Модуль 1

Основи Синтезу

Автор: Sander Korteweg

Метою цього модуля є вступ до термоядерного синтезу з наголосом на «чому» та «як». Чому термоядерний синтез – це цікаво не лише для вчених, а для кожного? Як працює термоядерний синтез, як з точки зору фізичних принципів, так і з точки зору виробництва енергії?

Ці питання автоматично ведуть до кінцевого питання. За чім зупинка? Чому так складно видобути енергію з синтезу?

Після опанування цього модуля Вам стануть відомі основи термоядерного синтезу, ВИ зможете порівняти синтез як потенціальне джерело енергії з іншими джерелами. Ви зможете обговорювати потенціал синтезу, а також розуміти, чому шлях до термоядерної енергії є таким вибагливим.

Якщо Ви хочете взнати ще більше про синтез після опанування цього модуля, Ви можете опрацювати інші модулі, які заглиблюються в специфічні аспекти синтезу.

1.1 Енергія та її роль у нашому світі

Джерела енергії

Перше питання, яке є важливим для синтезу, можна сформулювати просто так: “Чому синтез узагалі є цікавим?” Аби відповісти на це питання, нам слід спочатку розглянути не власне синтез, а енергію в цілому. З моменту винаходу парового двигуна, концепція енергії стає все більше важливою. Енергія потрібна, аби нагріти наші будинки холодною зимою та охолодити їх спкктним літом. Енергія рухає машини, автомобілі та пристрої: на транспорті та в інших електричних приладах, – сучасний світ неможливо уявити без енергії.

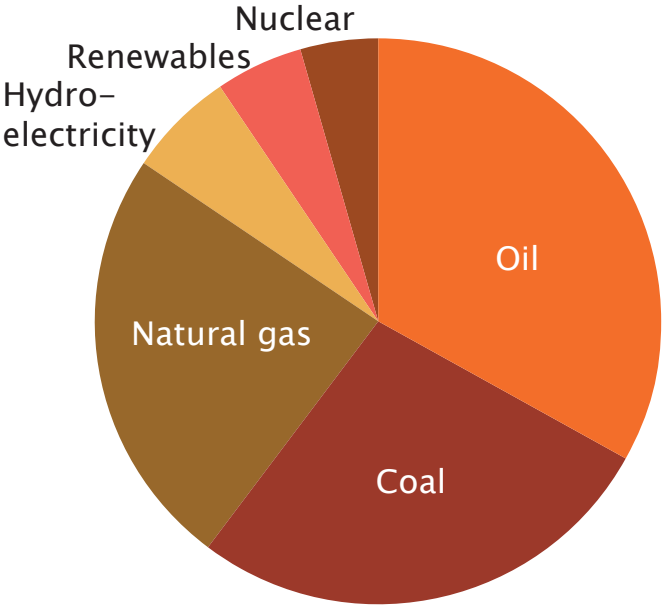


Рисунок 1. Діаграма споживання енергії в світі у 2019. Поки що найбільшу частку займає нафта, за нею йдуть вугілля та природний газ. Гідроенергія, відновлювальні джерела та ядерна енергетика йдуть слідом з рівними інтервалами. Джерело: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

Всю цю енергію, яку людство споживає, слід виробити у якийсь спосіб. Протягом промислової революції людство винайшло та розвинуло багато розумних способів виробництва енергії: так званих джерел енергії. Ці численні джерела енергії можна систематизувати в дві основні категорії: **невідновлювальна енергія** та **відновлювальна енергія**. Подальше заглиблення в предмет може призвести до

подальшої систематизації на **підтримувану енергію** та **непідтримувану енергію**.
Терміни відновлювальна та підтримувана часто плутають. Однак, відновлювальна не є те саме, що підтримувана. Відновлювальна означає, що вона знову поповнюється з часом, тоді як підтримувана означає, що її можна "підтримувати" тривалий час (без шкідливих наслідків для майбутнього).
Вирубка дерев з наступною посадкою є відновлювальними, але не завжди підтримуваними: посаджені паростки виростуть у нові дерева після достатнього часу, нові дерева виростуть на заміну старим, і процес почнеться наново. Але якщо вирубати дерева швидше, ніж садити нові, процес стає непідтримуваним: може не лишитись жодного дерева. З іншого боку, процеси можуть бути невідновлювальними, але підтримуваними: ядерний поділ (зазначте: поділ – це не те саме, що синтез) є невідновлювальним (поклади урану не поповнюються природним шляхом), але його достатньо для того, щоби підтримувати численні реактори досить тривалий час (але не вічно) і, за умови відповідального керування ядерними відходами, без шкідливих наслідків для майбутнього. Отже, поділ виглядає невідновлювальним, але може бути підтримуваним.

А як там із зеленою або чистою енергією?

Терміни зелена енергія або чиста енергія часто зустрічаються у повсякденному житті. Зелена та чиста є назвами, які підкреслюють вплив джерела енергії на навколишнє середовище: вони показують, що джерело не чинить шкідливих (вуглецевих/парникових) викидів (в процесі виробництва). То є спірним питанням, що означає дійсно чисте джерело енергії, оскільки виробництво чистої енергії може так само спричиняти викиди під час його будівництва чи перевезення. Підтримувана енергія зазвичай передбачає, що її можна " підтримувати" тривалий проміжок часу без (відомих) шкідливих наслідків для майбутнього. Оскільки це визначено більш зрозуміло, ніж зелена або чиста енергія, тут сконцентровано увагу саме на підтримуваній енергії.

Класна вправа 1.1
(а) Оцініть, який відсоток енергії у Вашій країні виробляється відновлювальними джерелами енергії, такими як сонячними, вітровими, гідро, тощо. Поясніть, які Ви проводили оцінки. Чи робили ВИ якісь припущення?
(б) Порівняйте Вашу оцінку з оцінкою щонайменше ще одного учня. Чи сильно відрізняються оцінки? Порівняйте міркування, що передували оцінкам: чи не зробили Ви різні припущення?
(в) Розгляньте джерела виробництва енергії у Вашій країні. Порівняйте Ваші оцінки з довідковою інформацією. Чи є близькими Ваші оцінки?

Див. також вправи: **А.1, А.2, А.3**.

Енергетична проблема

Тепер ми розібралися з наявними джерелами енергії та обсягами, споживаними сучасним суспільством, але не наблизилися до розуміння, до чого тут синтез. Аби це зрозуміти, слід розглянути **енергетичну проблему**, що може бути пов'язаним із наступними міркуваннями.

Населення в світі зростає. Воно зросло від 6 більйонів у 1999 р. до 7.8 більйонів у 2020 р., а також очікується, що зросте до 8.5 більйонів у 2030 р., 9.7 більйонів у 2050 р. і 10.9 більйонів у 2100 р., див. також Рис. 2. **Середнє споживання на одну людину**

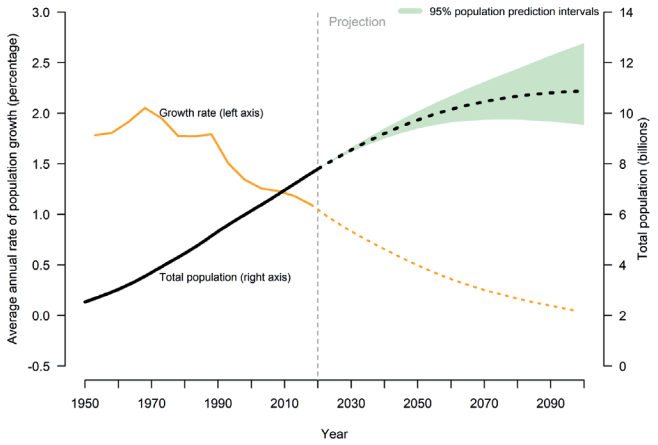


Рисунок 2. Темпи зростання світового населення знизились, починаючи з 1970-х років. Це видно з поведінки помаранчевої кривої. Внаслідок цього загальне населення—показано чорним—рівномірно наближається до сталого значення в близько 11 більйонів людей. Зелена частина показує похибку в застосованій моделі. Джерело: United Nations, Department of Economic and Social Af¬fairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

зростає. Країни розвиваються, що супроводжується підвищенням стандартів життя. Вищі стандарти життя, як правило, означають зростання споживання енергії, наприклад, завдяки розвитку основних послуг, інфраструктури або розширенню доступу до/електрики та інтернету. Як оголошено ООН,

кожна людина має право на стандарти життя, які відповідають її здоров'ю та статкам. Забезпечення кожному доступ до відповідних стандартів життя є пріоритетом, вищим за зниження середнього споживання енергії однією людину, і було б неетично відмовити людям у їх праві на кращі стандарти життя.

Більшість енергії досі виробляється джерелами, які є шкідливими для оточуючого середовища, зокрема, внаслідок **викидів парникових газів**. Викопне пальне переважає в нашому споживанні енергії. І хоча відновлювальні та чисті джерела швидко розвиваються, вони розвиваються не настільки швидко, аби позбавити нас залежності від викопного пального перед тим, як розпочнуться необоротні зміни клімату. До того ж, наші поклади викопного пального вичерпуються. Навіть якби зміни клімату не підганяли людство, викопне пальне не є підтримуваним рішенням для майбутнього.

Поєднання цих трьох факторів і є енергетичною проблемою, з якою стикається людство.

Вирішення енергетичної проблеми

Як і у випадку будь-якої проблеми, мають бути якість рішення. Для енергетичної проблеми можна вигадати багато можливих рішень. Але більшість цих рішень супроводжуються серйозними змінами способу життя та середніми стандартами життя: двома речами, якими людство не хоче жертвувати. З точки зору логіки, існують такі два шляхи вирішення енергетичної проблеми.

Істотно **знизити (середнє) споживання енергії**. Це можна зробити, лише якщо процеси стануть набагато ефективнішими, настільки, що індивідуальне споживання енергії суттєво зменшиться. На жаль, це часто є неможливим. Отже, тут немає переможців!

Істотно **підвищити підтримуване виробництво енергії**. Якби можна було припинити негайно споживання викопного пального, можна було б суттєво скоротити викиди парникових газів! Однак, це легше сказати, ніж зробити. Починають грати політичні та економічні

аспекти: видобуток викопних копалин є потужною промисловістю, і вона не може просто зникнути миттєво. Просто подумайте про автомобілі або літаки: неможливо миттєво відмовитись від усіх неелектричних двигунів. Очевидно, це є величезною суспільною проблемою, яка впливає на все життя нашої планети.
Розглядаючи шляхи підвищення обсягів енергії, яку виробляють підтримувано, необхідно подякувати сонячній і вітровій енергетиці. Одна проблема з цим – втни не можуть працювати безперервно. Але ж і наше суспільство не споживає енергію безперервно! З іншого боку, викопне пальне є особливо корисним, оскільки воно може генерувати багато енергії безперервно: воно може нести **основне навантаження**, навіть коли Сонце н світить і вітер не дме.

Можна визначити дві основні підходи до вирішення проблеми: **(1) Покращити зберігання енергії**: наприклад, кращі та більші батареї! **(2) Знайти альтернативний шлях для забезпечення цього основного навантаження**. Найкращий відомий спосіб: запустити термояд!

На жаль, батареї й досі є неефективними. І доки не трапиться новий радікальний науковий прорив, ніхто не очікує від батарей, що вони стануть кращими настільки, що зможуть вирішити проблему. Те саме стосується й інших сховищ енергії. Альтернатива забезпечити основне навантаження так само не є ідеальною: ядерний поділ супроводжується виробництвом ядерних відходів. І попри те, що сучасні реактори є надзвичайно безпечними, аварії типу Чорнобильської або Фукусіми у сукупності зі страхітливою концепцією небезпечної радіації призвели до загальної відрази або навіть побоювання ядерних реакторів.

Синтез як вирішення проблеми

Тут вступає в дію **ядерний синтез** як можливе рішення в майбутньому. Якби отримати енергію від ядерного синтезу тут, на Землі, це було б підтримуване, природно безпечне рішення, яке б прийняло на себе основне навантаження з (у подальшому)

нульовим викидом парникових газів. Якби в нас була термоядерна енергія, вона була б ідеальним замінником викопним копалинам. Але енергію від синтезу досі не отримали. Оскільки вона буда б ідеальним кандидатом з високим потенціалом, учені всього світу напружено працюють над розв'язанням цього великого виклику.

Отже, за чим затримка? Вчені мають досягти та зафіксувати синтез, вірно ж? На жаль, легко сказати, але важко здійснити. Досягти синтез не так то й важко, а от видобути з нього корисну енергію і досі є невирішеною проблемою. Щодня ми можемо спостерігати енергію синтезу просто дивлячись угору: наше Сонце є потужним джерелом термоядерної енергії, від якого залежить все життя на Землі. Метою вчених усього світу є створення маленької керованої зірки тут, на Землі, та вони все ближче наближаються до цієї мети. На жаль, синтез не вирішить проблеми в найближчому майбутньому, оскільки потрібен час для реалізації термоядерної енергетики. Однак, він може бути відповіддю на всі енергетичні виклики протягом наступних століть. Висновок: не існує «золотого» варіанту розв'язку енергетичної проблеми. Спливає час для відвернення незворотних змін клімату, та багато людей згодні з тим, що щось слід змінити. Набір споживаної людством енергії слід змінити докорінно. Синтез не вирішить наші проблеми протягом найближчих 50 років, але він міг би дати відповіді на всі енергетичні виклики всіх прийдешніх поколінь. Тому він виглядає як гідна мета багатьма людьми, які працюють над найшвидшим досягненням керованого синтезу. Відновлювальні джерела не є конкурентами синтезу, ці два джерела доповнюють один одного: їхня комбінація була б найкращим можливим сценарієм у майбутньому.
Але пам'ятайте: якби керований синтез був простою задачею, його б уже давно досягли. Однак, ця задача сьогодні є набагато важливішою, ніж будь-коли.

1.2

Синтез всередині нашого Сонця

Тепер, коли ми розібрались із «чому», настав час для “як”. По-перше, розглянемо один термоядерний реактор, який працює безперервно від того часу, як людство ще не знало навіть про синтез: Сонце.

Сонце

Сонце є масивним набором частинок, які утримуються разом **гравітацією**. Це просто: завдяки гравітації будь-яке тіло, що має масу, притягує інше тіло, яке маю масу. Величина цього притягування (наскільки сильно тіла “притягують” одне одного) залежить від того, наскільки великими є маси. На Землі, сама планета є дуже масивною, і тому притягує все до свого центру. Це спричиняє гравітацію, яку ми відчуваємо, яка тримає наші стопи на поверхні землі та змушують тіла падати на цю поверхню.

Сонце є набагато масивнішим: понад 333,000 разів важчим за Землю. Так само, як **тиск** зростає на Землі при наближенні до центру планети, так само тиск

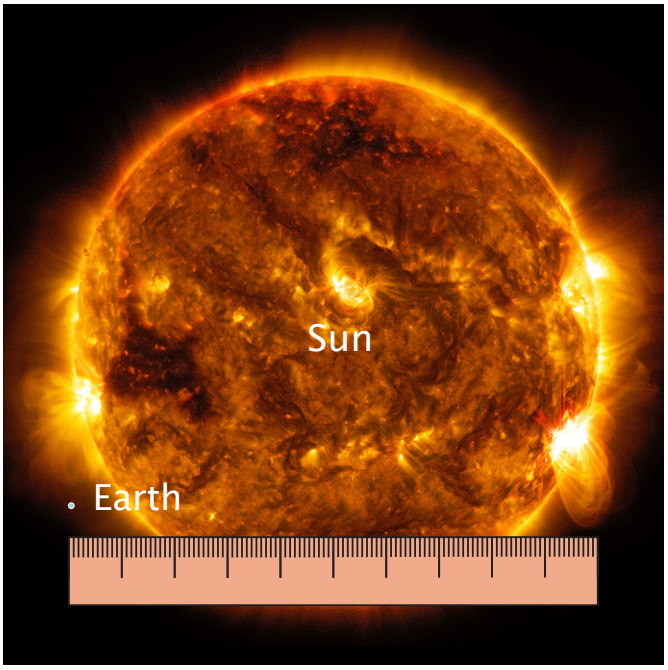


Рисунок 3. Порівняно з Сонцем Земля є неймовірно малою. Бліда блакитна точка, як сказав Карл Саган. Її радіус у сотні разів менший за радіус Сонця, отже, її об’єм в мільйони разів менший. Джерело: NASA/Solar Dynamics Observatory.

на Сонці зростає при наближенні до його центру. Такий самий принцип спричиняє високий тиск при зануренні в океані: вся маса згори тисне на вниз через гравітацію. Що більше маси над точкою, то вищий там тиск. На Землі цей тиск є настільки великим, що в земній корі утворюються алмази. В центрі Землі цей тиск є таким надзвичайно високим, що окремі частинки можуть об'єднуватися в одну: відбувається синтез.

Всередині атома

Let us look deeper into what these "particles" are exactly Розглянемо в деталях, що таке "частинки" та що означає, що вони "синтезуються" докупи.

Всі фізичні об'єкти з чогось побудовані. Якби можна було необмежено збільшити предмет, то можна було б побачити, що (майже) всі предмети побудовані зі складних молекулярних структур, які побудовані з окремих молекул, які побудовані з атомів. Кожен із цих атомів має схожу структуру: **ядро** ("серцевина") та "хмара" **електронів**, які обертаються навколо цього ядра. Ядро, в свою чергу, складається з двох типів частинок: **протони** і **нейтрони**.

Число протонів у ядрі визначає тип атома або хімічного елемента, а саме: якщо ядро має лише один протон, його називають **водень**, якщо ядро має два протони, його називають гелій. Відкрито та систематизовано багато різних елементів, їх можна побачити в періодичній системі Менделєєва на наступній сторінці. Число нейтронів всередині ядра може відрізнятися, внаслідок чого існують різні варіанти одного елемента. Наприклад, ядро, яке складається лише з одного протона без жодного нейтрона, називають водень. Але якщо в ядрі є протон і нейтрон, його називають **дейтерій**, це – інший **ізотоп** водню. У випадку атомів водню, існують три можливі ізотопи: "звичайний" водень, дейтерій і **тритій** (у ньому один протон і два нейтрони).

Тоді ж у чому різниця між протоном і нейтроном? Протон є додатно зарядженою частинкою, тоді як нейтрон є нейтральною частинкою. Існують

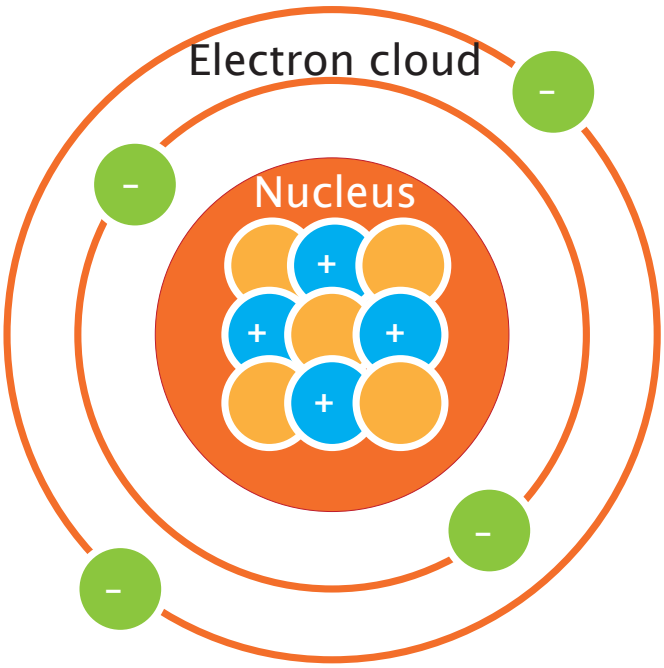


Рисунок 4. Схематичне уявлення про атом. В центрі лежить ядро, побудоване з (додатно заряджених) протонів і (нейтральних) нейтронів. Ядро оточене хмарою (негативно заряджених) електронів.

електричні заряди двох типів: додатні та негативні. Додатні заряди відштовхують інші додатні заряди та притягують негативні заряди. Аналогічно негативні заряди відштовхують інші негативні заряди та додатні заряди. Цей процес можна спостерігати, коли Ваше волосся стає дибки, якщо Ви заряджаєте себе: коли волосся на Вашій голові заряджено однойменно (наприклад, унаслідок того, що Ви торкнулись чогось зарядженого), тоді воно буде відштовхувати одне одного. В результаті все волосся намагатиметься бути якомога далі одне від одного, внаслідок чого волосся стане дибки!

Чи це означає, що атоми є зарядженими? У той час, як ядро є завжди позитивно зарядженим (оскільки воно складається винятково з протонів і нейтронів), воно є оточеним електронами, які «літають» навколо ядра. Електрони є негативно зарядженими частинками з тим самим зарядом, що й один протон, тільки негативним. Атоми завжди є нейтральними, отже в атомі має бути однакове число негативно та додатно заряджених часинок. Отже, в будь-якому атомі завжди однакове число протонів і електронів. Але це не означає, що існують лише частинки з однаковим числом протонів і електронів: якщо атом втрачає один (або більше) електрон(ів) і стає додатно зарядженим, він стає додатним **іоном**. Електрон, який більше не є частиною

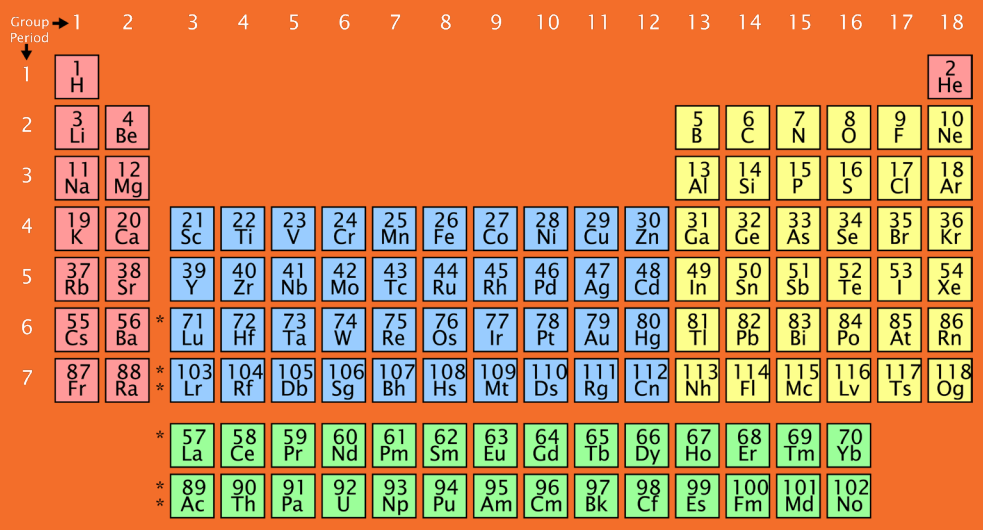


Рисунок 5. Періодична система елементів. Джерело: Wiki- media user Double Sharp (CC BY-SA 4.0)

Позначення атомів

Тепер, коли ми знаємо, що таке атоми та ізотопи, коротко розглянемо позначення, які використовують для них. Оскільки число протонів у атомі визначає тип атома або елемент, яким він є, це є першим покажчиком. Для водню (H) це число є 1, для вуглецю (C) це 6. Усі атоми водню мають атомний номер 1, усі атоми вуглецю мають атомний номер 6, незалежно від того, який це ізотоп.

Це дає можливість використовувати стандартне позначення для атомних ізотопів з зазначенням масового номера (вгорі перед літерою) та атомного номера (внизу після літери, яка відповідає типу атома. Оскільки літера містить ту саму інформацію, що і атомний номер, можна обійтись і без зазначення атомного номера. В цих розділах будуть використані позначення літерою з зазначенням як масового, так і атомного номера.

атома, називають вільним електроном. Існує велике число йонів, як додатно, так і негативно заряджених.

Ядерні реакції

Повернемося до процесу синтезу. Тепер, коли ми знаємо, що таке ядра, розглянемо, що відбувається, коли зливаються два ядра. На Сонці тиск є настільки високим, що його достатньо для того, аби стиснути два ядра докупи, навіть попри те, що вони відштовхують одне одного через свій додатний заряд, та утворити одне більше ядро. Це називають **реакцією ядерного синтезу** або коротше – реакцією синтезу. Реакції синтезу в зірках можуть спричиняти утворення важчих елементів, які самі потім можуть зливатися, якщо тиск є достатньо високим. В такий спосіб можуть утворюватися важчі елементи та в зірках вивільняється енергія внаслідок ланцюга реакцій синтезу.

Розглянемо найцікавішу реакцію синтезу, яку найпростіше здійснити: це реакція синтезу дейтерій – тритій або, інакше, **D-T синтез**.

$$ {}^{2}_{1}H^{+} + {}^{3}_{1}H^{+} \rightarrow {}^{4}_{2}He^{2+} + n + 17.6\ MeV $$

У цій реакції два ізотопи водню, дейтерій (один протон плюс один нейтрон) і тритій (один протон і два нейтрони) зливаються з утворенням ядра гелію, вільного нейтрона та неймовірної кількості енергії: 17.6 МеВ. Тут МеВ означає **мега електронвольт**. Один електронвольт (еВ) – це одиниця вимірювання енергії, подібно до **Джоуля** (Дж) або тонни нафтового еквівалента (тне), яку часто використовують в описі ядерних і атомних процесів.

Один електронвольт є дуже малою величиною: 1 еВ = 1.602×10^{-19} Дж. Тому 17.6 МеВ може видатися не такою й великою величиною (10^{-19} = 0.0000000000000000001, тому 17.6 МеВ=2.82×10^{-12} Дж або 0.00000000000282 Дж). Але ж для всього двох ядер це неймовірно велика кількість енергії. Оскільки ядра є дуже малими, і їх

Класна вправа 1.2
Поняття густини енергії є важливим у фізиці. І хоча на перший погляд воно виглядає складним, насправді воно стискається до такого: “скільки енергії міститься в одиничному об’ємі речовини”. Якщо спалити 1 літр бензину та виміряти кількість енергії, яка вивільнилось (у формі тепла), а потім поділити на об’єм, який спалено, то отримуємо величину густини енергії. Густину енергії можна виміряти для будь-якого пального.

(а) Вгадайте, яке пальне з наведеного нижче списку має найвищу густину енергії? Вгадайте, яке пальне має найнижчу густину енергії? Вишикуйте їх за порядком від найвищого до найнижчого.
(б) Порівняйте ваш рейтинговий список зі списком щонайменше ще одного учня. Обговоріть, чому Ви розташували пальне в такому порядку.
(в) Знайдіть таблицю густини енергії пального. Порівняйте Ваш рейтинговий список з довідковою інформацією. Чи співпали Ваші списки?

Бензин - нафта - вугілля - деревина - водень (газ) - етанол - дейтерій - уран

Див. також вправи: **А.4, А.5, А.6, А.7, А.8**.

дуже багато в малій кількості ядерного «палива», **густина енергії** (кількість енергії в одиниці об’єму) є надзвичайно великою. Коли спалити один літр бензину та порівняти здобуту енергію з тією, що виробляється при синтезі одного літра пального, яке складається з дейтерію та тритію, виявиться, що реакція синтезу дає набагато більше енергії (приблизно в 10 мільйонів разів більше!!).

Це є справедливим для всіх ядерних реакцій, як для поділу, так і для синтезу. Це робить ядерні реакції такими надзвичайно корисними для виробництва енергії. Щоправда, на жаль, це ж таки робить їх дуже привабливими для зловісних цілей, як це було продемонстровано створення атомної бомби під час Другої світової війни (пристрій поділу) та створенням водневої бомби в п’ятдесятих роках двадцятого сторіччя (вона базувалася на комбінації реакцій поділу та синтезу).

Назад на Землю

Тепер можна зрозуміти, чому Сонце може існувати. Гравітація тисне всередину. Енергія, що вивільняється в реакціях синтезу в ядрі Сонця, нагріває ядро та спричиняє його розширення та тиск назовні. Баланс між цими тисками всередину та назовні забезпечує, що Сонце не колапсує через гравітацію та не вибухає через вивільнення енергії внаслідок реакцій синтезу.

Електронвольт

Електронвольт звучить як чудернацький тип одиниць вимірювання, одна він є дуже корисним для атомних процесів. Оскільки атомні процеси відбуваються на дуже малих масштабах, їм притаманні дуже малі кількості енергії. Тобто, малі одиниці вимірювання є набагато зручнішими для використання в атомних процесах (записувати все в Джоулях є просто громіздким). Вибираючи маленькі одиниці вимірювання краще вибрати щось, що легко та точно вимірюється, і в той самий час стосується процесів, до яких цю одиницю застосовуватимуть.

Оскільки енергія атомних частинок передовсім стосується їхнього руху, природно обрати енергію, яку набуває частинка, коли її прискорюють. Найлегше прискорювати заряджені частинки (приклавши різницю потенціалів). І електрони відіграють надзвичайно важливу роль в атомних процесах. Отже, 1 електронвольт (еВ) визначають як енергію, яку набирає електрон, який прискорено різницею потенціалів у 1 Вольт (В) (починаючи з нерухомого стану у вакуумі). Іншими словами, один електрон з зарядом е, прискорений різницею потенціалів у 1 В, набуває енергію в 1 еВ.

Для майбутнього, якщо використовувати батарейку АА (яка забезпечує близько 1.5 В) для прискорення одного електрона (у вакуумі, починаючи з нерухомого стану), то цей електрон набуде енергію: заряд x напруга = 1 e x 1.5 V =1.5 eV.

З того часу, як людство зрозуміло, як працюють зірки, воно намагається повторити цей процес на Землі для виробництва енергії. Але проблема полягає в тому, що вся Земля є надто малою для того, аби синтез було здійснено на Землі в той самий спосіб, як на Сонці. Слід знайти заміну надзвичайно потужній гравітації. На щастя, людство винайшло кілька способів здійснити синтез на Землі. Найбільш розвинутим є створення так званої "**плазми**" та застосування дуже потужних магнітів для керування нею. Аби зрозуміти найкращий спосіб для здійснення синтезу на Землі, передовсім, розберемося, які умови потрібні, аби відбувся синтез.

Критерії синтезу

Надзвичайний тиск на Сонці забезпечує умови для реакцій синтезу. Цей тиск є наслідком двох причин: **температури** та **густини**. Обидві є важливими для синтезу. Для пояснення цього розглянемо гіпотетичну ситуацію з усього двома частинками, які рухаються в коробці.

Нехай обидві частинки будуть зарядженим додатно. Через це вони відштовхують одна одну. Це відштовхування залежить від відстані між частинками: якщо вони розташовані близько одна до одної, відштовхування є надзвичайно сильним, але якщо між ними є певна відстань, то відштовхування швидко стає достатньо слабким. Частинки природно тримаються подалі одна від одної якомога далі. Але оскільки вони в коробці, то вони зупиняться біля протилежних стінок коробки. Якщо достатньо наблизити частинки одну до одної, вони зможуть злитися. Припустимо, що частинки автоматично зливаються в нову більшу частинку, щойно вони торкнуться одна одної. Аби це сталося, їх слід якось наблизити одну до одної: для цього треба якось подолати силу їхнього відштовхування. Оскільки відштовхування стає тим сильнішим, що ближче частинки одна до одної, це не так і просто. Існують два основні підходи до того, аби примусити частинки доторкнутися одна до одної та злитися:

(1) Все сильніше притискати частинки все ближче та

ближче одну до одної, допоки вони не доторкнуться та зіллються. (2) Надати частинкам настільки велику швидкість, що вони зможуть зіткнутися та злитися.

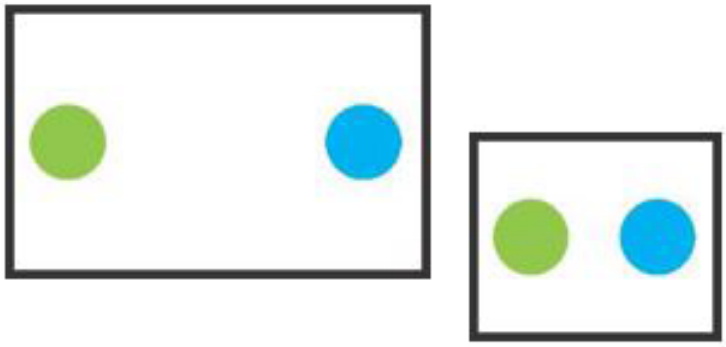


Рисунок 6. Дві однаково заряджені частинки всередині коробки. Частинки відштовхуються одна від одної та рухаються до протилежних сторін коробки. Якщо зменшувати розміри коробки, частинки наближаються одна до одної, допоки коробка не стане достатньо малою, щоби частинки доторкнулися.

У першому підході (1), припустимо, що частинки є взагалі нерухомими. Частинки можна притискати одну до одної, зменшуючи розміри коробки. Частинки лежатимуть біля протилежних стінок коробки, але наближатимуться одна до одної. Це також означає, що частинки відштовхуватимуться все сильніше, внаслідок чого сильніше тиснутимуть на стінки. Тому слід тиснути на стінки все сильніше та сильніше, змушуючи частинки

продовжувати повільно рухатись назустріч одна одній. Щойно коробка стане настільки малою, що ці дві частинки доторкнуться одна до одної, можна вважати тиск, що ми докладаємо до стін, а відповідно і тиск, який відчувають частинки з боку коробки, є достатньо високим. Отже, якщо можна досягти такого високого тиску, то це означає, що можна створити умови для злиття частинок. Однак, оскільки частинки є надзвичайно малими, то стискання коробки до

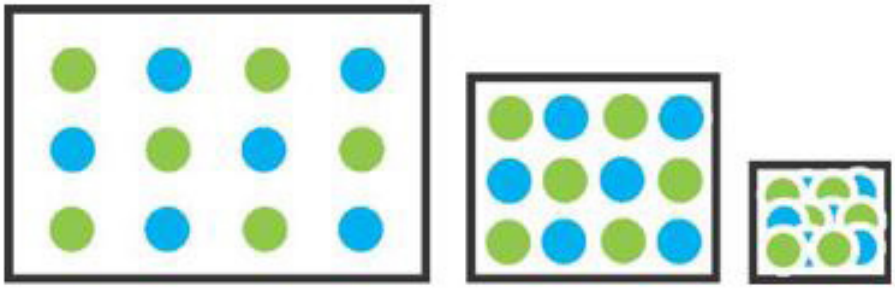


Рисунок 7. Коробку заповнено багатьма однаково зарядженими частинками. Частинки відштовхуються одна від одної та розподіляються на рівних відстанях одна від одної. Якщо достатньо зменшити коробку, частинки почнуть торкатися одна одної. При цьому об’єм коробки зменшується, а число частинок лишається незмінним. Отже концентрація зростає!

розмірів частинок є неможливим у реальному житті. На щастя, саме цей принцип можна використати шляхом повного заповнення коробки частинками. Оскільки всі частинки відштовхуються, вони підтримуватимуть рівну відстань між собою автоматично. Припустимо, що всі частинки розподілені по коробці однорідно: відстань між сусідніми частинками є однаковою в усьому об'ємі та не рухаються, допоки не зіштовхнуться. Якщо тепер прикласти тиск до стінок і зменшити коробку, то зовнішні частинки (ті, що ближче до стін) наблизяться до своїх сусідів і стануть сильніше тиснути на них. Ті частинки стануть у свою чергу тиснути на своїх сусідів, тому всі частинки тиснутимуть на сусідів сильніше. І оскільки коробка стане тепер меншою, відстань між частинками зменшуватиметься. Якщо збільшувати тиск, усі частинки наближатимуться одна до одної. Так можна настільки збільшити тиск, що вже не буде вільного місця між частинками: вони почнуть зливатися! При цьому високий тиск є прямим наслідком високої концентрації в коробці: що більше частинок у коробці заданого об'єму, то менше відстань між частинками.

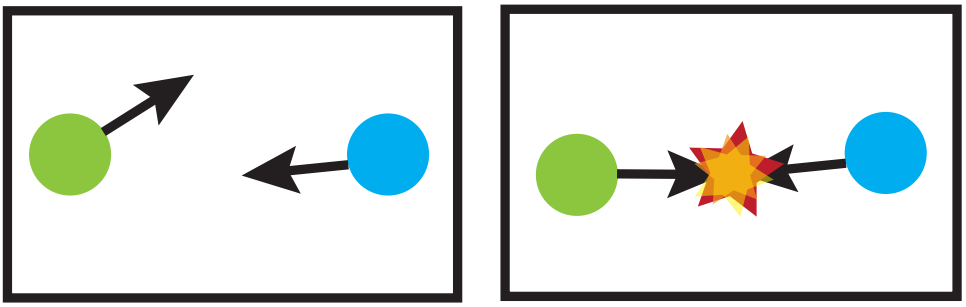


Рисунок 8. Дві однойменно заряджені частинки на високій швидкості всередині коробки. Коли взаємна швидкість є достатньо високою, частинки можуть здолати відштовхування та зіштовхнутися, тобто, вони торкаються одна одної.

У другому підході (2), двом часинкам надають високу **швидкість** і залишають їх рухатись у порожній коробці: тобто, частинкам надають **кінетичну енергію**. Частинки битимуться в стінки та безладно рухатимуться по коробці. Якщо частинки наблизяться одна до одної, відштовхування між частинками не даватиме їм зіштовхнутися. Якщо швидкість частинок стане достатньо високою, то відштовхування не вистачатиме, аби утримати частинки від торкання, і вони можуть зіштовхнутися: частинки торкнуться одна одної та зіллються. В цьому сценарії зіткнення можна розглядати як частинний

випадок дуже короткотермінового високого тиску: частинки рухаються дуже швидко, та щойно вони зіштовхуються, вони дуже сильно тиснуть на іншу частинку в момент торкання.

У другому підході важливо розуміти зв'язок між кінетичною енергією та температурою. Температуру

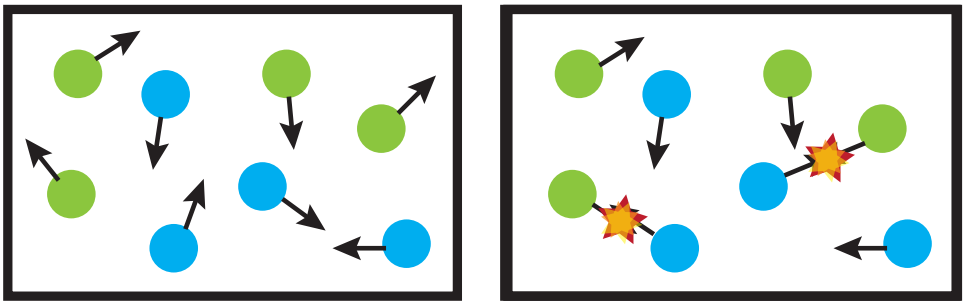


Рисунок 9. Коробку заповнено великим числом однойменно заряджених частинок з великими швидкостями. Якщо відносна швидкість є достатньо великою, частинки можуть здолати відштовхування та зіткнутися. Що більше частинок, то більша ймовірність їхнього зіткнення.

визначають як **міру середньої кінетичної енергії поступального руху набору частинок**. Отже, якщо наявно багато частинок, які рухаються навколо та стикаються на великих швидкостях, то середня швидкість буде великою, і тоді можна визначити температуру для набору частинок, яка так само буде високою. Коротше кажучи, якщо частинки мають велику середню швидкість, температура набору частинок так само є високою.

Отже, в нашому гіпотетичному випадку з двома частинками, сценарій **(1)** стосується дуже високої концентрації та сценарій **(2)** – дуже великих швидкостей, або (що те саме) дуже високої температури (набору) частинок.

Тобто, як надзвичайно велика концентрація за низької температури, так і надзвичайно висока температура за низької концентрації з теоретичної точки зору можуть створити умови для реакції синтезу. Однак досягнення таких надзвичайних умов є неможливим з практичної точки зору. **Для досягнення умов синтезу найкращим є поєднання високої концентрації та високої температури**.

Що більша концентрація, то меншою може бути температура для реалізації синтезу, і навпаки. Це

спостерігають і на Сонці, де концентрація в центре є надзвичайно високою та температура там ненульова. Отже, саме поєднання обох цих факторів: високої концентрації та високої температури спричиняє реакції синтезу в Сонці.

Нарешті, слід згадати ще один фактор: **час**!
Якщо поєднання високої концентрації та високої температури підтримувати достатньо довго, відбувається багато актів термоядерного синтезу. Якщо підтримувати температуру високою протягом короткого проміжку часу, то частинки уповільнюються та реакції синтезу більше не можуть відбуватися. Аналогічно, якщо концентрацію підтримувати високою лише протягом короткого проміжку часу, то якісь реакції синтезу спочатку відбудуться. Але щойно концентрація знизиться, число реакцій синтезу швидко спадає, оскільки зменшується ймовірність зіткнень. Отже, якщо підтримувати **високий тиск** (тобто, достатньо великий добуток концентрації та температури) **протягом довшого проміжку часу**, то можна отримати більше термоядерної енергії.

У кожній такій реакції синтезу вивільняється багато енергії. Однак, ця енергія вивільняється не у формі світла або чогось помітного: енергія вивільняється у формі кінетичної енергії частинок, які утворюються в реакціях синтезу. Це означає, що внаслідок реакції синтезу утворюються ще швидші частинки, що дає можливість підняти температуру та може дати можливість підтримувати реакції надалі.

Синтез на Землі

Оскільки не можна використати гравітацію для створення таких високих тисків, які властиві умовам Сонця, слід віднайти інший спосіб здобути такі високі тиски. Нам слід створити або дуже високі тиски, або дуже високі температури, або їх комбінацію, аби забезпечити достатньо високий тиск в термоядерних пристроях на Землі.

1.3 Плазма

Як уже згадували раніше, найчастіше синтез на Землі створюють із використанням плазми. У цьому розділі обговорюється, що таке плазма та як її використовують для синтезу.

Нагрівання палива

Як показано вище, **температура є мірою енергії**: вона є мірою середньої швидкості, з якою частинки рухаються, або коливаються. **Що вища температура, то швидше рухаються або коливаються частинки. Це стосується всієї матерії в усіх агрегатних станах**: твердому, рідкому та газоподібному. **Якщо нагрівати твердий предмет, наприклад, шматочок металу, атоми починають коливатися з більшою амплітудою. У твердому тілі це не спричиняє значної зміни**

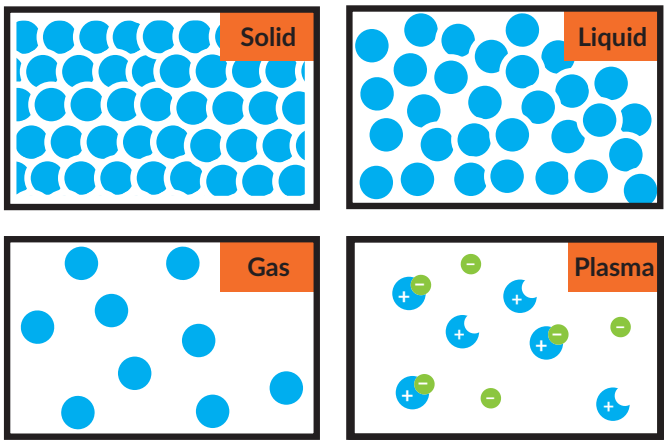


Рисунок 10. Схематичне представлення трьох агрегатних станів і плазми. Всі частинки рухаються або коливаються: середня швидкість залежить від температури речовини. Середня швидкість руху частинок зростає, коли речовину нагрівають. У твердому тілі, рух частинок є дуже обмеженим. У рідині частинки можуть рухатися уже вільніше. І в газі частинки можуть рухатися повсюди (майже) абсолютно вільно. Коли газ нагріти до достатньо високих температур, він розпадається: утворюється плазма, яка складається з окремих заряджених частинок.

форми предмету; шматочок металу розширюється трохи, але форму майже не змінює. Якщо він стає достатньо гарячим, макроскопічна (= спостережувана оком) структура шматочка металу починає руйнуватися. Частинки починають рухатися швидше, та предмет втрачає свою структуру: відбувається плавлення. Якщо речовину ще нагріти, макроскопічна

структура, тепер це рідина, може розпастися далі: вона стає газом. У цій зміні агрегатного стану від рідини до газу зв'язки
між атомами повністю руйнуються та частинки починають вільно рухатись. Зіткнення лишаються єдиною формою взаємодії між частинками.

Процес зміни твердого тіла на рідину та газ (або в зворотному напрямку) ще називають **фазовим переходом**. Температура, за якої відбувається фазовий перехід, залежить від типу атомів і типу зв'язків між ними. Одні матеріали починають плавитися за низьких температур (шоколад, свічі), тоді як інші, наприклад, метали плавляться лише за високих температур. Деякі речовини навіть киплять за таких низьких температур, що їх можна спостерігати в природі лише у газовому стані: наприклад, кисень у повітрі, яким ми дихаємо. Він починає кипіти за надзвичайно низьких температур, а саме –183 °C.

Нагадаємо, що тут розглядають дейтерій і тритій я к термоядерне пальне, які є різними ізотопами водню. За кімнатних температур водень уже є газом. Густина речовини так само залежить від фазового стану. Якщо розплавити матеріал, у загальному випадку, між частинками утворюється більше простору. Тобто об'єм зростатиме за незмінного числа частинок, що спричинятиме зменшення густини. Відповідно, якщо наше пальне є газом, його густина є низькою у загальному випадку. **Отже, для досягнення умов синтезу, газ слід нагріти до дуже високих температур**.

Іонізація

Отже, наше пальне є газом, який слід нагріти до надзвичайно високих температур. А що відбувається при подальшому нагріванні газу? Чи може з газом статись щось на кшталт "кипіння", як це буває з рідиною? Саме так: якщо газ достатньо нагріти, відбувається свого сорту **пробій**. Цей пробій не схожий на плавлення чи кипіння, коли рвуться зв'язки між атомами або молекулами. У цьому випадку починають рватися зв'язки всередині атому: зв'язки між ядром і електронами.

Цей пробій настає, щойно газ нагрітий настільки, що енергія атома перевищує певний поріг, так звану **енергію йонізації**. Атом починає розпадатися та ядро може втратити один або більше електронів, перетворюючись на
йон. Цей процес називають **іонізацією**. Оскільки більшість атомів мають кілька електронів, ці атоми можуть позбутися більше, ніж одного електрона. Якщо атом позбувся всіх електронів, він стає повністю іонізованим іоном, тобто позитивно зарядженим ядром без електронів. Щойно газ починає розпадатися на йони та електрони, кажуть про плазму. Бо **плазма – це іонізований газ, що складається з вільних додатних іонів і вільних негативних електронів**. Зазвичай, не всі атоми в плазмі є іонізованими. Якщо всі атоми є йонізованими, кажуть про повністю йонізовану плазму. Не слід дивуватися надалі, що Сонце не є вогняною кулею: Сонце є великою плазмовою кулею!

Рисунок 11. Приклади плазми. Згори донизу та зліва праворуч показано північне сяйво, неонову рекламу, блискавку, експериментальний плазмовий розряд, Сонце та розряд у сферичному токамаку MAST. Джерела: NASA, Pixabay/Pexels, Pixabay/FelixMittermeier, Plasmalab TU Eindhoven/J.P.K.W. Frankemolle, NASA/Solar Dy¬namics Observatory & CCFE.

Пошукаємо плазму

Ви можете сказати: “Але ж ту плазму важко створити”. Однак, плазма є найпоширенішою формою матерії у Всесвіті. Більшість об’єктів у космосі перебувають у стані плазми: зірки, туманності, тощо. Плазма менше

поширена на Землі, але й тут її можна часто зустріти. Блискавка є плазмою, північне сяйво виникає завдяки наявності плазми у небі над північним полюсом. Залежно від точного визначення плазми, (гаряче) полум'я так само можна вважати за плазму. Через поширеність плазми в природі, її інколи називають четвертим станом речовини.
Крім того, що плазма зустрічається в природі, її часто використовують у промисловості. Від дезінфекції інструментів у лікарнях до виробництва комп'ютерних чіпів, сонячних панелей або смартфонів, плазмову обробку застосовують усюди. Існує багато способів створити плазму, наприклад, за допомогою електромагнітних хвиль (тих, що генерують у мікрохвильовій печі!).

Різниця між газом і плазмою

"А тепер з'ясуємо, в чому полягає різниця між газом і плазмою, крім вишуканої назви?" Головна різниця походить від того, що плазма складається з іонів і електронів, тобто, заряджених частинок, тоді як звичайний газ складається з самих нейтральних атомів. Отже, в плазмі **заряди рухаються вільно**. Це означає, що в плазмі можуть протікати **електричні струми**, так само як у металевому провіднику. Крім провідності, іншою важливою властивістю плазми є її **чутливість до електричних і магнітних полів**.

Класна вправа 1.3
Отже, різниця між плазмою та газом полягає в тому, чи є більшість частинок зарядженими , чи нейтральними. До того ж, зазвичай плазма світиться, тоді як гази часто є безбарвними і напевне не світяться. Отже, чому плазма світиться? [можна обрати кілька відповідей]

(А) За достатньо високих температур все починає випромінювати, отже, природно, що плазма світиться за високих температур.
(Б) Заряджені частинки вільно рухаються. Коли електрон стикається з іоном, вони можуть рекомбінувати. У цій рекомбінації заряджені частинки об'єднуються в нейтральну, внаслідок чого випромінюється світло. Якщо випромінюване світло лежить у видимому діапазоні, плазма починає світитися.
(В) У деяких ядерних реакціях випромінюється світло. Якщо випромінюване світло належить видимому діапазону, плазма починає світитися.

Блискавка

Блискавку можна пояснити провідністю плазми. Блискавка – це величезний електричний струм між зарядженою хмарою та поверхнею Землі. Завдяки різниці в заряді між хмарою та поверхнею газ побіля хмари починає розпадатися, утворюється плазма, яка може проводити струм. Щойно заряд передано від хмари до Землі, провідність втрачається та світіння припиняється. Все це відбувається миттєво: блискавично.

Електричні та магнітні поля

Електричні поля є способом описати, як одне заряджене тіло впливає на інше заряджене тіло поблизу. Заряджена частинка притягує або відштовхує інші заряджені частинки залежно від того, чи ці заряди є однаковими (+ + / —), чи протилежними (+–/–+). Сила взаємодії залежить від відстані між зарядженими частинками. Якщо заряджені частинки зафіксувати у просторі та уявити, що деяка частинка — **'тестова' частинка** — розташована близько до іншої частинки, то взаємодія між цими двома частинками буде сильною (зафіксована частинка притягуватиме або відштовхуватиме тестову частинку). Це означає,

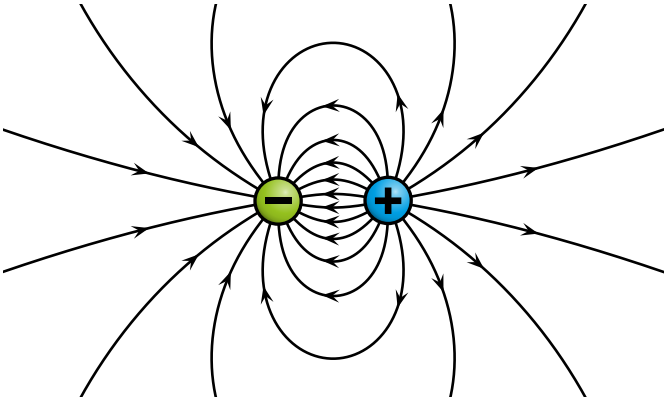


Рисунок 12. Схематичне зображення електричного поля між додатно та негативно зарядженими частинками. Зображено кілька силових ліній електричного поля. Зазначте, що силові лінії направлено від додатного до негативного заряду. Джерело: Wikimedia Commons/Geek3.

що електричне поле від зафіксованої частинки в точці розташування тестової частинки є сильним. Якщо розташувати тестову частинку далеко, то вона все одно відчуватиме взаємодію, але дуже слабку:

електричне поле від фіксованої частинки далеко від неї є слабким.
Уявивши такі «тестові» частинки всюди навколо фіксованої частинки, здобуваємо розуміння сили взаємодії в усіх точках простору: це й називають електричним полем. Можна нарисувати лінії, які

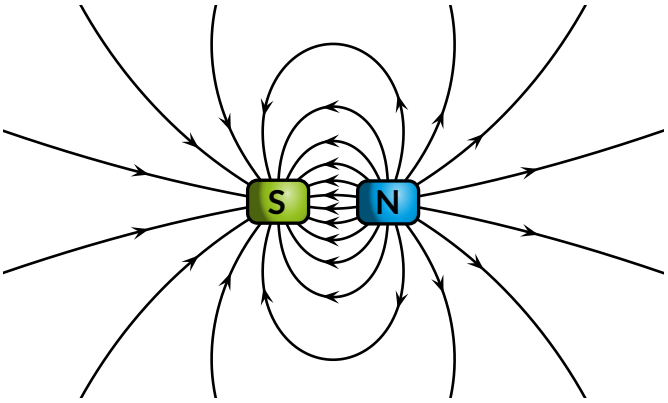


Рисунок 13. Схематичне зображення магнітного поля між двома «магнітними диполями». Зображено кілька силових ліній магнітного поля. Зазначте, що силові лінії мають напрямок, який іде від «півночі» до «півдня». В дійсності, силові лінії магнітного поля проходять крізь «магнітні полюси» та утворюють замкнені контури. Джерело: Wikimedia Commons/GeekB.

виходять з додатно зарядженої частинки в усіх напрямках і ніколи не перетинаються одна з одною. Це і є **силові лінії електричного поля**. В такий спосіб можна зробити поле наочним: якщо силові лінії лежать густо, то електричне поле є сильним; якщо лінії проходять далеко одна від одної, то поле є слабким. Силові лінії електричного поля завжди направлено від додатного до негативного заряду.

Магнітне поле визначають аналогічно. Але замість бути взаємодією між додатним і негативним зарядами, це поле зображують як взаємодію між двома «магнітним полюсами»: північним і південним. Два однакові полюси відштовхуються один від одного; а два протилежні притягуються. Найбільш реалістичний спосіб зобразити магнітне поле полягає в рисуванні силових ліній, лишень тепер – це **силові лінії магнітного поля**, які завжди утворюють замкнені контури. Якщо лінії проходять крізь (магнітний) матеріал, тоді місце, звідки лінії виходять з матеріалу, називають «північним полюсом», а куди входять в матеріал – «південним полюсом». Якщо лінії лежать поза магнітним матеріалом, то вони йдуть з «півночі на південь». Оскільки магнітні поля можуть існувати й у вакуумі, то існує можливість силовим лініям магнітного поля не проходити крізь магнітний матеріал. У цьому випадку магнітне поле не має

північного та південного полюсів, але магнітне поле все одно існує.

Заряджені частинки в магнітному полі

Виявляється, що коли заряджена частинка потрапляє до магнітного поля, вона починає **обертатися** навколо силових ліній магнітного поля. Цей рух у магнітному полі, так зване **гірообертання**, є дуже корисним! Аби частинки стикались достатньо часто для синтезу,

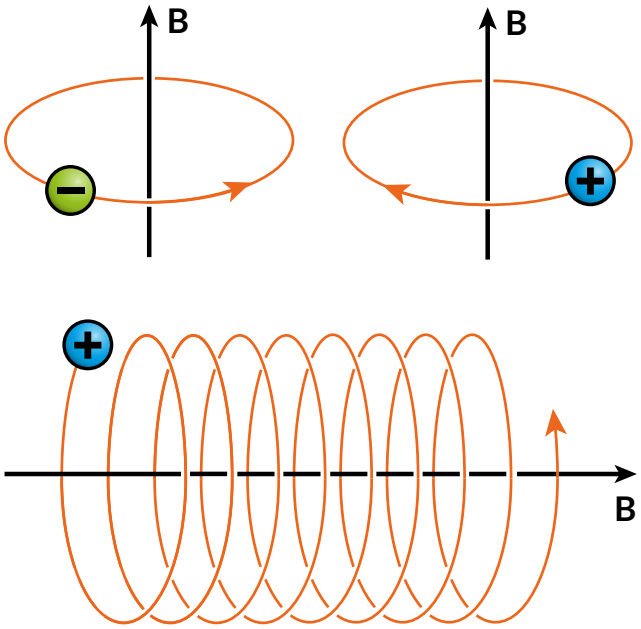


Рисунок 14. Рух (негативно або додатно) зарядженої частинки в магнітному полі. Коли частинка рухається перпендикулярно магнітному полю, то вона рухається по окружностях навколо силових ліній магнітного поля. Якщо в частинки також є складова швидкості в напрямку магнітного поля, частинка рухається по гвинтовій траєкторії навколо силових ліній магнітного поля. Цей круговий/гвинтовий рух навколо силових ліній магнітного поля називають гірорухом.

Класна вправа 1.4

Напрямок магнітного поля (тобто, напрямок магнітних силових ліній) залежить від напрямку електричного струму, який створює це поле. Нарисуйте напрямок магнітного поля, зображуючи кілька силових магнітних ліній в наступних ситуаціях:

(а) Електричний струм тече вздовж прямого дроту.

(б) Електричний струм тече по кільцю проти стрілки годинника.

(в) Електрон обертається по колу за стрілкою годинника та протон рухається по колу проти стрілки годинника. Порівняйте цей випадок із ситуацією б): що Ви зазначили?

(г) Що Ви можете сказати про напрямок силових магнітних ліній по відношенню до напрямку електричного струму в цілому?

Див. також вправи **А.9, А.10**.

потрібні надзвичайно високі температури. Отже, треба створити плазму та нагріти її до надзвичайно високих температур.

Тоді виникає така проблема. Не існує таких матеріалів, які були б здатні утримувати плазму за таких надзвичайно високих температур у контейнері. Контейнер почне плавитися, гаряча плазма всередині почне охолоджуватися при торканні стінок. Тут починає проявлятися корисність магнітного поля. Якщо можна керувати плазмою за допомогою магнітів, то можна уникнути торкання плазмою стінок контейнера, утримуючи її в такий спосіб. Оді вона не може розплавити термоядерний пристрій (а термоядерний пристрій не може охолодити плазму)! **Плазму можна утримувати магнітним полем**.

1.4

Будова термоядерного пристрою

Тепер маємо основні знання, необхідні для того, аби почати вивчати будову термоядерного пристрою! Нам відомі ядерні реакції синтезу та перебіг синтезу на Сонці. Встановлені критерії для досягнення реакцій синтезу. А саме, слід підтримувати дуже високий тиск якомога довше. Цей високий тиск створюється поєднанням концентрації та температури. На Сонці високий тиск виникає внаслідок гравітації, але на Землі слід шукати інший шлях.

Найбільш ефективним підходом є використання магнітних полів для утримання плазми та досягнення високих тисків шляхом нагрівання плазми до високих температур протягом достатньо тривалого часу, аби відбулися реакції синтезу. Особливо в Європі більшість

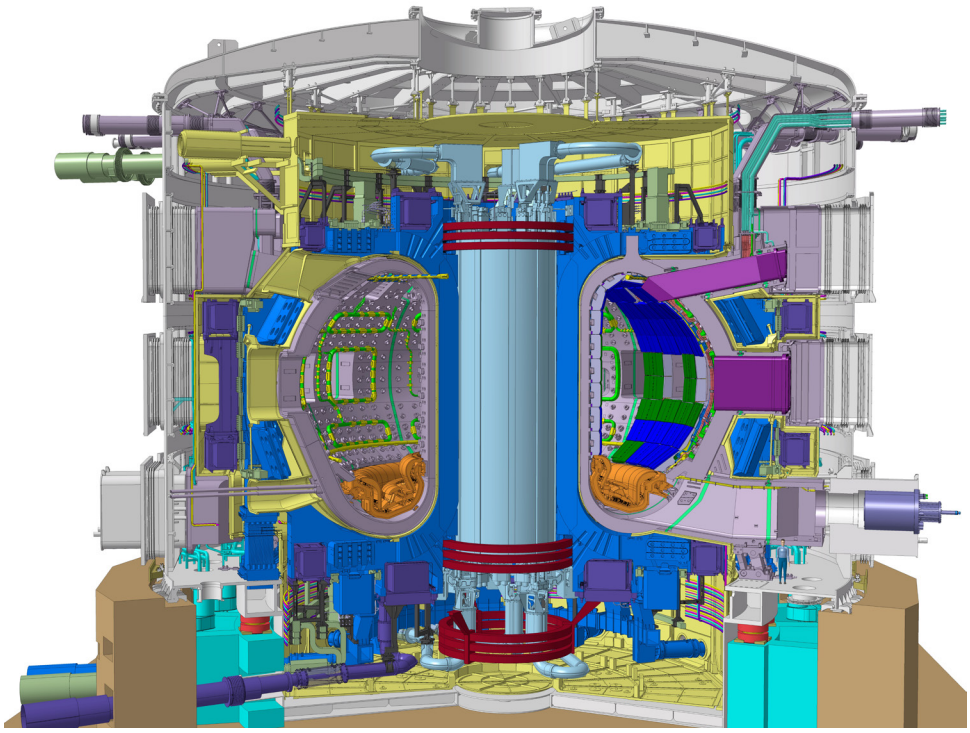


Рисунок 15. Схематичне зображення токамака ITER, який зараз споруджують на півночі Франції. Джерело: ITER Organization, https://www.iter.org. Показано котушки тороїдного магнітного поля (темно сині), котушки полоїдного магнітного поля (темно фіолетовий), а також центральну котушку (світло синій, по центру).

термоядерних проєктів із виробництва термоядерної енергії зосереджено на нагріванні та магнітному утриманні плазми. Такий підхід до синтезу називають **термоядерний синтез із магнітним утриманням (ТСМУ)**.

Оскільки вже усвідомлено, що магніти можна застосовувати для утримання плазми, розглянемо детальніше, як це реалізують у термоядерних пристроях з магнітним утриманням. Почнемо з розгляду найпоширенішого типу термоядерних пасток – **токамаків**.

Токамак

Слово «токамак» походить від російського. Токамак містить скорочення від виразу «тороїдна камера з магнітним котушками» або «тороїдна камера з аксіальним магнітним полем». І це саме те, чим воно є: камера у формі бублика, обмотана котушками магнітного поля, яка може містити плазму. Камеру відкачують на вакуум, тоді туди напускають термоядерне паливо (газ водню), який розкладають на плазму та нагрівають (зазвичай високочастотними хвилями). Цю плазму утримують магнітним полем, котушки якого лежать за межами камери (і інколи частково всередині камери, залежно від конкретного дизайну).

Класна вправа 1.5

Різні токамаки та тороїдні термоядерні пристрої мають різне **аспектове співвідношення**: частка великого радіусу R до малого радіусу a. Через це форма цих торів може трохи відрізнятися. Розглянемо ці різні форми детальніше.

(а) Схематично нарисуйте тор із гігантським великим радіусом, але мізерним малим радіусом. На що він схожий?
(б) Тепер схематично нарисуйте тор із незначним великим радіусом і значним малим радіусом. Чому такий пристрій важче нарисувати?
(в) Що трапиться, якщо робити великий радіус все меншим і залишати незмінно значним малий радіус? Яку форму Ви зрештою побачите?
Тепер погляньте на аспектове співвідношення для двох схем на (а) і (б).
(г) Що відбувається при зміні аспектового співвідношення?
(д) Яке є найменше можливе значення аспектового співвідношення для тора?

Класна вправа 1.6

Як ми бачили, на поверхні тора є два головні напрямки: “тороїдний” і “полоїдний”. Їх можна переплутати, тому розглянемо це детальніше.

(а) Схематично нарисуйте два можливі перерізи тора.
(б) Який переріз є полоїдним? Який переріз є тороїдним? Що Ви зазначили про тороїдний/полоїдний напрямки та відповідні їм перерізи?

Геометрія токамака

Перед розглядом різних магнітних систем стандартного токамака звернемо увагу на геометрію камери пристрою. Це – **тор**.
Існує багато способів визначити положення точки поза тором, на або всередині тора. Зокрема, можна було б використати для цього тривимірну сітку з взаємно перпендикулярними осями x, y, і z. Однак, такий вибір супроводжується надмірними математичними ускладненнями: така сітка є доречною для визначення плоских поверхонь. А коли поверхня є кривою, для її описання потрібно трохи більше тригонометрії. Більш елегантно описувати тор за допомогою двох констант і двох змінних: **великого радіусу R, малого радіусу a, полоїдний кут 0** (тета) і **тороїдний кут ^** (фі). Приклад такого описання тору наведено на Рис. 16 з усіма згаданими константами та змінними.

Великий і малий радіуси зображено як радіуси двох різних окружностей, які можна побачити в торі.

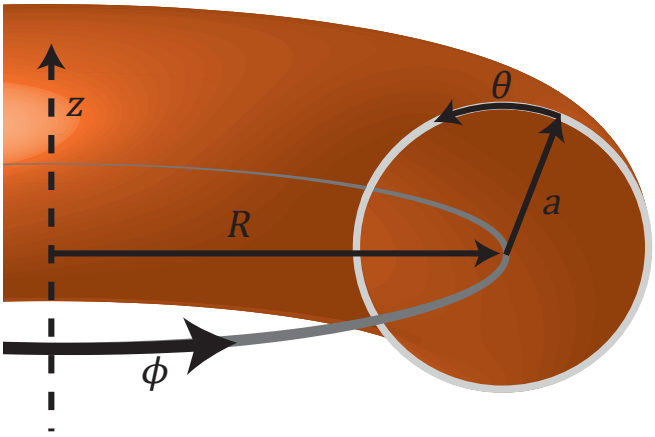


Рисунок 16. Схематичне зображення геометрії тора. Позначено великий радіус (R) і малий радіус (a) тора. Також зображено тороїдний та полоїдний напрямки.

Великий радіус R – це від центру «дірки бублика» до центру малої окружності бублика.
А радіус меншої окружності бублика так і називають – малим радіусом a. В дійсності, маленька «окружність» тора часто є скоріше трикутною або D-подібною в сучасних токамаках. Як з'ясувалось, така форма перерізу бублика сприяє ефективній роботі токамака. Зразок такої форми котушки наведено на Рис. 17.

Інші дві координати – це полоїдна та тороїдна координати або полоїдний і тороїдний кути, 0 і ???. Тороїдний напрямок – це «довгий шлях навколо» тора. А полоїдний напрямок – це «короткий шлях навколо тора». Якщо задано ці кути, полоїдний і тороїдний кути, 0 і ???, то можна визначити будь-яку точку на тороїдній поверхні. Оскільки тор є симетричним, слід визначити, де тороїдний кут дорівнює нулю. Для полоїдного кута, за нуль зазвичай приймають зовнішню точку тора.

Магнітні котушки

Тепер, коли ми трохи ознайомились із геометрією токамака, розглянемо різні магніти стандартного токамака та як їх називають. Потім з'ясуємо, навіщо всі ці різні магніти потрібні для утримання плазми всередині тороїдної камери.

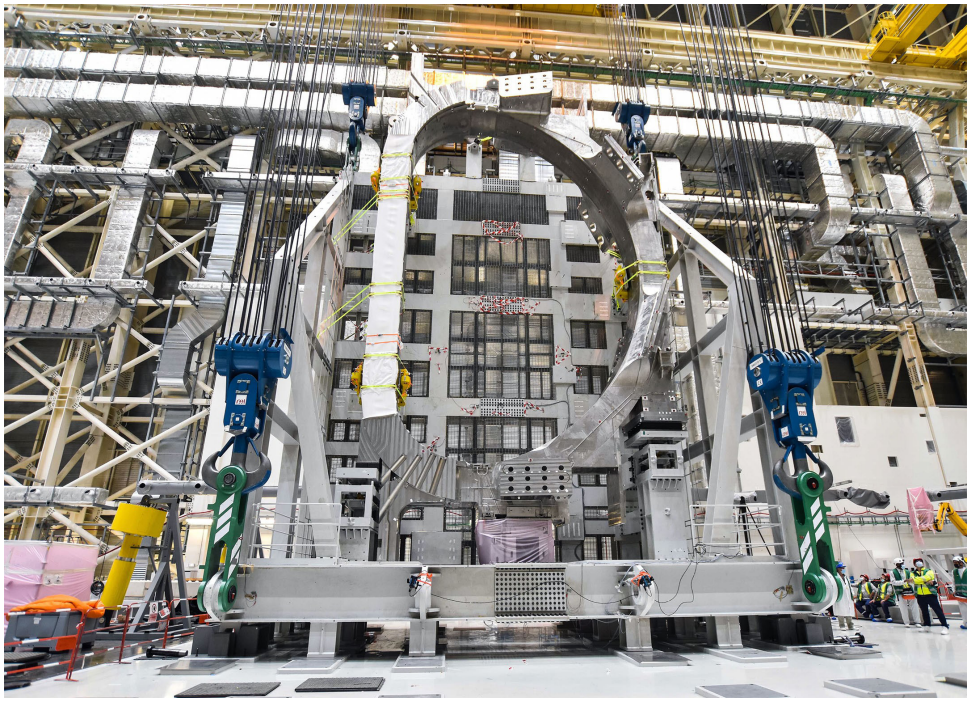


Рисунок 17. Це є TF12, перший із вісімнадцяти D-подібних магнітів тороїдного магнітного поля, які розташують навколо вакуумної камери ITER. Виготовлений у Японії, цього гіганта у 17 метрів заввишки та у 9 метрів завширшки було встановлено всередині складального залу ITER червня 2021 р. Джерело: ITER Organization, https://www.iter.org.

Котушки

Для створення належного магнітного поля використовують електромагнітні котушки. Нагадаємо, про що йшлося наприкінці попереднього розділу. А саме, якщо заряджені частинки рухаються по замкненому колу, то напрямок магнітного поля в площині кола є перпендикулярним цій площині (і напрямку струму). При цьому напрямок магнітного поля поза колом є протилежним до напрямку поля всередині кола. Напрямок магнітного поля залежить від знаку частинок, які переносять струм; див. Рис. 14.

Оскільки електрони можуть вільно рухатись у металах, заряджені частинки можуть рухатись по металевих дротах. Коли такий дріт навити багато разів, виходить котушка. Котушку, яка діє як магніт при увімкненому струмі, називають магнітною котушкою або соленоїдом.

Коли заряджені частинки рухаються вздовж кільцевої траєкторії, магнітне поле спрямовано в перпендикулярному напрямку. При цьому найсильніше магнітне поле створюється в центрі кільця, див. Рис. 18.

Коли заряджені частинки рухаються по такому замкненому контуру, кажуть про струм. Напрямок цього струму визначається напрямком руху додатно заряджених частинок. Якщо рух створюється електронами (або іншими негативними частинками), напрямок руху електронів є протилежним напрямку струму. Під дією різниці потенціалів електрони можуть рухатися по металевих дротах. Отже, пропускаючи струм по (металевих) котушках і розташовуючи котушки в певний спосіб, можна створити магнітне поле належного напрямку.

На Рис. 15 показано стандартну магнітну конфігурацію токамака. Перший набір магнітів, який впадає в очі, це ті, що розташовані уздовж бублика та дещо нагадують формою літеру D. Це котушки **тороїдного магнітного поля**. Крім того, є ще дві інші

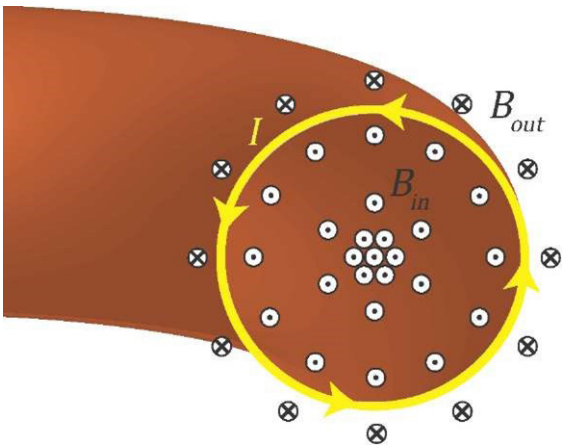


Рисунок 18. Схематичне зображення геометрії тора. Показаний напрямок струму крізь (круглу) котушку тороїдного магнітного поля та відповідний напрямок магнітного поля всередині (Bin) та назовні (Bout) тора. Видно, що магнітне поле є найсильнішим у центрі тора.

важливі системи котушок. Перша, схожа на трубу котушка в центрі бублика – **центральний соленоїд**. Друга – це набір великих магнітів, які лежать нагорі та знизу машини – **котушки полоїдного магнітного поля**. Ці три групи магнітів складають основну магнітну систему токамака. Зазвичай, існують ще менші додаткові магніти для покращення роботи токамака. Але вони є менш важливими, тому про них тут не йтиметься. В наступних розділах котушки тороїдного магнітного поля та центральний соленоїд розглянуто більш детально. Котушці полоїдного поля присвячено окрему вправу.

Котушки тороїдного поля

Першим кроком на шляху побудови стабільного термоядерного пристрою є утримання плазми у формі тора. Для цього слід, по-перше, змусити плазму рухатись по колу в тороїдному напрямку. Уже розглянуто, як створити магнітне поле з певним напрямком. До того ж, заряджені частинки рухаються вздовж силових ліній магнітного поля

Класна вправа 1.7

Розглянемо стандартний токамак, головне, його три основні магнітні системи.

(а) Які магніти лежать у полоїдному перерізі? Як називають ці магніти та чи має сенс така назва?
(б) Поясніть назви інших двох груп магнітів.

(вздовж гвинтової траєкторії). Цього достатньо для розуміння, як змусити заряджені частинки рухатись по замкненому контуру в тороїдному напрямку. Слід укласти кільця зі струмом вздовж траєкторії, по якій мають рухатись частинки. Отже, коли ми хочемо, аби частинки рухались у тороїдному напрямку, слід скрутити магнітні котушки навколо тора, тобто, виготовити котушки тороїдного магнітного поля! Коли розташувати багато таких D-подібних котушок навколо камери у формі бублика, магнітне поле закручується в кільця всередині цього бублика. Тороїдне магнітне поле набагато перевищує інші компоненти в токамаку.

Отже, тепер маємо плазму, що рухається вздовж тороїдного напрямку. Звучить пречудово, чи не так? Так тоді навіщо оті інші котушки на додаток до котушок тороїдного магнітного поля? На жаль, виявляється, що якщо існує магнітне поле винятково в тороїдному напрямку, плазма є нестійкою. Було показано, що наявність полоїдного магнітного поля на додаток до тороїдного магнітного поля вирішує проблему. В результаті здобуваємо гвинтове магнітне поле.

Центральний соленоїд і струми в плазмі

Для створення цього такого необхідного магнітного поля використовують центральний соленоїд (не напряму). Насправді в цієї котушки дещо інше призначення. А саме, він призначений не для створення магнітного поля самого по собі. Він використовує **магнітну індукцію** для створення (тороїдного) електричного струму в плазмі. Для розуміння суті магнітної індукції слід згадати силові лінії магнітного поля. Як показано у попередньому розділі, магнітне поле можна показати створенням силових ліній магнітного поля, які утворюють замкнені контури. Напруженість **магнітного поля, B**, напряму пов'язана з **густиною силових ліній магнітного поля**. Якщо силові лінії лежать достатньо близько одна до одної, магнітне поле є сильним у цій області. Якщо силові лінії розташовані далеко одна від одної, у цій області магнітне поле є слабким.

Далі, важливим є поняття **магнітного потоку**. Магнітний потік визначають для певної поверхні. Він дорівнює напруженості магнітного поля (тобто, густині силових ліній магнітного поля) помноженій на (перпендикулярну) площу, крізь яку проходять ті силові лінії. Внаслідок цього, магнітний потік можна розглядати як міру магнітної енергії, яка «тече» вздовж силових ліній крізь певну поверхню. Співвідношення між магнітним потоком, величиною магнітного поля та площею можна записати так:

$$\Phi = B\,A\cos(a)$$

де Ф (велика фі) – це магнітний потік, B – це величина магнітного поля, A – це площа, яка нас цікавить, і a – це кут між перпендикуляром до поверхні та напрямком силових ліній магнітного поля.

Магнітне поле

Величина магнітного поля B є важливим поняттям у фізиці електрики та магнетизму. Вона може спантеличувати, оскільки має кілька назв: напруженість магнітного поля, густина ліній магнітного поля, густина магнітного потоку або магнітна індукція. Різні назви є наслідком умовностей. Одні автори пишуть так, інші надають перевагу іншому. У більш точному математичному трактуванні магнетизму силові лінії не використовують – їх замінив математичний вектор поля. Як результат, визначення електромагнітних полів адаптували. І хоча ми говоримо про те саме B, у новітній літературі найчастіше вживають поняття магнітної індукції або густини магнітного потоку. Оскільки наш розгляд базується на силових лініях (а також для того, аби уникнути плутанини між магнітною індукцією та законом індукції) ми залишили або «величину магнітного поля» або «густину силових ліній магнітного поля».

Важливо зазначити, що попри те, що поняття магнітного потоку та густини силових ліній магнітного поля є пов'язаними, вони є різними. Густина ліній магнітного поля визначається відстанню між силовими лініями, тоді як магнітний потік визначається відстанню між силовими лініями на певній площі. Якщо густина силових ліній магнітного поля є великою на певній поверхні, тоді силові лінії лежать близько одна до одної, внаслідок чого величина магнітного поля є великою на цій поверхні. Тому й магнітний потік крізь цю поверхню є так само великим.

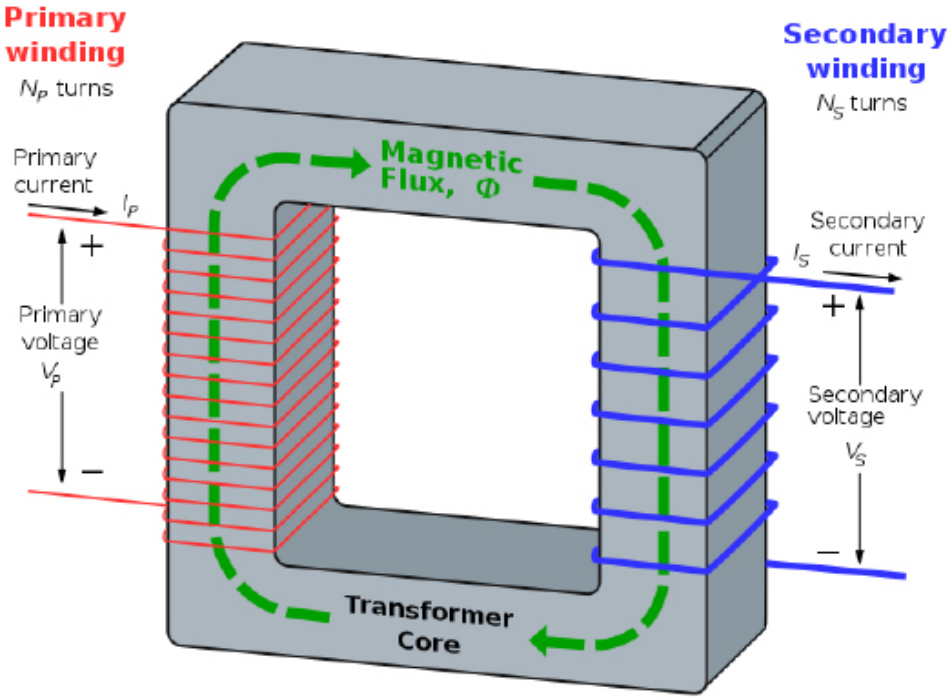
Якщо взяти певну котушку, то магнітне поле можна створити, пропускаючи струм крізь неї. Якщо струм крізь котушку є сталим, силові лінії магнітного поля не змінюють свого положення. При цьому зберігається густина силових ліній магнітного поля, отже, магнітне поле лишається незмінним. Це означає, що для певної (фіксованої) поверхні поблизу котушки магнітний потік так само є сталим.

З іншого боку, якщо потроху збільшувати струм по дротах, магнітне поле також потроху зростає: сильніший струм створює сильніше магнітне поле, і як наслідок, більшу густину силових ліній магнітного поля. Зростає число силових ліній поля на певній поверхні поблизу магніту чи котушки: збільшується магнітний потік.

Однак, виявляється, що природа опирається зміні магнітного потоку! Зміна магнітного потоку автоматично спричиняє (**індукує**) так звану '**електрорушійну силу**' або **ЕРС**. Ця ЕРС намагається протистояти зміні магнітного потоку створенням напруги, що в свою чергу, спричиняє струм (який створює протилежне магнітне поле).

Розглянемо для прикладу котушку. Якщо збільшувати струм крізь котушку, зростає магнітне поле, отже, зростає магнітний потік усередині контуру. Ця зміна магнітного потоку спричиняє ЕРС, яка намагається опиратися цій зміні та створює струм, який у свою чергу покликаний створити магнітне поле у напрямку, зворотному до первинного зростаючого магнітного

Рисунок 19. Трансформатор із залізним осердям. Змінний струм у первинній обмотці збуджує змінне магнітне поле в осерді. Залізне осердя переносить це поле до вторинної обмотки, де зміна в магнітному потоці збуджує струм у вторинній обмотці. Джерело: BillC at English Wikipedia, https://en.wikipedia.org/ wiki/ File:Transformer3d_col3. svg (CC BY-SA 3.0).



поля. Цей опір зміні магнітного потоку виникає в будь-якому провідному середовищі поблизу котушки. Важливо в цьому місці розуміти, що величина ЕРС залежить від швидкості зміни магнітного потоку, а не від величини магнітного поля.

Наприклад, якщо взяти дві котушки поблизу одна одної та змінювати струм в одній із них, то магнітний потік змінюється в них обох! Це відбувається тому, що магнітне поле в одній котушці відчувається другою. Тому зміна магнітного потоку так само відбувається і у вторинній котушці, збуджується ЕРС, яка спричиняє струм і відповідне магнітне поле, що опирається зміні

Classroom exercise 1.8

The use of induction to generate a plasma current which creates our poloidal field has one major drawback: it makes a tokamak a pulsed device.

(a) How does magnetic induction lead to pulsed operation?
(b) Why is this a problem for a fusion reactor?

See also exercise: A.11.

потоку в первинній котушці. Цей процес називають **(електро)магнітною індукцією**. Вона дає можливість збуджувати струми та магнітні поля в контурах, які не є з'єднаними!
Як виявляється, збуджену ЕРС можна підсилити за рахунок збільшення числа витків у котушці: кожен виток відчуває зміну магнітного потоку. Всі витки є з'єднаними, внаслідок чого загальна зміна магнітного потоку в котушці є сумою змін магнітного потоку в окремих витках. Загальну ЕРС розраховують як добуток зміни ЕРС в окремому витку на число витків у котушці. На використання цього принципу було винайдено трансформатор.

Трансформатор складається з двох котушок, які між собою є електрично ізольованими. Ці котушки називають первинною та вторинною. У трансформаторі використовують змінний струм, що спричиняє безперервну зміну магнітного потоку в котушках. В **ідеальному трансформаторі** немає втрат енергії в процесі індукції, тому потужності у первинній і вторинній котушках мають бути однаковими:

$$I_p V_p = I_s V_s,$$

тут Ip і Is – це струми крізь первинну (p) та вторинну (s) котушки, Vp і Vs – напруги на первинній і вторинній котушках. Оскільки повна ЕРС у котушці залежить від числа витків у котушці, здобуваємо:

$$V_p / V_s = N_p / N_s ,$$

де Np – це число витків у первинній котушці та Ns – це число витків у вторинній котушці. Як результат, змінюючи намотку котушок, можна в потрібний спосіб змінити струми та напруги.

Тепер повернемося до токамака. Центральна котушка всередині токамака являє собою одну велику первинну котушку з дуже великим числом витків. Оскільки плазма є провідною, вона пропускає струм: плазма по суті діє як один виток дроту. Це робить наш токамак одним великим трансформатором, чия первинна обмотка має багато витків, а вторинну виготовлено

у вигляді одного витка – плазми. Зміна струму в центральній котушці спричиняє зміну магнітного поля, що в свою чергу збуджує струм у центрі плазми. Цей струм у плазмі потім створює полоїдне магнітне поле, яке нам потрібне! Як результат, ми тепер маємо як тороїдне, так і полоїдне магнітне поля, тобто, таке бажане для стійкого утримання гвинтове магнітне поле!

Котушки полоїдного поля та додаткові котушки

Отже, струм у плазмі створює належне полоїдне магнітне поле. Можна було б сподіватись, що котушки полоїдного поля створюють полоїдне магнітне поле, чи не так? Дійсно, вони таки створюють додаткове полоїдне магнітне поле, проте воно є набагато слабшим за тороїдне поле або те полоїдне поле, яке генерується струмом у плазмі. Котушки полоїдного магнітного поля використовують для створення **вертикального магнітного поля** всередині плазми. Це слабеньке вертикальне поле допомагає ще покращити утримання плазми.

Крім котушок тороїдного магнітного поля, центральної котушки та котушок полоїдного магнітного поля, існує ще багато інших котушок у справжньому токамаку. Одні використовують для вимірювань, інші – для більш точного керування. Однак, ці додаткові котушки не є важливими для розуміння основ термоядерного синтезу, тому їх і не обговорюють у цих модулях.

Магнітне утримання

Тепер ми остаточно готові зрозуміти, як слід створити стійку магнітну систему для утримання плазми. Котушки тороїдного магнітного поля створюють тороїдне магінтне поле, яке в поєднанні з полоїдним магнітним полем, збуджуваним струмом у плазмі (який у свою чергу створений центральною котушкою), дає гвинтове магнітне поле.

Лишилось обговорити лише таке наостанок: **баланс тисків** усередині токамака. В токамаку є зовнішній

і внутрішній тиски. Якщо вони дорівнюють один одному, плазма залишається стійкою. Це так само, як у шинах велосипеда: повітря в шинах має тиснути достатньо сильно зсередини на гуму шин, аби протистояти тиску від землі. Якщо тиск повітря є занадто слабким, земля «перемагає», і шини стають пласкими.
У токамаку, тиск назовні зумовлений наявністю плазми. Єдине, що утримує плазму від руху до стінок, це магнітна система, побудована з використанням магнітів, про які йшлося вище. Ця система створює спрямований всередину **магнітний тиск**.

Може видаватися дивним, що магніти «створюють магнітний тиск». Однак це є важливе поняття в термоядерному синтезі, та це є основна причина утримання плазми стійкою. Без магнітів плазма рухалась би безладно та дифундувала назовні.
За рахунок різних магнітних систем, про деякі йшлося вище, частинки плазми можуть рухатися всередині тора, не торкаючись стінки. Магнітний тиск є реальним фактором і останнім із понять у курсі «основи синтезу».

Тепер, коли перший модуль опрацьовано, Ви вже чимало знаєте про синтез. Ви знаєте про енергетичну проблему. Ви знаєте про синтез на Сонці. Ви знаєте, коли відбувається синтез і як можна створити ці умови на Землі у найбільш поширенішому термоядерному пристрої – токамаку. У наступних модулях,
Ви зможете здобути більш глибокі знання про термоядерний синтез у чотирьох різних аспектах.

1.5 Читайте далі

Аби вивчити більше про термоядерний синтез, ми пропонуємо чотири модулі. В них розглянуто синтез з точки зору перспективи. Це такі чотири модулі.

Модуль 2: На шляху до Термоядерної Енергії

У цьому модулі обговорено історію синтезу та його розвиток. Розглянуто різні конструкції реактора та спроби. Пояснено всі важливі кроки, які привели світ до теперішнього стану в цій царині.

Модуль 3: Керування Плазмою

У цьому модулі пояснено, як нагрівають, керують та вимірюють термоядерну плазму. Існує кілька способів нагрівання плазми. Оскільки йдеться про надзвичайно високі температури, застосовують спеціальні вимірювальні технології. Завдяки різним діагностикам плазми вдається утримувати контроль над термоядерним реактором.

Модуль 4: Термоядерні Матеріали

У цьому модулі пояснено вимоги синтезу до матеріалів. Стінки термоядерного реактора мають бути виготовлені з дуже специфічних матеріалів, які мають витримувати термоядерні умови. У кожного компонента термоядерного пристрою є свої вимоги до матеріалів: чи то затримувати нейтрони, чи то бути охолоджуваними, чи то створювати потужні магнітні поля.

Модуль 5: Розгортання Термоядерної Енергетики

У цьому модулі термоядерну енергетику

розглянуто з точки зору перспективи виходу на ринок електроенергії та порівняння синтезу з іншими джерелами енергії. Крім чисел, енергетична стратегія також відіграє свою роль у тому, чи буде синтез задіяний як джерело енергії.

Електронні ресурси

Окрім різних модулів уроків із синтезу, існує безліч інформації та освітнього змісту на електронних ресурсах. По кожному модулю можна знайти багато цікавих книжок, статей або посилань.

Operation Tokamak in the iOS AppStore

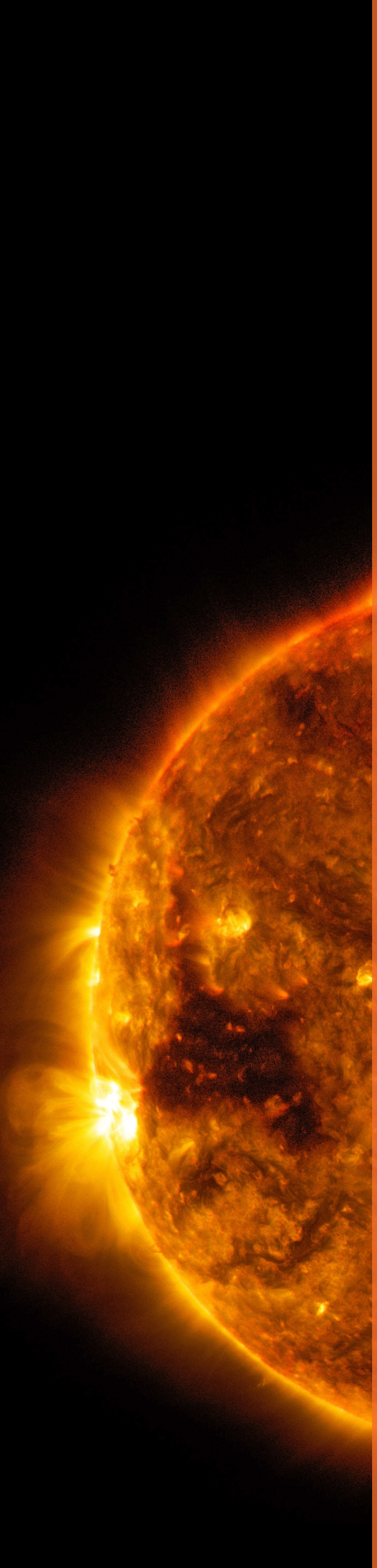
Цікавим прикладом матеріалу про синтез у вільному доступі є ‘Operation Tokamak’ app, який можна скачати безкоштовно на iOS AppStore і Android Play Store:

https://apps.apple.com/us/app/operation-tokamak/id808190835

Operation Tokamak in the Android Play Store

https://play.google.com/store/apps/details?id=dk.markfilm. operationtokamak&hl = nl&gl = US

У цьому додатку можна керувати токамаком, змінюючи силу магнітів і системи нагрівання. Утримуючи реактор за правильних умов та пригнічуючи нестійкості, коли вони виникають, можна підтримувати реакцію з метою виробити якомога більше термоядерної електроенергії.



Колофон

Цей модуль написано як частину навчальних матеріалів FuseNet для середніх шкіл. Його можна знайти за посиланням на браузері FuseNet: **https://fusenet.eu/education/material**. Більше інформації шукайте на нашому сайті: **https://fusenet.eu**.

Автор
Sander Korteweg

Головні редактори
Sander Korteweg
Sjoukje Tijmensen-Hoekstra

Макет і дизайн
Jens Peter Frankemölle
David Becker

Переклад
Ігор Гірка
Юлія Волкова

Зображення на обкладинці
NASA/Solar Dynamics Observatory

Видавець
FuseNet

Фінансова підтримка
Цей проєкт був би неможливим без фінансової підтримки EUROfusion.

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

FuseNet
The European Fusion Education Network

EUROfusion