



Кубок ЛФИ

9.s05.e05

*Каждый из нас горит и жжёт как умеет.
Это роднит нас и это нас объединяет!
Дороги меняют цвет*

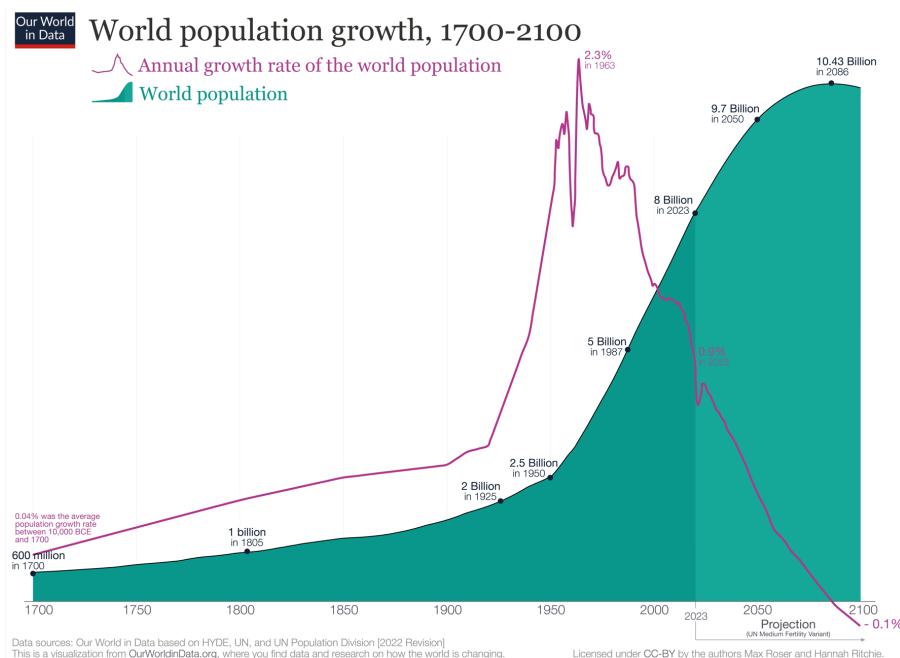
Синтез

Среди нескольких старых книг на столе кабинета лежала папка с пометкой «Разработки Ганса Зингера».

Сильный порыв ветра в незакрытое окно обсерватории перевернул титульную страницу...

Часть 1. Ядерные реакции (3 балла)

Согласно общедоступным данным в 20 веке начался активный рост населения нашей планеты.



- (0 баллов) По графику определите, в каком году была пиковая скорость роста населения, т.е. процент прироста населения за год был максимален, и чему она равнялась в процентах.
- (0,5 балла) Считая, что с 2023 года скорость роста населения будет равна пиковой скорости роста в 20 веке, определите, через сколько лет на каждом квадратном метре суши будет стоять один человек. Считайте, что радиус Земли 6400 км, а доля суши от общей поверхности планеты равна $1/3$.

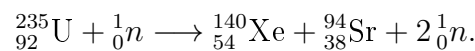
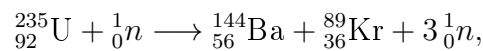
В связи с быстрым ростом населения земного шара так же быстро растет и энергопотребление. На сегодняшний день человечество потребляет примерно $Q = 10^{21}$ Дж в год. Возобновляемые источники энергии (ветро, гидро, солнечная энергетика и так далее) способны обеспечить до $3Q$ в год, но, к сожалению, они не решают энергетические проблемы. Полученная с их помощью энергия оказывается достаточно дорогой и требует дополнительных условий (наличие ветра, большого количества солнечных дней в году и т. д.). Мощность, генерируемая этими источниками, очень сильно меняется во времени (например, ночью солнечная панель не вырабатывает энергию), что требует создания огромных дорогостоящих хранилищ энергии.

Исторически человечество научилось очень активно использовать природные ископаемые: нефть, уголь, газ и т. д. К сожалению, их запасы ограничены и неравномерно распределены по планете. Например, запасы нефти порядка $15Q$, угля — $150Q$. Кроме того, сжигание углеводородов ведет к выбросу парниковых газов и влияет на климат.

Помимо этого, химические источники энергии обладают низкой энергоэффективностью.

3. (0,5 балла) Оцените **энергоэффективность** сжигания химического топлива, т. е. количество энергии (в эВ) на один нуклон, выделяющееся при сгорании одного килограмма угля ^{12}C . Считайте, что его удельная теплота сгорания 31 МДж/кг.

По этим причинам человечество ищет альтернативные источники энергии. В ходе исследований по ядерной физике было установлено, что ядра одних элементов могут превращаться в ядра других. Например:



4. (0,5 балла) Используя понятие дефекта масс, оцените энергоэффективность каждой реакции.
5. (0 баллов) На сколько порядков энергоэффективность ядерного топлива больше энергоэффективности химического?

В ходе реакций деления часто образуются нестабильные изотопы, в результате распада которых происходит цепочка ядерных превращений.

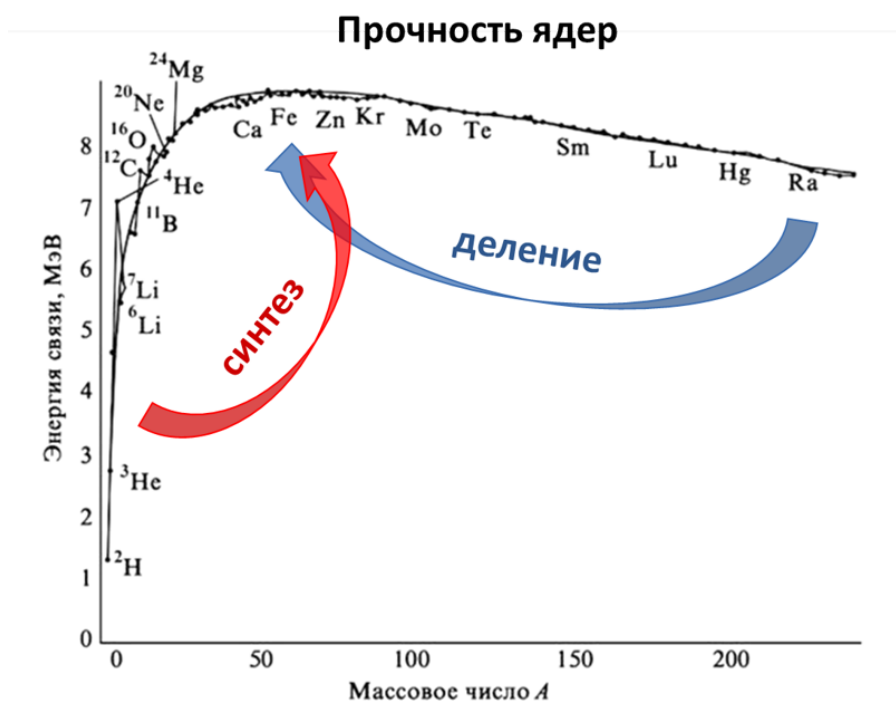
6. (1,5 балла) Рассмотрим возможные цепочки распадов ядра $^{235}_{92}\text{U}$, в конце которых образовалось ядро $^{207}_{82}\text{Pb}$. Будем считать, что для тяжелых ядер возможны только три типа реакций: альфа распад, бета-минус распад и протонная эмиссия. Считая, что их вероятности относятся как $20 : 10 : 1$ соответственно, определите наиболее вероятный набор продуктов распада.

Замечание. В реальности протонная эмиссия еще на порядок менее вероятна, чем в приведенном примере, и происходит с искусственно созданными изотопами химических элементов.

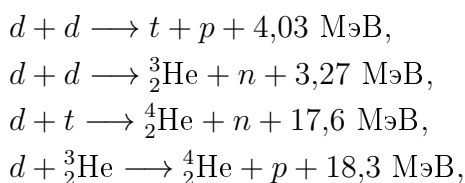
Из всего вышесказанного следует, что ядерная энергия решает проблемы человечества с обеспечением энергоресурсами, однако, при работе ядерных электростанций происходит накопление радиоактивных отходов и возможны техногенные катастрофы, что вынуждает продолжать поиск альтернативных источников энергии.

Часть 2. Термоядерный синтез (4 балла)

Со временем было установлено, что энергия может выделяться не только при реакциях деления тяжелых ядер, но и при синтезе легких элементов из начала таблицы Менделеева. Наглядная демонстрация этого факта приведена на рисунке, где изображена зависимость энергии связи ядер от атомного номера. Из него видно, что элементы, находящиеся левее Fe, стремятся к синтезу, а находящиеся правее — к делению.



С практической точки зрения наибольший интерес представляют следующие реакции синтеза:



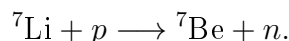
где d , t — это ядра дейтерия и трития. Важно отметить, что первая и вторая реакции равновероятны.

1. (0 баллов) Найдите энергоэффективность реакций термоядерного синтеза.

В отличие от полезных ископаемых и ядерного топлива, дейтерий широко распространен в природе и содержится в воде. Один атом дейтерия приходится на 6500 атомов водорода.

2. (0,5 балла) Сделайте оценку снизу для количества бензина, которое надо сжечь, чтобы получить энергию, равную той, что выделится в реакции синтеза на дейтерии, выделенном с одного стакана воды (0,33 л). Удельная теплота сгорания бензина 44 МДж/кг.

Рассмотрим одну из возможных реакций синтеза:



В этой реакции ядро лития неподвижно и бомбардируется протонами. Такая ядерная реакция имеет порог $E_{\text{п}} = 1,88$ МэВ, т. е. может идти только тогда, когда кинетическая энергия протона равна или превосходит эту величину. Считайте, что массы лития и бериллия одинаковы и в 7 раз больше массы протона и нейтрона. Массы протона и нейтрона считайте равными $1 \text{ а.е.м} = 940 \text{ МэВ}/c^2$, где c — скорость света. Импульс выразите в МэВ/с.

3. (0,5 балла) Считая столкновение протона и лития центральным, найдите импульс нейтрона, если энергия протона $2E_{\text{п}}$.
4. (0,5 балла) При каком значении энергии налетающего протона возможен процесс, когда нейтрон стоит на месте?
5. (1,0 балл) Столкновение протона и лития нецентральное. При каком значении энергии налетающего протона максимальный угол, под которым может начать двигаться нейтрон по отношению к скорости протона будет равен $\pi/6$?
6. (1,0 балл) Энергия протона такая же, как и в предыдущем пункте. Известно, что в направлении φ со скоростью протона детектируют нейтроны с двумя значениями энергии. Один тип нейтронов обладает энергией E_1 . Чему равно второе значение энергии E_2 ?
7. (0,5 балла) Оцените энергию кулоновского взаимодействия протона и ядра лития при их сближении вплотную друг к другу. Классический радиус ядра атома равен $1,4 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{A}$ м, где A — это массовое число. Считайте протон точечным зарядом.

Для протекания реакций ядерного синтеза нужно преодолеть кулоновский барьер отталкивания взаимодействующих частиц. Поэтому для реализации управляемого термоядерного синтеза (УТС) предпочтительно использовать изотопы водорода, которые имеют минимальный заряд среди всех других ядер. Но даже для них реакции термоядерного синтеза могут идти только при очень высоких температурах, на уровне десятков кэВ ($1 \text{ эВ} = 11604 \text{ К}$). При таких температурах любое вещество переходит в состояние плазмы.

При создании реактора УТС необходимо решить две основных проблемы. Первая состоит в том, чтобы стационарно удерживать плазму с необходимыми параметрами в течение достаточного длительного времени, а вторая — в том, чтобы поток тепла и частиц не повреждали стенки реактора. Оба этих вопроса решаются при помощи применения магнитных полей и анализируются в задаче 11 класса.

В задаче 9го класса мы будем знакомиться с понятием плазмы на примере самостоятельного газового разряда. Процесс поддержания разряда задействует механизм положительной обратной связи, который в том или ином виде встречается в любом генераторе, в том числе и в термоядерной электростанции (да, она тоже генератор).

Часть 3. Самостоятельный разряд (3 балла)

Рассмотрим качественно процесс возникновения самостоятельного газового разряда.

Пространство между двумя плоскими проводящими электродами (катодом и анодом), находящихся на расстоянии d друг от друга, заполнено газом, а сами электроды подключены к источнику постоянного напряжения.

Процесс формирования газового разряда состоит из двух частей. Первая – формирования электронами в процессе ионизации тока электронов и ионов в среде заполняющее пространство между электродами. Вторая часть – выбивание ионами новых вторичных электронов из катода.

Рассмотрим каждый из этих процессов более детально.

Пусть между электродами в силу каких-то причин образовался электрон. Под действием электрического поля, он начинает разгоняться и двигаться от катода к аноду и в процессе движения сталкиваться с молекулами газа, ионизуя их. Образовавшиеся новые электроны и ионы также придут в движение к аноду и катоду соответственно. При этом электроны будут образовывать все новые и новые электронно-ионные пары, а ионы этого делать не будут (т.к. их скорость, которая является в этом процессе одним из определяющих параметров, будет существенно меньше, чем скорость электронов). По этой причине, если при ударе ионов о катод ничего не будет происходить, то через какое-то время процесс протекания тока в газе прекратится, т.к. все электроны достигнут анода, ионы — катода, а новые заряды не будут образовываться.

Однако при попадании иона на катод с некоторой вероятностью происходит выбивание электронов, что заново запускает процесс образования электронно-ионных пар в газе.

В этом разделе вам предлагается исследовать данный процесс.

Будем называть коэффициентом объемной ионизации α количество электронно-ионных пар, образующихся на единице длины пути электрона, а коэффициентом вторичной ионно-электронной эмиссии γ – среднее количество электронов, выбиваемых одним ионом из катода. Внешней ионизацией мы будем называть некоторый процесс, который создает первичные электроны. Это могут самые разные процессы: ультрафиолетовое или γ излучение, проходящее через газ, дополнительный проводник, создающий небольшой ток электронов и так далее. В нашем рассмотрении мы будем считать, что этот процесс локализован в области катода.

1. (0,5 балла) Известно, что электронный ток в области катода равен I_{ek} , в который входит ток внешнего ионизатора и ток вторичных электронов, выбитых ионами с катода. Коэффициент объемной ионизации α известен и постоянен во всем объеме между электродами. Найдите электронный ток в области анода.
2. (0,5 балла) Определите, чему равен ионный ток в области катода I_{ik} .
3. (1 балл) Выразите электронные токи катода и анода I_{ek} и I_{ea} через ионизационный ток I_i .

Пробоем называем ситуацию, когда электронный ток I_{ea} бесконечно нарастает при сколько угодно малом ионизационном токе. Если после возникновения пробоя убрать внешний ионизатор и ток не прекращается, то разряд называют самостоятельным: ионизация поддерживается процессами в самом разряде.

4. (1 балл) Определите, при каком условии на α , γ и d произойдет пробой и разряд станет самостоятельным?

Замечание. Вам может быть полезен следующий математический факт:

$$(e^{\alpha x})' = \alpha e^{\alpha x}$$

Первая подсказка — 29.05.2024 20:00 (МСК)

Вторая подсказка — 31.05.2024 15:00 (МСК)

Окончание пятого тура — 02.06.2024 18:00 (МСК)

Разбор пятого тура — 02.06.2024 18:00 (МСК)