Модуль 1

Основи Синтезу

1.1 Енергія та її роль у нашому світі

- Джерела енергії на Землі
  - Відновлювальні проти невідновлювальних

Джерело: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

Класна вправа 1.1

(а) Оцініть, який відсоток енергії в Україні отримують з відновлювальних джерел енергії, таких як сонячні, вітрові, гідро, тощо. Поясніть, як Ви проводили свої оцінки. Чи робили Ви якісь припущення?

(б) Порівняйте Ваші оцінки з оцінками принаймні одного іншого студента. Чи сильно відрізняються ці оцінки? Порівняйте міркування, які передували оцінкам: можливо, Ви робили різні припущення?

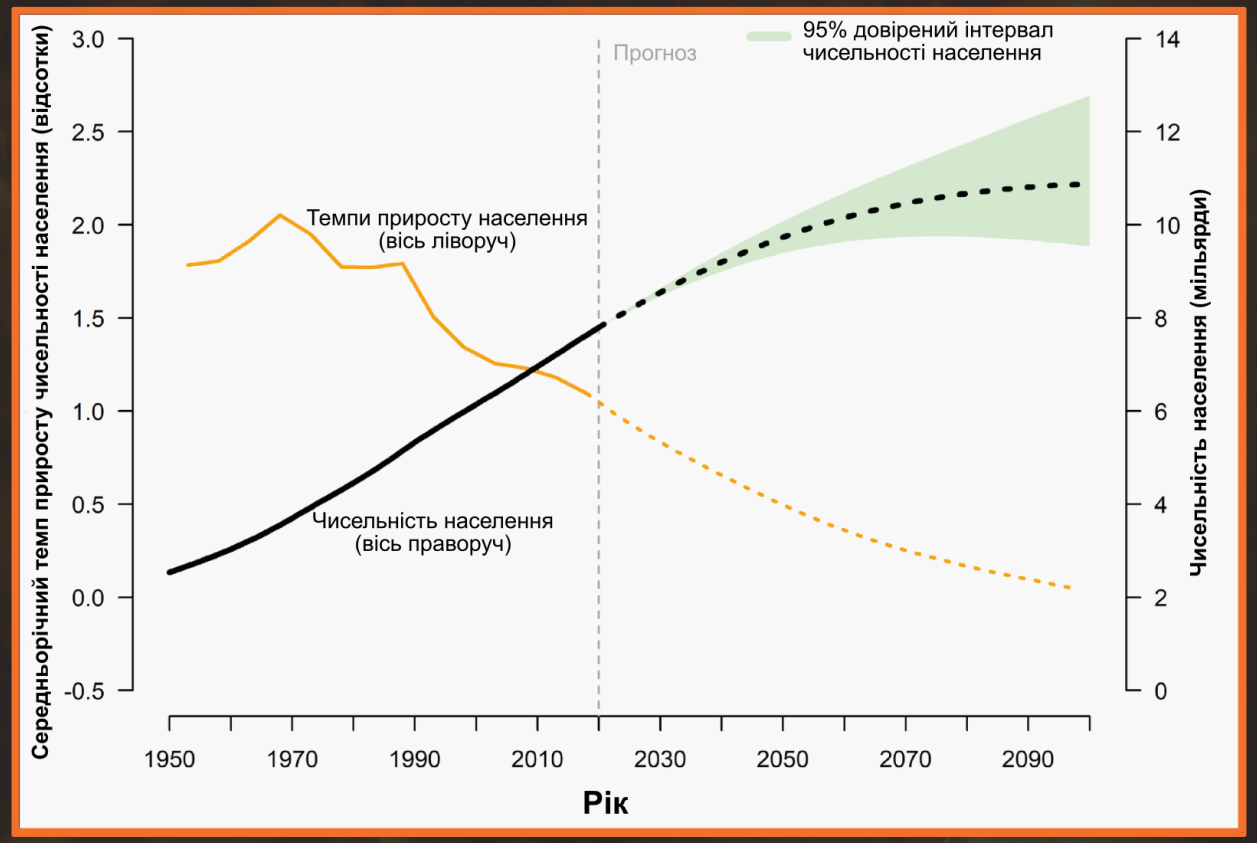
(в) Знайдіть довідкову інформацію про джерела енергії в Україні. Порівняйте Ваші оцінки з довідковою інформацією. Чи сильно Ваші оцінки відрізняються від наведеної в довідкових джерелах?

Класна вправа 1.1 - відповіді

- Обговоріть!

Енергетична проблема

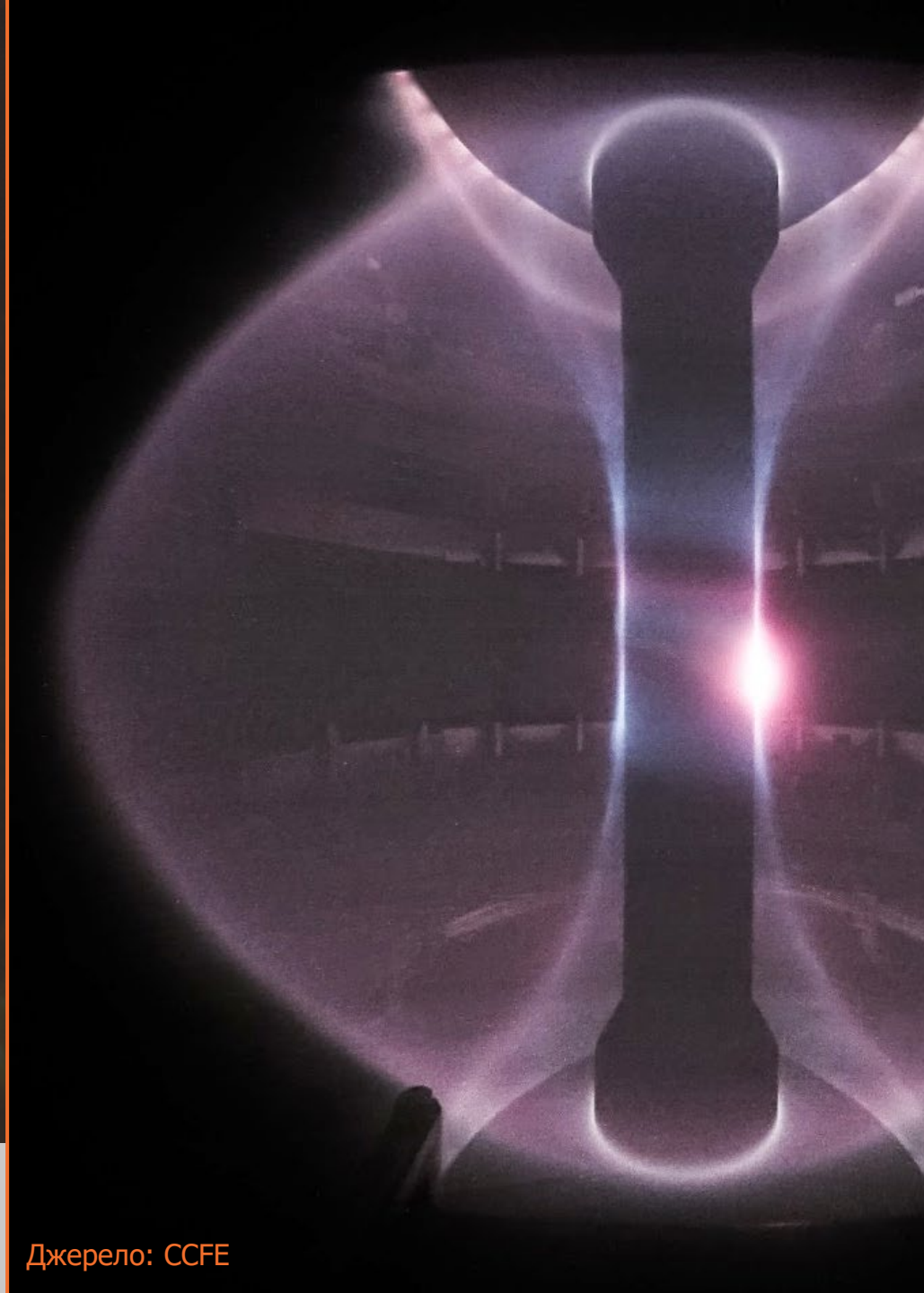
- Зміст проблеми
  - Збільшення населення
  - Збільшення споживання енергії
  - Джерела енергії, які наносять шкоду навколишньому середовищу



Джерело: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

Енергетична проблема

- Шляхи вирішення
  - Зменшення споживання енергії
  - Збільшення стабільних джерел
- Як?
  - Краще зберігання
  - Альтернативні джерела енергії
  - Резервне рішення:
    Ядерний синтез!



Джерело: CCFE

1.2 Синтез всередині нашого власного сонця

- Сонце
  - Зірка
  - Утримувана докупи гравітацією
  - Величезний тиск
  - У рівновазі

- Отримує свою енергію від синтезу!
  - Нумо розглянемо дійсно зблизька!

Джерело: NASA

Всередині атому

- Ядро
  - протон: визначає, який це саме елемент, має додатний заряд
  - нейтрон: визначає, який це ізотоп, не має заряду
- Електронна хмара
  - електрон: визначає заряд/іон, має від'ємний заряд

Ізотопи

Атоми та йони

- Атоми
  - нейтральні

- Іони
  - заряджені
  - можуть бути додатними або від’ємними

Заряд

- Заряджені частинки взаємодіють між собою

Притягуються: (+/-)

Відштовхуються: (+/+) or (-/-)

Ядерні реакції

- Поділ
  - Одне важке ядро розпадається на два (або більше) ядра, внаслідок чого вивільняється енергія
- Синтез
  - Два легких ядра зливаються з утворенням важчого ядра, внаслідок чого вивільняється енергія

Графіка Сари Харман | Департамент енергетики США

Ядерні реакції синтезу

- Найпростіша: синтез D-T

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

  - Дейтерій і тритій
  - Два ізотопи водню

17.6 МеВ = 0.00000000000282 Дж → багато енергії від двох дуже малих частинок!

1 а.о.м. = 1.661×10^{-27} кг

= 0.000000000000000000000000001661 кг

Класна вправа 1.2

Поняття про густину енергії є дуже важливим у фізиці. І хоча воно виглядає складним, воно зводиться до того, "скільки енергії припадає на одиницю об'єму речовини". Якщо спалити 1 літр бензину та виміряти кількість енергії, яка виділилась, (у формі тепла), потім поділити її на об'єм бензину, який було спалено, то вийде міра густини енергії. Густину енергії можна виміряти для будь-якого пального.

a) Розгляньте пальне, наведене внизу. В якого пального, на Вашу думку, найвища густина енергії? В якого пального, на Вашу думку, найнижча густина енергії? Розташуйте пальне в порядку зменшення густини енергії.

b) Порівняйте Ваш список зі списком щонайменше ще одного студента. Поясніть, чому Ви розташували пальне саме в такому порядку.

c) Знайдіть табличні дані про густину енергії. Порівняйте Ваш список з табличними даними. Наскільки близькими є Ваші оцінки до табличних даних ?

бензин – нафта – вугілля – деревина – водень (газ) – етанол – дейтерій – уран

Класна вправа 1.2 – відповіді

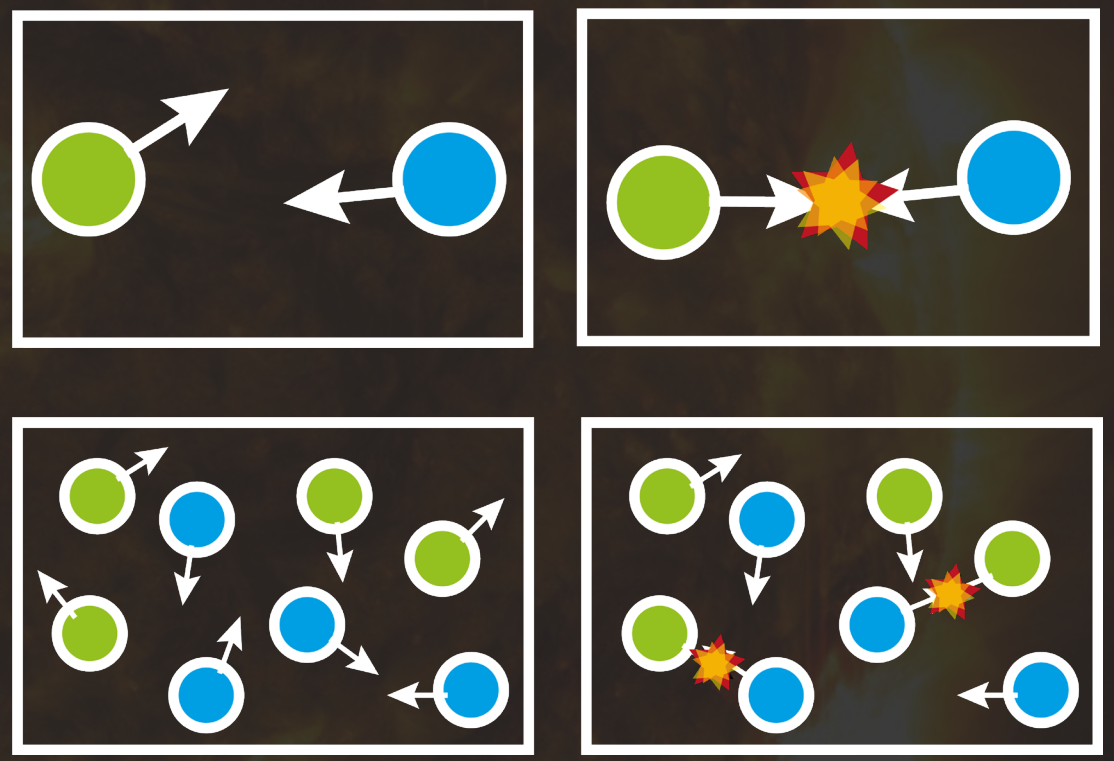
Від високої до низької густини:

1. Дейтерій
2. Уран
3. Вугілля
4. Нафта
5. Бензин
6. Етанол
7. Деревина
8. Водень (газ)

Графіка Сари Харман | Департамент енергетики США

Умови для синтезу

- Потрібні:
  - Високі температури (= високі швидкості)
  - Висока густина частинок
- А також:
  - Час утримання енергії

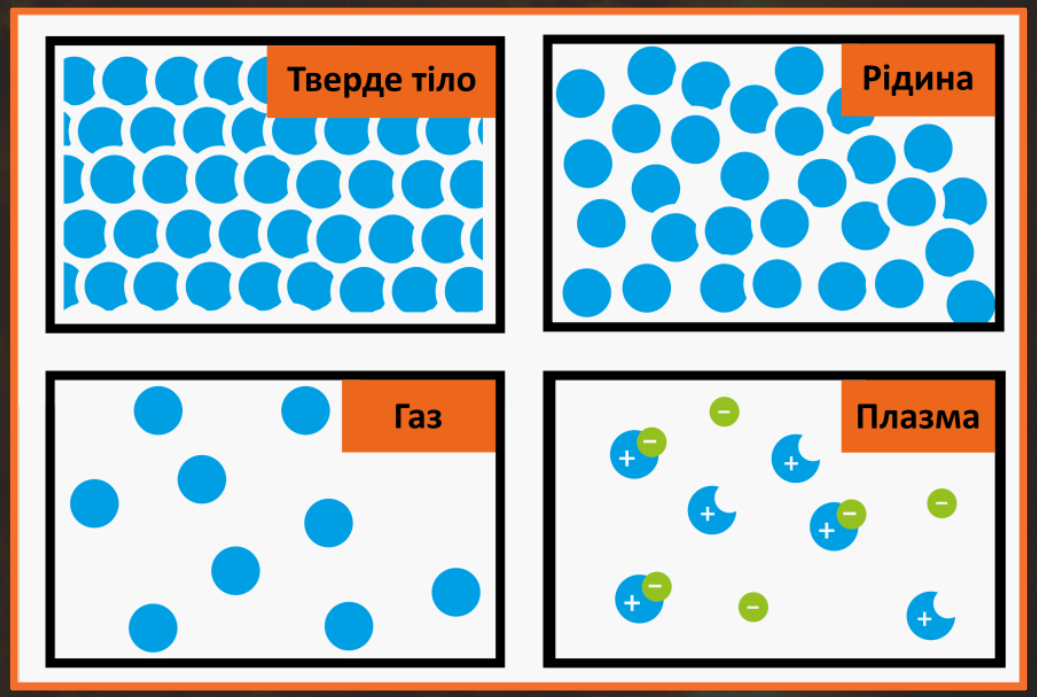


Умови для синтезу

- На Сонці: гравітація
  - Створює екстремальні умови та утримує енергію тривалий час
- На Землі: нам потрібен інший спосіб
  - Термоядерні реактори
  - Плазма!

1.3 Плазма

- ‘Четвертий’ стан речовини
- Іонізований газ
  - Містить рухомі заряджені частинки:
    - Додатно заряджені йони
    - Від’ємно заряджені електрони
  - Повністю іонізована плазма
    - Якщо вона складається виключно з іонів і електронів



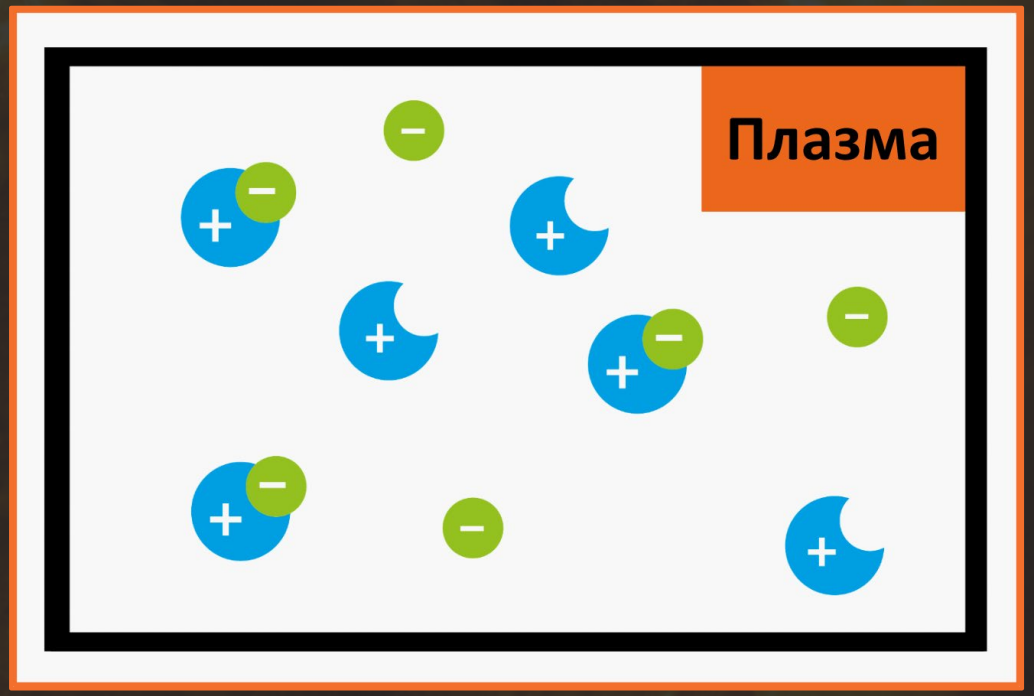
Іонізація проти зміни фазового стану

- **Іонізація**
- Газ
- Високі тиск і температура
- Пробій:
  рвуться зв’язки електрона *з* ядром
- Умови пробою
  - Енергія, вища за енергію іонізації

- **Зміна фазового стану**
- Тверде тіло/рідина/газ
- За певних тиску та температури
- Перехід:
  слабнуть зв’язки *між* атомами
- Умови переходу
  - Енергія, вища за порогову енергію

Провідність плазми

- Плазма складається з заряджених частинок, що відносно вільно рухаються
- Може проводити електричні струми
- Чутлива до
  - Електричні поля
  - Магнітні поля



Приклади плазми

- Найбільш поширений стан речовини у Всесвіті!

- Північне сяйво (Aurora Borealis)
- Неонове світло
- Блискавка
- Плазмовий розряд
- Сонце
- Всередині токамака чи стеларатора

Класна вправа 1.3 – широкий вибір

Отже, різниця між плазмою та газом полягає в тому, чи є основна маса частинок зарядженими чи нейтральними. Однак, плазма, як правило, світиться, тоді як гази часто не мають забарвлення та точно не світяться. То чому ж плазма світиться?

а) За достатньо високих температур будь-яка речовина випромінює, отже, плазма природно світиться за високих температур.

б) Заряджені частинки рухаються в плазмі майже вільно. І коли вільний електрон і йон стикаються, виникає можливість для рекомбінації. В цьому процесі рекомбінації заряджені частинки об’єднуються в нейтральну частинку, внаслідок чого випромінюється світло. Якщо випромінюване світло належить до видимого спектру, плазма світиться.

в) Світло випромінюється в деяких ядерних реакціях. Якщо випромінюване світло належить до видимого спектру, плазма світиться.

Класна вправа 1.3 – відповіді

Отже, різниця між плазмою та газом полягає в тому, чи є основна маса частинок зарядженими чи нейтральними. Однак, плазма, як правило, світиться, тоді як гази часто не мають забарвлення та точно не світяться. То чому ж плазма світиться?

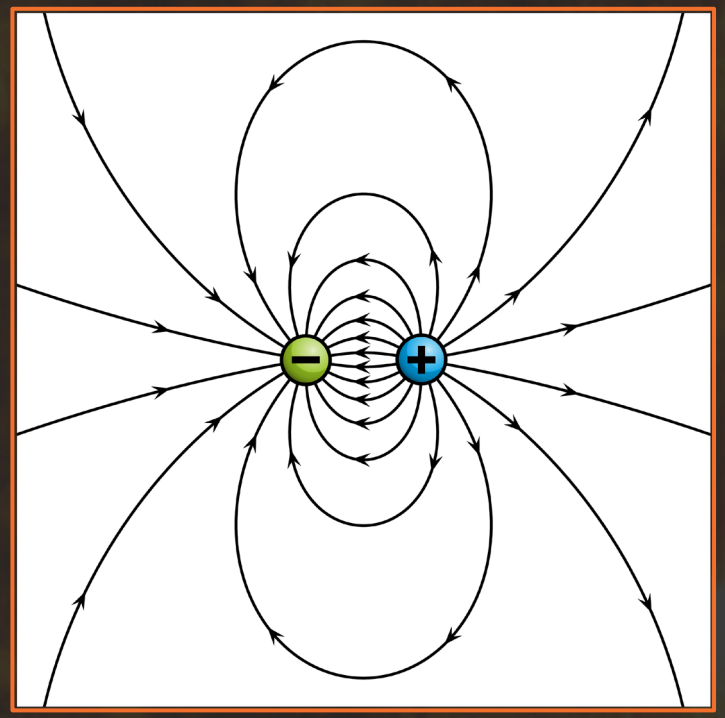
а) За достатньо високих температур будь-яка речовина випромінює, отже, плазма природно світиться за високих температур.

б) Заряджені частинки рухаються в плазмі майже вільно. І коли вільний електрон і йон стикаються, виникає можливість для рекомбінації. В цьому процесі рекомбінації заряджені частинки об’єднуються в нейтральну частинку, внаслідок чого випромінюється світло. Якщо випромінюване світло належить до видимого спектру, плазма світиться.

в) Світло випромінюється в деяких ядерних реакціях. Якщо випромінюване світло належить до видимого спектру, плазма світиться.

Електричне поле

- Вплив заряду на оточуюче середовище
- Сильне поле близько до заряду

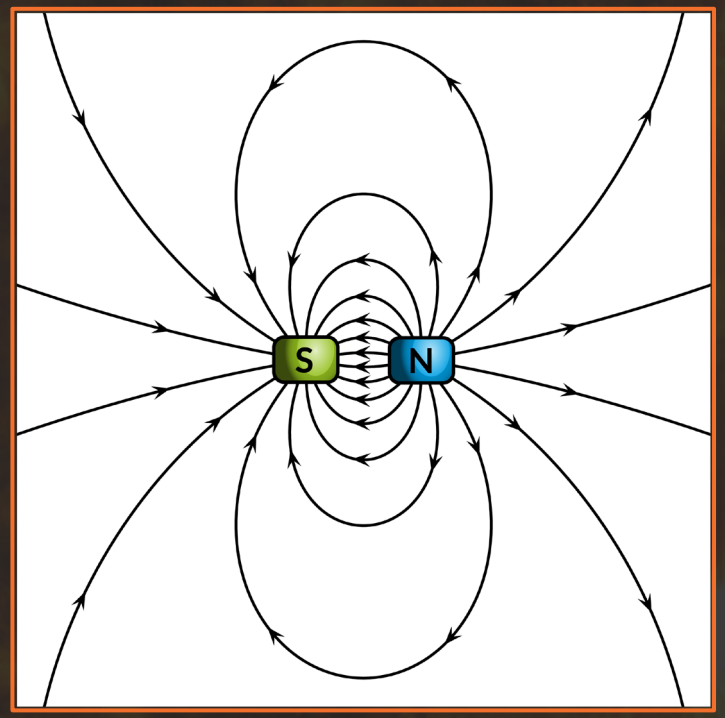


- Силові лінії електричного поля
  - Уявні
  - Ніколи не перетинаються
  - Густі = сильні!
  - Від + до -

Магнітне поле

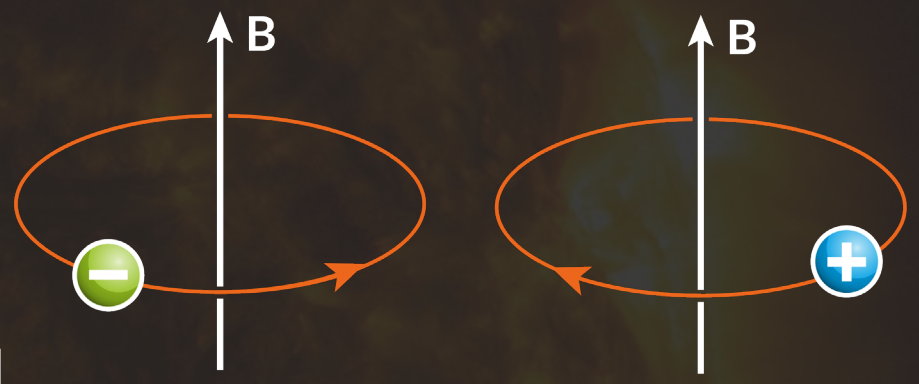
- Вплив заряду на оточуюче середовище
- Сильне поле близько до полюсів

- Силові лінії магнітного поля
  - Уявні
  - Ніколи не перетинаються
  - Густі = сильні!
  - Від N до S
  - Петлі завжди є замкненими

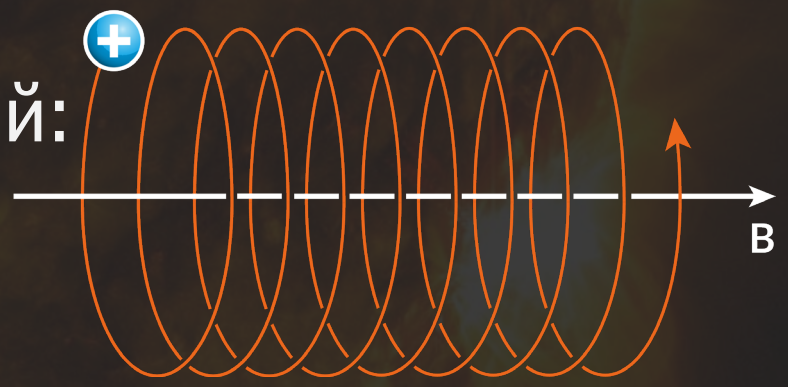


Заряди в магнітному полі

- Обертання
  - Електричний заряд взаємодіє з магнітним полем
  - Круговий рух навколо силових ліній



- Якщо частинка має складову швидкості вздовж напрямку силових ліній:
  - Гвинтова траєкторія навколо силових ліній



Утримання плазми

- Навіщо потрібні електричні та магнітні поля в синтезі?

- Для утримання плазми!
- Плазма → висока температура та швидкі частинки

- Коли частинки досягають стінки реактора, стінка тане
- Магнітне поле можна використати, аби не дати частинкам торкнутися стінки!

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?

Класна вправа 1.4 – відповіді

а) Якщо електричний струм виходить з площини рисунка, магнітне поле обертається проти стрілки годинника.

б) Магнітне поле всередині кільця спрямоване з площини рисунка. Магнітне поле ззовні кільця спрямоване в площину рисунка.

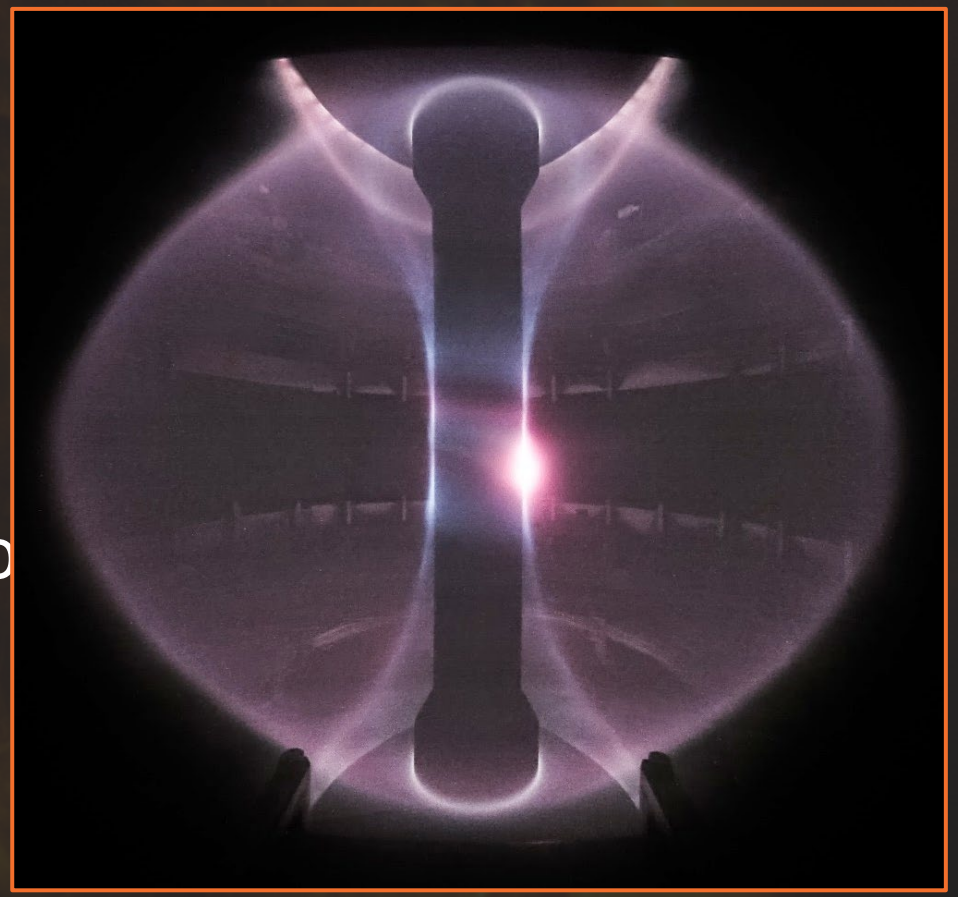
в) Оскільки частинки мають протилежний знак заряду та протилежний напрямок руху, магнітне поле має однаковий напрямок для обох частинок.

г) Магнітне поле завжди спрямоване перпендикулярно напрямку електричного струму.

1.4 Будова термоядерного пристрою

- Термоядерний синтез з магнітним утриманням (СМУ)
  1. Плазму утримують за допомогою магнітного поля
  2. Плазму гріють до термоядерних температур

- Якнайширше відомий тип термоядерного пристрою:
- Токамак
- Російською:
  “Тороїдна камера з магнітними котушками”



MAST (Mega Ampere Spherical Tokamak) | Джерело: CCFE

Токамак

- Має форму бублика (тор)
  - Всередині бублика: плазма
  - Навколо бублика: магнітні котушки
- Геометрія
  - великий радіус R
  - малий радіус a
  - полоїдний кут θ
  - тороїдний кут φ

Джерело: зображення зі сховища Powerpoint

Класна вправа 1.5

Різні токамаки та тороїдні термоядерні пристрої мають різне ‘аспектове співвідношення’, тобто частку великого радіусу R до малого радіусу a. Внаслідок цього форми цих торів можуть дещо 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 1.5 – відповіді

а) Бублик

б) Бублик стає більш схожим на кулю, малий радіус не може бути більшим за великий радіус (інакше то буде не тор!)

в) Якщо дозволити малому радіусу бути більшим за великий, то в граничному випадку матимемо кулю

г) Тор змінює форму

д) Малий радіус не може бути більшим за великий. Якщо вони дорівнюють один одному, то аспектове співвідношення сягає свого мінімуму, тобто дорівнює одиниці.

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?

Класна вправа 1.6 – відповіді

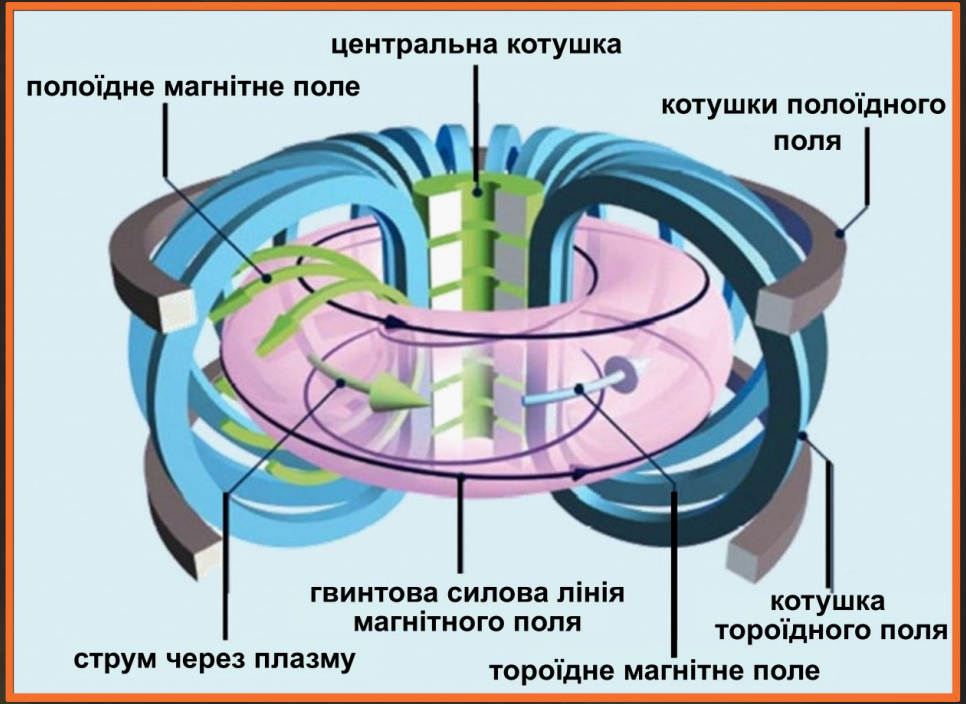
Полоїдний переріз

Тороїдний переріз

Магнітні котушки токамака

- Три основні магнітні системи:

- Котушки тороїдного поля
- Центральна котушка
- Котушки полоїдного поля



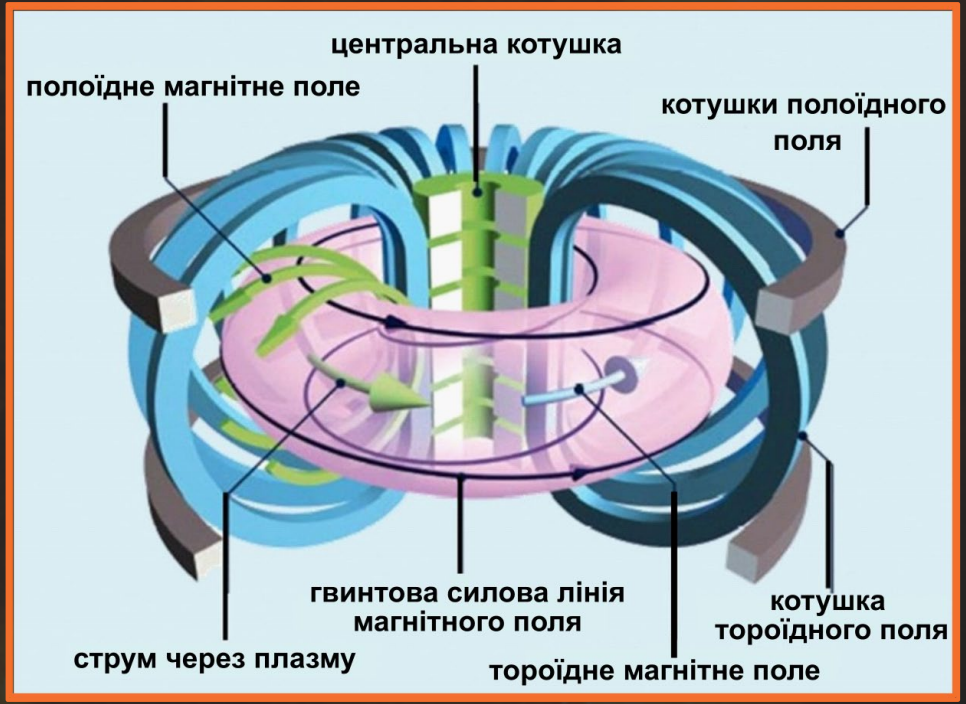
Джерело: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

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.



Джерело: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Класна вправа 1.7 – відповіді

а. Котушки тороїдного поля – лежать у полоїдному перерізі токамака

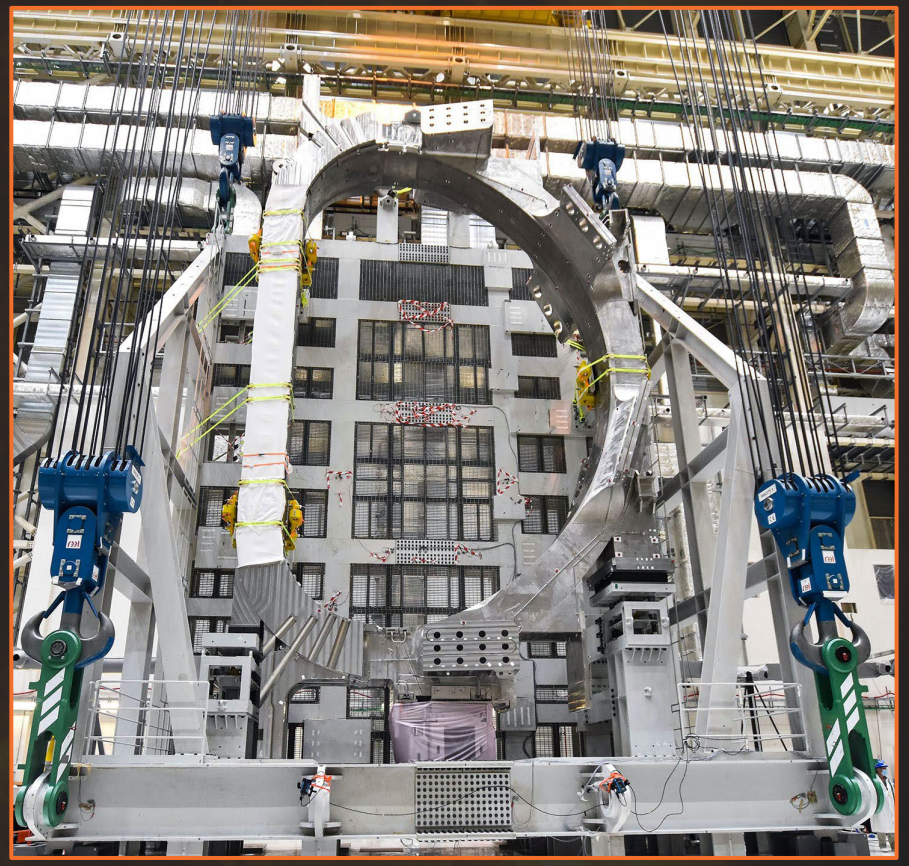
б. Цетральна котушка – лежить у дірці бублика, тобто в центрі

Котушки полоїдного поля – лежать нагорі та внизу тора

Котушки тороїдного поля

- Найсильніше поле в токамаці
- Мають форму літери D
- Обгортають бублик

- Додаткові магнітні поля є необхідними для стійкого утримання



Джерело: ITER

Центральна котушка

- Зібраний набір котушок, розташований у дірці бублика
- Її поле використовують непрямо:
  її магнітна індукція створює електричний струм в плазмі

- Цей струм створює полоїдне магнітне поле

- Тороїдне + полоїдне поля → гвинтове магнітне поле
- Гвинтове поле є необхідним для стійкого утримання

Магнітні властивості

- Напруженість магнітного поля B
  - Що густіші силові лінії магнітного поля, то більше значення B

$$\Phi = B \cdot A \cos(\alpha)$$

- Магнітний потік Φ
  - ‘Фі’
  - Число силових ліній, що перетинають поверхню
  - Силові лінії є перпендикулярними до поверхні

Електрорушійна сила (ЕРС)

- Залежить від швидкості зміни магнітного потоку
- Обчислюють так:

$$\text{Число мотків котушки} \times \text{зміна магнітного потоку}$$

- ЕРС: ε (епсілон)
- Використовують при розрахунку трансформаторів

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

ЕРС & магнітна індукція

ЕРС протидіє зміні магнітного потоку

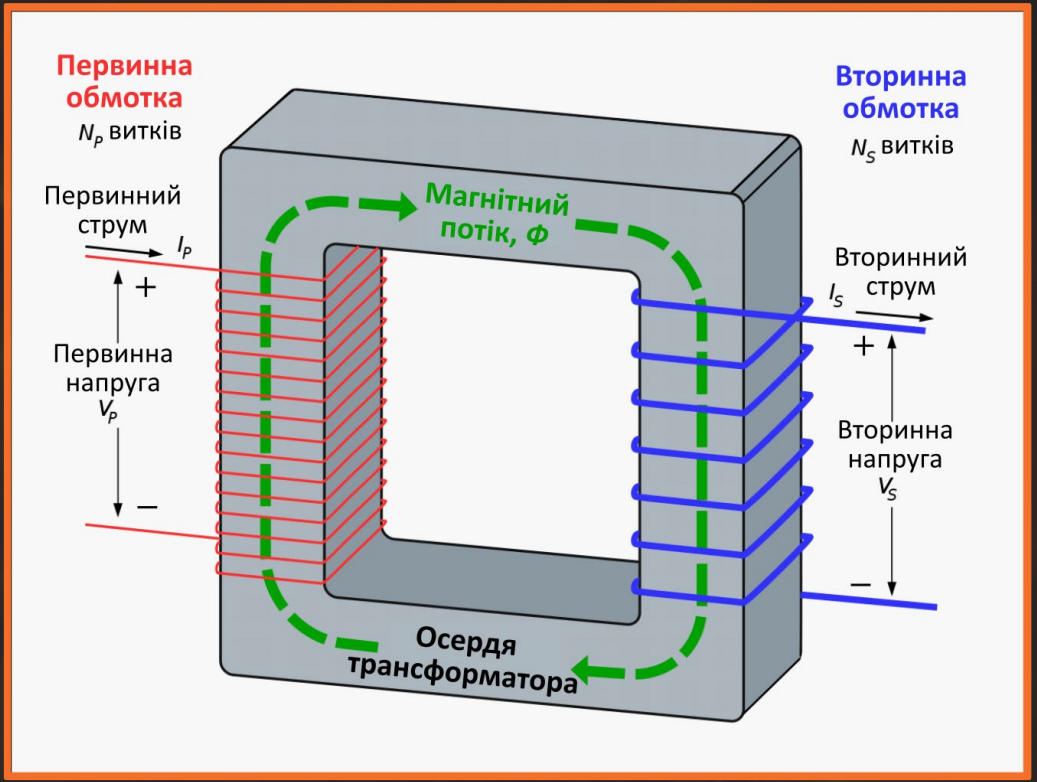
1. Створюючи напругу
2. Напруга спричиняє струм
3. Струм створює протилежне магнітне поле

Отже, протилежне магнітне поле створюється ЕРС: Магнітна індукція

В такий спосіб, змінюючи струм в одному витку, можна збуджувати струм в іншому витку, коли ці витки не є з’єднаними!

Трансформатори

- Складається з двох котушок
  - Первинна котушка
  - Вторинна котушка
  - Різне число витків
  - Базується на магнітній індукції



Нагадування!

Потужність = Напруга × Струм $P = V \times I$

- Ідеальний трансформатор
  - Немає втрат потужності: $P_{coil1} = P_{coil2}$

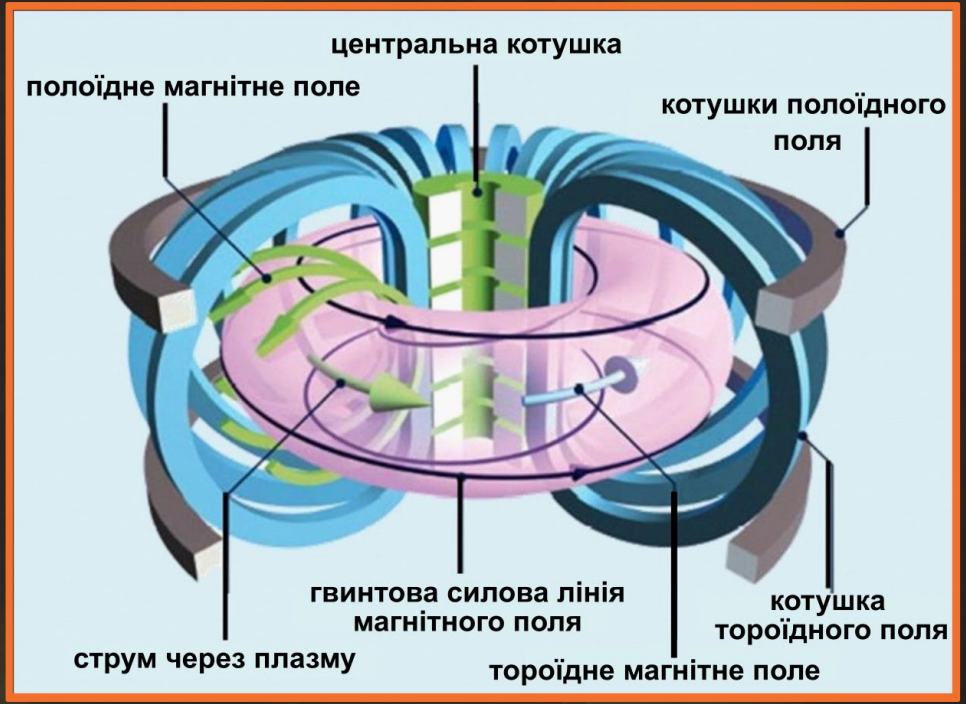
Джерело: By BillC at the English-language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://tinyurl.com/ye55fpxv

Котушки полоїдного поля

- Допомагають керувати формою та положенням плазми
  - Є необхідними для підтримання стабільності плазми

- Отже, ці котушки не створюють полоїдне поле!

(Центральна котушка створює полоїдне поле завдяки магнітній індукції)



Джерело: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Класна вправа 1.8

Використання індукції для створення струму в плазмі, який у свою чергу створює нам полоїдне поле, має одну дуже важливу ваду: воно робить токамак імпульсним пристроєм.

а) Як магнітна індукція спричиняє імпульсність експлуатації токамака?

б) Чому це створює проблему для термоядерного реактора?

Класна вправа 1.8 – відповіді

a) Індукція залежить від зміни магнітного потоку. Магнітний потік не може змінюватися безперервно. В якийсь момент магнітний потік сягає свого граничного значення. Тому центральну котушку експлуатують в імпульсному режимі, що спричиняє імпульсний режим токамака в цілому

b) В ідеалі, термоядерний реактор функціонує безперервно. Якщо він є імпульсним, існують проміжки часу, коли він не генерує енергію

Магнітне утримання

- Баланс тисків у токамаку
  - Зовнішній тиск: плазма
  - Внутрішній тиск: магнітне поле
    → сила Лоренца!
  - Рівновага!
  - Це дає можливість досягти синтезу на Землі!

Хочете довідатися більше про синтез?

Перегляньте наступні чотири модулі!

- Модуль 2: На шляху до термоядерної енергії
- Модуль 3: Керування плазмою
- Модуль 4: Термоядерні матеріали
- Модуль 5: Розгортання термоядерної енергетики

- Або почитайте літературу зі списку ‘Що ще почитати’ в файлі «читати учню»

Цей модуль було створено як частину освітніх матеріалів FuseNet для середньої школи. Його англомовну версію можна знайти за посиланням на сторінку FuseNet: https://fusenet.eu/education/materials

Більше інформації – за посиланням https://fusenet.eu

Автор: Sander Korteweg

Головні редактори: Sjoukje Tijmensen-Hoekstra, Sander Korteweg

Переклали українською: Юлія Волкова, Ігор Гірка

FuseNet

The European Fusion Education Network

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.