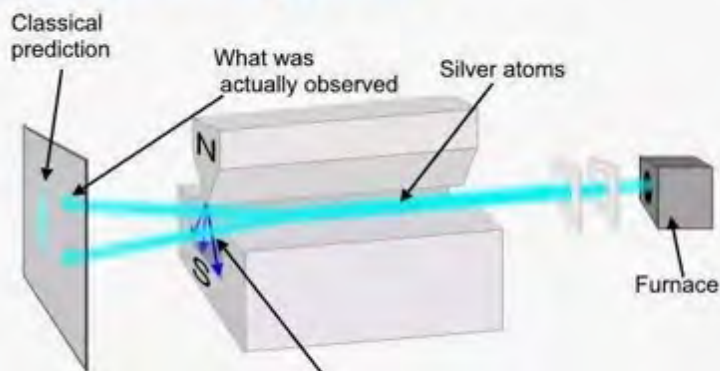
Рисунок 4. Открытка Герлаха, датированная 8 февраля 1922 года, Нильсу Бору. На ней изображена фотография расщепления пучка с сообщением в переводе: «Прилагается экспериментальное доказательство направленного квантования».

Опыт Штерна-Герлаха



Отто Штерн Вальтер Герлах

(1922)



Гиромангнитное отношение

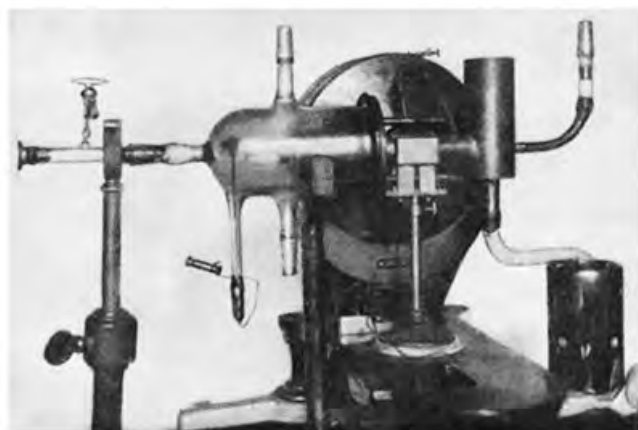
$$\frac{\mu}{M} = \frac{e}{m}$$

Вместо

$$\frac{\mu_l}{M_l} = \frac{e}{2m}$$

Удвоенный магнетизм!

$$\mu = \pm \mu_A$$



Экспериментальная установка Штерна и Герлаха.



Отто Штерн (на фото) и Вальтер Герлах сами себе помогали, кури снгары в своей лаборатории. Сообщается, что сиганный дым помог развить себебояный осалок

Из Википедии –

«Опыт Штерна — Герлаха был задуман Отто Штерном в 1921 году и проведён им совместно с Вальтером Герлахом во Франкфурте в 1922 году[8]. В то время Штерн был ассистентом Макса Борна в Институте теоретической физики Франкфуртского университета и Герлах был ассистентом в Институте экспериментальной физики того же университета.

Во время эксперимента наиболее распространённой моделью описания атома была модель Бора, в которой электроны описывались как движущиеся вокруг **положительно заряженного** ядра только на определённых дискретных атомных орбиталях или энергетических уровнях. Поскольку энергия электрона квантована так, чтобы он находился только в определённых траекториях в пространстве, разделение на отдельные орбиты называлось квантованием пространства. Эксперимент Штерна — Герлаха должен был проверить гипотезу Бора — Зоммерфельда о том, что **направление углового момента** атома серебра **квантуется**.

Эксперимент был проведён за несколько лет до того, как Уленбек и Гоудсмит сформулировали свою гипотезу о существовании спина электрона. Несмотря на то, что результат опыта Штерна — Герлаха позже оказался в согласии с предсказаниями квантовой механики для частиц со спином-1/2, его следует рассматривать как подтверждение теории Бора — Зоммерфельда[11].

В 1927 году Т. Э. Фиппс и Дж. Б. Тейлор воспроизвели эффект, используя атомы водорода в их основном состоянии, тем самым исключив любые сомнения, которые могли быть вызваны использованием атомов серебра[12]. Однако в 1926 году нерелятивистское уравнение Шрёдингера неверно предсказало, что магнитный момент водорода равен нулю в его основном состоянии. Чтобы решить эту проблему, Вольфганг Паули ввёл «вручную» три матрицы Паули, которые теперь носят его имя, но которые, как позже показал Поль Дирак в 1928 году, являются неотъемлемой частью его релятивистского уравнения.

Сначала эксперимент был проведён с электромагнитом, который позволял постепенно увеличивать неоднородное магнитное поле от нулевого значения[1]. Когда поле было нулевым, атомы серебра осаждались одной полосой на предметном стекле. Когда поле было усилено, середина полосы начала **расширяться** и, в конце концов, **разделилась на две части**, так что изображение на предметном стекле выглядело как отпечаток губ с отверстием посередине[13]. В середине, где магнитное поле было достаточно сильным, чтобы разделить луч на две части, статистически половина атомов серебра была отклонена неоднородностью поля.»

«Поскольку разрешение тогда было еще очень низким, структура пятна позволяла только грубо оценить величину магнитного момента атома серебра. Но она уже показала, что магнитный момент был примерно ожидаемого размера одного магнетона Бора. В этом первом эксперименте разрешение еще не позволяло Герлаху увидеть расщепление атомного пучка (Герлах и Штерн, 1921).

Одним из важнейших параметров первой конструкции SGE была коллимация серебряного пучка (Герлах и Штерн, 1922b). Серебряный пучок должен был сначала пройти через крошечное отверстие печи (диаметром 1 мм), затем на расстоянии 2,5 см через почти круглое отверстие (площадью $3 \cdot 10^{-3}$ мм²), а затем непосредственно перед входом в магнитное поле (на расстоянии 3,5 см от второго отверстия) он проходил через прямоугольное отверстие длиной 0,8 мм и шириной 0,3–0,4 мм.

Было практически невозможно получить контролируемый луч с достаточной интенсивностью, проходящий через все три отверстия. В первые дни февраля 1922 года Штерн и Герлах встретились на небольшой конференции в Геттингене (Friedrich and Herschbach, 2003) и решили заменить одно круглое отверстие прямоугольной щелью. Эта модификация сразу же оказалась правильным решением. Несколько дней спустя, в ночь с 7 на 8 февраля 1922 года, SGE был успешным (Gerlach and Stern, 1922b). На рисунке 3 показан эскиз в конечном итоге успешной установки SGE. Будучи ночным работником, только Герлах руководил экспериментом в эту ночь. Аспирант Вильгельм Шютц присоединился к нему утром 8 февраля (Schütz, 1969). Штерн уже вернулся в Росток. Из-за небольшого размера аппарата SG (расстояние между коллиматорами около 3 см) наблюдаемая структура дублета была едва разделима (около 0,1 мм), но **микроскопическая фотография пластины детектора** ясно показывала отчетливое разделение двух лучей, см. Рисунок 4. Результат явно противоречил результату, предсказанному в соответствии с классической теорией. Классически следует ожидать только расширения наблюдаемого пятна. Согласно квантовой теории, луч должен разделиться, но были некоторые разногласия относительно того, должен ли он разделиться на два или три луча.»

Сегодня физики признают, что Штерн и Герлах были правы, интерпретируя свой эксперимент как подтверждение все еще зарождающейся квантовой теории. Но они были правы по неправильной причине. Ученые предположили, что расщепленная траектория атома серебра определяется орбитой его самого внешнего электрона, который зафиксирован под определенными углами. На самом деле расщепление происходит из-за квантования внутреннего углового момента электрона — величины, известной как спин, которая не будет открыта еще несколько лет. По счастливой случайности интерпретация сработала, потому что исследователей спасло то, что Фридрих называет «странным совпадением, этим заговором природы»: два пока неизвестных свойства электрона — его спин и его аномальный магнитный момент — случайно уравновесились.

Спин электрона. Опыт Штерна и Герлаха - <https://cloud.mail.ru/public/Hwwn/DCFYrATeU>

Разбор эксперимента Дж.Томсона — <https://dzen.ru/video/watch/66e94e6bdf8d72ead3d74d9>

....

II. [01:52:49](#) **Valentin Shironosov:**

странно, но опыт на стр. 31 легко объясним на основе обычных НОДУ и НПР - <https://ikar.udm.ru/mis-rt.htm> сборник №66-6 (три 6-ки), {66 №№5-8} и работ П.Л. Капицы и В.Н. Челомея (см. стр.7-13 <https://www.ikar.udm.ru/files/pdf/sb22.pdf>) о перевернутом Маятнике:

66-6. О маятнике П.Л. Капицы и В.Н. Челомея вне и в зоне параметрического резонанса. (Ширососов В.Г.— ЖТФ, 1990, т. 60, вып. 12, с. 1-7.)  [sb66-6.pdf](#)

66-5. Об устойчивости неустойчивых состояний, бифуркации, хаосе нелинейных динамических систем. (Ширососов В.Г.- ДАН СССР, 1990, т. 314, № 2, с. 316-320.)  [sb66-5.pdf](#)

66-6. О маятнике П.Л. Капицы вне и в зоне параметрического резонанса. (Ширососов В.Г.— ЖТФ, 1990, т. 60, вып. 12, с. 1-7.)  [sb66-6.pdf](#)

66-7. Задача двух магнитных диполей с учетом уравнений движения их спинов. (Ширососов В.Г.— Известия вузов МВ и ССО СССР, Физика, 1985, № 7, с. 74-78.)  [sb66-7.pdf](#)

66-8. Эффект резонансного захвата спиновых частиц (Ширососов В.Г.— ЖТФ, 1983, т. 53, вып. 7, с. 1414-1416.)  [sb66-8.pdf](#)

II. [XX:XX:XX](#) :

