Unitatea de învăţare: XII. 2
Efectul fotoelectric extern şi efectul Compton

„Există procese în care se manifestă caracterul corpuscular al luminii?”

Clasa **a XII-a**.
Numărul orelor/lecţiilor: **8+1**.
Conţinuturi repartizate: **2.1. Efectul fotoelectric extern.** 2.1.1. Legile efectului fotoelectric extern. 2.1.2. Ipoteza lui Planck. Ipoteza lui Einstein. Ecuaţia lui Einstein. 2.1.3. Interpretarea legilor efectului fotoelectric extern. **2.2. (*)** ***Efectul Compton*** (Programa de fizică pentru clasa a XII-a, 5959/22.12.2006).
Strategie didactică asociată unității de învățare, bazată predominant pe **modelare**[1].
Structura unității de învățare:

Secvenţele unităţii de învăţare	**Sarcini didactice dominante**	**Obiective vizate în cadrul unităţii de învăţare** (etape ale modelării)
I. Evocare–Anticipare	**Lecţia 1. Evaluarea iniţială a situaţiei de învăţare**, stabilirea obiectivelor/formarea unei prime reprezentări a situaţiei de rezolvat;	1. **Sesizarea modelului** (conceptual, material, procedural) de exersat;
II. Explorare–Experimentare	**Lecţia 2. Dezvoltarea strategiilor cognitive** (de abordare a situaţiilor-problemă, sarcinilor);	2. **Identificarea componentelor modelului** de exersat (concepte, secvenţe, proceduri);
III. Reflecţie–Explicare	**Lecţiile 3-5. Elaborarea/ enunţarea** noilor cunoştinţe (definiţii, generalizări);	3. **Organizarea datelor** obţinute prin exersare, compararea cu modelul original şi propunerea unor generalizări;
IV. Aplicare–Transfer	**Lecţia 6. Sistematizarea şi consolidarea** noilor cunoştinţe;	4. **Testarea modelului** obţinut, prin includerea altor cazuri particulare;
	Lecţiile 7-8. Dezvoltarea atitudinilor, a percepţiei valorilor. **Evaluarea rezultatelor învăţării**.	5. **Extinderea sferei noilor cunoştinţe** prin includerea altor informaţii.

Mijloace de învățământ: computer cu acces la Internet şi videoproiector (facultativ); fişe de lucru pentru elevi; manuale şi alte resurse cu informaţii vizând tema, planşe, filme, animaţii, simulări, software educaţional.

O privire de ansamblu asupra strategiei de cunoaştere: Succesiunea lecţiilor corespunde etapelor *modelării* declanşate în clasă de o situaţie-problemă: „*Ştiind că abordarea ondulatorie a luminii permite explicarea unor fenomene precum reflexia, refracţia, interferenţa sau difracţia, cum ar trebui considerată lumina pentru a putea explica efecte precum efectul fotoelectric extern sau efectul Compton?”* Pe parcursul unităţii, gândirea elevilor se orientează către ideea că „*lumina prezintă un caracter dual, de undă şi particulă”.*

De asemenea, pe parcursul lecţiilor şi la finalul acestora (aprox. **10 min.**) elevii sunt implicaţi în realizarea unor momente de *feedback metacognitiv*, necesare anticipării sarcinilor (competenţelor de însuşit) şi proiectării lecţiilor următoare.

Printre tehnicile recomandate de includere a feedback-ului metacognitiv în cadrul lecţiilor sunt: ***Harta „Ştiu. Vreau să ştiu. Am învăţat”*** şi ***”Eseul de 5 minute”.***

În funcţie de specificul lecţiilor, pot fi folosite şi alte instrumente de evaluare formativă, potrivit inventarului de sugestii de evaluare.[2]

[1] Strategia didactică aferentă fiecărei lecţii va fi completată cu alte metode, procedee şi tehnici de predare-învăţare (tradiţionale sau moderne), selectate de către fiecare profesor în funcţie de diverse variabile ale contextului educaţional
[2] Aceste precizări sunt valabile pentru finalul fiecărei lecţii din unitate; excepție face ultima lecție.

I. Evocare–Anticipare
Ce ştiu sau cred eu despre asta?

Lecţia 1. Sesizarea modelului (conceptual, material, procedural) de exersat.

„Lumina–întotdeauna undă electromagnetică?"

În această lecţie, au loc următoarele procese: i) identificarea scopului urmărit (evidenţierea unor noi fenomene optice); ii) identificarea procedurilor care trebuie imaginate pentru îndeplinirea scopului (caracterizarea calitativă a fenomenelor); iii) proiectarea demersului de rezolvare (necesitatea studiului teoretic sau experimental al fenomenelor).

În acest scop, profesorul (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Prelegere interactivă*** – **15 min.**)

- **dezbate** cu elevii conceptul de undă electromagnetică ce permite explicarea fenomenelor de reflexie, refracţie, interferenţă, difracţie şi polarizare, studiate în clasa a XI-a;
- **prezintă** elevilor schema dispozitivului experimental pentru studiul efectului fotoelectric extern;
- **prezintă** elevilor o simulare a ciocnirii elastice foton–electron în cazul efectului Compton;

Se cere elevilor (***variantă de abordare***):

Activitatea 2 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **25 min.**)

- **să descrie** construcţia dispozitivului experimental pentru studiul efectului fotoelectric extern;
- **să anticipeze** modul de funcţionare, reglajele şi dependenţa dintre mărimile fizice implicate;
- **să observe** comportarea electronului şi fotonului incident în simularea efectului Compton;
- **să anticipeze** legile de conservare la interacţiunea foton–electron;
- **să formuleze** constatări/concluzii, în raport cu previziunile anterioare: *substanţa poate emite electroni dacă este iradiată cu radiaţie electromagnetică corespunzătoare; fotoelectronii emişi pot determina un curent electric într-un circuit; la împrăştierea radiaţiei X pe electroni se observă o schimbare a frecvenţei caracteristice acestei radiaţii* etc.

Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

II. Explorare–Experimentare
Cum se potriveşte această informaţie cu ceea ce ştiu sau cred eu despre acest subiect?

Lecţia 2. Identificarea componentelor modelului de exersat.

„Legile efectului fotoelectric extern"

Care este dependenţa dintre intensitatea curentului fotoelectric şi tensiunea aplicată pe celulă? Depinde acest curent şi de alţi factori? (*conflict cognitiv*). Elevii studiază caracteristica curent–tensiune pentru o celulă fotoelectrică şi identifică dependenţa fotocurentului de tensiunea aplicată, de lungimea de undă a radiaţiei electromagnetice incidente şi de intensitatea acesteia.

În acest scop, elevii sunt ghidaţi (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Interviul în perechi*** – **15 min.**)

- **să observe** forma caracteristicii curent–tensiune, **să compare** caracteristicile pentru diferite intensităţi ale radiaţiei electromagnetice incidente şi **să exprime** această dependenţă (*fotocurentul se modifică la modificarea tensiunii la bornele celulei fotoelectrice; există o tensiune de stopare evidenţiată la aplicarea unui potenţial pe anod mai mic decât pe catod; există un curent de saturaţie; creşterea intensităţii radiaţiei incidente determină creşterea intensităţii curentului de saturaţie.*);

Activitatea 2 (***Brainstorming în grup*** – **15 min.**)

- **să observe** dependenţa energiei cinetice maxime a fotoelectronilor de frecvenţa radiaţiei electromagnetice incidente pentru diferite metale şi **să exprime** această dependenţă (*fotocurentul apare dacă frecvenţa radiaţiei incidente depăşeşte o valoare specifică fiecărui metal; graficul este o dreaptă*);
- **să observe** (pe baza materialelor bibliografice) că fotocurentul apare practic instantaneu la iradierea catodului celulei fotoelectrice;

Activitatea 3 (***Interviul în grup*** – **10 min.**)
- **să formuleze** constatări şi generalizări parţiale – *formularea legilor efectului fotoelectric extern*.
Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

III. Reflecţie–Explicare
Cum sunt afectate convingerile mele de aceste idei?

Lecţia 3. Organizarea datelor obţinute prin exersare, compararea cu modelul original şi propunerea unor generalizări.

„Explicarea efectului fotoelectric extern în cadrul modelului clasic (lumina—undă electromagnetică)"

În această etapă, problema care declanşează învăţarea este posibilitatea emiterii de electroni de către catodul celulei fotoelectrice sub acţiunea undei electromagnetice incidente (*conflict cognitiv*). Elevii, plecând de la modelul emisiei de electroni de către un corp încălzit, încearcă să explice legile efectului fotoelectric extern pe baza emisiei termice de electroni datorită iradierii electromagnetice a catodului.

În acest scop, elevii sunt ghidaţi (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **30 min.**)

- **să explice** curentul electric în metale datorat electronilor de valenţă;
- **să anticipeze** efectul termic al radiaţiei electromagnetice incidente pe catodul celulei fotoelectrice şi emisia de electroni de către acesta;
- **să extragă** (din materialul bibliografic disponibil) caracteristicile lucrului mecanic de extracţie a electronului din catod şi **să anticipeze** dependenţa acestuia de natura catodului şi de adâncimea la care se găseşte electronul;
- **să formuleze observaţii** asupra caracteristicii curent–tensiune, folosind câmpul electric rezultant dintre câmpul electric anod–catod aplicat (determinat de tensiunea aplicată anod–catod) şi câmpul electric dintre catodul rămas cu sarcină pozitivă după emisia de electroni şi zona de sarcină electrică negativă a fotoelectronilor extraşi;
- **să scrie** ecuaţia de bilanţ energetic pentru electronul extras din catod ($E = L_{ex} + E_c$, energia primită de electronul din catod este suma dintre lucrul mecanic de extracţie şi energia sa cinetică după extracţie);

Activitatea 2 (***Ştiu, vreau să ştiu, am învăţat!*** – **10 min.**)

- **să formuleze** constatări/concluzii (pentru modelul clasic): „Electronii pot fi extraşi indiferent de frecvenţa radiaţiei incidente, dacă energia primită (adică intensitatea radiaţiei) este suficientă."; „Considerând că emiterea electronului este determinată de creşterea temperaturii catodului iluminat, ar trebui să existe un interval de timp necesar încălzirii catodului după care efectul să fie observat."; „Creşterea intensităţii radiaţiei incidente ar trebui să determine creşterea energiei cinetice a electronilor extraşi, ceea ce ar fi evidenţiat prin creşterea tensiunii de stopare.".

Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

Lecţia 4. Compararea cu modelul original şi propunerea unei generalizări.

„Ecuaţia lui Einstein"

În această lecţie, problema care declanşează învăţarea este imposibilitatea explicării tuturor legilor efectului fotoelectric extern folosind emisia termică a electronilor de către catodul iradiat electromagnetic (*conflict cognitiv*). Elevii, plecând de la sinteza datelor colectate în etapa de *Explorare* şi de la observaţiile asupra neconcordanţei dintre modelul clasic şi legile efectului fotoelectric, încearcă o altă abordare folosind ipoteza lui Planck şi ipoteza lui Einstein.

În acest scop, profesorul (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Prelegere interactivă*** – **20 min.**)

- **explică** elevilor contradicţiile din teoria clasică a radiaţiei corpului negru şi **prezintă** ipoteza lui Planck privind emisia sau absorbţia cuantificată a radiaţiilor electromagnetice de către substanţă (şirul de energii posibile ale radiaţiei electromagnetice emise sau absorbite de substanţă, $E = 0, hv, 2 hv, 3 hv, ..., h$ fiind constanta lui Planck);

- **prezintă** elevilor ipoteza lui Einstein: lumina este formată din cuante de lumină numite fotoni având energia $E = hv$, unde h este constanta lui Planck, iar v este frecvenţa radiaţiei luminoase; fotonii sunt emişi sau absorbiţi pe principiul „totul sau nimic"; un foton absorbit de un metal furnizează întreaga sa energie unui singur electron;

Se cere elevilor (***variantă de abordare***):

Activitatea 2 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **10 min.**)

- **să scrie** relaţia lui Einstein (bilanţul energetic în efectul fotoelectric extern) folosind bilanţul energetic din teoria clasică studiată anterior şi ipoteza lui Einstein ($hv = L_{ex} + E_{c\ max}$, unde $E_{c\ max}$ este energia cinetică maximă a fotoelectronului extras de pe suprafaţa catodului);

Activitatea 3 (***Ştiu, vreau să ştiu, am învăţat!*** – **10 min.**)

- **să formuleze** constatări/concluzii: „Energia unui foton este cuantificată şi depinde de frecvenţă."; „Întreaga energie a fotonului este cedată unui electron."; „Energia primită de electroni datorită efectului termic al radiaţiei pe catod este neglijabilă faţă de energia primită de la foton şi nu apare în ecuaţia lui Einstein." etc.

Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

Lecţia 5. Compararea cu modelul original şi propunerea unei generalizări.

„Interpretarea legilor efectului fotoelectric extern (lumina – flux de particule)"

În această etapă, problema care declanşează învăţarea este explicarea legilor efectului fotoelectric extern, considerând lumina un flux de particule—fotoni (*conflict cognitiv*). Elevii, plecând de la sinteza datelor colectate în etapa de *Explorare* şi de la ecuaţia lui Einstein, explică unitar efectul fotoelectric extern.

În acest scop, elevii sunt ghidaţi (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **30 min.**)

- **să explice** dependenţa dintre intensitatea radiaţiei electromagnetice incidente şi intensitatea curentului fotoelectric de saturaţie (*creşterea fluxului radiaţiilor incidente are loc când creşte numărului de fotoni incidenţi pe catod şi determină creşterea numărului de electroni emişi, deci a intensităţii curentului fotoelectric de saturaţie*);

- **să explice** existenţa unei frecvenţe de prag în efectul fotoelectric (*frecvenţa de prag este impusă de valoarea lucrului mecanic de extracţie,* $L_{ex} = hv_0$);

- **să observe** că efectul fotoelectric se produce practic instantaneu, deoarece *transferul de energie de la foton la electron se produce practic instantaneu*;

- **să observe** că lucrul mecanic de extracţie depinde de natura substanţei, datorită valorii diferite a energiei necesare pentru a extrage un electron de pe suprafeţe metalice diferite;

Activitatea 2 (***Ştiu, vreau să ştiu, am învăţat!*** – **10 min.**)

- **să formuleze** constatări/concluzii privind relaţia dintre tensiunea de stopare (U_0) şi lucrul mecanic de extracţie: $eU_0 = E_{c\ max}$ şi, folosind ecuaţia lui Einstein, $hv = L_{ex} + E_{c\ max}$, să obţină $eU_0 = hv – L_{ex}$ etc.

Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

IV. Aplicare–Transfer
Ce convingeri îmi oferă această informaţie?

Lecţia 6. Testarea modelului obţinut.

„Aprofundarea efectului fotoelectric extern"

În această lecţie, elevii plecând de la legile efectului fotoelectric extern explicate de ecuaţia lui Einstein, încearcă aplicarea acestora pentru rezolvarea unor probleme particulare.

În acest context, profesorul ghidează gândirea elevilor către (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **30 min.**)

- determinarea frecvenţei, impulsului şi energiei unui foton, cunoscând lungimea de undă a acestuia;
- determinarea numărului de fotoni emişi în unitatea de timp de o lampă cu putere şi lungime de undă predominantă cunoscută;
- determinarea lucrul mecanic de extracţie cunoscând relaţia dintre energiile cinetice maxime ale fotoelectronilor extraşi, pentru cazul efectului fotoelectric produs pe acelaşi catod de două radiaţii cu frecvenţe diferite;

Activitatea 2 (***Interviul în perechi*** – **10 min.**)

- studiul efectului fotoelectric plecând de la diagramele experimentale pentru caracteristica curent–tensiune şi $E_{c\,max}$ – frecvenţă.

Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

Cum pot utiliza această informaţie?
Ce anume pot face în alt fel, acum când deţin această informaţie?

Lecţia 7. Extinderea sferei noilor cunoştinţe.

„Explicarea efectului Compton"

În această lecţie,.elevii fac încercări de aplicare a cunoştinţelor însuşite la studiul efectului fotoelectric extern pentru explicarea efectului Compton (*conflict cognitiv*).

În acest context, profesorul ghidează gândirea elevilor către (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **30 min.**)

- reprezentarea schematică a ciocnirii foton–electron;
- scrierea legilor de conservare pentru impulsul şi energia totală a sistemului foton–electron în efectul Compton;
- scrierea sistemului de ecuaţii, considerând iniţial electronul liber şi în repaus şi folosind formalismul relativist;
- determinarea variaţiei lungimii de undă a fotonului incident.

Activitatea 2 (***Interviul în grup*** – **10 min.**)

- formularea de observaţii particulare asupra efectului Compton *(variaţia lungimii de undă nu depinde de lungimea de undă a fotonului incident, ci doar de unghiul de împrăştiere; efectul Compton poate fi observat uşor pentru fotoni cu lungime de undă mică (exemplu - radiaţie X); sensul de mişcare a electronului de recul este întotdeauna înainte (în sensul deplasării fotonului incident); energia maximă a electronului de recul se obţine pentru cazul întoarcerii fotonului incident ($\theta = \pi$ rad)).*

Evaluarea de la finalul lecţiei (10 min.)

Lecţia 8. Extinderea sferei noilor cunoştinţe.

„Aprofundarea efectului Compton"

În această lecţie,.elevii fac încercări de aplicare a cunoştinţelor însuşite la studiul efectului Compton pentru rezolvarea unor probleme particulare. (*conflict cognitiv*).

În acest context, profesorul ghidează gândirea elevilor către (***variantă de abordare***):

Activitatea 1 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **10 min.**)

- **scrierea** legilor de conservare pentru impulsul şi energia totală a sistemului foton–electron în efectul Compton;
- **evocarea** expresiei variaţiei lungimii de undă a fotonului incident.

Activitatea 2 (***Gândiţi, lucraţi în perechi, comunicaţi!*** – **30 min.**)

- **rezolvarea** unor probleme folosind relaţia dintre lungimea de undă a fotonului difuzat, lungimea de undă a fotonului incident şi unghiul de deviere a fotonului;
- **rezolvarea** unor probleme de determinare a unghiului de împrăştiere a electronului şi energiei sale cinetice pentru anumite caracteristici ale fotonului incident;

La finalul unităţii de învăţare (**10 min.**) elevii sunt implicaţi în realizarea unor momente de *feedback metacognitiv*, necesare evaluării sarcinilor urmărite/ realizate pe parcursul întregii unităţi de învăţare.

În acest scop, pe lângă ***Harta „Ştiu. Vreau să ştiu. Am învăţat"***sau ***"Eseul de 5 minute"***, pot fi folosite şi alte instrumente de evaluare formativă, potrivit inventarului de sugestii de evaluare.

Pentru evaluarea finală (**1 oră**), pot fi folosite o serie de instrumente de evaluare cu caracter sumativ, prezente în inventarul de sugestii de evaluare.

Bibliografie

- Crocnan, D. O., *Fizică, Manual pentru clasa a XII-a*, Editura Sigma, Bucureşti, 2007.
- Chiriţă, M., *Fizică. Culegere de probleme*, clasele a XI-a–a XII-a, Editura Tamar, 2011.
- http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric.
- http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap28/PhotoEffect/photo.htm
- http://www.walter-fendt.de/ph14e/photoeffect.htm
- http://www.student.nada.kth.se/~f93-jhu/phys_sim/compton/Compton.htm
- http://www.compadre.org/OSP/items/detail.cfm?ID=10531
- http://escoala.edu.ro/labs/index.php#117

Anexă

Competenţele specifice ale programei şcolare pentru clasa a XII-a/5959/22.12.2006 repartizate pe secvenţele unităţii de învăţare

Secvenţele unităţii de învăţare	**Competenţele specifice ale programei şcolare**
Secvenţa I. Evocare–Anticipare	• Investigarea experimentală în laborator/laborator virtual a legilor efectului fotoelectric extern • *(**) Investigarea experimentală în laborator/laborator virtual a efectului Compton*
Secvenţa II. Explorare–Experimentare	• *(**) Formularea legilor efectului fotoelectric extern*
Secvenţa III. Reflecţie–Explicare	• Interpretarea efectului fotoelectric extern şi a legilor acestuia din perspectivă clasică, respectiv cuantică
Secvenţa IV. Aplicare–Transfer	• Rezolvarea unor probleme utilizând legile efectului fotoelectric extern şi ecuaţia lui Einstein • *(*) Interpretarea efectului Compton din perspectivă cuantică* • *(*) Rezolvarea unor probleme de efect Compton*