

## Вивчення потоку енергії від Сонця

### Мета

На основі комп'ютерного моделювання дослідити взаємодію фотонів з атомами газу.

### Завдання

Вивчити поглинання та перевипромінювання фотонів окремим атомом, залежність енергії фотона від інтенсивності поглинання в газі, вплив дифузії і його залежність від кількості шарів газу у зірці.

Вияснити як у спостережуваному нами спектрі утворюються лінії поглинання та емісійні лінії. Зрозуміти чому для проходження від центра до поверхні Сонця фотону потрібно досить багато часу.

### Вступ. Поглинання у атмосфері

Програма моделює рух фотонів від центра Сонця до його поверхні і демонструє взаємодію квантів з речовиною. Ця взаємодія відбувається по різному у двох областях:

-- у сонячній атмосфері, - тонкому шарі газу, який утворює зовнішню оболонку Сонця. Він майже прозорий для світла, коефіцієнт поглинання для фотонів континууму незначний ( $\tau_c \approx 0$ ), тому він мало впливає на поведінку більшості фотонів. Але частина фотонів, енергія яких співпадає з енергіями переходів атомів атмосфери, поглинаються та перевипромінюються атомами у випадковому напрямку ( $\Omega = 4\pi$ ). Це і є причиною появи темних ліній поглинання у спектрі;

-- перед тим, як досягти поверхні, фотони, згенеровані у ядрі Сонця, проходять через його об'єм (внутрішню область). Шлях фотонів дуже звивистий, оскільки по дорозі вони багато разів розсіюються частинками (в основному електронами) випадковим чином в межах повного тілесного кута ( $4\pi$ ). Зіткнень та перевипромінювань настільки багато, що для виходу на поверхню фотону потрібно сотні і тисячі років. Для спрощення схеми моделювання, енергія кванта в процесі руху з надр Сонця до поверхні вважається незмінною.

Програма включає кілька моделей поведінки фотонів під час взаємодії з атомами газу. Якщо енергія фотона співпадає з енергією збудження атома газу, фотон легко поглинається та перевипромінюється через деякий час у випадковому напрямку. Якщо ж енергія фотона сильно відрізняється від енергії збудження, фотон проходить через газ практично без взаємодії. Тому після проходження через хмару газу, спектральний склад потоку фотонів дещо відрізняється від початкового.

Модель **Interaction** дозволить Вам познайомитися з тим, як фотони окремої лінії чи континууму взаємодіють з атомами. Інші моделі дозволяють показати, що взаємодія фотонів, які проходять через тонку хмару газу, залежить від енергії фотонів. Фотони, енергія яких співпадає з енергією переходу атома у вищій енергетичний стан, поглинаються атомами з наступним випромінюванням фотона тієї ж частоти у довільному напрямку. Це фотони випромінювання у лінії (**line radiation photons**), вони вивчаються у моделі **Emission**. Інші фотони - це фотони континууму (**continuum photons**). Їх енергія не відповідає дискретним рівням атомів в атмосфері, і вони не можуть бути захопленими, тому фотони континууму вільно проходять через хмару газу за винятком досить нечастих випадкових розсіювань. Такі фотони вивчаються у моделі **Continuum**.

Остання модель, **Experiment**, дозволить Вам експериментувати з різними енергіями фотонів та різними газами. Це дозволить зрозуміти процес утворення ліній та побудувати спектр, подібний до того, який можна спостерігати за допомогою телескопа, обладнаного спектрометром.

В моделі **Flow** використано двовимірний шматок внутрішньої області модельної зірки (гарячий густий газ). Моделювання демонструє, як фотон дифундує назовні з ядра і як кількість шарів, які треба подолати фотону, впливає на час, необхідний йому для виходу із надр зірки.

### **Вправа 1. Interaction. Субмікроскопне вивчення взаємодії атом/фотон**

Щоб почати, виберіть пункт **Interaction** у меню **Simulation**. На екрані зображення атомів газу, рис.15 (див.дискету, файлFigs\Pic15.gif). Ядро атома оточене електронними оболонками; ядра, однак, невидимі, оскільки їх розміри надзвичайно малі порівняно з розмірами атомів. Звичайно, в зображенні масштаб не збережено і атоми – це власне, лише їх символи. Насправді атоми зовсім не такі круглі, оскільки орбіти електронів у складних рівнях, які називаються оболонками, мають лише осьову симетрію, а не сферичну. Масштаб можна змінити, вибравши **Close-Up** або **Large-Scale** з меню **View**.

Виберіть з меню **Photon type** пункт **Line** (або **Continuum**). Таким чином, Ви вибираєте тип фотонів, які пропускаються через хмару газу. Фотони, які приймають участь у утворенні лінії, мають рівно стільки енергії, скільки необхідно для їх резонансного поглинання атомами. Таке поглинання фотонів збільшує енергію атомів, електрони в яких вимушено переходять на вищі енергетичні рівні. Через певний час атоми спонтанно випромінюють такі ж за енергією фотони у довільних напрямках. Фотон, поглинутий атомом, а потім перевипромінений, практично не має шансів зберегти напрямок свого початкового руху. Кажуть, що такі фотони приймають участь у зв'язано -

зв'язаній взаємодії, оскільки електрони залишаються зв'язаними з атомами, навіть у збуджених станах. Фотони континууму мають “неправильну” енергію, вони не можуть легко взаємодіяти з атомами, і тому проходять через газ практично без зіткнень. Випадково і дуже рідко вони взаємодіють з вільними електронами.

Виберіть фотони лінії і натисніть кнопку **run**. Ви маєте змогу побачити як зліва направо по екрану проходить пучок фотонів і взаємодіє з атомами. Натисніть **stop** після того, як пройде 20 фотонів. Скільки фотонів розсіялось? Повторіть експеримент з фотонами континууму. Скільки фотонів розсіялось тепер?

## **Вправа 2. Emission. Утворення ліній**

З меню **Simulation** виберіть пункт **Emission**, рис.16, (див.дискету, файл Figs\Pic16.gif). Кожний запуск показує як фотони проходять крізь хмару газу (пробірку з газом). Фотони приходять зліва від яскравого сонцеподібного об’єкта за межами екрану. Детектор випромінювання знаходиться справа. Ви спостерігаєте Сонце через газову хмару. Якщо фотон пройшов крізь хмару і потрапив у детектор, збільшується відлік **Detected**. Фотон може не потрапити у детектор, тоді зростає відлік **Not detected**. За допомогою кнопки **Reset** ви можете розпочати новий відлік.

Встановіть значення 20 для кількості випущених фотонів. Натисніть **Run** щоб пропустити їх крізь речовину. Який відсоток фотонів дійшов до детектора?

Фотони лінії відповідають за лінії у спектрі (тому і назва). Якщо спостерігати їх на яскравому фоні, наприклад, поверхні зірки, вони призведуть до появи темної лінії, оскільки, як показує модель, більшість з них будуть розсіяні вбік. Це - спектр поглинання (абсорбційний). Але якщо спостерігати газ, що розсіює випромінювання на темному фоні, то зареєструємо яскраві емісійні лінії спектра. Згадайте спектр хромосфери Сонця під час затемнень.

## **Вправа 3. Continuum. Континуум.**

Щоб почати, виберіть **Continuum** з меню **Simulation**. Конфігурація досліду та ж, але тепер фотони будуть фотонами континууму. Рівень енергії кожного з фотонів погано узгоджується з рівнем енергії атомів газу, так що більшість з них проходять через газ без змін. Пошліть 20 фотонів і виясніть, яка частина з них пройшла.

Фотони континууму – це майже весь неперервний спектр за винятком великої кількості ліній поглинання, в масі своїй дуже вузьких. Світло фотосфер зірок спостерігається крізь їх атмосферу, тому неможливо спостерігати чистий континуум.

Майже всі відомі лінії поглинання характеризують холодніші та менш густі області верхньої атмосфери зірки.

#### **Вправа 4. Experiment. Експеримент**

Виберіть **Experiment** в меню **Simulation**. У цій частині роботи ви повинні визначити рівні енергії фотона, необхідні для збудження атомів різних газів. Ви можете нанести на графік кількість фотонів, що пройшла через газ, у залежності від довжини хвилі. Таким чином ви зможете побачити ті значення довжин хвиль де з’являються лінії поглинання. У вправах 2 та 3 ви побачили, що для цього фотони повинні мати цілком відповідну енергію. Якщо на шляху поширення фотони зазнали багато зіткнень, то фотонів буде зареєстровано мало, оскільки більшість з них розсіяна в інші сторони. З іншого боку, фотонів континууму буде зареєстровано багато, оскільки зіткнень відбувається мало, бо лише зіткнення змінюють напрямок руху фотонів.

Для дослідження в моделі закладено кілька хімічних елементів, які спостерігаються в спектрах зірок. Це газоподібні стани кальцію (Ca), водню (H), магнію (Mg), кисню (O), та натрію (Na).

Намалюйте таблицю з трьох стовпчиків. Відповідно впишіть заголовки: “Енергія, eV”, “Довжина хвилі, нм”, “Відсоток фотонів, що пройшли через газ”. Зв’язок між енергією та довжиною хвилі фотона згадайте самостійно. Виберіть газ за допомогою пункту **Select Gas Atoms** меню **Parameters**. Напишіть назву газу як заголовок цієї таблиці. За допомогою розділу **Change Photon Energy** в меню **Parameters** можна змінювати енергію фотонів пучка.

**Заповніть таблицю, пропускаючи через газ фотони різних енергій від 1.5 до 3.2 eV.** Для цього потрібно, зрозуміло, проробити цілу низку експериментів з різними енергіями фотонів. Нанесіть отримані результати на графік. Вісь абсцис позначте *Довжина хвилі* і проставте на ній значення від 350 нм до 900 нм. Вісь ординат – *Відсоток фотонів*. Сполучіть точки графіка прямими лініями. Назвіть графік *Спектр поглинання газу*.

Хоча і грубо, але на графіку видно, що фотони з деякими значеннями енергій проходять через газ погано (у спектрі бачимо заглиблення, кажуть - депресії). Такі фотони добре віддають свою енергію газу і таким чином легко збуджують атоми. Як тільки якийсь фотон передав енергію, збудивши атом, він буде перерозсіяний у напрямку, майже напевне не в тому, куди він йшов.

#### **Вправа 5. Flow. Потік**

Виберіть **Flow** та **1 photon** з меню **Simulation**, рис.17 (див.дискету, файл Figs\Pic17.gif). Фотон вибирається з глибини сонячних чи зоряних надр дуже звивистим

шляхом. У гарячому густому газі, наприклад сонячному існує три механізми, що заважають фотонам на його шляху. Це розсіювання на електронах, зв'язано - вільне поглинання та вільно - вільне поглинання.

Більшість атомів всередині Сонця та інших зірок високоіонізовані, тобто, внаслідок високої температури, вони втратили більшість своїх електронів. Таким чином, існує велика кількість вільних електронів. Розсіювання фотонів на вільних електронах відбувається тоді, коли фотон зустрічається з електроном і збуджує його коливальні ступені вільності. Енергія, яку отримує електрон від фотона у такому процесі, перевипромінюється у деякому новому, цілком випадковому напрямку як новий фотон.

При зв'язано - вільному поглинанні, фотон поглинається атомом. Надлишкова поглинута енергія призводить до іонізації атома і атом втрачає електрон. Цей вільний електрон може рекомбінувати з іншим іонізованим атомом в інший момент часу і, таким чином, з'являється новий фотон у деякому довільному напрямку.

При вільно - вільному поглинанні фотон віддає свою енергію вже вільному електрону і таким чином енергія електрона зростає. Знову ж цей більш енергійний електрон може випромінити свою енергію у формі нового фотона і знову ж у довільному напрямку.

Всі ці процеси грають важливу роль, але розсіювання на вільних електронах найбільш ефективне. В результаті цих процесів у кожний момент часу фотон взаємодіє з речовиною і це приводить до випадкових змін напрямку його руху. Результуючий шлях можна вважати випадковим блуканням (**random walk**). У вправі це показано графічно.

Використайте вправу щоб з'ясувати кількість зіткнень фотона з речовиною, що відбувається на шляху від ядра до поверхні. Щоб побачити цей шлях з випадковими змінами напрямку виберіть пункт **Trails** з меню **Parameters**.

За допомогою меню **# of Layers** виберіть кількість шарів. Запускайте програму з 20, 30, 40, 50, 60, 80 шарів. Кожен варіант повторіть тричі і занесіть результати у таблицю, зразок якої наведено нижче:

Шарів	20	30	40	50	60	80
Спроба 1						
Спроба 2						
Спроба 3						
Середнє						

Нанесіть середні значення на графік. По осі абсцис – кількість шарів, по осі ординат – кількість взаємодій (від 0 до 6500). Сполучіть точки лінією.

**Опишіть та поясніть вигляд лінії, що утворилася. Чи можна говорити, що залежність квадратична?**

## **Вправа 6. Дифузія фотонів.**

Виберіть **Flow** та **Diffusion** з меню **Simulation**, рис.18 (див.дискету, файл Figs\Pic18.gif). Вправа 5 була присв'ячена спостереженню за окремим фотоном. Цей процес має цілком статистичний характер, керується випадком і для отримання результатів його потрібно було повторити кілька разів. Уявимо собі, що замість повторення експерименту багато раз, ми повторимо експеримент один раз, але з великою кількістю фотонів.

У цій вправі це можна зробити. Ви можете випустити одночасно від 1 до 1000 фотонів і спостерігати їх спільний шлях до поверхні зірки. Якщо дочекатися поки вони всі дійдуть до поверхні, то матимемо досить правильну оцінку того, скільки взаємодій відбувається на шляху фотона при виході його з зірки, поділеної на  $n$  шарів. Такий експеримент, звичайно, займе менше часу, ніж повторення експерименту з одним фотоном  $n$  разів.

Вам треба повторити один з експериментів вправи 5 і побачити наскільки добре узгоджуються результати: наприклад 10 фотонів та 50 шарів.

Ця вправа не тільки скорочена форма експерименту. Вона також дозволяє вивчити явище, що називається **дифузією**. Це процес просочування фотонів через матеріал, подібний до сонячного, що розсіює фотони. Зверніть увагу, що всі фотони розпочинають свій шлях одночасно у короткому миттєвому імпульсі. Але розсіяння процес випадковий, тому деякі фотони приходять до поверхні швидше, а деякі пізніше. Графік у нижньому правому куті екрана показує як багато фотонів приходить до поверхні у відповідний момент часу після початкового імпульсу.

Ви бачите не одночасний потужний викид фотонів, а деякий розтягнутий у часі процес. Крім того, енергія не генерується у центрі зірки імпульсом, це теж неперервний процес.

**Проаналізуйте процес, вивільнивши в центрі 25-шарової зірки 100 фотонів, а у іншому експерименті 5 шарів та 1000 фотонів. Чи мають графіки однакову форму? Чи відрізняються вони суттєво?**

## **Вправа 7.**

Для того, щоб фотон покинув Сонце, йому треба кількості тисяч років. Оцініть час виходу фотона за умови, що зіткнень нема. Поясніть таку суттєву різницю отриманих значень.

## **Вправа 8.**

Ви вже знаєте, що фотони лінії можуть утворювати як лінії поглинання в одних спектрах, так і лінії випромінювання в інших. Поясніть, чому такі однакові фотони призводять до появи таких різних за виглядом спектрів.