

Non-obvious controls:

- In **Experiment** mode, a single Hydrogen atom is hidden behind the black box. In **Prediction** mode, the atom is visible. Students should be able to discover that only the predictions of the **Schrodinger** model match the results of an experiment.
- Select **Transitions** in the **Help** menu to show the wavelengths needed for transitions in the **Bohr**, **deBroglie**, and **Schrodinger** models. If **Light** is set to **Monochromatic**, the wavelength slider flashes white when it is over a wavelength that could excite the electron from the ground state.
- Use the camera icon () to take a snapshot of the **Spectrometer** so that you can compare the patterns for different models.
- Set the slider at the bottom to **fast** to build up the Spectrometer pattern quickly.
- You can **Pause** the sim and then use **Step** to incrementally analyze.
- If you are doing a lecture demonstration, set your screen resolution to 1024x768 so the simulation will fill the screen and be seen easily.

Important modeling notes / simplifications:

- These atoms are not to scale!
- In the **Schrodinger** model, transitions obey the selection rules $\Delta l = \pm 1$, $\Delta m = 0, \pm 1$. Because of these selection rules, the state 2,0,0 is a metastable state from which the electron cannot spontaneously emit a photon. If **Light** is set to **White**, whenever the electron falls into this state, the gun will soon emit a photon of exactly the right energy to excite it. If **Light** is set to **Monochromatic**, the electron will remain stuck in this state unless you select a wavelength that can excite it out of this state.
- In the **Bohr** and **deBroglie** models, transitions between any two levels are equally probable. In the **Schrodinger** model, the probability of a transition is based on the overlap between the wave functions, and some transitions are forbidden or highly improbable. Thus, there are fewer spectral lines in the **Schrodinger** model than in the **Bohr** or **deBroglie** model.
- In the **Plum Pudding** model, we assume the electron can absorb any frequency of light, but always emits light with frequency equal to its oscillation frequency.¹

Insights into student use / thinking:

- Students may not realize that UV photons can have different wavelengths, since they all look the same.
- If **Light** is set to **Monochromatic**, students may not realize that they need to move the slider into the **UV** region to excite the atoms.
- Students many have trouble identifying the red goo in the **Plum Pudding** model as positive charge. In interviews, we see that some students describe the **Plum Pudding** model as a cloud of negative charged filled with little specks of positive charge, rather than the other way around. The word “cloud” suggests that they are mixing up the **Plum Pudding** model with the **Schrodinger** model, in which the electrons are often described as a cloud of negative charge. These students initially thought that the electron in the simulation was a proton, but were eventually able to identify it correctly by using the legend or by comparing it to the electrons in other models.

¹ A.P. French and E. F. Taylor, *An Introduction to Quantum Physics* (1978), p. 11.

Неочевидные элементы управления:

- В режиме эксперимента один атом водорода скрыт за черным ящиком. В режиме прогнозирования атом виден. Учащиеся должны быть в состоянии обнаружить, что только предсказания модели Шредингера соответствуют результатам эксперимента.
- Выберите Переходы в меню справки, чтобы показать длины волн, необходимые для переходов в моделях Бора, де Бройля и Шредингера. Если свет настроен на монохроматический, ползунок длины волны мигает белым, когда он превышает длину волны, которая может вывести электрон из основного состояния.
- Используйте значок камеры () , чтобы сделать снимок спектрометра, чтобы вы могли сравнить образцы для разных моделей.
- Установите ползунок внизу в положение "быстро", чтобы было легче увидеть весь спектрометр.
- Вы можете приостановить симулятор, а затем использовать Step для пошагового анализа.

Важные замечания по моделированию / упрощения:

- Эти атомы не масштабируются!
- В модели Шредингера переходы подчиняются правилам выбора $\Delta l = \pm 1$, $\Delta m = 0, \pm 1$. Из-за этих правил выбора состояние $2,0,0$ является метастабильным состоянием, из которого электрон не может самопроизвольно испускать фотон. Если свет настроен на белый цвет, то всякий раз, когда электрон переходит в это состояние, пушка вскоре испустит фотон такой энергии, чтобы возбудить его. Если свет настроен на монохроматический, электрон останется застрявшим в этом состоянии, если вы не выберете длину волны, которая может вывести его из этого состояния.
- В моделях Бора и де Бройля переходы между любыми двумя уровнями равновероятны. В модели Шредингера вероятность перехода основана на перекрытии волновых функций, и некоторые переходы запрещены или крайне маловероятны. Таким образом, в модели Шредингера меньше спектральных линий, чем в модели Бора или де Бройля.
- В модели пудинга мы предполагаем, что электрон может поглощать свет любой частоты, но всегда излучает свет с частотой, равной частоте его колебаний.¹

Трудности понимания и использования учениками:

- Учащиеся могут не догадываться, что ультрафиолетовые фотоны могут иметь разную длину волны, поскольку все они выглядят одинаково.
- Если свет настроен на монохроматический, учащиеся могут не догадаться, что им нужно переместить ползунок в ультрафиолетовую область, чтобы возбудить атомы.
- Многие учащиеся с трудом идентифицируют тесто булочки в модели пудинга как положительный заряд. В интервью мы видим, что некоторые учащиеся описывают модель пудинга как облако отрицательного заряда, наполненное маленькими частичками положительного заряда, а не наоборот. Слово "облако" наводит на мысль, что они смешивают модель пудинга с моделью Шредингера, в которой электроны часто описываются как облако с отрицательным зарядом. Эти учащиеся сначала думали, что электрон в моделировании был протоном, но в конечном итоге смогли правильно идентифицировать его, используя условные обозначения или сравнивая его с электронами в других моделях.

¹ A.P. French and E. F. Taylor, *An Introduction to Quantum Physics* (1978), p. 11.