

Измерване на константата на Планк*

Васил Н. Гурев¹, Стоян Г. Манолев², Васил Г. Йорданов³,
Тодор М. Мишонов⁴

¹Софийски Университет Св. Климент Охридски,
Физически факултет, к-ра Атомна физика,
София 1164, бул. Джеймс Баучър 5

²СУ Гоце Делчев, ул. Първوماйска 3, MKD-2460 Валандово,
Република Македония

³Софийски Университет Св. Климент Охридски,
Физически факултет, София 1164, бул. Джеймс Баучър 5

⁴Софийски Университет Св. Климент Охридски,
Физически факултет, к-ра Теоретична физика,
София 1164, бул. Джеймс Баучър 5

Абстракт. Представената задача покрива широк диапазон въпроси, свързани с изграждане на изследователски умения, като запознаване с характеристиките на различни устройства и материали, сглобяване на опитна постановка, измерване и обработка на данни, теоретично осмисляне и интерпретация на резултатите. Задачата бе дадена на Втората отворена Олимпиада по експериментална физика (ОЕФ2) “Ден на фотона” 25 април 2015. Олимпиадата, проведена в София, бе част от честването на международната Година на светлината <http://www.light2015.org/Home/Event-Programme/2015/Competition/Bulgaria-Second-Experimental-Physics-Olympiad--25-April-2015-in-Sofia.-The-Day-of-the-Photon-in-the-International-Year-of-the-Light.html> и бе организирана от Софийски клон на Съюза на физиците в България съвместно с Регионалното сдружение на физиците в Струмица, Република Македония. 90 ученици и придружаващи взеха участие в Олимпиадата. От 37 ученика от 10–12. клас, 11 определиха константата на Планк с точност, съответстваща на студентски практикум.

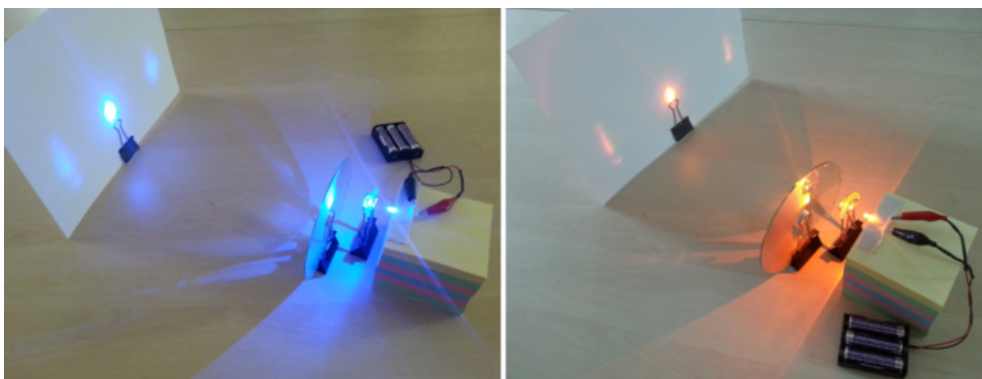
УСЛОВИЕ НА ЗАДАЧАТА

Измерете константата на Планк h , като използвате експерименталния набор и постановката, показани на Фиг. 1 — Фиг. 5, а също така известните стойности за скоростта на светлината $c = 299792458 \text{ m/s}$ и заряда на електрона $q_e = 1.602176565 \times 10^{-19} \text{ C}$, както и разстоянието между пътеките на компакт диска $d = 1.50 \mu\text{m}$.

*Текстът на задачата на български език с превод на английски, македонски и сръбски може да се намери в Интернет <http://arxiv.org/abs/1602.06114> [1]



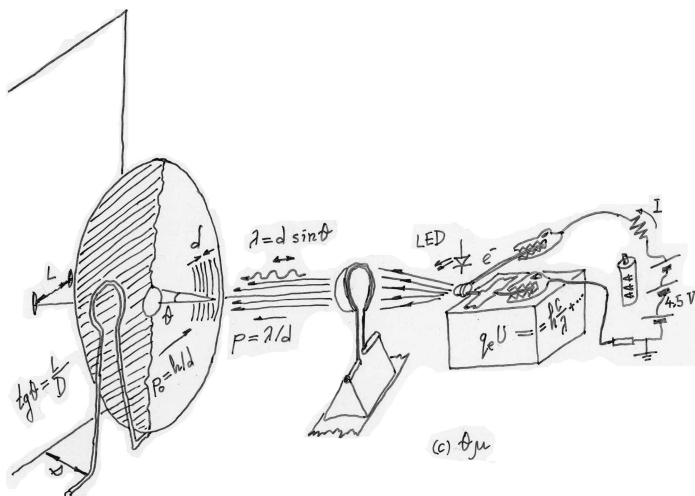
Фиг. 1. Детайли от комплекта за измерване на константата на Планк h : Проводници с щекер и щипка, мултиметър, държач за батерии и 3 батерии от 1.5 V, 4 светодиода, потенциометър с проводници и щипки, 3 щипки за хартия, фенерче и лещата му, компакт диск (CD) и двойно-залепваща лента, фоторезистор, непрозрачна тръбичка, пластелин, кламер.



Фиг. 2. Постановка за измерване на дължината на вълната на светлината на светодиод: Напрежението от батериите по жици се подава върху светодиода. Светлината се фокусира от лещата, преминава през набраздената повърхност на прозрачния компактдиск и върху екрана, като пламък от свещ, се вижда яркият образ на светодиода. Освен централния максимум се виждат и два бледи дифракционни максимума. Ъглите на дифракция са различни за различните цветове, жълт и син на снимките. Това е метод за определяне на дължината на вълната.

ОЦЕНЯВАНЕ И ОРГАНИЗАЦИОННИ ВЪПРОСИ

Експерименталните постановки остават за участниците и кабинетите по физика. Сглобяването им не се оценява. Предават се всички листове (чернови и белови). Оценяват се всички резултати: таблиците с експериментално-получените данни, графичното им представяне, правите, минаващи най-близо до експерименталните точки, анализът на експерименталните резултати и отговорите на въпросите, свързани с използваните формули за тяхната обработка.



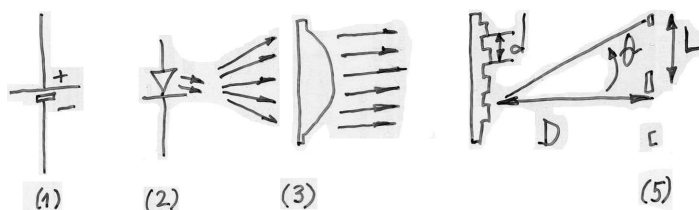
Фиг. 3. Схема на постановките, показани на Фиг. 2. Светодиодът (LED) е свързан към батериите с “крокодили”. Фотон от успоредния сноп светлина, фокусиран от лещата, има импулс $p = h/\lambda$, който е перпендикулярен на диска. При дифракция фотонът получава импулс $p_0 = h/d$ перпендикулярно на пътеките, набраздени на компакт-диска с частично отлепено фолио, и се разсейва на ъгъл θ . D е разстоянието между диска и екрана, а L е разстоянието между централния и първия дифракционен максимум; $\text{tg } \theta = L/D$. Щипките за хартия, които държат лещата и диска, са представени схематично.

Класирането е по възрастови групи. Разпределение на подусловията по класове е:

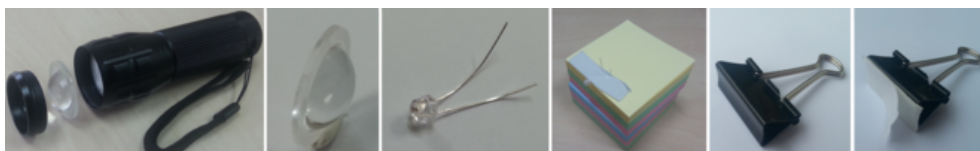
- 7.–8. клас – електрическа част: напрежения на изгасване, волтамперни характеристики на светодиодите, ом-амперни характеристики на осветяван фоторезистор;
- 9. клас – същите задачи като за 7–8 клас;
- 10. клас – оптическа (измерване на дължината на вълната) и електрическа част (само напреженията на изгасване); **определяне на константата на Планк**;
- 11.–12. клас – всички задачи.

Теоретичните задачи са свързани с формулите, използвани за обработка на експерименталните данни, и имат за цел да проверят дали експериментаторът разбира какво измерва. Те дават малко точки, но са с предимство при равни други условия. Теоретичните задачи ще са по-важни при класирането за най-добре решено домашно.

Съветваме учениците да решават задачите от съответната възрастова



Фиг. 4. Пътя на енергията: 1) химична в батериите 2) светлинна 3) фокусиране на светлината 4) дифракция 5) поглъщане и топлина.



Фиг. 5. Пръстен с винтова резба, леща и фенерче (1); леща на фенерчето (2); светодиода (3); светодиода, залепен с лента, върху “постамент” от хартиени листчета (4); щипка за хартия (5); щипка за хартия с двойно-залеваща лента за прикрепване към масата (6).

група. Ако ученик от 7–9 клас реши всичките задачи за неговата възрастова група, може да опита да реши част от оптичните експериментални или теоретични задачи, което ще му донесе допълнителни точки. Също така ученик от 10–12 клас може да реши задачи от електрическата част, които са за 7–9 клас, това ще му донесе допълнителни точки.

Задачите за домашна работа може да започнете да решавате, ако сте напълно готови с всички останали задачи. Ще има допълнително класиране за задачите от домашно. Ако не ви остане време, довършете задачите за домашно и ни пратете отговора днес на емайл epo@bgphysics.eu до 24:00 ч.

Имате за работа 4 часа и 30 мин, като през първите 2 часа не можете да напускате залата. При решението на задачата можете да ползвате калкулатор. Ако ученикът забрави да предаде своя GSM, това води до дисквалификация. Ако имате организационни въпроси, обърнете се за съдействие към контролиращите учители.

Като изключим мултиметрите, експерименталните постановки са подарък от организаторите за “кабинета по физика” и участниците се окуражават да демонстрират решението на задачата пред съучениците си. Ако допълните постановката за измерване на h с вакуумен фотодиод, започнете да я покажете на конкурса за уреди на 6 юни 2015 г.

ФОТОЕФЕКТ

При фотоэффекта, фотон избива електрон от повърхността на метал и законът за запазване на енергията дава връзка между енергията на фотона $h\nu$, кинетичната енергия на електрона и отделителната работа, параметризирана с напрежение. При светодиодите имаме обратен процес на вътрешния фотоэффект: електрон и дупка с малки енергии рекомбинират и се излъчва фотон. Връзката между праговото напрежение U_c , при което диодът светва, и енергията на фотона е

$$q_e U_c \approx h\nu + \text{const}, \quad (1)$$

където q_e е зарядът на електрона, а константата слабо зависи от материала на светодиода, като изключим зелените светодиоди. Кинетичните енергии на рекомбиниращите електрони са пренебрежими, т.е. много по-малки от енергията на излъчения фотон. Задачата, която разглеждаме, се основава на близките стойности на константите за различни материали, от които се правят светодиоди.

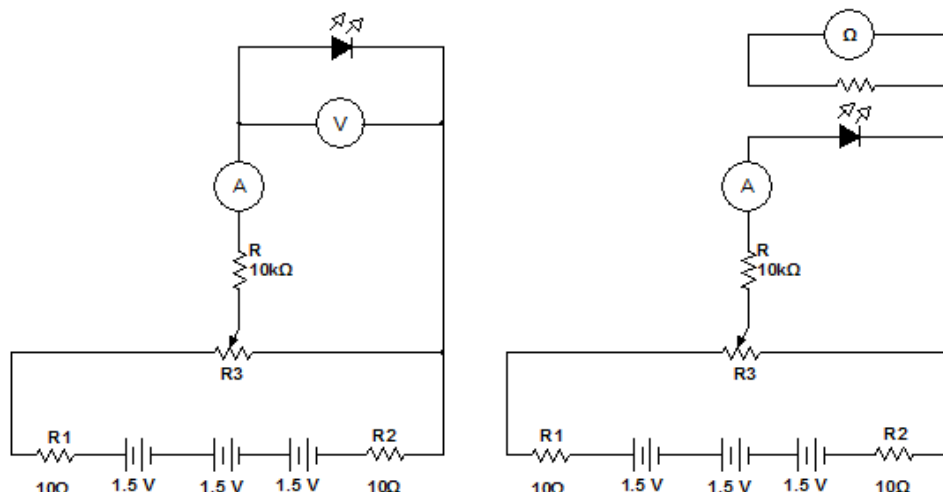
Електрична част

А. Измерване на праговите напрежения U_c на светване или угасване на светодиодите :

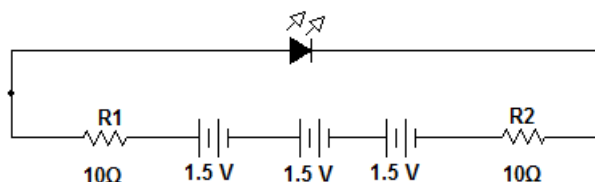
1. Пречертайте схемата от Фиг. 6а без амперметър (заменете го с проводник). Сглобете тази схема с предоставените Ви елементи. (7.–12. клас)

Поставете батериите в държача и свържете диодите по схемата от Фиг. 7. Подайте напрежение към светодиода само през края на проводниците (щипките) така, че токът да преминава през изолираните с шлаух резистори! Това ограничава тока през светодиода и той не може да Ви заслепи. Все пак не гледайте към светещия светодиод.

При това подусловие можете да пропуснете свързването на амперметъра, той се заменя с проводник. Свържете сега някой от светодиодите през потенциометър, както е показано на схемата от Фиг. 6 или по-точно от пречертаната от Вас схема без амперметър. Свържете “крокодилите” от държача на батериите към двата крайни извода на потенциометъра. Можете да ползвате допълнителни проводници завършващи с щипки. Свържете волтметъра с жиците, излизащи от светодиода. Въртете копчето на потенциометъра, докато светодиодът светне или изгасне. Ако светодиодът е тъмен



Фиг. 6. Лявата фигура се цитира в текста като 6а, дясната – 6б. Потенциометрично захранване на светодиодида за изследване на зависимостта $I(U)$. Напрежението от държача на батериите се подава на потенциометъра. Диодът се свързва със средния електрод на потенциометъра и с някой от крайните изводи. Съпротивлението R е запоено за средния извод на потенциометъра преди щипката (“крокодила”) и е скрито в черна изолираща тръбичка. Това голямо съпротивление дава възможност да се изследва частта от волт-амперната характеристика (ВАХ), където диодът светва или изгасва. Амперметърът е свързан последователно с светодиода, а волтметърът успоредно. Ако светодиодът не светне в едно от крайните положения на потенциометъра, сменете полярността на батериите. Съпротивленията R_1 и R_2 са скрити в черни изолиращи тръбички преди крокодилите на изводите от държача на батерии.



Фиг. 7. Захранване на светодиодите за експеримента по дифракция. Тази схема може да се използва и за тест при каква полярност на свързване светят светодиодите. Токът от 3-те последователно свързани батерии преминава през светодиода. Двата резистора R_1 и R_2 са скрити в черните изолиращи тръбички. Тези резистори ограничават тока, за да може светодиодът да не прегрее и да не ви заслепява. Точките по вертикалните линии от схемата показват свързване с щипки (“крокодили”).

или интензивността на светлината не се променя при въртенето на копчето на потенциометъра, може би сте го свързали обратно, или не сте свързали правилно схемата. Проверете отново дали елементите са свързани според пречертаната от Вас схема. [5 т.]

2. За 4-те светодиода измерете напрежението U_c , при което те изгасват или обратно започват да светят. (7.–12. клас)

При сглобената от предната точка схема проверете дали при въртене на копчето на потенциометъра светодиодът светва и изгасва. Решението на задачата изисква да наблюдавате слаба светлина, поради което аудиториите са леко затъмнени. За всеки от светодиодите направете няколко измервания и усреднете резултата за всеки един от тях. Пресметнете и максималното отклонение от средната стойност, това е оценка за точността на измерването. Резултатите представете таблично, като ги подредите по измереното напрежение (вж. Табл. 1). В таблицата запишете: цвят, средна стойност на напрежението, максимално отклонение от средната стойност, брой измервания за всеки светодиод. [10 т.]

Табл. 1. Експериментални резултати за праговите напрежения на светване или угасване на светодиодите

Цвят	червен	жълт	зелен	син
U_c [V]				

Б. Измерване на праговите напрежения $\tilde{U}_c$ чрез изследване на волтамперните характеристики на светодиода :

3. За 4-те светодиода измерете тяхната волтамперна характеристика. (7.–9. клас)

Включете мултиметъра, който носите със себе си, като амперметър и го свържете към схемата от Фиг. 6а така, че да измерва тока през светодиодите.

Изследвайте зависимостта между тока и напрежението $I(U)$ (волтамперна характеристика, ВАХ) за дадените ви светодиоди. За всеки от светодиодите трябва да попълните отделна таблица с по 25 реда, с номер на измерването, ток I и напрежение U . Пригответе на отделен лист таблица, подобна на примерната Табл. 2.

Първо, проверете дали в едно от крайните положения на потенциометъра диодът светва (може да се наложи да размените изводите му). При максимално ярък светодиод запишете напрежението и

Табл. 2. Волт-амперна характеристика на светодиоди около напрежението на запалване. Последователните колони са за червен, жълт, зелен и син светодиод. За да се опишат добре ВАХ, таблицата трябва да бъде с поне 20 измервания за всеки светодиод.

червен			жълт			зелен			син		
№	$I [\mu\text{A}]$	$U [\text{V}]$	№	$I [\mu\text{A}]$	$U [\text{V}]$	№	$I [\mu\text{A}]$	$U [\text{V}]$	№	$I [\mu\text{A}]$	$U [\text{V}]$
1			1			1			1		
2			2			2			2		
$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$		

тока – това е първото измерване. После въртете копчето на потенциометъра и намалявайте тока с около $20 \mu\text{A}$; записвайте резултатите в таблицата, докато се получи ток, по-малък от $10 \mu\text{A}$. След това наблюдавайте волтметъра (може да се наложи да смените обхвата). Нашият съвет е да въртите копчето на потенциометъра и да записвате напрежението на светодиода през около 200 mV докато достигнете до нулево напрежение. Попълнете колоните от Табл. 2 за различните светодиоди.

[20 т. за първия и 20 т. за трите останали светодиода]

4. За 4-те светодиода представете графично тяхната волт-амперна характеристика, използвайки резултатите от попълнената Табл. 2. (7.–9. клас)

Представете графично резултатите от таблиците, като използвате една и съща координатна система за различните светодиоди. Преди да започнете, внимателно обмислете мащаба. Би било добре данните да запълват целия лист от хартията на квадратчета или милиметровата хартия. Добре е точките за различните светодиоди да могат да се различават. За тази цел използвайте моливи или химикалки с различни цветове. Използвайте черна химикалка за жълтия светодиод. Върху абсцисата нанесете напреженията $U [\text{V}]$, а по ординатата – токовете $I [\mu\text{A}]$. **[20 т.]**

5. За 4-те светодиода от графиките на ВАХ определете праговото напрежение $\tilde{U}_c$. (7.–9. клас)

На ВАХ при силни токове има почти праволинеен участък. Начертайте права линия, която да се допира до стръмния склон на ВАХ при големи токове. Къде тази права линия пресича абсцисата $I = 0$ за различните светодиоди? Намерете пресечните точки на правите за различните светодиоди и запишете съответните напрежения $\tilde{U}_c$

Табл. 3. Експериментални резултати за критичните напрежения, получени чрез изследване на ВАХ на светодиодите

Цвят	червен	жълт	зелен	син
$\tilde{U}_c$ [V]				

в таблица, както е показано в Табл. 3. Сравнете тези прагови напрежения с напреженията на светване и изгасване U_c , които измерихте в подусловие 2, като посочите цвета на светодиода. Каква е максималната разлика от $\tilde{U}_c - U_c$? [10 т.]

6. *Обяснете качествено наклона на графиките на ВАХ при малки токове. (7.–9. клас)*

Сега насочете вниманието си върху полегатите склонове на ВАХ при малки токове. Обърнете внимание, че наклонът за различните светодиоди е почти еднакъв. Как може да се интерпретира този факт? [10 т.]

В. Изследване на интензивността на светлината излъчена от светодиодите с помощта на фоторезистор. Алтернативен метод за измерване на праговите напрежения $\tilde{U}_c$ на светодиода

7. *Измерете зависимостта на съпротивлението на фоторезистора от тока през светодиода. (7.–9. клас)*

За тази цел използвайте схемата, показана на Фиг. 6б. Амперметърът измерва тока през светодиода, но волтметърът не се поставя. Сега включвате този мултиметър като омметър, който да измерва съпротивлението на фоторезистора R_φ . Доближете фоторезистора до диод, светещ с максимална интензивност, за да видите как се изменя съпротивлението му. Сега трябва да премахнем влиянието на външната светлина. Поставете светодиода и фоторезистора в тръбичката и я запушете с пластелин, за да не прониква светлина. Както при измерване на ВАХ от предишната точка, записвате тока, протичащ през светодиода, и съпротивлението на фоторезистора R_φ . В Табл. 4 добавете още една колона за реципрочната стойност на съпротивлението $1/R_\varphi$, която също така се нарича и проводимост и се измерва в единици Ω^{-1} . Въртете копчето на потенциометъра, за да намалявате тока с около $20 \mu\text{A}$ и пак запишете данните в таблицата. Когато достигнете до нулев ток, опитайте да се върнете обратно и да изследвате малки токове до $15 \mu\text{A}$. Повторете тези измервания за всички светодиоди и запишете резултатите в раз-

Табл. 4. Зависимост на съпротивлението през фотодиода от тока през светодиода. Таблицата трябва да съдържа поне 25 измервания за всеки светодиод

червен				жълт				зелен				син			
№	I [μA]	R_φ [Ω]	$1/R_\varphi$ [Ω^{-1}]	№	I [μA]	R_φ [Ω]	$1/R_\varphi$ [Ω^{-1}]	№	I [μA]	R_φ [Ω]	$1/R_\varphi$ [Ω^{-1}]	№	I [μA]	R_φ [Ω]	$1/R_\varphi$ [Ω^{-1}]
1				1				1				1			
2				2				2				2			
$\vdots$				$\vdots$				$\vdots$				$\vdots$			

лични таблици. След приключване на измерванията пресметнете реципрочните съпротивления $1/R_\varphi$ в 3-тата колона.

[20 т. за първия и 20 т. за трите останали светодиода]

8. За 4-те светодиода представете графично зависимостта на съпротивлението на фотодиода от тока през светодиода, използвайки резултатите от попълнената Табл. 4. (7.–9. клас)

Резултатите представете графично: по абсцисата – тока през светодиода I , а по ординатата – реципрочното съпротивление $1/R_\varphi$ в единици Ω^{-1} . Използвайте една координатна система за всички отделни светодиоди. Добре е да нанасяте точките с различни цветове. Покрай точките прекарайте водещи погледа гладки криви. Анализирайте тези криви и се опитайте да обясните резултатите от този експеримент.

[20 т. за първия и 20 т. за трите останали светодиода]

9. Анализирайте как фоторезисторът може да се използва за определяне на праговото напрежение $\tilde{U}_c$. (7.–9. клас)

[10 т.]

Оптическа част

А. Измерване дължината на вълната на светлината, излъчвана от светодиодите. (10.–12. клас)

10. Отлепване на фолиото от половината диск.

Като използвате кламера, разрежете фолиото от компакт-диска по радиуса. Върху разреза залепете двойнозалепваща лента и като я дръпнете ще свалите фолиото под нея (вж. Фиг. 8). По този начин махнете фолиото от половината диск. Хванете диска с щипката, както е показано на Фиг. 2. [0 т.]



Фиг. 8. “Технология” за свалянето на фолиото от диска: 1) Фолиото се издрасква (разрязва) радиално с кламера; 2) Върху разреза се залепва лента; 3) Лентата се издърпва и фолиото остава залепнало за нея; 4) Залепването и издърпването на лентата се повтаря докато половината от диска се обели.

11. Сглобяване на оптичната постановка.

Сега предстои най-сложната част от задачата – запасете се с търпение и спокойствие. Върху една от щипките за хартия залепете двойнозалепваща лента – тя се къса лесно с ръка. Поставете екрана от бял картон в щипката. Махнете пластмасовото фолио от лентата и фиксирайте щипката с екрана далеч пред вас. Екранът трябва да бъде изправен вертикално. По същия начин фиксирайте прозрачния диск успоредно на екрана, примерно на педя разстояние пред него. Постарайте се да бъдете прецизни. Ако не сте доволни от точността на изпълнението, махнете лентите и монтирайте всичко отново. Измерете разстоянието D между екрана и диска с точност до милиметър. Пред диска поставете щипката с лещата, а пред лещата, примерно на два пръста разстояние, закрепете със залепваща лента един от светодиодите върху “пиедестал” от листчета. Светодиодът трябва да бъде на еднаква височина с центъра на лещата. Захранването на светодиодите в експеримента по дифракция е показано на Фиг. 7.

Включете светодиода да свети. Движете поставката с листчета, докато върху върху екрана се фокусира ярко петно. Това е реалният образ на светодиода през лещата. Добавяте и махате листчета, докато образът се прожектира, с точност до 1-2 сантиметра, на същата височина, както светодиода.

Нека проследим пътя на светлината: тя е излъчена от светодиода, който е почти във фокуса на лещата, както е показано на Фиг. 2. Успоредният сноп преминава през прозрачния диск и на екрана освен централния максимум се виждат и два дифракционни максимума.

Придвижете малко диска в щипката така, че тесният светлинен сноп да преминава през хоризонтален радиус на диска. Тогава дифракционните максимуми и централният максимум се разпо-

лагат на една хоризонтала върху екрана. Това е важно за точното измерване на дължината на вълната, което е един от критериите за класиране в олимпиадата.

Използвайте цветната химикалка, за да отбележите централния максимум и двата дифракционни максимума. За жълтия светодиод използвайте черния химикал. Разстоянието между двата дифракционни максимума е $2L$, а разстоянието между централния максимум и всеки от дифракционните максимума е приблизително L .

[0 т.]

12. Колко е фокусното разстояние на лещата f в метри и каква е неговата реципрочна стойност $1/f$? [15 т.]

13. Измерване на ъглите на дифракция.

Запишете разстоянието D между компакт-диска и екрана. Работете с точност до милиметър. Последователно измерете за всеки от светодиодите разстоянието L от центъра на централния максимум до центъра на петното на първия дифракционен максимум. По-добре е да очертаете на хартиения екран светлите петна и после да определите къде според вас е центъра им. Представете резултатите таблично (цвят, разстояние L) и, като използвате праговите напрежения U_c , попълнете Табл. 5.

[20 т.]

14. Пресмятане на синуса от ъгъла на дифракция.

За всеки от цветовете пресметнете синуса от ъгъла на дифракция $\sin(\theta) = L/(L^2 + D^2)^{1/2} = \sin(\arctg(L/D))$. Можете да намерите и графично решение. Построявате правоъгълен триъгълник с катети L и D и хипотенуза 100 mm. Измервате срещулежащия на ъгъла θ катет, успореден на L . Дължината на този катет в дециметри дава $\sin(\theta)$. В Табл. 5 попълнете колоните и пресметнете съответните дължини и честоти на вълните. Попълването на колоните, съдържащи критично напрежение $\tilde{U}_c$, получено чрез изследване на ВАХ, остава като задача за домашно.

[15 т.]

Табл. 5. Експериментални данни за дифракция и прагово напрежение за светодиоди с различни цветове; $D = \dots$ cm.

№	Цвят	L [cm]	$\tg(\theta)$	θ [rad]	$\sin(\theta)$	λ [nm]	ν [Hz]	U_c [V]	$\tilde{U}_c$ [V]	$q_e U_c$ [J]	$q_e \tilde{U}_c$ [J]
1	червен						$\times 10^{14}$			$\times 10^{-19}$	$\times 10^{-19}$
2	жълт						$\times 10^{14}$			$\times 10^{-19}$	$\times 10^{-19}$
3	зелен						$\times 10^{14}$			$\times 10^{-19}$	$\times 10^{-19}$
4	син						$\times 10^{14}$			$\times 10^{-19}$	$\times 10^{-19}$

15. *Определяне на константата на Планк от получените данни.*

Представете графично резултатите от последната Табл. 5. По ординатата представете $q_e U_c$, а по абсцисата ν . Начертайте права, която максимално добре, по ваше мнение, описва приближеното уравнение

$$q_e U_c \approx h\nu + \text{const.} \quad (2)$$

Изберете две произволни точки от правата. Образувайте разликите между ординатите (по вертикала) и абсцисите (по хоризонтала) на крайните точки от отсечката по правата. Нека със символа Δ означим разлика. Тогава $\Delta(q_e U_c)$ е разликата по вертикала, а $\Delta(\nu)$ – по хоризонтала. Отношението на тези разлики се нарича тангенс на ъгъла на наклона, а в нашия случай това е константата на Планк, $h = \Delta(q_e U_c) / \Delta(\nu)$. Как измерената от Вас стойност $h = \dots\dots \text{Js}$ се съгласува с известната стойност за тази фундаментална константа? Попълнете многоточието! Колко процента е грешката $100 (h_{\text{exp}} - h) / h = \dots\dots \%$? Подчертайте резултата и го заградете в рамка! **[137 т.]**

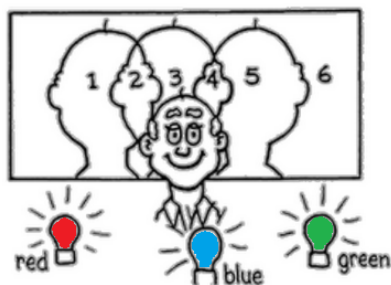
16. *Определяне на h чрез ВАХ. (Само ако Ви остане време.)*

Сега изпълнете точка 5 и извършете обработката на експерименталните данни от ВАХ. Повторете същата процедура за определяне на константата на Планк, като използвате не субективно определените напрежения на светване и изгасване U_c , а критичните напрежения, получени от анализа на ВАХ $\tilde{U}_c$. Кой от методите е по-добър? Посочете какви систематични грешки влияят на резултата и как бихте подобрили експерименталната постановка, за да се повиши точността на измерването. Константата, която участва в уравнението (2), за фотоефекта е значително по-различна за зеления светодиод. Пропуснете тази точка и с помощта на останалите 3 светодиода определете h . **[30 т.]**

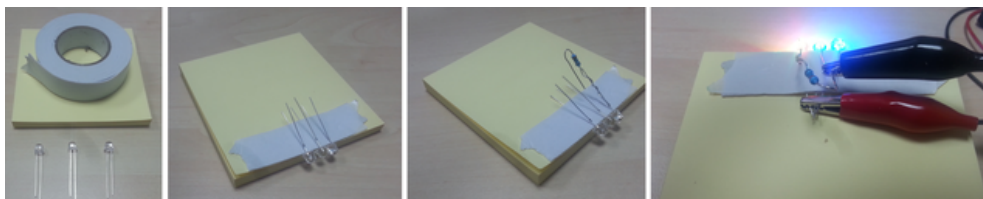
Б. Оптичен експеримент със смесване на цветове. (7.–12. клас)

17. *Намерете цветовете на сенките.*

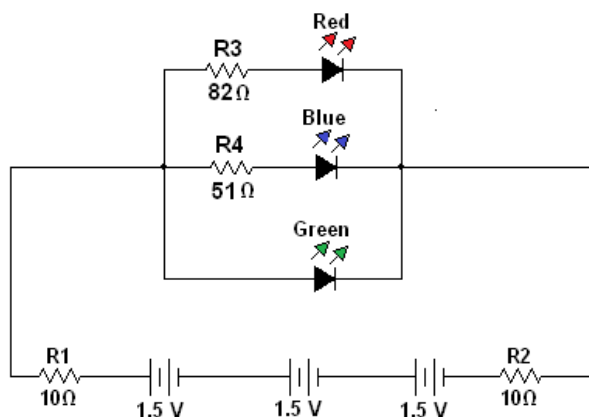
На Фиг. 9 са показани схематично 3 източника на светлина и различни сенки [2] върху екрана от един осветен обект. Какви са цветовете в различните области, номерирани от 1 до 6. Можете да намерите цветовете с разсъждения или да използвате дадените светодиоди. За този експеримент 3-те светодиода трябва да светят едновременно, както е показано на Фиг. 10. Червеният и жълтият диод дават по-силна светлина и за да може смесената светлина да напомня бяла те трябва да бъдат захранвани през компенсиращи



Фиг. 9. Сенки от 3 източника на светлина: червен (red), син (blue) и зелен (green) [2]. Посочете цвета на сенките в различните области.



Фиг. 10. Едновременно светене на червен, зелен и син светодиоди: 1) Диоди, листчета и двойнозалепаваща лента; 2) Диодите са прикрепени с лентата върху листчетата; Единият електрод е под лентата, а другият е отгоре; 3) Червеният електрод и синият диод са свързани през съпротивления, за да може светлината от 3-те диода да бъде почти бяла; 4) Крокодилите са захапали успоредно свързаните диоди. По-дългите изводи на светодиодите се свързват с отрицателните полюси на батериите. Ако някой от диодите не свети, разменете електродите му. Разположете диодите на разстояние, равно на диаметъра на монетата, която ще използвате за създаване на сянка.



Фиг. 11. Схема на успоредно свързване на 3 светодиода. Токът през червения диод се подава през $82\ \Omega$ резистор, а синият се свързва през съпротивление от $51\ \Omega$. Резисторите от $10\ \Omega$, свързани с държача на батериите, са скрити в шлаух.

Фиг. 12. Щипка, ластик и прикрепване на монетата. Закрепената на щипката монета използвайте за създаване на сянка при осветяване с цветните светодиоди.



съпротивления (вж. Фиг. 11). Червеният и зеленият диод трябва да са на разстояние 1.5 см от синия. Ползвайте сянката на 1 стотинка, закрепена както е показано на Фиг. 12, и ни пратете снимката до 24:00 ч. днес.

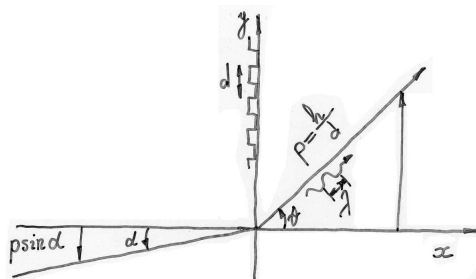
[20 т.]

Теоретична част (главно за домашно за 11. и 12. клас)

18. Какъв импулс може да има в една дифракционна решетка?

Как се променя формулата за ъгъла на дифракция, ако светлината пада под ъгъл α отчитан от нормалата на дифракционната решетка, както е показано на Фиг. 13?

[5 т.]



Фиг. 13. Набраздяването на дифракционната решетка е по оста y . Ъглите отчитаме от оста x , която е избрана по нормалата на дифракционната решетка. Успоредната на дифракционната решетка проекция на импулса на фотона след разсейването е $p \sin(\theta)$, а преди разсейването y -компонентата на импулса е била $p \sin(\alpha)$, където по формулата на дьо Бройл $p = h/\lambda$.

19. Какъв е импулсът на фотона във водата?

Как се изменя ъгълът на дифракция, ако работим с отразена вълна от потопен във вода диск? За показателя на пречупване на водата вземете приближено $n = 1.33$. Оградете с кръгче правилните отговори:

- А. Формулата $\lambda = d \sin(\theta)$ не се променя;
- Б. Ъгълът на дифракция се увеличава;
- В. Ъгълът на дифракция намалява n пъти;
- Г. Синусът от ъгъла намалява n пъти.

Експериментално можете да решите тази задача за домашно (трябва Ви съд с вода) и ни пратете решението до 24:00 ч. днес на адрес ero@bgphysics.eu [5 т.]

20. При какво съотношение между фокусното разстояние на лещата f и радиуса на компакт-диска R_{CD} поставеният експеримент е възможен?

Може ли фокусното разстояние да бъде един лакът? [5 т.]

21. Промяна на честотата на светлина, дифрактирала от движеща се решетка.

Как се променя честотата на дифрактиралата светлина ν' , ако решетката се движи напречно на браздите със скорост v ? [5 т.]

22. Импулс на плоска електромагнитна вълна.

Използвайте формулите за скоростта на светлинната вълна $c = \lambda/T$, енергията $E = h/T$ и импулса на фотона $p = h/\lambda$ и изведете как импулсът на светлинната вълна $p(E)$ зависи от енергията $\hbar$. [5 т.]

23. Да се намери отместването на вагона.

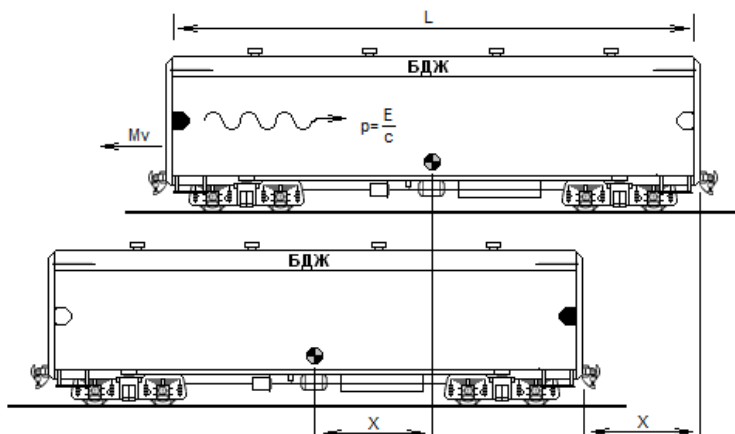
За пресмятане на ъгъла на дифракция е най-удобно да се използва импулсът на фотона. Затова добавяме още една задача, в която се разглеждат едновременно енергията и импулсът на фотона. Механиката в известен смисъл е част от оптиката. Нека проведем мислен експеримент, който е представен схематично на Фиг. 14.

Вагон с маса M и дължина l може да се движи без триене по релси. В левия край на вагона е светлото с лазерна показалка и енергията на светлинния лъч е E . Импулсът на светлината е $p(E)$. Формулата изведохте в предишното подусловие. Съгласно със закона за запазване на импулса вагонът потегля наляво със скорост $V = p/M$. Светлинният импулс, нека приемем, че е съвсем кратък, прелита вагона за време $t = l/c$. За това време вагонът се премества наляво на разстояние $X = Vt$. Накрая, светлината се поглъща в десния край на вагона и той спира. Какво става със светлината, когато се погълне от стената на вагона? С колко се е преместил центърът на тежестта на вагона.

[5 т.]

24. Парадокс: Центърът на тежестта е неподвижен. Кое от твърденията е вярно? Къде е грешката?

В предишното подусловие стигнахме до извода, че вагонът се е отместил на разстояние X . Това разстояние може да е малко, но не



Фиг. 14. Мислен експеримент: Вагон с маса M и светлинен импулс с енергия E . Фотонът се движи надясно с импулс $p = E/c$, а вагонът се движи наляво с точно противоположния импулс Mv . Механичната задача е аналогична на анализа на “ритане” на пушка или откат на оръдие. Докато светлината прелита вагона с дължина l , той се отмества наляво на разстояние X . Приемаме, че $X \ll l$. Точките символизират пътя на енергията: първоначално в батерията на лазерната показалка, а после в топлинното петно, където светлината е погълната.

е нула. Съществува строга теорема от механиката, че едно неподвижно тяло, на което не действат външни сили не може да промени центъра на тежестта си. Образно казано: барон Мюнхаузен не може да се вдигне за косата. Баронът не може, но вагонът може – къде е грешката? За подсещане, нека разгледаме прост пример: ако в левия край на вагона има букова маса с маса m , то при преместването ѝ в десния край на вагона на разстояние l , вагонът се премества наляво на малко разстояние X . Тези величини са свързани със съотношението $MX = ml$ и центърът на тежестта не се променя. А защо тогава светлината може да променя центъра на тежестта на вагона?

[5 т.]

25. Как си обяснявате цвета на различните сенки, които са описани в точка 17?

[5 т.]

26. Задача за домашно

Ако намерите решението на последното подусловие, пишете ни днес до 24:00 ч. на epo@bgphysics.eu, като непременно ни напишете името на консултанта или източника на информация, например Интернет страница или книга, които сте ползвали. Пратете ни домашното с всички решени подусловия.

[премия 1-камък]

Задача за конкурса “Уреди за кабинета по физика” (10, 11 и 12 клас)**27. Класически експеримент за фотоефект.**

Светодиодите, на които днес измерихте честотата и дължината на вълната, са добри източници на монохроматична светлина. Изследвайте ВАХ на вакуумен светодиод (вакуумен фотоелемент или вакуумна фото клетка), например СЦВ-4 или RCA-930 [3], когато катодът му е осветен със светлината на различни светодиоди. Ако не намерите подходящ фотоелемент, може да ползвате и фотоумножители като например ФЭУ-35 [4], но тогава трябва да използвате само антимонов-цезиевия електронен емитер електрод (1) и първия ускоряващ електрод (2) без да подавате захранване. Намерете спирещото напрежение U_c за различните цветове; този опит е описан в учебниците по физика. Нанесете експерименталните данни на равнината енергия-честота ($E-\nu$). Прекарайте права линия, която максимално добре да описва експерименталните точки. От уравнението $q_e U_c = h\nu + q_e A$, намерете константата на Планк и отделителната работа на метала, с който е покрит катод. Оценете точността на измерването. Този метод дава значително по-висока точност, защото за разлика от различните светодиоди, които имаха различни ширини на забранените зони, сега металът е един и същ с постоянна отделителна работа. Има много съвременни ръководства, но все пак започнете търсенето в Интернет с класическата работа на Миликен [5]. Опитайте да изследвате и ВАХ на полупроводников фотодиод, осветяван от различните светодиоди. И заповядайте на конкурса <http://bgphysics.eu/> да демонстрирате работата на тази класическа постановка. Най-голям успех за олимпиадата би било реанимацията на този експеримент в училищата; опитайте да го направите днес за домашно. **[137 т.]**

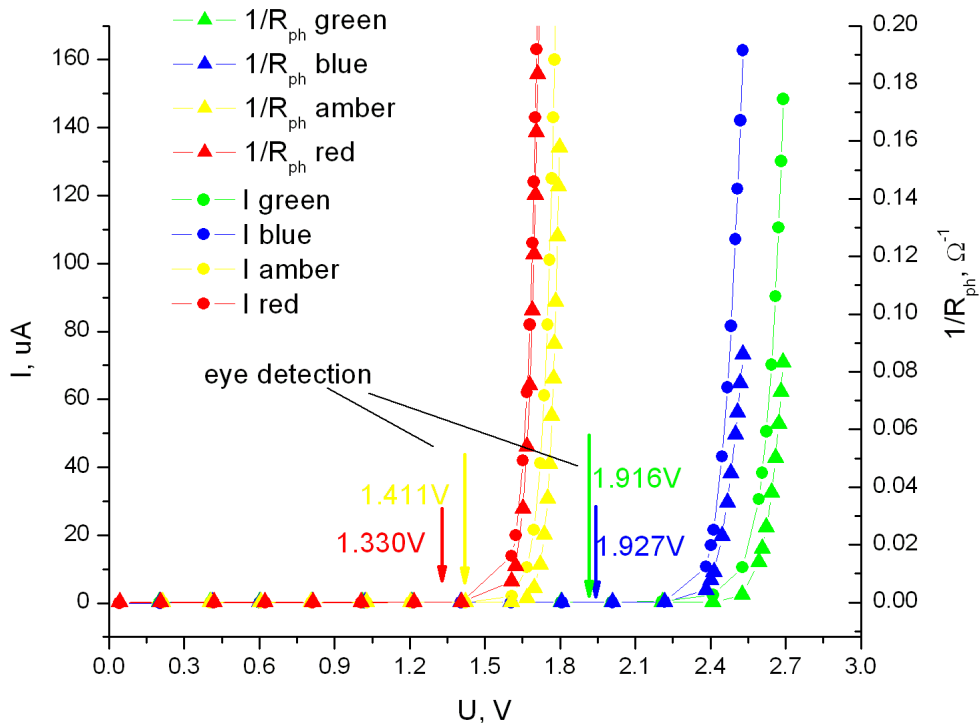
РЕШЕНИЕ

Измерването на фундаменталните константи на вселената е важна част от развитието на цивилизацията. Фундаменталните константи се измерват със скъпоструваща апаратура и за тяхното непрекъснато доуточняване работят първокласни експериментатори. За константата на Планк $6.62606957 \times 10^{-34}$ Js точността се измерва в милиардни части. От друга страна, този фундаментален квант на действие е част от света, който ни заобикаля. Светодиодите и компакт-дискете са в нашето ежедневие. Всеки ученик ги е виждал, учил е нещо за тях и е голям успех, ако ученикът успее да определи тази фундаментална константа,

използвайки само знания от учебния материал. Ако запомни, че в Деня на фотона е измерил константата на Планк с точност 20% това може да се смята за голям успех на нашата образователна система. Наученото в училище успешно се е трансформирало в умение и този млад човек ще бъде полезен за всяка квалифицирана професия.

По-долу са описани решенията за всяка от точките на условието. В коментара често има и елементи на популярна статия, но те са предназначени главно за учителите.

4 и 7: В Табл. 6 е дадено едно пълно изследване на проблема, което малко надхвърля поставената на учениците задача, но дава представа за цялостната физика на проблема. За светодиодиите с различни цветове са дадени данни за напрежението U , тока I и проводимостта на фоторезистора, осветяван от светодиода R^{-1} .



Фиг. 15. Зависимост на тока I (кръгчета и скалата в ляво), както и на проводимостта R_{ph} (триъгълници и скалата в дясно) като функции от напрежението U . Стрелките показват праговите напрежения, при които окото вижда слаба светлина U_c . Данните за различните диоди са показани с различен цвят: червен (red), кехлибарено-жълт (amber), зелен (green) и син (blue). По форма зависимостите $I(U)$ и $R_{ph}(U)$ са неразличими.

Табл. 6. Експериментални данни за напрежението U , тока I и проводимостта на фоторезистора R^{-1} за червен, жълт, зелен и син светодиоди. За някои напрежения токовете са неизмеримо малки или съпротивлението на фоторезистора много голямо

№	червен				жълт			
	U [V]	I [μ A]	R_{φ} [Ω]	R_{φ}^{-1} [Ω^{-1}]	U [V]	I [μ A]	R_{φ} [Ω]	R_{φ}^{-1} [Ω^{-1}]
1	0.042	—	0	0	0.042	—	0.1	0
2	0.207	—	0.1	0	0.215	—	0.1	0
3	0.419	—	0.1	0	0.405	—	0.1	0
4	0.623	—	0.1	0	0.605	—	0.1	0
5	0.813	—	0.1	0	0.807	—	0.1	0
6	1.006	—	0.1	0	1.028	—	0.1	0
7	1.217	—	0.2	0	1.203	—	0.2	0
8	1.407	—	0.3	0	1.421	—	0.2	0
9	1.606	136.5	13.9	0.007 33	1.607	—	2.1	0
10	1.623	79.8	20	0.0125	1.668	617	10.5	0.001 62
11	1.652	30.66	42	0.0326	1.696	202.5	21.5	0.004 94
12	1.668	18.5	62	0.0540	1.721	76	41.2	0.0131
13	1.679	13.27	82	0.0753	1.737	42.6	61.1	0.0234
14	1.690	9.87	106	0.101	1.750	27.75	82	0.0360
15	1.696	8.29	124	0.120	1.758	20.79	101	0.0481
16	1.701	7.07	143	0.141	1.767	15.46	125	0.0646
17	1.706	6.13	163	0.163	1.773	12.89	143	0.0775
18	1.711	5.46	182	0.183	1.778	11.15	160	0.0896
19	1.716	4.84	205	0.206	1.783	9.58	180	0.104
20	1.718	4.48	221	0.223	1.789	7.87	210	0.127
21	1.722	4.09	242	0.244	1.793	6.93	232	0.144
22	1.724	3.85	256	0.259	1.797	6.34	248	0.157

Данните от таблицата са представени на няколко фигури. На Фиг. 15 токът I през светодиода и проводимостта на фоторезистора R_{φ}^{-1} са представени като функция от подаденото напрежение. Всички фигури са сходни, но са отместени по напрежение за различните цветове. Когато диодът не свети, токът през него е пренебрежим и проводимостта на фоторезистора също е пренебрежима. Човешкото око е много чувствително и вижда слаба светлина при напрежения, при които не се забелязват особености на изследваните величини. Чупката, при която ВАХ започва да се издига стръмно, е значително по-вдясно от критичното напрежение U_c , при което окото вижда слаба светлина.

Сходството на ВАХ и $R_{\varphi}(U)$, показани на Фиг. 15, заслужава да бъде изследвано. Нека обсъдим накратко природата на фоторезистора. На

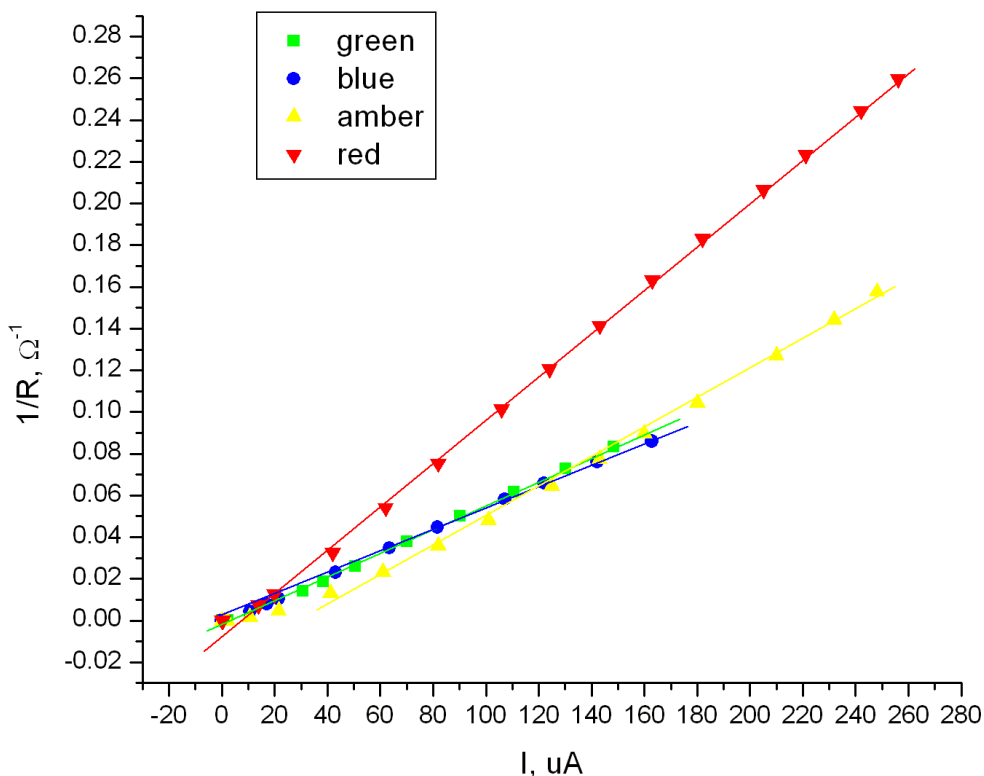
Табл. 6. Продължение

№	зелен				син			
	U [V]	I [μ A]	R_{φ} [Ω]	R_{φ}^{-1} [Ω^{-1}]	U [V]	I [μ A]	R_{φ} [Ω]	R_{φ}^{-1} [Ω^{-1}]
1	0.042	—	0	0	0.042	—	0	0
2	0.200	—	0.1	0	0.204	—	0	0
3	0.404	—	0.1	0	0.412	—	0.1	0
4	0.601	—	0.1	0	0.602	—	0.1	0
5	0.808	—	0.1	0	0.811	—	0.1	0
6	1.011	—	0.1	0	1.022	—	0.1	0
7	1.208	—	0.2	0	1.207	—	0.2	0
8	1.404	—	0.2	0	1.404	—	0.2	0
9	1.606	—	0.2	0	1.605	—	0.2	0
10	1.803	—	0.2	0	1.807	—	0.2	0
11	2.008	—	0.3	0	2.009	—	0.2	0
12	2.208	—	0.5	0	2.217	—	0.4	0
13	2.410	—	2.4	0	2.382	228	10.7	0.004 39
14	2.527	370.8	10.5	0.0027	2.402	127.7	17	0.007 83
15	2.593	71.5	30.6	0.0139	2.413	95.6	21.5	0.0104
16	2.606	53.6	38.3	0.0186	2.446	43.3	43.1	0.0230
17	2.623	38.43	50.5	0.0260	2.467	28.82	63.5	0.0347
18	2.643	26.29	70.2	0.0380	2.482	22.35	81.6	0.0447
19	2.659	19.99	90.3	0.0500	2.499	17.17	107.1	0.0582
20	2.672	16.17	110.6	0.0618	2.508	15.16	122	0.0659
21	2.682	13.7	130.1	0.0729	2.519	13.15	142.1	0.0760
22	2.690	12.01	148.4	0.0832	2.529	11.64	162.8	0.0859

тъмно той е добър изолатор. Светлината създава в него носители на електричен ток – електрони и дупки. Когато подаденото напрежение е причина за възникналият ток, е по-удобно законът на Ом да се представи чрез проводимост, дефинирана като реципрочен съпротивление

$$I_{\varphi} = \sigma U_{\varphi}, \quad \sigma \equiv \frac{1}{R_{\varphi}}. \quad (3)$$

За фоторезисторите, проводимостта е пропорционална на интензивността на светлината. Ако фоторезисторът е под постоянно напрежение, токът през него е пропорционален на интензивността на светлината. На Фиг. 16 е показана зависимостта на проводимостта на фоторезистора $\sigma_{\varphi}(I_{\text{LED}})$ като функция от тока през светодиода. Линейната зависимост показва, че рекомбинираните електрон-дупчени двойки в светодиода създават фотони, които долитат до фоторезистора и там създават електрон-дупчени двойки и електрична проводимост. Единицата за

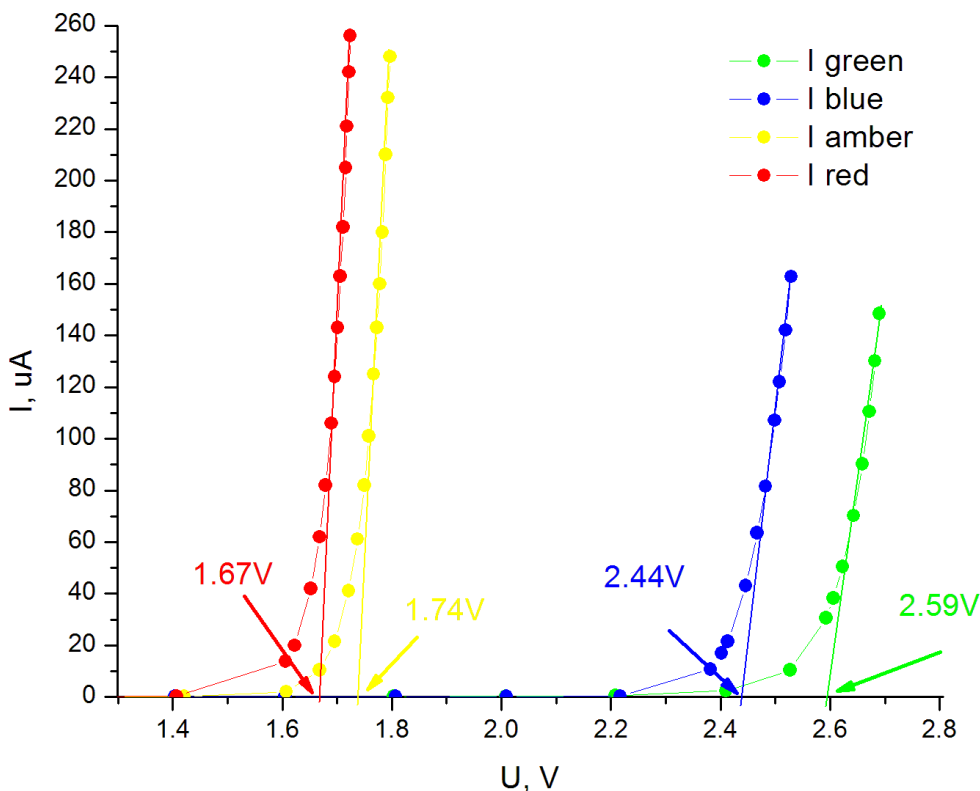


Фиг. 16. Проводимост на фоторезистор R_{φ}^{-1} като функция от тока на поставения до него светодиод I . Инженерите, които не обичат гръцки букви, използват съкращението μA за μA . За всички цветове: червен (red), кехлибарено-жълт (amber), зелен (green) и син (blue) с висока точност се наблюдава линейна зависимост. Около прага, токът през светодиода е пропорционален на интензивността на излъчената светлина, който на свой ред създава зарядови носители и електрична проводимост на фоторезистора.

проводимост се нарича още Сименс $\text{Sm} = \Omega^{-1}$ и техниците, които смесват физичните величини с единиците, биха казали, че имаме линейна сименс-амперна характеристика.

Както волт-амперните характеристики, така и сименс-амперните характеристики на светодиодите могат след известна обработка на експерименталните данни да дадат оценка на критичното напрежение $\tilde{U}_c$ и енергията на квантовия преход $q_e \tilde{U}_c$. Така намерените критични напрежения са представени в Табл. 7.

15: Константата, която участва в уравнението за фотоефекта (2), е леко различна за полупроводниците на светодиодите, които светят с разли-



Фиг. 17. ВАХ и тяхната линейна апроксимация за светодиодиите с различни цвят: червен (red), кехлибарено-жълт (amber), зелен (green) и син (blue). Линейната екстраполация пресича абсцисата и дава едно критично напрежение $\tilde{U}_c$, получено чрез анализ на ВАХ, а не чрез субективното усещане, кога диода светва. $\mu A \equiv \mu A$.

Табл. 7. Експериментални данни за праговото (критично) напрежение за светване (угасване) на светодиод от съответен цвят

Цвят	червен	жълт	зелен	син
U_c [V]	1.330	1.411	1.916	1.927

чен цвят. Особено силно това различие се проявява при зелените светодиоди. Освен това светването и изгасването на фотодиодите не е наблюдавано на тъмно. При подробно изследване на волт-амперната характеристика критичното напрежение може да се определи по-точно, но трябва да се отчита множителят на неидеалност (*non ideality factor*) на светодиодите n , което вече ще ни отведе дълбоко в областта на електро-

Табл. 8. Други експериментални данни за дифракция и прагово напрежение за фотодиоди с различни цветове (производител CREE); $D = 21 \text{ cm}$, $d = 1.5 \mu\text{m}$

№	Цвят	$L \text{ [cm]}$	$\text{tg}(\theta)$	θ, deg	$\sin(\theta)$	$\lambda \text{ [nm]}$	$\nu \text{ [Hz]}$	$U_c \text{ [V]}$	$q_e U_c \text{ [J]}$
1	виолет	6.0	0.294	15.5	0.274	411	7.30×10^{14}	1.46	3.70×10^{-19}
2	син	6.7	0.319	17.7	0.304	456	6.58×10^{14}	1.55	2.10×10^{-19}
3	зелен	7.5	0.357	19.7	0.337	505	5.94×10^{14}	1.99	1.94×10^{-19}
4	жълт	8.3	0.395	21.6	0.368	552	5.43×10^{14}	2.10	1.55×10^{-19}
5	червен	9.0	0.429	23.2	0.394	591	5.08×10^{14}	2.23	1.40×10^{-19}

Табл. 9. Критичните напрежения, определени на око $U_c \equiv U_c^{\text{eye}}$ или ВАХ $\tilde{U}_c \equiv U_c^{\text{VAC}}$, са дадени в съседни колони. Експериментални данни за дифракция и прагово напрежение за светодиоди от различни цветове серия 272 (широко-ъгълни) [6], $D = 20 \text{ cm}$, $d = 1.5 \mu\text{m}$

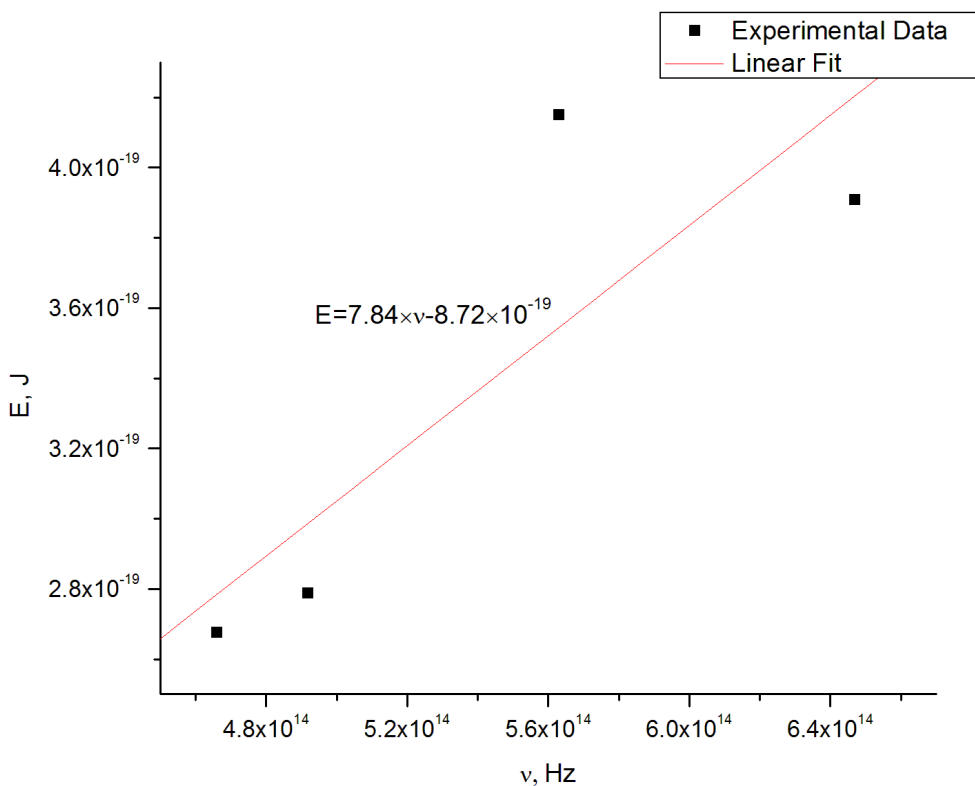
№	Цвят	$L \text{ [cm]}$	$\text{tg}(\theta)$	$\theta \text{ [deg]}$	$\sin(\theta)$	$\lambda \text{ [nm]}$
2	син	6.5	0.325	18.0	0.309	464
3	зелен	7.6	0.380	20.8	0.355	532
4	жълт	8.9	0.445	24.0	0.407	609
5	червен	9.5	0.475	25.4	0.429	644

№	Цвят	$\nu \text{ [Hz]}$	$U_c^{\text{eye}} \text{ [V]}$	$q_e U_c^{\text{eye}} \text{ [J]}$	$U_c^{\text{VAC}} \text{ [V]}$	$q_e U_c^{\text{VAC}} \text{ [J]}$
2	син	6.47×10^{14}	1.927	3.087×10^{-19}	2.44	3.91×10^{-19}
3	зелен	5.63×10^{14}	1.916	3.069×10^{-19}	2.59	4.15×10^{-19}
4	жълт	4.92×10^{14}	1.411	2.260×10^{-19}	1.74	2.79×10^{-19}
5	червен	4.66×10^{14}	1.133	2.131×10^{-19}	1.67	2.67×10^{-19}

никата. Най-точно би било да се изследва ВАХ на вакуумен диод (това е радиолампа), осветяван от различни светодиоди. Опитът за наблюдаване на фотоефект с вакуумен диод е описан в учебниците.

17: Нека съобразим кои цветове допринасят за сенките, показани на Фиг. 9: 1) пурпур (магента) = червено + синьо; 2) червено; 3) жълто = червено + зелено; 4) зелено; 5) синьо-зелено (циан) = синьо + зелено; 6) бяло = червено + синьо + зелено (само при добре балансирани с потенциометри 2 цвята).

18: Преди дифракцията фотонът има успоредна на дифракционната решетка проекция на импулса $p \equiv (h/\lambda) \sin(\alpha)$. От дифракционната решетка с период d фотонът получава импулс $p_0 \equiv h/d$ или кратен на него; за простота в това подусловие разглеждаме само първия дифракционен максимум. След дифракцията y -компонентата на импулса е



Фиг. 18. Енергия на прехода E , определена чрез изследване на ВАХ и съответната честота на светлинната вълна ν . Плътната права линия $E = (7.8 \times 10^{-34} \text{ J})\nu + \text{const}$ е прекарана така, че сумата от квадратите на разстоянията по вертикала между експерименталните точки и правата линия да бъде минимална. Измерването дава 18% по-голяма стойност от точното значение; като за първо измерване на константата на Планк това е добро начало.

$p' \equiv (h/\lambda) \sin(\theta)$, а законът за запазване на импулса $p' = p' + p_0$ дава

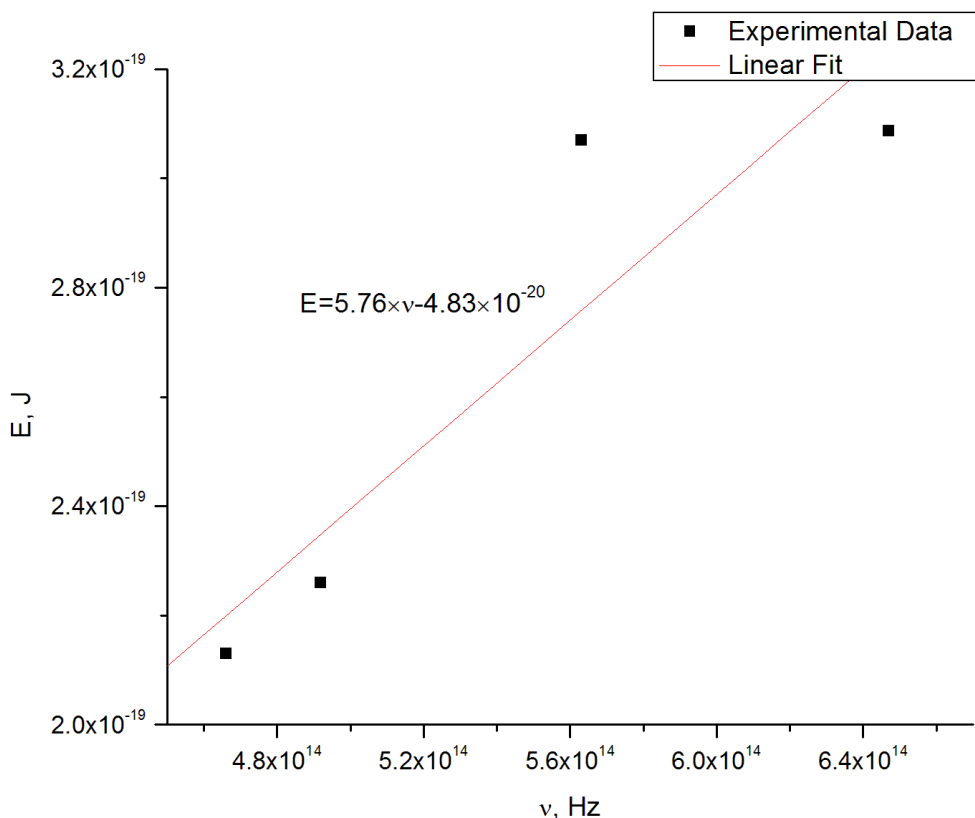
$$\frac{h}{\lambda} \sin(\theta) = \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha) + \frac{h}{d}. \quad (4)$$

Тогава разликата в оптичните пътища за съседни процепи на дифракционната решетка е

$$\lambda = [\sin(\theta) - \sin(\alpha)] d. \quad (5)$$

Вълновото решение изисква добър чертеж, а механичното решение – познаване на законите за запазване на енергията и импулса.

19: Когато светлината се движи в среда с показател на пречупване n , дължината на вълната става n пъти по-малка. Във формулата за ъгъла на



Фиг. 19. Енергия на прехода, определена по напрежението на светване и изгасване на светодиода срещу честотата на излъчената светлина. За разлика от Фиг. 18 сега апроксимиращата права $E = (5.7 \times 10^{-34} \text{ J})\nu + \text{const}$ дава 15% по-малка стойност. Това е съвсем прилична точност за първо измерване на константата на Планк. За нас е важно, че се докоснахме до измерване на една важна фундаментална константа, която е вързана с квантовите явления.

дифракция трябва да заместим дължината на вълната за среда с показател на пречупване n , $\lambda_n \equiv \lambda/n = d \sin(\theta)$. За вода синусът от ъгъла на дифракция намалява с около 25% и това лесно може да се провери експериментално. Ако дифракционната решетка е на границата на две среди с показатели на пречупване n_1 и n_2 , законът за запазване на импулса приема вида

$$\frac{h}{\lambda_2} \sin(\theta) = \frac{h}{\lambda_1} \sin(\alpha) + i_m \frac{h}{d}, \quad \lambda_1 \equiv \frac{\lambda}{n_1}, \quad \lambda_2 \equiv \frac{\lambda}{n_2}, \quad (6)$$

където цялото число $i_m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ е порядъкът на дифракционния максимум, а λ е дължината на светлината във вакуум. При $i_m = 0$, напри-

мер, получаваме закона на Снелиус $n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\theta)$, като следствие от закона за запазване на импулса.

20: Нека приближено разгледаме диода като точков източник на светлина, поставен във фокуса на лещата. Зад лещата излиза почти успореден сноп светлина. Радиусът на снопа е сравним с радиуса на лещата. За да може да разглеждаме браздите на диска като почти успоредни, трябва радиусът на диска R_{CD} да бъде много по-голям от фокусното разстояние $R_{CD} \gg f$. Затова точността на измерването се подобрява, ако лещата е поставена близо до периферията на диска. Ако разполагате само със слаба леща с фокусно разстояние, по-голямо от диаметъра на диска, тогава трябва на поставите бленда до дифракционната решетка. Най-просто би било, ако фолиото се махне само от площ 1 cm^2 .

21: Ако решетката се движи със скорост v , периодът d се изминава за време d/v и честотата на преминаване на браздите спрямо неподвижен наблюдател е $\nu_0 = v/d$. Тази малка честота се добавя към честотата на падащия фотон $\nu = 1/T$ с период на вълната T . В този случай за честотата на дифрактиралата светлина получаваме $\nu' = \nu + \nu_0$. Ако умножим с константата на Планк h , получаваме за енергията на разсеяния фотон $E' = E + E_0$, където $E' \equiv h\nu'$, $E \equiv h\nu$ и $E_0 \equiv h\nu_0$. С други думи, движещата се дифракционна решетка предава своята енергия на фотона. Такъв е например случаят, когато светлина се разсейва от звукова вълна. Звуковата вълна е като една движеща се дифракционна решетка. Честотата на разсеяната вълна може да се пресметне от закона за запазване на енергията. Квантът на звука (фонона) и квантът на погълнатата светлина (фотона) отдават своята енергия на разсеяния фотон. При много физични процеси, когато две вълни създават трета, например, Комптоново или Раманово разсейване, имаме едновременно запазване на енергията и импулса

$$E' = E + E_0, \quad \mathbf{p}' = \mathbf{p} + \mathbf{p}_0. \quad (7)$$

22: Във формулата за фазовата скорост на фотона изразяваме дължината на вълната чрез импулса и периода чрез енергията

$$c = \frac{\lambda = h/p}{T = h/E} = \frac{E}{p} \quad (8)$$

и получаваме връзката между енергията и импулса на фотона $E = cp$. Това е общо съотношение между импулс и енергия за плоска електромагнитна вълна $p = E/c$.

23: Заместването във формулите от условието дава

$$X = \left(V = \frac{p = E/c}{M} \right) \left(t = \frac{l}{c} \right) = l \left(m \equiv \frac{E}{c^2} \right) / M. \quad (9)$$

24: Горното уравнение може да се запише като $MX = mL$. Това е оригиналното разсъждение на Айнщайн за еквивалентност на масата и енергията $E = mc^2$, изведена като следствие от постоянното положение на центъра на масата. При разумни енергии отместването на вагона е пренебрежимо малко, масата на нагрятото тяло е нищожно по-голяма, но от друга страна малки различия в масите съответстват на огромна енергия. Така импулсът на фотона е дал тласък в развитието на ядрената физика и енергетика. А в нашия мислен експеримент първоначално енергията E е била химична енергия на лазерната показалка, а после се е превърнала в топлинна енергия на стената погълнала светлинния импулс. Така проведеното решение ни позволи да направим кратък преговор на материала от учебниците по физика.

Авторите благодарят за финансовата помощ на български спомоществователи, благодарение на която бяха изготвени експерименталните постановки за олимпиадата, както и на Декана на Физически факултет проф. Ал. Драйшу за предоставяне на аудитории за провеждане на олимпиадата в София, за вниманието и подкрепата.

ОТЗИВИ ЗА ПРОВЕДЕНАТА ОЛИМПИАДА ПО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ФИЗИКА ЕПО-2 (Ден на фотона)

Във Втората Олимпиада по експериментална физика, проведена на 25 април 2015 г. в София, участваха 61 ученика от 7 до 12 клас, 29 придружаващи учители от 12 града от България и Република Македония – София, Смолян, Ст. Загора, Ловеч, Правец, Варна, Вършец, Елин Пелин, Благоевград, Струмица, Валандово, Скопие. 37 ученици от 10. до 12. клас решаваха както електричната, така и оптичната част на задачата. От тях 11 ученика решиха най-важното условие на задачата, а именно, да се измери константата на Планк.

Отзиви от олимпиадата дадоха 14 участника, 16 придружаващи учители, 1 гост. По-долу са представени в табличен вид техните отговори на четири въпроса:

Въпрос 1: *Вашата оценка за трудността на задачата*

Отговор	Брой
Много трудна	3
Трудна	10
Нормална	18
Лесна	0
Много лесна	0

Въпрос 2: *Ще участвате ли в олимпиадата през есента на 2015 г.?*

Отговор	Брой
Ще участвам	20
Не мога да потвърдя в момента	10
Няма да участвам	1

Въпрос 3: *Намирате ли задачата за интересна?*

Отговор	Брой
Завладяваща	12
Интересна	17
Рутинна	0
Не е интересна	0
Досадна	0

Въпрос 4: *Дайте оценка за нивото на организацията на Олимпиадата*

Отговор	Брой
Организирана по-добре от другите олимпиади	15
Много добре организирана	14
Добре организирана	2
Нормално организирана	0
Лошо организирана	0

Допълнителни препоръки и коментари за Олимпиадата, получени от формата за обратна връзка:

- Нямам, всичко много ми хареса, но нашият директор не ни финансира, защото олимпиадата НЕ е в календара на МОН.
- Впечатлена съм от организацията. Браво!
- По-малко условия, защото времето не беше достатъчно.
- Много интересна и полезна олимпиада!
- Sakam da se zablagodaram na profesionalnuiot a istovremeno topol priem na domakinot. Gostite od Makedonija se custvuvame navistina prijatno i so zadovolstvo bi dosle povtorno vo Sofija. Golem pozdrav od Makedonija

- От 1989 г. не съм виждал по-добра олимпиада. Преди тази година имаше подобни състезания и аз съм участвал на така наречените състезания по електротехника още в 4. клас. Иначе инициативата ви е супер!
- От най-приятните за решаване задачи са вашите. Хубаво ще е, ако олимпиадата стане по-масова и да влезе в “календара със състезания”, за да участват повече конкурентно способни в горните възрастови групи.
- Уважаеми организатори, благодаря Ви за приятното изживяване! За мен участието на ученичката ми бе много полезно. Научих много приложими неща. Идеята да ни подарите опитните постановки е страхотна. Желая Ви здраве и много сили, за да продължите да ни изненадвате с нови задачи!
- Много ми хареса това, че материалите, които ползвахме на олимпиадата, останаха за нас и сега мога да правя опитите вкъщи.
- Възможно ли е да се направи курс за учители, които да бъдат подготвяни за подобни мероприятия, дори и платен?
- Поздравявам организаторите за тази интересна инициатива.
- Децата наистина се забавляваха.
- Олимпиадата беше много добре организирана, задачата беше изключително интересна и увлекателна. Искам да поздравя и спонсорите за това, че са помогнали да се състои тази олимпиада, а това, че работните установки останаха за участниците също беше чудесно, защото така всеки може да повтори опита вкъщи, да го покаже на приятели и познати, и така да разпали техния интерес не само конкретно за приятната и интересна страна на физиката, но и за науката като цяло.
- Изключително интересна и забавна олимпиада, особено с това, че и придружаващите учители имаха възможност да се докоснат до задачите. Благодаря ви, беше удоволствие за нас!

Литература

- [1] V.N. Gourev, St.G. Manolev, V.G. Yordanov, T.M. Mishonov, Measuring Planck constant with colour LEDs and compact disk, arXiv:1602.06114 [physics.ed-ph]
- [2] PhysicsLAB, HTML conversion, Catharine H. Colwell, Mainland High School, Daytona Beach, FL 32114.
http://dev.physicslab.org/Document.aspx?doctype=5&filename=Compilations_NextTime_Shadows2.xml

- [3] <https://www.pinterest.com/pin/285697170082704438/>,
<http://www.vivatubes.com/nib-rca-usa-1p40-photocell-vacuum-tube-ip40-1/>,
<http://www.istok2.com/data/2559/>,
http://ru.pc-history.com/wp-content/uploads/Fotoelement_SCB-4.jpg,
<http://ru.pc-history.com/fotoelement-scv-4.html>,
<http://aukro.ua/fotoelement-scv-4-i5027393716.html>,
http://www.ebay.com/itm/2-VACUUM-TUBES-RCA-930-6E5/201322750445?_trksid=p2047675.c100005.m1851&_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D1%26asc%3D29384%26meid%3Dbb80c151a256490fbe6f40df42bc9a3e%26pid%3D100005%26rk%3D3%26rkt%3D6%26sd%3D151256790743&rt=nc,
http://www.ebay.com/itm/Vacuum-Tube-RCA-Type-6W6GT-Clear-Glass-Black-Rectangular-Plate-USED/321699509598?_trksid=p2047675.c100005.m1851&_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D1%26asc%3D29384%26meid%3Dbb80c151a256490fbe6f40df42bc9a3e%26pid%3D100005%26rk%3D4%26rkt%3D6%26sd%3D151256790743&rt=nc,
<http://www.ebay.com/itm/RCA-930-PHOTOCELL-VACUUM-TUBE-BLACK-GLASS-/151256790743>.
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>,
<http://www.eandc.ru/news/detail.php?ID=20954>,
<http://www.eandc.ru/catalog/detail.php?ID=16654>,
<http://www.pitersvet.ru/index.php?productID=501>,
<http://www.istok2.com/data/2850/>,
<http://pepina.org/pdf/tube/fey-35.pdf>.
- [5] R. Millikan, 'A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h."' Physical Review 7, Nr. 3, 355–388 (1 March 1916),
<http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.7.355>
- [6] *Светодиоди серия 272 (широковълни)*
<http://www.led-bg.com/bg/product/svetodiodi-seriya-272-shirokoagalni>

Measuring of Planck Constant with Colour LEDs and Compact Disk

**Vassil N. Gourev¹, Stojan G. Manolev², Vasil G. Yordanov³,
Todor M. Mishonov⁴**

¹Department of Atomic Physics, Faculty of Pphysics,
St. Kliment Ohridski University of Sofia, 5 James Bourchier Blvd., 1164 Sofia

²Middle School “Goce Delchev”, Purvomaiska str. 3,
MKD-2460 Valandovo, Republic of Macedonia

³Faculty of Pphysics, St. Kliment Ohridski University of Sofia,
5 James Bourchier Blvd., 1164 Sofia

⁴Department of Theoretical Physics, Faculty of Pphysics,
St. Kliment Ohridski University of Sofia, 5 James Bourchier Blvd., 1164 Sofia

Abstract: This problem was given at the Second Open Experimental Physics Olympiad (OEPO) “The Day of Photon”. The Olympiad was organised by the Sofia Branch of the Union of Physicists in Bulgaria in cooperation with the Regional Society of Physicists of Strumica, Republic of Macedonia and was held in Sofia on 25 April 2015. The Olympiad was devoted to the 2015 International Year of Light and Light-based Technologies (IYL2015) and was included in the Event Programme of this UN global initiative <http://www.light2015.org/Home/Event-Programme/2015/Competition/Bulgaria-Second-Experimental-Physics-Olympiad--25-April-2015-in-Sofia.-The-Day-of-the-Photon-in-the-International-Year-of-the-Light.html>