


Неочевидні елементи керування:

- У верхньому меню "Опції" виберіть "Показати фотони", щоб показати світловий промінь, що складається з окремих фотонів.
- Оберіть «Змінювати кількість фотонів» замість інтенсивності в меню «Опції», щоб змінити повзунок «Інтенсивність» на повзунок «Кількість фотонів».
- Використовуйте піктограму камери () , щоб зробити знімок графіків, щоб можна було

порівняти графіки для різних параметрів.

- Ви можете призупинити роботу симуляції (кнопка **Пауза** (Pause), а потім використовувати Крок (Step) для покрокового аналізу.
- Якщо ви робите демонстрацію на лекції, встановіть роздільну здатність екрана до 1024x768, щоб симуляція заповнила екран і легко читалася.

Важливі примітки / спрощення в моделюванні:

- Електрони випромінюються з діапазоном енергій, тому що фотони можуть викидати електрони з діапазоном енергій зв'язку. Якщо більше енергії фотона використовується для вивільнення електрона, випромінюваний електрон буде мати меншу кінетичну енергію. Зауважимо, що така поведінка відрізняється від спрощеної моделі, що використовується в деяких підручниках, в яких всі електрони випромінюються з однаковою кінетичною енергією. Якщо ви хочете скористатися цією спрощеною моделлю, ви можете перевірити опцію "Показувати лише електрони з найбільшою енергією". Цей параметр не змінює графіки, оскільки струм все ще обчислюється на основі всіх електронів.
- Не кожен фотон випускає електрон, навіть якщо фотони мають достатньо енергії, щоб випромінювати електрони. Якщо фотон поглинається електроном з енергією зв'язування, більшою, ніж енергія фотона, електрон не вивільняється. Фотони з більш високими енергіями частіше вивільняють електрони, тому що більша частка електронів в металі має енергію зв'язку менше енергії фотонів. Тому, збільшуючи частоту, кількість випромінюваних електронів (i , отже, струму) зростатиме, поки всі фотони не випромінюють електрони. Зауважимо, що така поведінка відрізняється від спрощеної моделі, використовуваної багатьма підручниками, в якій кожен фотон з частотою, що перевищує порогову частоту, вивільняє електрон, тому струм постійно вище порогової частоти.
- За замовчуванням, оскільки інтенсивність світла пропорційна кількості фотонів, що перевищують частоту, якщо збільшити частоту, тримаючи постійну інтенсивність, кількість фотонів зменшиться. Тому, якщо збільшити частоту, що перевищує точку, де всі фотони випромінюють електрони (див. Попередній абзац), кількість випромінюваних електронів (i , отже, струму) почне зменшуватися. Зауважимо, що це відрізняється від спрощеної моделі, що використовується багатьма підручниками, в яких струм постійно перевищує порогову частоту. Якщо ви хочете змінити частоту без зміни кількості фотонів, у меню "Опції" виберіть "Змінювати кількість фотонів" замість "інтенсивності".
- Ми припускаємо, що всі електрони викидаються перпендикулярно до пластини для простоти обчислень. У реальному експерименті фотони викидаються у всіх напрямках. Учні часто запитують, чи дійсно електрони відходять під різними кутами, і, як правило, готові визнати, що це просто спрощення моделювання.
- Ми ігноруємо такі складні питання, як контактний потенціал, термодіємійне випромінювання та зворотний струм.

Поради щодо використання для розвитку мислення учнів:

- Дослідження¹ показує, що у учнів часто виникають труднощі з розумінням основної схеми, що бере участь у фотоелектричному ефекті. Наприклад, вони можуть думати, що напруга, а не світло, змушує електрони відриватися від пластини, або намагатися застосувати $V = IR$. Варто витратити деякий час на вирішення таких учнівських труднощів.
- Багато учнів мають труднощі з розумінням зв'язку між струмом і швидкістю електронів. Наші учні часто обговорюють, чи збільшення швидкості електронів призводить до збільшення струму. Моделювання є найважливішим інструментом у вирішенні цих дебатів, тому що учні можуть побачити при уважному дослідженні, що збільшення швидкості електронів не збільшує кількість, що надходить на секунду на пластину, і тому не збільшує струм.
- В інтерв'ю ми виявили, що навіть учні, які не мали наукових знань, змогли зрозуміти, як експеримент фотоелектричного ефекту працює, граючись з цим моделюванням, але вони потребували подальшого керівництва, щоб зрозуміти наслідки експерименту для фотонної моделі світла.

Пропозиції для використання у форматі SIM:

- Поради щодо використання SIM-моделей з учнями див. : [Керівництво з діяльності. PhET -підходи до досліджень з супроводом і Поради з використання PhET](#)
- Моделювання успішно використовуються при виконанні домашніх завдань, під час лекцій, для занять у класі або на лабораторних роботах. Використовуйте їх для ознайомлення з концепціями, вивченням нових концепцій, підкріпленням понять, як візуальні засоби для інтерактивних демонстрацій або за допомогою клікерних запитань. Щоб дізнатися більше, див. [Вивчення фізики з використанням PhET-симуляцій](#)
- Для перегляду заходів та планів уроків, написаних командою сайта та іншими вчителями, див. [Поради для вчителів / Для вчителів](#)
- Ми рекомендуємо використовувати керовану дослідницьку діяльність, щоб допомогти учням «виявити» модель світла, яка пояснює поведінку, що спостерігається в симуляції.
- Дайте учням таблицю для різних матеріалів і попросіть їх використовувати симуляцію для визначення невідомого металу (з позначкою “?????”).
- Дуже чітко можна продемонструвати концепцію зупинки потенціалу, показуючи, що якщо ви встановите напругу акумулятора трохи нижче потенціалу зупинки, електрони просто потрапляють до протилежної пластини і обертаються. Це часто викликає сміх у учнів, коли вони це бачать вперше.
- Попросіть учнів з'ясувати спосіб використання моделювання для визначення постійної Планка.
- Запитайте учнів, як змінюватиметься графік струму від напруги, якщо не буде зроблено спрощення викиду електронів лише перпендикулярно пластині. (Це було б рівномірним при певній позитивній напрузі, а не при 0 вольтів, тому що більшість електронів, що летять під гострими кутами, будуть притягнуті назад до позитивної пластини.)
- Більш детальну інформацію про використання цього моделювання в сучасному класі фізики див. : SB McKagan, W. Handley, K.K. , 87 (2009):
http://per.colorado.edu/papers/McKagan_etal/photoelectric.pdf

S. B. McKagan, W. Handley, K. K. Perkins, and C. E. Wieman, “A Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect,” American Journal of Physics 87, 77 (2009).

¹ R. N. Steinberg, G. E. Oberem, and L. C. McDermott, “Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect,” American Journal of Physics 64, 1370 (1996).