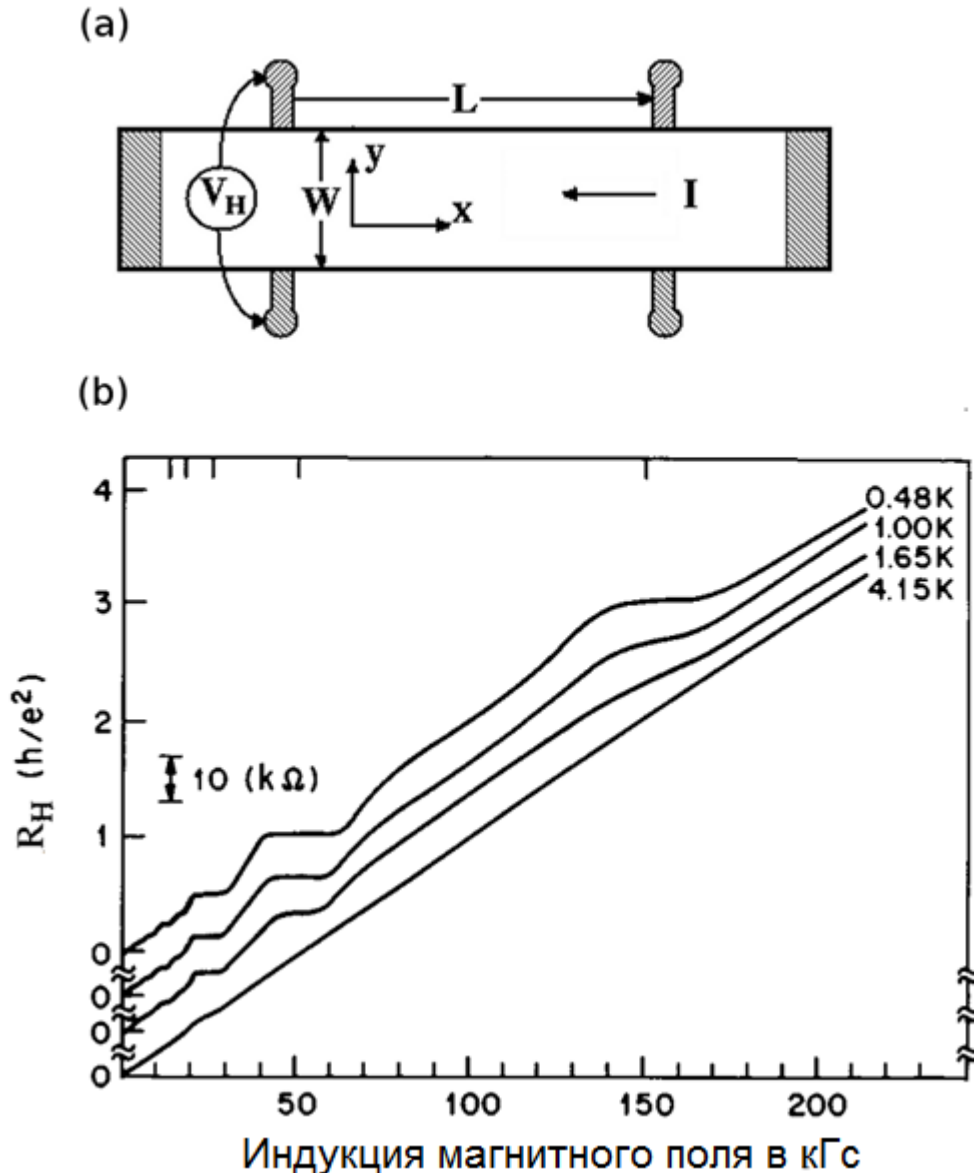


Задача 1

Дробный квантовый эффект Холла (ДКЭХ) был обнаружен Д. К. Цуи и Г. Стормером в 1981 году. В эксперименте электроны могли двигаться только вдоль поверхности пластинки, изготовленной из GaAs/AlGaAs (т.е. толщиной электронного слоя можно пренебречь). Перпендикулярно к электронной системе было приложено сильное однородное магнитное поле. Прохождение тока I по поверхности пластинки приводит к появлению Холловской разности потенциалов V_H , а при достаточно низких температурах на кривой зависимости Холловского сопротивления от величины магнитного поля появляется плато, которое соответствует Холловскому сопротивлению $R_H = 3h/e^2$. Появление этого плато свидетельствует о наличии квазичастиц с дробным зарядом, которые будут рассмотрены ниже.

- (a) В классической модели электроны на поверхности пластинки GaAs/AlGaAs ведут себя как заряженные шарики с некоторой эффективной массой m^* .
- (i) (2 балла) Запишите уравнение движения электрона в перпендикулярном электрическом $\vec{E} = -E_y \hat{y}$ и магнитном $\vec{B} = B \hat{z}$ полях, где \hat{x} , \hat{y} и \hat{z} – единичные вектора по направлениям осей X, Y и Z.
- (ii) (1 балл) Найдите установившуюся скорость электронов v_s .
- (iii) (1 балл) Укажите направление этой скорости?
- (b) (2 балла) По определению Холловское сопротивление $R_H = V_H/I$. Представьте R_H как функцию от числа свободных электронов N на поверхности пластинки и магнитного потока ϕ через пластинку, который равен $\phi = BWL$, где W и L – ширина и длина пластинки соответственно.
- (c) (2 балла) Из квантовой механики следует, что внешнее магнитное поле приводит к появлению коллективного движения электронов, которое можно рассматривать как круговые вихри. Количество вихрей определяется тем, что на создание одного вихря требуется поток внешнего магнитного поля, равный h/e , где h – постоянная Планка, а e – заряд электрона. Для случая $R_H = 3h/e^2$, найдите коэффициент заполнения ν , который представляет собой отношение числа электронов N на поверхности пластинки к числу вихрей $N\phi$.



- (d) (2 балла) Если на один электрон приходится более одного вихря, то это приводит к дополнительному отталкиванию электронов, энергия которого $\Delta U(B) \propto B^\alpha$ оценивается как средняя электростатическая энергия взаимодействия двух электронов при фиксированном коэффициенте заполнения. Определите коэффициент α .
- (e) (2 балла) Некоторые вихри не связаны с электронами и могут быть рассмотрены как квазичастицы, способные нести дробный заряд $e^* = e/n$, где $\nu = 1/n$. На какую величину ΔB надо изменить индукцию внешнего поля для того, чтобы в системе возникла одна квазичастица.
- (f) В рассматриваемом эксперименте величина индукции внешнего магнитного поля для плато $R_H = 3h/e^2$ была равной $B_{1/3} = 15$ Тл.

Эффективная масса электрона в пластинке GaAs, $m^* = 0.067 m_e$,

Масса электрона, $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ кг,

Постоянная в законе Кулона, $k = 9.0 \times 10^9$ Н·м²/Кл²,

Диэлектрическая постоянная, $\epsilon_0 = 1/4\pi k = 8.854 \times 10^{-12}$ Ф/м,

Элементарный заряд, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл,

Постоянная Планка, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Дж·с

Постоянная Больцмана, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

(i) **(1 балл)** Вычислите тепловую энергию электрона E_{th} при температуре $T = 1.0$ К.

(ii) **(2 балла)** Из законов квантовой механики следует, что для того чтобы поместить два электрона в один вихрь требуется затратить достаточно большую энергию. Оцените её, используя принцип неопределенности.

(g) Как видно из рисунка существует несколько плато с $R_H = h/ie^2$, где $i = 1, 2, 3 \dots$ – целое число. Это явление получило название целочисленного эффекта Холла. В отличие от него дробный эффект Холла связывают с существованием квазичастиц с дробным зарядом, что было подтверждено в 1997 году, когда была проведена серия экспериментов при коэффициенте заполнения $\nu = 1/3$, в которых определялся так называемый уровень шума при измерениях электрического тока через очень малый контакт (квантовая точка). В простейшей статистической модели число носителей n_τ с зарядом e^* , проходящих через такой контакт в течение малого интервала времени τ , подчиняется распределению вероятности Пуассона с параметром λ :

$$P(n_\tau = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!},$$

где $k!$ – факториал числа k . Вам может понадобиться следующая формула:

$$e^\lambda = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!}.$$

(i) **(2 балла)** Найдите силу тока через контакт I_B как функцию λ и τ .

(ii) **(2 балла)** Шум электрического тока обусловлен его флуктуациями, т.е. отклонениями от среднего значения. Уровень шума характеризуется величиной S_I , определяемой как среднее от квадрата отклонения электрического заряда от его среднего значения в единицу времени. Найдите уровень шума S_I как функцию λ и τ .

(iii) **(1 балл)** Найдите отношение уровня шума к величине тока S_I/I_B .

Как солнечный ветер «зажигает» северное сияние?



Рис. 1

Ниже содержатся вопросы, на которые Вам следует находить ответы, один за другим.

Основные сведения о взаимодействии между солнечным ветром и магнитным полем Земли

Как известно, Земля обладает постоянным магнитным полем, структура которого аналогична структуре магнитного поля обычного магнита, как показано на рис. 2. Магнитное поле Земли искажается солнечным ветром, который является высокоскоростным потоком горячей плазмы (плазмой называют квазинейтральный ионизированный газ). Этот поток плазмы вылетает из Солнца, его интенсивность зависит от солнечной активности. Солнечный ветер деформирует магнитное поле Земли, которое защищает Землю от солнечного ветра. Солнечный ветер «обтекает» магнитное поле Земли, как вода обтекает судно, см. рис. 3.

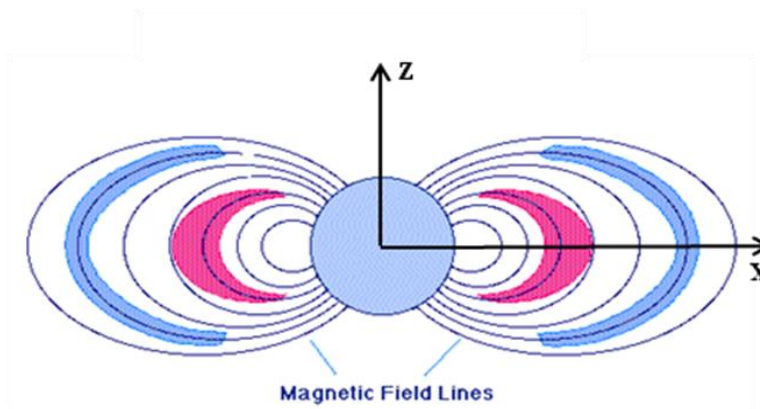


Рис. 2. Magnetic field lines – линии магнитного поля

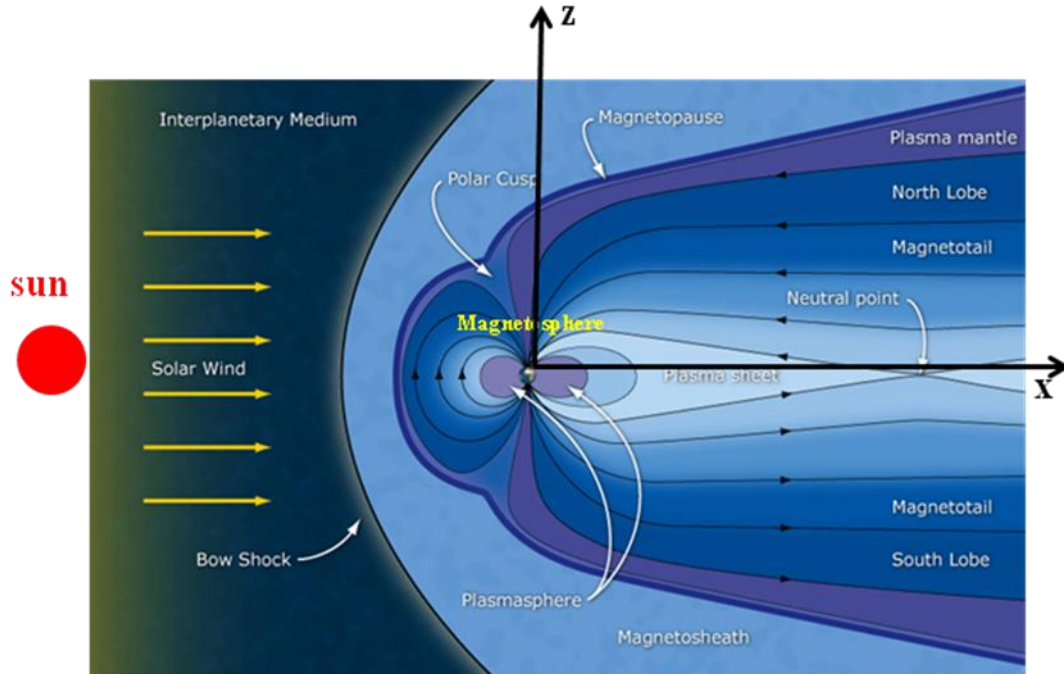


Рис. 3.

Sun – Солнце

Interplanetary Medium – межпланетное пространство

Solar Wind – солнечный ветер

Bow Shock – косая ударная волна

Magnetosheath – магнитослой

Magnetosphere – магнитосфера

Plasmasphere – плазменная сфера

Polar Cusp – полярный рог

Magnetopause – магнитопауза

Plasma Sheet – плазменная пелена

Neutral Point – нейтральная точка

Plasma Mantle – плазменная мантия

Magnetotail – магнитный след

North Lobe – северный лепесток

South Lobe – южный лепесток

Криволинейная поверхность, на которой солнечный вектор отклоняется в первый раз, называется *косой ударной волной*. Область за косой ударной волной спереди магнитного поля Земли называется *магнитослоем*. Область, окруженная солнечным ветром, называется *магнитосферой*. Магнитное поле Земли в значительной степени препятствует попаданию солнечного ветра в магнитосферу. Область контакта между солнечным ветром и магнитным полем Земли называется *магнитопаузой*. Расположение магнитопаузы в значительной степени определяется интенсивностью солнечного ветра и

направлением его магнитного поля. Когда направление магнитного поля солнечного ветра антипараллельно магнитному полю Земли, имеет место магнитное воссоединение на дневной стороне магнитопаузы, как показано рис. 4, что позволяет некоторым заряженным частицам солнечного ветра из области "А" переместиться в магнитный след "Р" на ночной стороне, как показано на рис. 5. Мощный солнечный ветер способен сдвинуть дневную магнитопаузу очень близко к Земле, что может привести к тому, что высокоорбитальный спутник (например, геостационарный спутник) будет полностью подвержен воздействию солнечного ветра. Высокоэнергетичные частицы солнечного ветра могут повредить высокотехнологичные электронные компоненты спутника, поэтому важно изучать движение заряженных частиц в магнитных полях. В частности, такое движение объясняет появление северного сияния и может помочь в понимании механизма взаимодействия между солнечным ветром и магнитным полем Земли.

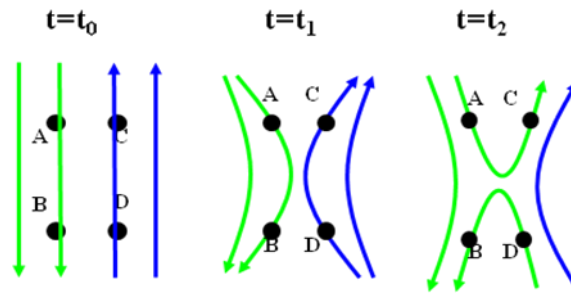


Рис. 4

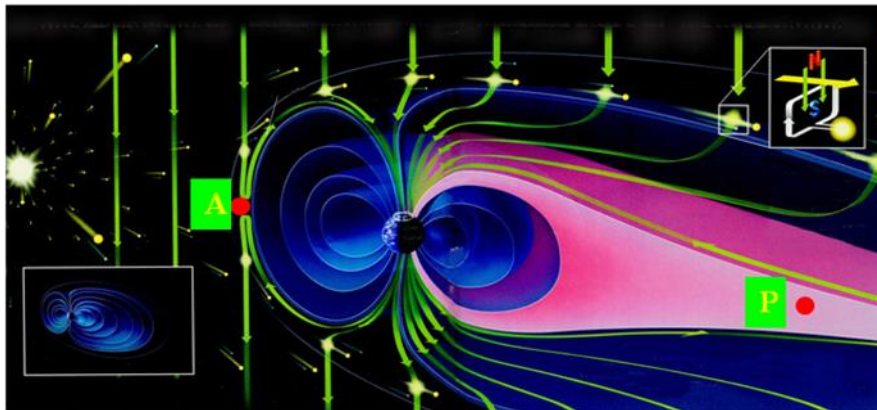


Рис. 5

Численные значения физических постоянных и дипольного магнитного поля Земли:

Скорость света в вакууме: $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ (м/с);

Электрическая постоянная: $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ Кл²/(Н м²);

Магнитная постоянная: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ (Н/А²);

Заряд протона: $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Кл);

Масса электрона: $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$;

Масса протона: $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$;

Постоянная Больцмана: $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (Дж/К);

Ускорение свободного падения: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ (м/с²);

Постоянная Планка: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (Дж·с)

Радиус Земли $R_E = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$.

Индукция магнитного дипольного поля Земли описывается формулой

$$\vec{B}_d = \frac{B_0 R_E^3}{r^5} [3xz\hat{x} - 3yz\hat{y} + (x^2 + y^2 - 2z^2)\hat{z}] \quad , \quad (r \geq R_E) \quad (1)$$

Здесь $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $B_0 = 3.1 \times 10^{-5} \text{ T}$ (Тл) а $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ - единичные вектора, направленные по осям x, y, z , соответственно.

Вопросы:

(a) (3 балла)

(i) (1 балл) Прежде, чем мы изучим движение заряженной частицы в дипольном магнитном поле Земли, рассмотрим движение электрона в однородном магнитном поле \vec{B} . Определите траекторию движения электрона, если начальная скорость электрона \vec{v} перпендикулярна индукции однородного магнитного поля, как показано на рис. 6. Электрон изначально расположен в точке $(x, y, z) = (0, 0, 0)$.

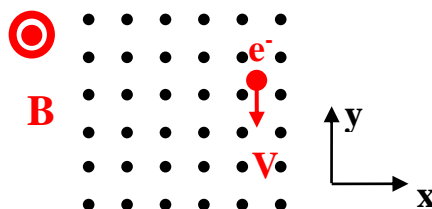


Рис. 6

(ii) (1 балл) Определите величину электрического тока, обусловленного движением электрона и вычислите магнитный момент $\vec{\mu} = I\vec{A}$; здесь $|A|$ - площадь круговой орбиты электрона; направление вектора \vec{A} определяется по

правилу буравчика (правой руки) в соответствии с направлением электрического тока.

(iii) (1 балл) Если начальная скорость электрона \vec{v} не перпендикулярна индукции однородного магнитного поля, т.е. угол θ между \vec{B} и \vec{v} $0^\circ < \theta < 90^\circ$, определите шаг спирали траектории электрона (расстояние вдоль оси z между соседними витками).

(b) (4 балла) Рассмотрим плазму в однородном фоновом магнитном поле, как показано на рис. 6. При этом если плотность плазмы неоднородна по x , то будет возникать электрический ток намагничивания. Для простоты предположим, что температура и распределение ионов и электронов одинаковы. Давление плазмы при этом описывается формулой:

$$p(x) = kT[n_i(x) + n_e(x)] = 2kTn(x) = 2kT(n_0 + \alpha x),$$

Здесь B, T, k, n_0 , и α являются положительными постоянными, $n_i(x)$ и $n_e(x)$ - концентрации ионов и электронов.

(i) (2 балла) Объясните схематичным рисунком причину возникновения тока намагничивания.

(ii) (2 балла) Если как ионы, так и электроны подчиняются распределению Максвелла, и распределение ионов описывается формулой

$$f_i(x, v_\perp, v_\parallel) = n_i(x) \left(\frac{m_i}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_i(v_\perp^2 + v_\parallel^2)/2kT},$$

вычислите постоянную β в выражении для намагниченности $M = \beta n(x) \frac{kT}{B}$, здесь намагниченность M есть маг-

нитный момент единицы объема. (Подсказка: $\int_0^\infty x \exp(-x) dx = 1$ и $\int_{-\infty}^\infty \exp(-x^2) dx = \sqrt{\pi}$.)

(c) (1 балл) Теперь вернемся к дипольному магнитному полю Земли. Пожалуйста, используйте результат из вопроса

(b) для вычисления отношения диамагнитного поля и дипольного магнитного поля Земли в уравнении (1) в поло-

жении ($x=10R_E, y=0, z=1 R_E$). Предполагается, что давление плазмы $p(z) = p_0 e^{-(z/a)^2}$; здесь $p_0 = 10^{-10}$ Па и

$a = 2R_E$. Магнитное поле в районе этого положения также можно считать однородным. Обратите внимание на

различие в координатных системах в вопросах (b) и (c). (Подсказка: Диамагнитное поле определяется форму-

лой $B_{mx} = \mu_0 M$.)

(d) (4 балла) Из рис. 2, 3 и 5 видно, что величина индукции магнитного поля Земли вдоль линии магнитного поля максимальна на полюсах и минимальна в экваториальной плоскости. Так как магнитное дипольное поле Земли обладает осевой симметрией и медленно изменяется вдоль линии магнитной индукции, оно для простоты может рассматриваться как поле магнитного зеркала, как показано на рис. 7. Величина индукции магнитного поля вдоль линии магнитного поля минимальна (B_0) в точке "P₂" и максимальна (B_m) в точках "P₁" и "P₃". Электрон с начальной

скоростью \vec{v} расположен в точке "P₂" и дрейфует по направлению к точке "P₃". Угол между начальной скоростью \vec{v} и индукцией магнитного поля в точке "P₂" составляет $0^\circ < \theta < 90^\circ$. Для поля магнитного зеркала $\vec{B} = B_r \hat{r} + B_z \hat{z}$

(причем $B_r \ll B_z$), можно считать, что $\frac{dB}{dz} = \frac{dB}{ds}$; здесь $\frac{dB}{ds}$ частная производная от B вдоль линии магнитной индукции. При этом $\langle B_r \rangle = -\frac{1}{2} \frac{dB}{dz} r_c \ll B_z$, здесь $\langle B_r \rangle$ есть усредненная по кругу B_r , а r_c радиус вращения электрона.

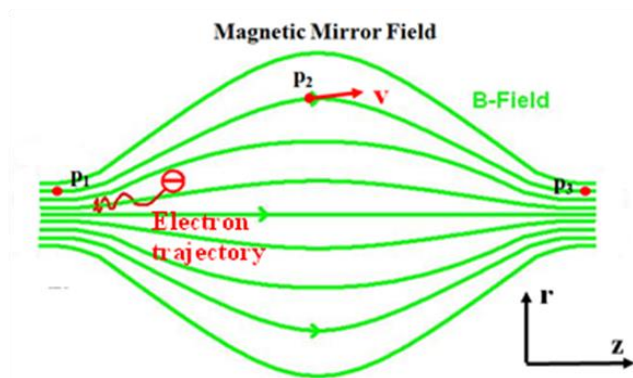


Рис. 7. Magnetic Mirror Field – поле магнитного зеркала
Electron trajectory – траектория электрона
B-field – поле B

(i) (3 балла) Получите выражение для усредненной по периоду вращения силы со стороны магнитного поля вдоль линий магнитной индукции, действующую на электрон и покажите, что магнитный момент не изменяется в процессе движения, т.е. $\frac{d\mu}{dt} = 0$, основываясь на сохранении кинетической энергии.

(ii) (1 балл) Основываясь на постоянстве магнитного момента в процессе движения, определите условие для угла θ между начальной скоростью электрона \vec{v} и индукцией магнитного поля в точке "P₂" для того, чтобы электрон не смог вылететь из поля магнитного зеркала.

(e) (1 балл) Линии индукции магнитного дипольного поля Земли (синие линии) показаны на рис. 8. Спиральная траектория заряженной частицы (красные линии) находится вблизи плоскости $y=0$, т.к. градиентом и кривизной линий магнитного поля можно пренебречь. Если заряженная частица с массой m , зарядом q и скоростью \vec{v} сначала расположена в экваториальном положении $[x=6R_E, y=0, z=0]$ и угол между скоростью электрона \vec{v} и индукцией магнитного поля равен сначала θ , определите, какое условие должно выполняться для θ , чтобы заряженная частица на широте 60° смогла приблизиться до 200 км высоты.

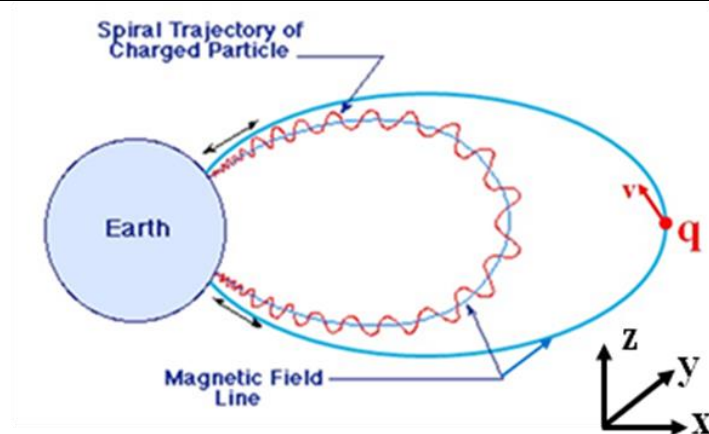


Рис. 8. Earth – Земля

Spiral Trajectory of Charged Particle – спиральная траектория заряженной частицы

Magnetic Field Line – линия магнитного поля

(f) (5 баллов) Как показано на рис. 5, если на дневной стороне магнитопаузы происходит магнитное воссоединение, линии индукции воссоединенного магнитного поля дрейфуют по направлению к ночной области потому, что солнечный ветер течет по направлению к следу. Таким образом, некоторые электроны из солнечного ветра в области "А" также двигаются к магнитному следу в области "Р". После того, как электроны появляются в области "Р", некоторые электроны могут быть ускорены до энергий порядка 1кэВ. Таким образом, частицы могут достичь термосферы (высота термосферы составляет около 85 км-800 км). Эти высокоэнергетичные электроны могут сталкиваться с нейтральными атомами и переводить их в возбужденное состояние. Если за время жизни возбужденного состояния нейтральный атом не испытывает соударения, он из более высокого возбужденного состояния возвращается в нижнее возбужденное состояние или в основное состояние с испусканием фотона соответствующей длины волны. Таким образом, цвет северного сияния (рис. 1) обусловлен этим явлением. Установлено, что северное сияние в основном обусловлено фотонами, испущенными атомами кислорода. Значения энергии уровней первого и второго возбужденных состояний по отношению к основному состоянию равны 1.96 эВ и 4.17 эВ, соответственно. Времена жизни двух возбужденных состояний атома кислорода составляют 110 с and 0.8 с, как показано на рис. 9.

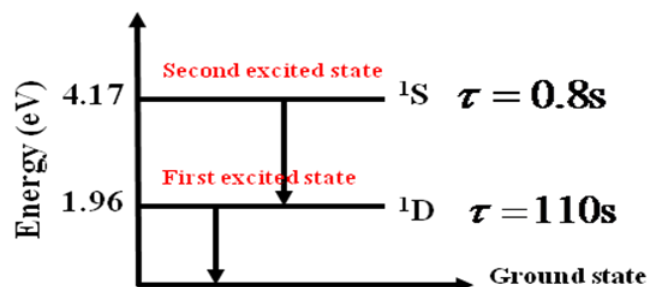


Рис. 9. Energy (eV) – энергия (эВ)

Ground state – основное состояние

First excited state – первое возбужденное состояние

Second excited state – второе возбужденное состояние

(i) (2 балла) Получите выражение для плотности атмосферы как функцию высоты и найдите отношение плотности кислорода на высотах $H = 160$ км и $H = 220$ км. Для простоты предположите, что температура атмосферы не зависит от высоты и что воздух является идеальным газом. ($\rho_0 g / P_0 = 0,13 \text{ км}^{-1}$ здесь ρ_0 и P_0 - плотность и давление атмосферы на уровне моря.)

(ii) (3 балла) Определите цвета северных сияний на высотах $H = 160$ км и $H = 220$ км. (Подсказка: Зависимость частоты соударений молекул атмосферы от плотности атмосферы выглядит как $\nu = \nu_0 \rho / \rho_0$; здесь $\nu_0 \approx 10^9 / \text{s}$ - частота соударений молекул атмосферы на уровне моря.)

(g) (2 балла) Как отмечалось выше, мощный солнечный ветер способен сдвинуть дневную магнитопаузу настолько близко к Земле, что высокоорбитальный спутник окажется под воздействием солнечного ветра. Высокоэнергетичные частицы солнечного ветра могут повредить высокотехнологичные электронные компоненты спутника. Для простоты считается, что дипольное магнитное поле Земли слабо изменяется, когда солнечный ветер его сжимает, а плотностью плазмы в магнитосфере можно пренебречь. Определите минимальную скорость солнечного ветра, способную вызвать повреждение геостационарного спутника, если индукция магнитного поля и плотность плазмы солнечного ветра составляют $B_s = 5 \text{ нТл}$ и $\rho_s = 50 \text{ протонов/см}^3$ соответственно. (Подсказка: Сила на единицу площади, вызванная магнитным полем, равна $f = B^2 / 2\mu_0$. Мы рассматриваем только изменение вдоль x для всех физических величин, т.е. физические величины не зависят от y и z).

Задача 3

Интерферометр Фабри-Перо (рис. 1) состоит из двух стеклянных пластин с высоко-отражающими покрытиями внутренних сторон, параллельных друг другу. В пространстве между пластинами свет может многократно переотражаться. Внешние стороны пластин не вполне параллельны внутренним, отражением от них можно пренебречь. Интерферометр можно использовать, например, для измерения плотности воздуха, который в него нагнетают. Свет от натриевой лампы, расположенной в фокусе линзы (коллиматоре), проходит через интерферометр. Пропускная способность интерферометра для пучка параллельных лучей:

$$T = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)},$$

где $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$, R – коэффициент отражения внутренних поверхностей, $\delta = \frac{4\pi n t \cos \theta}{\lambda}$ –

фазовый сдвиг между двумя соседними лучами в интерферометре, n – коэффициент преломления воздуха в интерферометре, t – расстояние между отражающими поверхностями, θ – угол падения лучей, λ – длина волны.

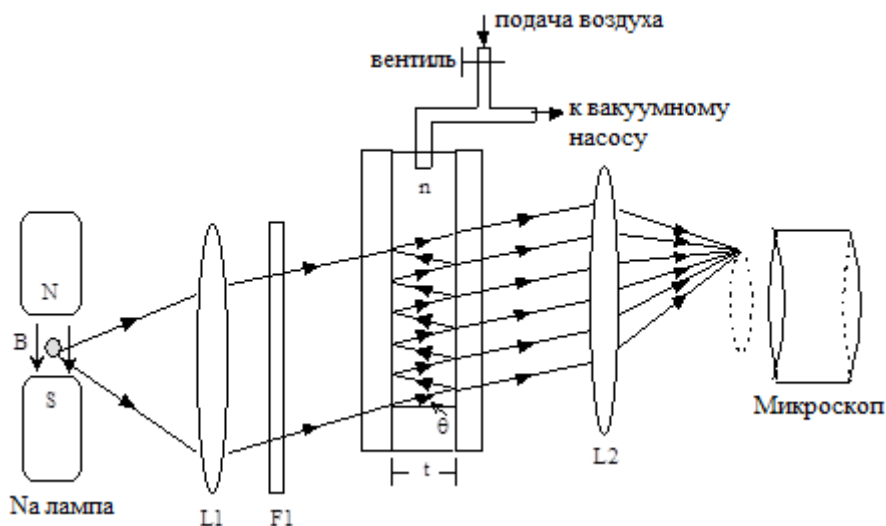


Рис. 1

Натриевая лампа испускает две спектральные линии D1 ($\lambda = 589,6$ нм) и D2 ($\lambda = 589,0$ нм) и расположена между полюсами электромагнита, который вначале выключен. Оптический фильтр F1 пропускает только линию D1. В микроскоп, настроенный на фокальную плоскость линзы L2, фокусное расстояние которой $f = 30$ см, наблюдаются интерференционные кольца. Положим коэффициент отражения $R = 90\%$ и расстояние $t = 10$ мм.

Физические константы:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \quad m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, \quad c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

- (a) (3 балла) Рассчитайте для линии D1 ($\lambda = 589,6$ нм) в случае вакуума ($n = 1,0$) порядок интерференции m_i , угол падения θ_i и диаметр D_i для первых трёх светлых колец $i = 1, 2, 3$.
- (b) (3 балла) Как показано на рис. 2, ширина ε спектральной линии определяется на половине высоты графика зависимости пропускающей способности от фазового сдвига δ . Разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо определяется так: спектральные линии λ и $\lambda + \Delta\lambda$ считаются разрешёнными, если разница $\Delta\delta$ между фазовыми сдвигами, соответствующих максимумам спектральных линий, больше ε (рис. 2). Таким образом разрешающая способность интерферометра равна $\lambda/\Delta\lambda$ при $\Delta\delta = \varepsilon$.

Для вакуумированного интерферометра, линии D1 ($\lambda = 589,6$ нм) и угла падения $\theta = 0$ рассчитайте:

- (1) ширину спектральной линии ε ,
- (2) разрешающую способность $\lambda/\Delta\lambda$ интерферометра.

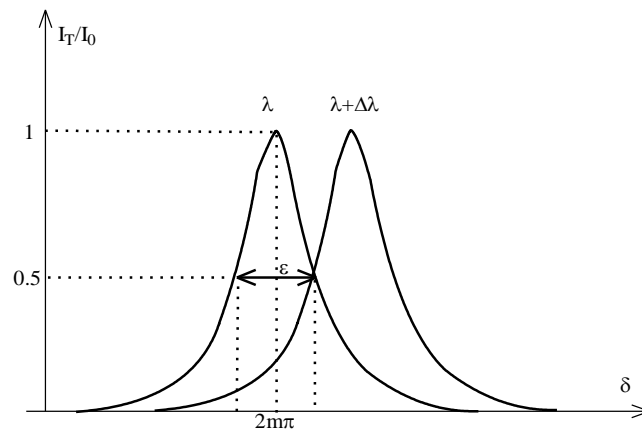


Рис. 2

- (c) (1 балл) Пусть в начальный момент давление воздуха в интерферометре равно нулю, т.е. между пластинами интерферометра вакуум ($n = 1,0$). Вентиль (рис. 1) медленно открывают, и воздух постепенно заполняет интерферометр, достигая в итоге атмосферного давления. При этом из центра фокальной плоскости линзы L2 «вырастают» 10 новых интерференционных колец. Основываясь на этом факте, рассчитайте коэффициент преломления воздуха n_{air} при атмосферном давлении.

- (d) (2 балла) В магнитном поле уровни энергии атома натрия расщепляются. Это явление называется эффектом Зеемана. Сдвиг уровня энергии:

$$\Delta E = m_j g_k \mu_B B,$$

где магнитное квантовое число m_j может принимать значения $J, J - 1, \dots, -J + 1,$

$-J, (J - \text{орбитальное квантовое число}), g_k - \text{множитель Ландау}, \mu_B = \frac{he}{4\pi m_e}, h -$

постоянная Планка, e – элементарный заряд, m_e – масса электрона, B – индукция магнитного поля. Как показано на рис. 3, линия D1 излучается при переходе атома натрия с уровня ${}^2P_{1/2}$ на ${}^2S_{1/2}$, для которых $J = 1/2$. Таким образом, в магнитном поле каждый из уровней расщепляется на два подуровня (рис. 3). Обозначим расстояния между расщепившимися подуровнями энергий ΔE_1 для уровня ${}^2P_{1/2}$ и ΔE_2 для уровня ${}^2S_{1/2}$ ($\Delta E_1 < \Delta E_2$). В результате линия D1 расщепляется на 4 спектральных линии (a, b, c, d) как показано на рис. 3. Запишите выражения для частот (ν) всех четырёх линий.

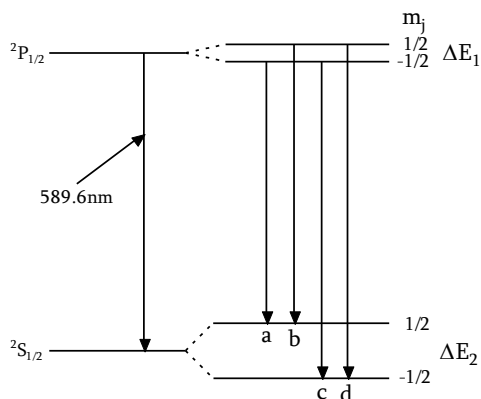


Рис. 3

- (e) (3 балла) После включения магнитного поля, каждое интерференционное кольцо линии D1 расщепляется на 4 кольца: 1, 2, 3, 4 (см. рис. 4). Диаметры колец, произошедших от самого маленького интерференционного кольца, равны D_1 , D_2 , D_3 и D_4 . Получите выражения для расстояний между подуровнями ΔE_1 уровня ${}^2P_{1/2}$ и ΔE_2 уровня ${}^2S_{1/2}$.

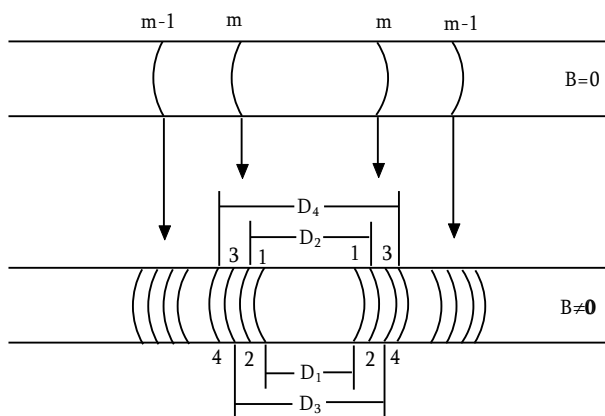


Рис. 4

- (f) (3 балла) Для магнитного поля $B = 0,1$ Т, диаметры расщепившихся колец равны:

$$D_1 = 3,88 \text{ мм}, \quad D_2 = 4,05 \text{ мм}, \quad D_3 = 4,35 \text{ мм}, \quad D_4 = 4,51 \text{ мм}.$$

Рассчитайте множители Ландау g_{k1} для уровня ${}^2P_{1/2}$ и g_{k2} для уровня ${}^2S_{1/2}$.

- (g) (2 балла) Магнитное поле солнца можно определить по измерению расщеплению Зеемана натриевой линии D1 солнца. При наблюдении спектра солнца было установлено, что разница длин волн между самой коротковолновой и самой длинноволновой линиями в расщеплении равна 0,012 нм. Определите магнитное поле B солнца.
- (h) (3 балла) Излучение полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 650$ нм и спектральной шириной $\Delta\lambda = 2$ нм попадает в вакуумированный интерферометр Фабри-Перо под углом $\theta = 0$. Рассчитайте количество спектральных линий и их спектральную ширину $\Delta\nu$ на выходе из интерферометра.