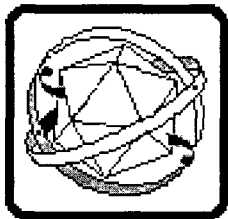


УТВЕРЖДЕНО  
Заместитель председателя оргкомитета  
заключительного этапа Республиканской олимпиады,  
заместитель министра образования Республики Беларусь

  
К.С. Фарино

«14» марта 2007 г



**Республиканская физическая  
олимпиада 2007 год.  
г. Минск  
Теоретический тур**

**11 класс.**

*Оргкомитет и Жюри заключительного этапа Республиканской олимпиады школьников 2007 года*

- *приветствуют вас в городе Минске;*
- *поздравляют с успешным выступлением на предыдущих этапах олимпиады;*
- *желают успехов на заключительном этапе.*

- 1 Полный комплект состоит из трех не связанных между собой заданий.
- 2 При оформлении работы каждую задачу начинайте с новой страницы. Первая половина тетради предназначена для чистовика, вторая - черновика. При недостатке бумаги обращайтесь к оргкомитету, *обеспечим!*
3. Подписывать тетради и отдельные страницы запрещается.
- 4 В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, калькулятор
- 5 Со всеми вопросами, связанными с условиями задач (но не с их решениями), обращайтесь к представителям Жюри



## Задание 1. Разминка.

### 1.1 «Оптическая бистабильность»

Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) представляет собой два тонких плоских зеркала с коэффициентом отражения по интенсивности  $R = 0,50$  каждое, расположенных параллельно на расстоянии  $L = 3,00 \text{ см}$ . На интерферометр направляют параллельный монохроматический пучок лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$ . В результате многократного отражения и интерференции света коэффициент пропускания (т.е. отношение интенсивности выходящего излучения  $I_{\text{вых}}$  к интенсивности входящего  $I_{\text{вх}}$ ) описывается формулой

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \psi},$$

где  $\psi$  – набег фазы световой волны при **однократном** прохождении от левого зеркала до правого.

Пространство между зеркалами заполняют прозрачным диэлектриком, средний показатель преломления которого зависит от **интенсивности света, выходящего**<sup>1</sup> из интерферометра

$$n = n_0 + \gamma I_{\text{вых}},$$

где  $n_0 = 2,30$ ,  $\gamma = 1,80 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 / \text{Вт}$ .

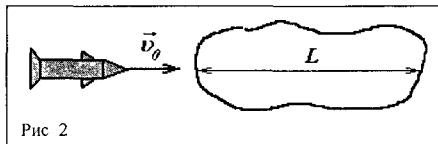
Изобразите график зависимости выходной интенсивности света от входной интенсивности при плавном изменении  $I_{\text{вх}}$  от 0 до  $1 \text{ кВт} / \text{см}^2$  и обратно до 0.

Поглощением света в диэлектрике пренебречь.

### 1.2 «Грязный космос»

Ракета массой  $m$ , летящая в космическом пространстве с выключенными двигателями со скоростью  $v_0$ , попадает в облако пыли

(Рис.2) со средней плотностью  $\rho$ , имеющее протяженность  $L$  в направлении движения ракеты. Пылинки неподвижны и прилипают к ракете при столкновениях с ней. Площадь поперечного сечения ракеты  $S$ . Какую скорость  $v$  будет иметь ракета при вылете из облака пыли? Сколько времени  $t$  займет пролет ракеты через облако?



<sup>1</sup> Логичней, конечно задавать зависимость показателя преломления диэлектрика от интенсивности света в нем, но мы решили упростить вам жизнь

## Задание 2. «У природы нет плохой погоды»

Достоверные прогнозы погоды до сих пор остаются проблемой для синоптиков – слишком уж много факторов на нее может повлиять. Но мы с вами не будем пытаться предсказать погоду на завтра – в этой задаче вам предстоит исследовать наиболее характерные закономерности климата планеты.

### 2.1. «Средняя температура»

Рассмотрим некую планету (условимся называть ее Землей), радиусом  $R_j = 6370 \text{ км}$ , вращающуюся по круговой орбите радиусом  $L = 150 \text{ млн км}$  вокруг звезды (условно Солнца) радиусом  $R_c = 696 \text{ тыс км}$  и температурой поверхности  $T_c = 5800 \text{ К}$ .

Определите поток излучения Солнца (солнечную постоянную)  $\Phi_0$  (т.е. энергию, проходящую за единицу времени через площадку единичной площади, перпендикулярную световым лучам) вблизи поверхности Земли.

Земля представляет собой твердый шар с очень большой теплопроводностью. Определите среднюю температуру Земли  $T_j$ .

*И Солнце и Землю считайте абсолютно черными телами.*

*По закону Стефана-Больцмана, энергия, излучаемая с единицы площади абсолютно черного тела за единицу времени равна  $\sigma T^4$ , где постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ .*

### 2.2. «Весна, лето, осень, зима и снова весна»

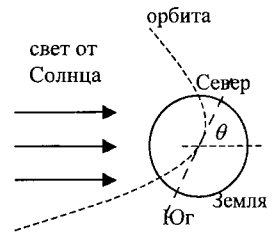
На Земле наблюдается смена времен года. Для объяснения этого явления рассмотрим другую модель Земли. Будем считать (как это есть на самом деле), что земной шар не успевает ни прогреться, ни промерзнуть из-за низкой теплопроводности. Поэтому его теплоемкость определяется только тем слоем, температура которого успевает измениться при смене времен года. Для оценки теплоемкости считайте, что вода прогревается однородно до глубины  $h = 5,00 \text{ м}$ , а более глубокие слои не греются. Ось вращения Земли наклонена к плоскости ее орбиты под углом  $\theta = 66,5^\circ$ . Воображаемая линия «экватор» делит Землю на северное и южное полушарие. Переносом тепла через экватор можно пренебречь.

Среднесуточная мощность солнечного излучения, падающая на северное полушарие, зависит от времени года (если отсчет вести от самого длинного дня), приблизительно как  $P = 2\pi R_j^2 (A + B \cos \Omega t)$ , где  $2\pi R_j^2$  – площадь северного полушария.

2.2.1 Определите постоянную  $\Omega$ . Оцените постоянные  $A$  и  $B$ .

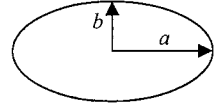
2.2.2 Найдите зависимость среднесуточной температуры  $T$  северного полушария от времени года  $t$ .

2.2.4 Найдите задержку во времени  $\tau$  между самым длинным и самым теплым днем года. Плотность воды равна  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $c = 4200 \text{ Дж/(кг К)}$ . Считайте, что вода полностью поглощает все излучение, падающее на нее. Период движения Земли вокруг Солнца равен  $t_j = 365,25 \text{ суток}$ .



### Примечания

- 1) Площадь круга равна  $\pi R^2$  Площадь поверхности сферы равна  $4\pi R^2$
- 2) Если смотреть на круг сбоку, то он виден как эллипс
- 3) Площадь эллипса равна  $\pi ab$ , где  $a$  и  $b$  – большая и малая полуоси эллипса
- 4) Справедливы следующие тождества  
 $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$   
 $\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$
- 5) При  $|\xi| < 0,1$  справедливо выражение  $(1 + \xi)^n \approx 1 + n\xi$ .
- 6)  $2 + 2 \approx 4$



### 2.3. «Парниковый эффект»

Согласно формуле Планка, интенсивность излучения абсолютно черного тела, приходящаяся на интервал длин волн от  $\lambda - \Delta\lambda/2$  до  $\lambda + \Delta\lambda/2$  равна

$$\Delta I = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \Delta\lambda$$

где  $e$  – экспонента ( $e \approx 2,7183$ ),  $c = 3,00 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура абсолютно черного тела.

В данном пункте вернемся к модели Земли, как шара с очень большой теплопроводностью. Кроме того, у Земли есть газовая атмосфера, полностью поглощающая излучение с длиной волны от  $\lambda_{\min} \approx 8,0$  мкм до  $\lambda_{\max} = 12,0$  мкм. Считайте, что теплообмен между поверхностью Земли и ее атмосферой осуществляется только посредством излучения. Температуру атмосферы считайте постоянной, не зависящей от ее высоты.

Из-за того, что температуры Солнца и Земли различны, их спектры излучения лежат в разных диапазонах длин волн, и атмосфера поглощает излучение Солнца и Земли по-разному.

**2.3.1** Оцените суммарный коэффициент поглощения атмосферой излучения Солнца  $A_0$  и излучения Земли  $A_1$ .

**2.3.2** Определите среднюю температуру земной поверхности  $T_j$  в рамках данного приближения

### 2.4. «Ядерная зима или почему вымерли динозавры»

В результате извержения крупного вулкана атмосфера Земли наполнилась дымом (мелкими частицами пыли и сажи) и стала частично непрозрачна для любого излучения (степень зачерненности атмосферы  $\eta = 0,6$ ), помимо полного поглощения излучения с длинами волн от  $\lambda_{\min} = 8,0$  мкм до  $\lambda_{\max} = 12,0$  мкм

**2.4.1** Определите среднюю температуру земной поверхности в этом случае

### Задание 3. «Охлаждение светом»

В 1997 году профессору Стивену Чу (Steven Chu) доктору Вильему Д Филлипсу (William D Phillips) и профессору Клоди Кохен-Танноуджи (Claude Cohen-Tannoudji) была присуждена Нобелевская премия «за разработку методов охлаждения и удержания атомов при помощи лазерного луча» Реализация такого эксперимента – очень непростая техническая задача Однако основные теоретические принципы не так уж и сложны Суть происходящих явлений можно легко понять если хорошо знать школьную физику В этой задаче Вам предстоит рассмотреть физические явления приводящие к торможению (а значит и охлаждению) атомов а также привести численные оценки основных величин

Для проведения эксперимента необходима вакуумная камера, пучок атомов и лазер, способный излучать фотоны строго определенной энергии Тонкий пучок атомов натрия ( $m = 23 \text{ а.е.м}$ ) запускается вдоль оси камеры (ось  $Ox$ ), а навстречу ему направляют лазерный луч (см рис 1) Скорости атомов в пучке первоначально направлены вдоль оси камеры В пучке существует некоторое распределение по скоростям, т.е. скорость некоторых атомов может значительно отличаться от средней скорости в пучке Кроме того, будем считать пучок достаточно разреженным (т.е. можно пренебречь столкновениями атомов между собой), а интенсивность лазерного луча достаточно большой

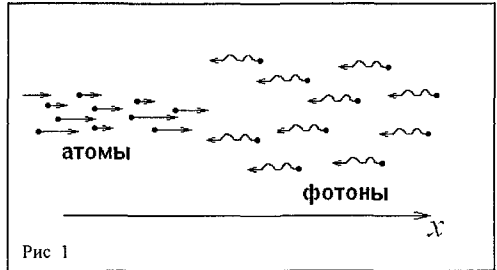


Рис 1

Как известно, атомы могут поглощать фотоны определенной энергии и переходить в возбужденное состояние У атомов натрия первому возбужденному состоянию соответствует энергия  $E_1 = 2,1 \text{ эВ}$

1 Какой энергией  $E_\phi$  должны обладать фотоны в пучке, чтобы произошло их поглощение атомами, движущимися со скоростью  $v_0 = 500 \text{ м/с}$ ?

2 Оцените, на сколько в среднем изменяется скорость движения этих атомов вдоль оси  $Ox$  после излучения фотона

3 Определите также максимальный угол отклонения этих атомов от направления  $Ox$

4 Известно, что энергетический уровень возбужденного состояния натрия обладает некоторой шириной  $\Delta E = 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ эВ}$  (см рис 2) Поэтому в поглощении фотонов с энергией  $E_\phi$  будут участвовать атомы, скорости которых лежат в некотором промежутке  $(v_0 - \Delta v_0, v_0 + \Delta v_0)$  Определите  $\Delta v_0$

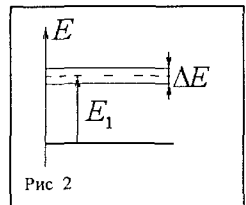


Рис 2

Из решения предыдущих пунктов становится ясно что через некоторый довольно маленький промежуток времени диапазон  $(v_0 - \Delta v_0, v_0 + \Delta v_0)$  опустеет Для дальнейшего охлаждения необходимо слегка изменить частоту лазерного излучения

5 Начнем охлаждение пучка с практически самых «горячих» атомов движущихся со скоростью  $v_{\text{max}} = 1000 \text{ м/с}$  После их незначительного охлаждения будем слегка изменять частоту тем самым захватывая в процесс охлаждения и более медленные атомы Оцените

время необходимое для практически полной остановки всего пучка. Оцените также расстояние вдоль оси  $Ox$ , которое пролетят «горячие» атомы.

При малых скоростях, отклонения от направления движения становятся значительными и пучок быстро рассеивается. Для дальнейшего охлаждения атомы помещают в своеобразную ловушку, образованную шестью встречными лазерными лучами с энергией фотонов равной  $E'_\varphi = E_1 - \frac{\Delta E}{2}$  (см. рис. 3).

6. Оцените минимальную температуру атомов в такой ловушке.

*Указание. В последнем пункте необходимо учитывать упругое рассеяние фотонов на атомах. Кроме этого, нужно знать, что процесс поглощения фотонов происходит с определенной вероятностью. Можно считать, что вероятность поглощения практически равна единице в случае, когда частота налетающего фотона соответствует переходу ровно в центр возбужденного состояния, т.е. переходу с энергией  $E_1$ . И эта вероятность уменьшается до нуля для переходов с энергиями  $E_1 + \frac{\Delta E}{2}$  и  $E_1 - \frac{\Delta E}{2}$ .*

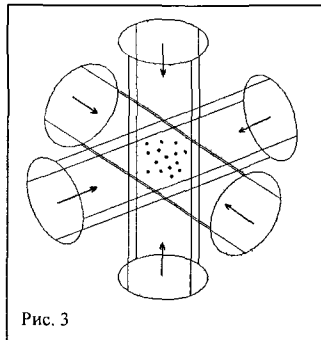


Рис. 3

Некоторые физические постоянные:

Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Постоянная Больцмана  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Число Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

Постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.