

# Плазма

Часть 1

## Искусственно созданная плазма

Учитель физики Яковлева Татьяна Юрьевна  
Школа № 377  
Санкт - Петербург

Философы античности, начиная с Эмпедокла, утверждали, что мир состоит из четырёх стихий: земли, воды, воздуха и огня. Это положение, с учётом некоторых допущений, укладывается в современное научное представление о четырёх агрегатных состояниях вещества, причем плазма, очевидно, соответствует огню.

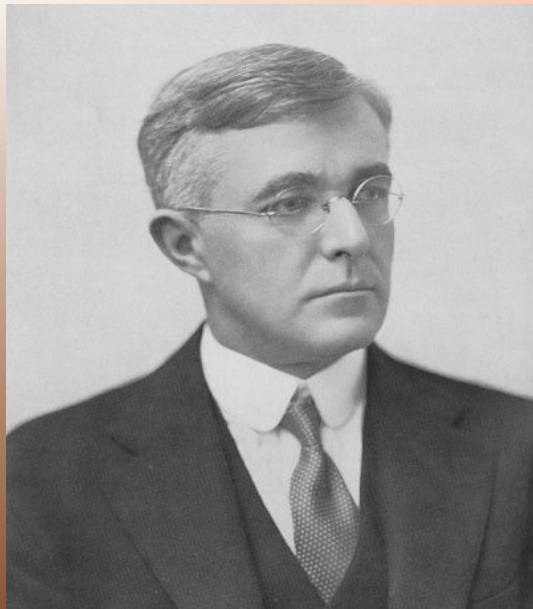


**Эмпедокл** из Акрагáнта (др.-греч. Ἐμπεδοκλῆς) (ок. 490 до н. э., Агридженто — ок. 430 до н. э.) — древнегреческий философ, врач, государственный деятель, жрец.

Английский физик и химик **Уильям Крукс** (Crookes) (1832 -1919) одним из первых начал систематическое изучение распространения электрического разряда в стеклянных трубках, наполненных разреженными газами. Трубки испускали яркое свечение, будучи подключены к высоковольтной обмотке индукционной катушки. Крукс установил, что характер разряда в трубке меняется в зависимости от давления, и разряд полностью исчезает при высоком вакууме. При этом **Крукс впервые предположил существование четвёртого агрегатного состояния веществ – плазменного. В 1879 г. он писал:** «Явления в откачанных трубках открывают для физической науки новый мир, в котором материя может существовать в четвёртом состоянии».



Другие три агрегатные состояния вещества - твёрдое, жидкое и газообразное.



**Термин «плазма»** был введён в **1928 г.** в работе американского химика **Ирвинга Ленгмюра (Irving Langmuir)** (1881–1957) в связи с исследованием разряда в электронных лампах, наполненных ионизованным газом низкого давления.

Когда к газовому промежутку прикладывается высокое напряжение, происходит пробой: **газ частично ионизуется**, и, образовавшиеся электроны и ионы, двигаясь в направлении разнополярных электродов, создают разрядный ток.

В наше время газовый разряд можно повсеместно наблюдать в лампах дневного света, а также в сварочных дугах и грозových разрядах.

**Пла́зма** — (от греческого *πλάσμα* «вылепленное», «оформленное») — частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации свободных положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы (квазинейтральный).

Слово «ионизированный» означает, что от электронных оболочек значительной части атомов или молекул отделён по крайней мере один электрон.



Газы при нормальных условиях являются хорошими **изоляторами**. Газ **становится проводником**, когда часть его молекул **ионизируется**. Для этого газ надо подвергнуть действию какого-либо **ионизатора**.

**Ионизация** газов может происходить под действием различных **факторов**:

- **нагрева** газа (столкновения быстрых молекул),
- коротковолнового электромагнитного **излучения** (ультрафиолетовое, рентгеновское и  $\gamma$ -излучения),
- **бомбардировки** газа быстрыми заряженными частицами (потoki электронов, протонов,  $\alpha$ -частиц),
- и т. д.

Одновременно с процессом ионизации всегда идет обратный процесс — рекомбинация.

# Состав плазмы

В наиболее распространенном случае плазма состоит из электронов и положительно заряженных ионов.

*Это тоже плазма:*

- частично (неполностью) ионизированная плазма – присутствует значительная доля нейтральных атомов (или молекул);
- заряженная (не-нейтральная) плазма – суммарный положительный заряд сильно отличается от суммарного отрицательного;
- электронно-дырочная плазма в полупроводниках – подвижные квазичастицы, ионы физически в решётке не перемещаются;
- пылевая плазма – макрочастицы разной массы и заряда;
- электрон-позитронная релятивистская плазма в астрофизике (позитрон — античастица электрона);
- и т. д. Далее будем рассматривать квазинейтральную электрон-ионную плазму.

# Степень ионизации плазмы.

Степень ионизации плазмы  $\alpha$  определяется отношением числа ионизированных атомов  $N_i$  к их общему числу  $N$  :

$$\alpha = (N_i / N) \cdot 100\%$$

В зависимости от степени ионизации плазма подразделяется на:

**слабо ионизированную** ( $\alpha$  — доли процента) — слабо ионизированной плазмой является **ионосфера** — верхний слой земной атмосферы;

**частично ионизированную** ( $\alpha$  — несколько процентов) - искусственно созданной плазмой различной степени ионизации является плазма **в газовых разрядах, газоразрядных лампах;**

**полностью ионизированную** ( $\alpha = 100\%$ ) — в состоянии полностью ионизированной плазмы находятся **Солнце, горячие звезды**. Солнце и звезды представляют собой гигантские сгустки горячей плазмы, где температура очень высокая, порядка  $10^6$  —  $10^7$  К.



# Свойства плазмы:

- **Квазинейтральность**

Важнейшей особенностью плазмы является ее квазинейтральность, это означает, что **концентрации положительных и отрицательных заряженных частиц, из которых она образована, оказываются почти одинаковыми, и суммарный электрический заряд плазмы приблизительно равен нулю.**

# Свойства плазмы:

- **Большая электропроводность**

Ток в плазме создается в основном электронами, как наиболее подвижными частицами.

Между заряженными частицами плазмы действуют **кулоновские силы**, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц.

- **Свечение**

- **Вибрационное состояние плазмы, вызванное колебаниями электронов с большой частотой ( $\sim 10^8$  Гц)**

# Свойства плазмы:

## • **Сильное взаимодействие с магнитным и электрическим полями**

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей.

Поэтому **любое нарушение электрической нейтральности** отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц с зарядом одного знака, **быстро исчезает**. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы так, что электрическая нейтральность восстанавливается и электрическое поле становится равным нулю.

# Свойства плазмы:

- **«Коллективное» одновременное взаимодействие громадного числа частиц**, благодаря чему плазма ведет себя как упругая среда.

Плазма обладает **достаточной плотностью**: заряженные частицы должны находиться достаточно близко друг к другу, чтобы каждая из них взаимодействовала с целой системой близкорасположенных заряженных частиц. Благодаря этому, **наряду с хаотическим тепловым движением, частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных движениях**. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

Все эти свойства определяют качественное своеобразие плазмы, позволяющее считать ее особым, четвертым состоянием вещества

Сила, действующая на заряженную частицу со стороны **электрического поля**, равна:

→ →

$$F_{\text{эл}} = qE,$$

где  $E$  — напряженность электрического поля.

Если заряд  $q$  положительный, то векторы  $F$  и  $E$  направлены в одну и ту же сторону; если заряд  $q$  отрицательный, эти векторы направлены в противоположные стороны.



Сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны **магнитного поля**, равна:

$$F_{\text{магн}} = |q| v B \sin \alpha,$$

где  $F_{\text{магн}}$  - модуль силы,

$|q|$  - модуль электрического заряда,

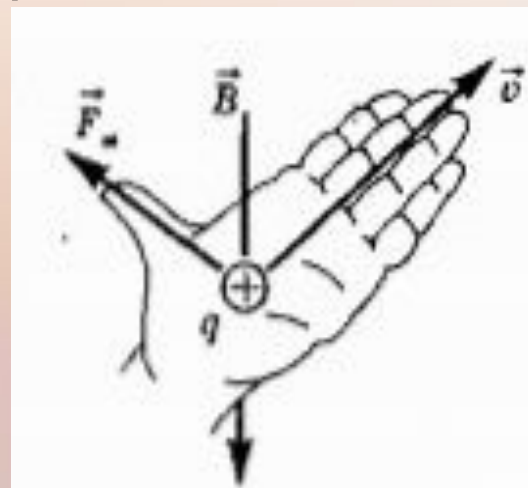
$v$  - скорость,

$B$  - вектор магнитной индукции,

$\alpha$  - угол между векторами скорости и индукции магнитного поля.

Направление силы  $F_{\text{магн}}$  для положительно заряженной частицы определяется правилом левой руки.

Если движется отрицательно заряженная частица, то пальцы левой руки следует располагать противоположно направлению вектора скорости (или воспользоваться правой рукой).



# Наиболее типичные формы плазмы

## Искусственно созданная плазма

- Вещество внутри люминесцентных (в том числе компактных) и неоновых ламп
- Плазменные ракетные двигатели
- Газоразрядная корона озонового генератора
- Исследования управляемого термоядерного синтеза
- Электрическая дуга в дуговой лампе и в дуговой сварке
- Плазменная лампа
- Дуговой разряд от трансформатора Теслы
- Воздействие на вещество лазерным излучением
- Светящаяся сфера ядерного взрыва

## Земная природная плазма

- Молния
- Огни святого Эльма
- Ионосфера
- Северное сияние
- Языки пламени (низкотемпературная плазма)

## Космическая и астрофизическая плазма

- Солнце и другие звезды (те, которые существуют за счет термоядерных реакций)
- Солнечный ветер
- Космическое пространство (пространство между планетами, звездами и галактиками)
- Межзвездные туманности

# Классификация плазмы

Плазма обычно разделяется на:

- идеальную и неидеальную,
- низкотемпературную ( $T < 10^5$  K) и высокотемпературную ( $T \approx 10^8$  K),
- равновесную и неравновесную,

при этом довольно часто холодная плазма бывает неравновесной, а горячая равновесной.

**Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ионизации.**

Доля ионизированных атомов в газе очень быстро увеличивается с возрастанием температуры.

При  $T = 10000$  К ионизировано менее 10% общего числа атомов водорода, при  $T > 20000$  К водород практически полностью ионизирован.

Электропроводность и теплопроводность полностью ионизированной плазмы зависят от температуры.

**При высокой температуре полностью ионизированная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.**

(Сверхпроводник — материал, который при понижении температуры до  $T_{\text{сверхпроводимости}}$  приобретает сверхпроводящие свойства, т. е. сопротивление материала понижается до нуля).

# **Температуры плазмы - величины, характеризующие среднюю кинетическую энергию компонент плазмы.**

При разряде в плазме скорость электронов и ионов увеличивается под действием электрического поля, скорость же нейтральных частиц меняется мало, так как нагревание газа может быть незначительным. Поэтому приходится различать истинную температуру плазмы (определяемую энергией движения нейтральных частиц) и электронную температуру, определяемую энергией электронов, - одна может сильно отличаться от другой.



**Значения температуры компонент плазмы, электронной и ионной температур  $T_e$  и  $T_i$  могут сильно отличаться друг от друга.**

В частично ионизованной плазме обычно ионная температура  $T_i$  совпадает с температурой тяжёлых частиц (атомов и молекул). Исключение составляет случай, когда массы тяжёлых частиц сильно различаются.

В газовом разряде, например, основным источником энергии является джоулев нагрев электронов, затем энергия передаётся тяжёлым частицам и выносится на стенки и электроды.

При низких давлениях, когда теплоперенос эффективен, электронная температура  $T_e$  обычно превышает температуру нейтральных частиц  $T_N$  на два порядка.

С ростом давления значения температур компонент плазмы в разряде сближаются и в пределе устанавливается локальное термодинамическое равновесие, характеризующееся общей температурой.

Температура, являющаяся мерой средней кинетической энергии частиц, выражается в электронвольтах, исходя из соотношения температуры и энергии частиц в одноатомном идеальном газе  $E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} mv^2 = eU = \frac{3}{2} kT$ .

**Принятая в физике плазмы**

**единица измерения энергии и температуры:**

**электронвольт**

В температурных единицах 1 эВ соответствует  $\sim 11600$  К

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \sim 11\,604,5 \text{ К} \sim 10^4 \text{ К}$$

Далее вместо  $kT$  будет использоваться  $T$  !!!

(физический смысл: избавляемся от постоянной Больцмана специальным выбором единицы измерения)

# Типичные параметры плазмы

Плазма	Концентрация (плотность) $n, \text{см}^{-3}$	Температура $T, \text{эВ}$
Магнитный Управляемый Термоядерный Синтез (УТС)	$10^{12} \div 10^{15}$	$10^3 \div 10^4$
Инерциальный УТС	$10^{20} \div 10^{24}$	$10^2 \div 10^3$
Газовый разряд	$10^6 \div 10^{12}$	$\sim 1$
Солнечный ветер	$\sim 5$	$10 \div 50$
Солнечная корона	$\sim 10^6$	$\sim 200$
Солнечная атмосфера	$\sim 10^{14}$	$\sim 1$
Солнечное ядро	$\sim 10^{25}$	$\sim 100$
Твёрдое тело (металл)	$10^{24} \div 10^{25}$	$\sim 0.01$
Ионосфера Земли	$\sim 5$	$10 \div 50$
Межзвёздный газ	$\sim 1$	$0,01 \div 1$

Управление движением плазмы в электрических и магнитных полях является основой ее использования как рабочего тела в различных двигателях для непосредственного **превращения внутренней энергии в электрическую — плазменные источники электроэнергии, магнитогидродинамические генераторы.**

Для космических кораблей перспективно использование маломощных **плазменных двигателей.**

Мощная струя плотной плазмы, получаемая в **плазмотроне**, широко используется для резки и сварки металлов, бурения скважин, ускорения многих химических реакций.

Проводятся широкомасштабные исследования по применению высокотемпературной плазмы для **создания управляемых термоядерных реакций.**

# Искусственно созданная плазма

- Вещество внутри люминесцентных (в том числе компактных) и неоновых ламп
- Плазменные ракетные двигатели
- Газоразрядная корона озонового генератора
- Исследования управляемого термоядерного синтеза
- Электрическая дуга в дуговой лампе и в дуговой сварке
- Плазменная лампа
- Дуговой разряд от трансформатора Теслы
- Воздействие на вещество лазерным излучением
- Светящаяся сфера ядерного взрыва



# Плазмотроны

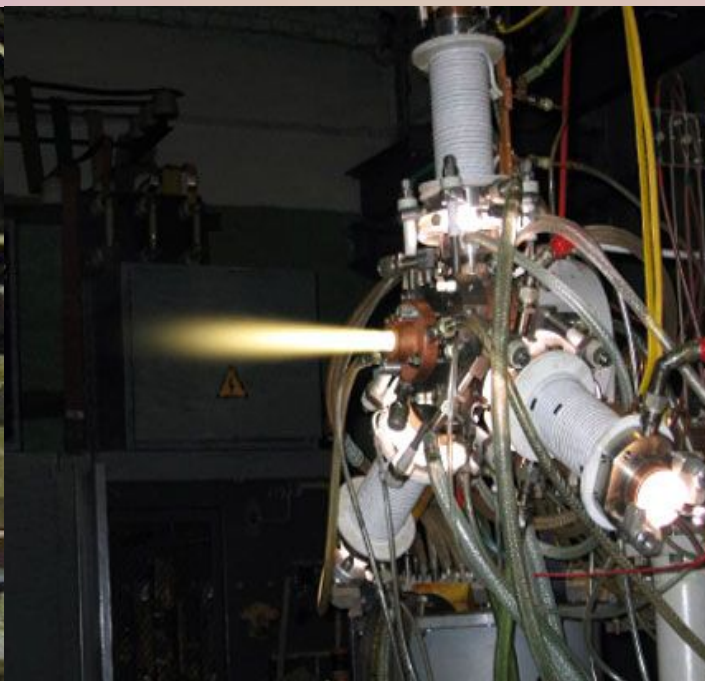
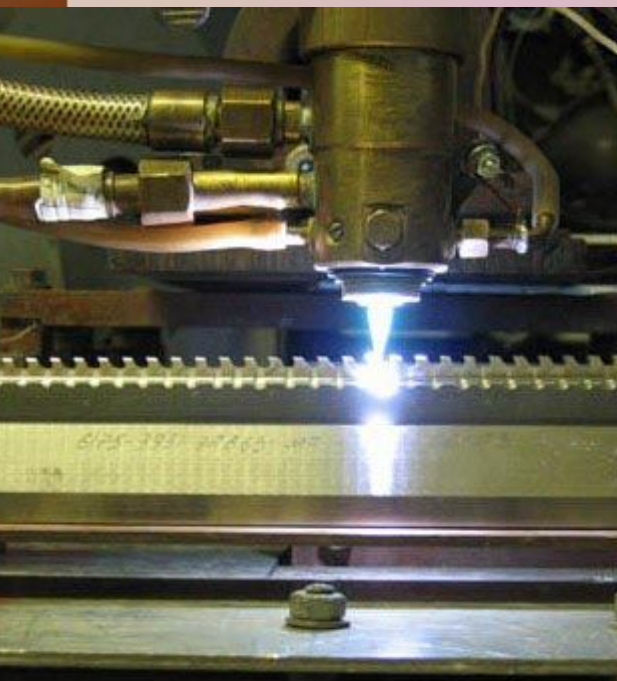
**Плазмотрон** — техническое устройство, в котором при протекании электрического тока через разрядный промежуток образуется плазма, используемая для обработки материалов или как источник света и тепла. Буквально, плазмотрон означает — генератор плазмы.

Первые плазмотроны появились в середине 20-го века в связи с появлением устойчивых в условиях высоких температур материалов и расширением производства тугоплавких металлов.

Другой причиной появления плазмотронов явилась элементарная потребность в источниках тепла большой мощности.

# Особенности плазмотрона как инструмента современной технологии:

- Получение сверхвысоких температур (до 150000 °С, в среднем получают 10000-30000 °С), не достижимых при сжигании химических топлив.
- Компактность и надежность.
- Легкое регулирование мощности, легкий пуск и остановка рабочего режима плазмотрона.



# Области использования плазмотронов

- сварка и резка металлов и тугоплавких материалов;
- нанесение ионно-плазменных защитных покрытий на различные материалы (плазменное напыление);
- нанесение керамических термобарьерных, электроизоляционных покрытий на металлы (плазменное напыление);
- подогрев металла в ковшах при мартеновском производстве;
- получение нанодисперсных порошков металлов и их соединений для металлургии;
- двигатели космических аппаратов;
- термическое обезвреживание высокотоксичных органических отходов;
- синтез химических соединений (например синтез оксидов азота и др., плазмохимия);
- накачка мощных газовых лазеров;
- плазменная проходка крепких горных пород;
- безмазутная растопка пылеугольных котлов электростанций;
- расплавление и рафинирование (очистка) металлов при плазменно-дуговом переплаве.

# Термоядерный реактор

**Термоядерный реактор – установка, где энергия получается за счёт самоподдерживающегося управляемого термоядерного синтеза. В земных условиях наиболее подходящими для такой установки являются реакции синтеза, осуществляемые изотопами водорода - дейтерием и тритием.**

Выход энергии на единицу массы ядерного вещества в реакциях синтеза может быть в несколько раз больше, чем в реакциях деления. Более того, дейтерий, с которого начинается цепочка реакций синтеза, является практически неисчерпаемым источником дешёвого термоядерного горючего (1 г дейтерия содержится в 60 литрах воды).



**Реализовать управляемый термоядерный синтез в земных условиях очень сложно** и до сих пор это не удалось. Для этого надо создать установку, в которой нагретое до огромных температур ( $10^8$  К), и поэтому представляющее собой **высокотемпературную плазму**, ядерное топливо необходимо достаточно долго удерживать в состоянии с высокой плотностью (как это имеет место внутри Солнца и других звёзд, которые представляют собой естественные термоядерные реакторы). Любой материал испарится при столь высоких температурах и, поэтому, не может быть использован, чтобы удержать высокотемпературную плазму в замкнутом объёме (в звёздах высокотемпературная плазма удерживается мощными гравитационными силами).

Есть **два способа удержания горячей плазмы**, которые считаются наиболее перспективными. Это магнитное удержание и, так называемое, инерционное удержание.

**Магнитное удержание** использует магнитное поле для того, чтобы не дать горячей плазме выйти из замкнутого контролируемого объёма. В существующих системах магнитного удержания (**токамаках**) область, внутри которой удерживается горячая плазма, имеет форму тороида (правильного бублика).

В **инерционном удержании** маленький (1 мм) дейтерий-тритиевый шарик подвергают одновременному “удару” с нескольких направлений очень интенсивными лазерными или электронными (ионными) пучками. Огромное количество энергии, которое при таком ударе передаётся шарик, мгновенно сжимает, нагревает и ионизует его, превращая в кусочек плотной нагретой до  $10^8$  К плазмы. Нагрев должен быть сверхбыстрым ( $10^{-9}$  сек), чтобы испаряющееся вещество шарика не успело выйти из контролируемого объёма до “зажигания” термоядерной реакции. Таким образом, в этом методе используется инерционность вещества.

Создание эффективного термоядерного реактора оказалось намного более сложной проблемой, чем создание реактора, использующего деление ядер. Однако, возможно, она будет решена в первой половине 21-го века.



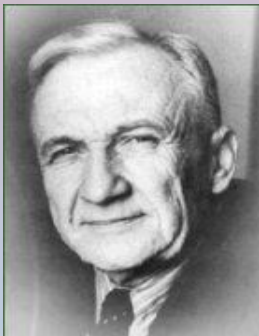
**Токама́к** (**Т**ороида**ль**ная **К**амера с **М**агнитными **К**атушками) - это один из вариантов устройства, способного формировать долгоживущую горячую плазму высокой плотности. При достижении определенных параметров плазмы в ней начинается термоядерная реакция синтеза ядер гелия из исходного сырья — изотопов водорода (дейтерия и трития).

При этом в токамак-реакторе должно вырабатываться существенно больше энергии, чем затрачивается на формирование плазмы.

**Термин “токамак”** был введён русскими физиками Игорем Евгеньевичем Таммом (1895-1971) и Андреем Дмитриевичем Сахаровым (1921-1989) в 50-х годах.

**Первый токамак был разработан** под руководством академика Льва Андреевича Арцимовича (1909-1973) в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова в Москве.

В настоящее время токамак считается наиболее перспективным устройством для осуществления управляемого термоядерного синтеза.



И.Е.Тамм



А.Д.Сахаров



Л.А.Арцимович

# Токама́к (тороидальная камера с магнитными катушками) -

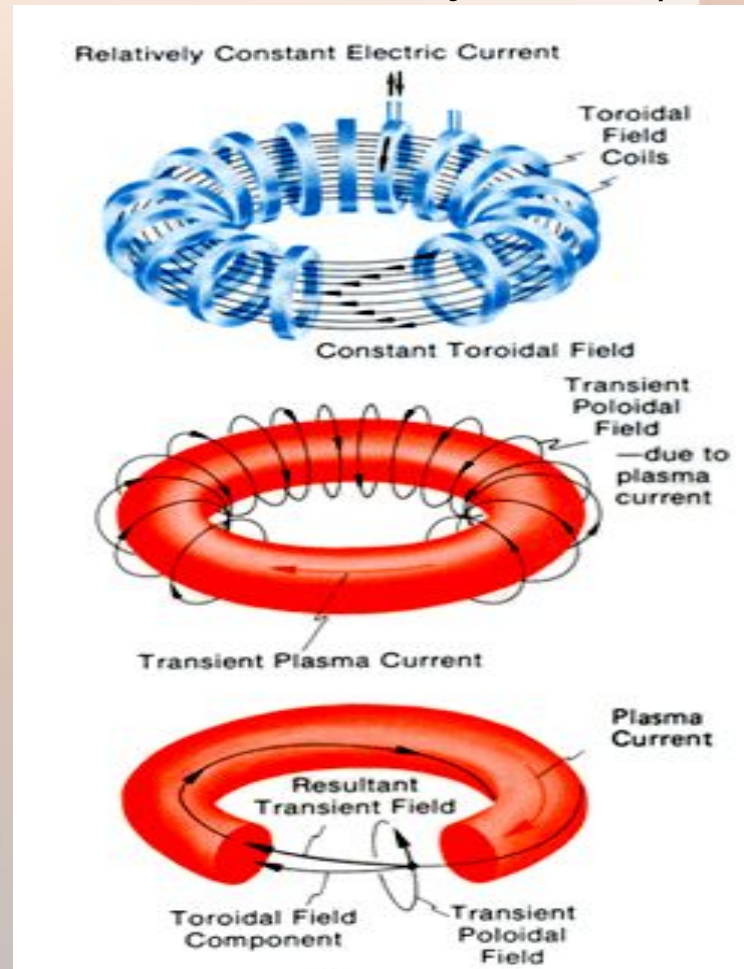
тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза.

Плазма в токамаке удерживается не стенками камеры, которые не способны выдержать необходимую для термоядерных реакций температуру, а специально создаваемым комбинированным магнитным полем — тороидальным внешним и полоидальным полем тока, протекающего по плазменному шнуру. По сравнению с другими установками, использующими магнитное поле для удержания плазмы, **использование**

**электрического тока является главной особенностью токамака.**

Ток в плазме обеспечивает разогрев плазмы и удержание равновесия плазменного шнура в вакуумной камере.

Всего в мире было построено около 300 токамаков.



# Термоядерный реактор

Одна из самых амбициозных задумок современности — строительство международного термоядерного реактора ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor) силами ученых со всего мира.

Проект по строительству термоядерного реактора ИТЭР является одним из главных долгостроев XXI века — его история тянется еще с 1980-х годов. Участвуют в проекте страны Евросоюза, Индии, Китая, Южной Кореи, России, США, Японии и Казахстана. Стоимость проекта выросла с €5 млрд до €13 млрд. Если раньше запустить реактор планировали в 2015 году, то теперь в качестве примерной даты запуска оптимистично называют 2021 год.

**В 2021 году будет получена первая плазма, а операции с дейтерий-тритиевой смесью начнутся в 2027 году.**

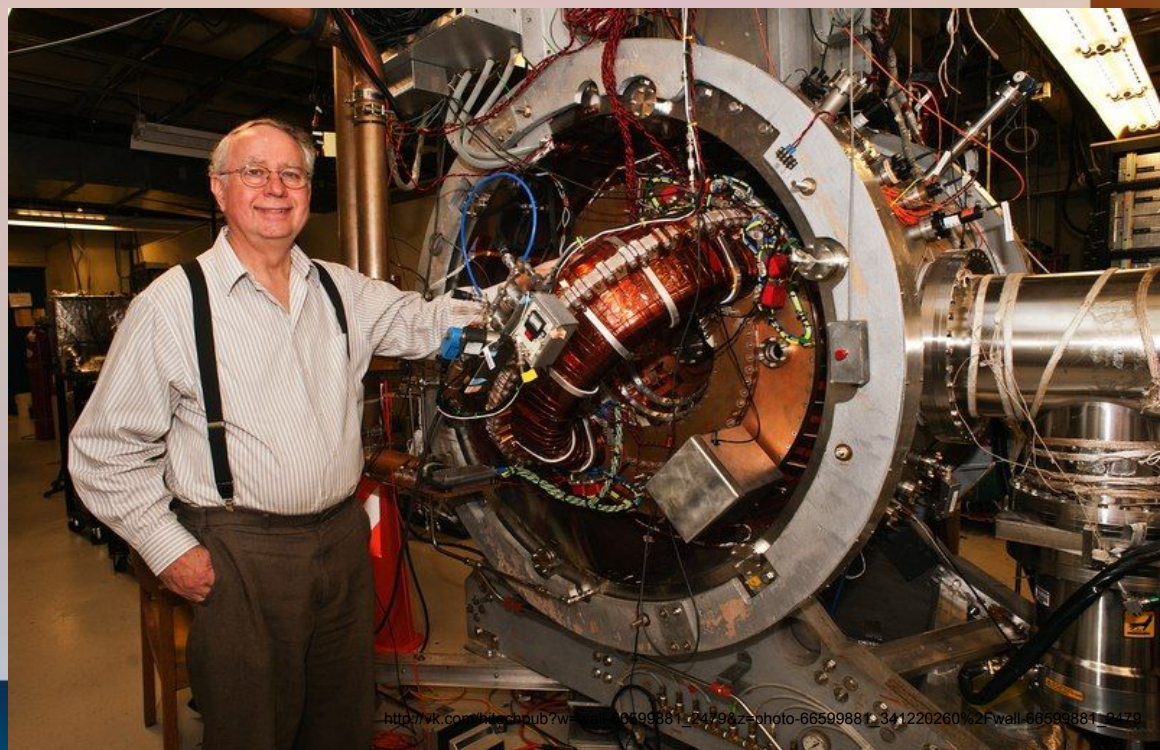
Доля России в ИТЭР составляет около 10%, и страна начала ее вносить с 2009 года. Без российского оборудования этот проект невозможно было бы создать.



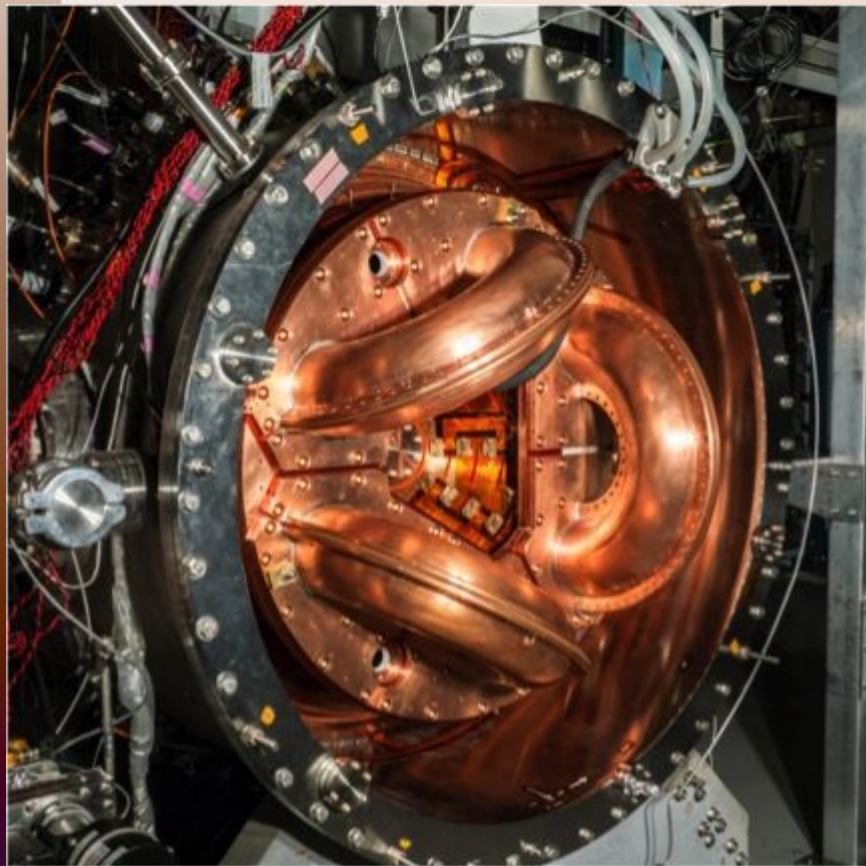
# Управляемый термоядерный синтез

Инженеры Вашингтонского университета (UW) работают над **термоядерным реактором**, который способен производить энергию, конкурентную по стоимости с угольной генерацией. Имеющийся образец (1:10) нового типа реакторов назван —Dynotак.

Реактор Dynotак имеет форму сферы, обмотанной лентами из высокотемпературного сверхпроводника, а магнитные поля, необходимые для удержания плазмы, формируются за счет прикладывания к центру плазменного сгустка сильных электрических полей.



Топливом для реактора послужит водород, два ядра которого сливаются в одно ядро гелия, выделяя при этом достаточно большое количество энергии. Для отвода энергии от активной зоны будут использовать расплавы солей, циркулирующих по охлаждающей рубашке, которые будут кипятить воду, а полученный пар будет использоваться для вращения традиционной паровой турбины.





# Плазменные ракетные двигатели



Компания SpaceX -  
запуск спутника  
ASIASAT 8  
14 июня 2014 г.



Китайский космический аппарат  
был запущен с космодрома  
«Сичан» 24 октября 2014 г. и  
совершил облет вокруг Луны .

Dream Chaser -  
многоцелевой  
пилотируемый  
космический корабль  
американской  
компании SpaceDev.



Старт ракеты носителя "Зенит-3Ф" с  
Байконура, Томская область 2014 г.





Imagens: 1 e 2 - Reprodução PostTV / Washington Post; 3 - Associated Press/Nasa



Погибло более 2,2 тонны полезных грузов, в том числе продовольствие, оборудование и материалы для научных экспериментов. Возможно, что взрыв ракеты Antares был вызван проблемами в двигателе.

<http://astrofiski.net/news/raketa-nositel-antares/>


28 октября 2014 года на 6-й секунде после старта взорвалась 240-тонная ракета-носитель Antares компании Orbital Science, которая должна была доставить на Международную космическую станцию корабль Cygnus.



## Плазма в быту.

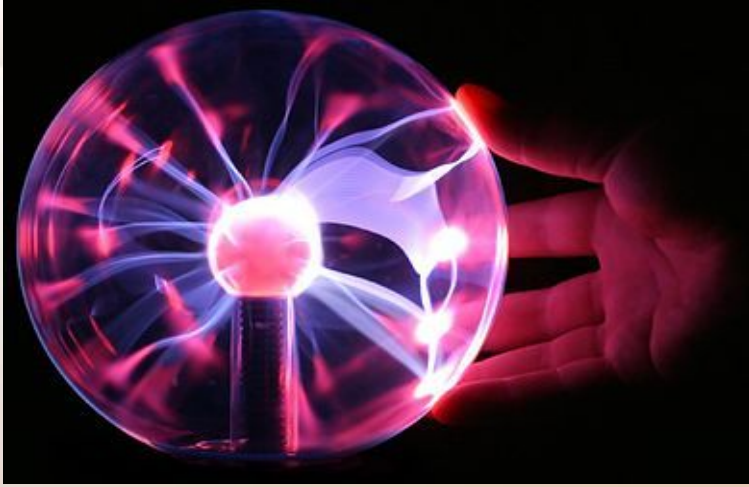
### Плазменные источники света:

•эффективность •яркость •разнообразие



Пла́зменная ла́мпа (Палантир) — декоративный прибор, состоящий обычно из стеклянной сферы с установленным внутри электродом. На электрод подаётся переменное высокое напряжение с частотой около 30 кГц. Внутри сферы находится разреженный газ (для уменьшения напряжения пробоя). В качестве наполнения могут выбираться разные смеси газов для придания «молниям» определённого цвета. Теоретически, срок службы у плазменных ламп может быть весьма продолжительным, поскольку это маломощное осветительное устройство, не содержащее нитей накаливания и не нагревающееся в процессе своей работы. Типичная потребляемая мощность 5—10 Вт.

Плазменная лампа — изобретение Николы Тесла (1894 год).



## Плазма в быту.

**Плазменные источники света:**  
При обращении с плазменной лампой нужно соблюдать **меры предосторожности**

Если на плазменную лампу положить металлический предмет, вроде монеты, можно получить ожог или удар током. Прикосновение металлическим предметом к стеклу способно привести к возникновению электрической дуги и прожиганию стекла насквозь. Прикосновение одновременно к лампе и к заземленному предмету приводит к удару электрическим током. Нельзя помещать электронные приборы (вроде компьютерной мыши или планшета) рядом с плазменной лампой. Это может привести не только к нагреванию стеклянной поверхности, но и к существенному воздействию переменного тока на сам электронный прибор. Электромагнитное излучение, создаваемое плазменной лампой, может наводить помехи в работе таких приборов, как цифровые аудиопроигрыватели и подобные устройства. Эта лампа создаёт вокруг себя из кислорода токсичный для человека озон (явление ионизации).



Вопрос 1: Какие вы знаете агрегатные состояния вещества?

Вопрос 2: Всякую ли систему заряженных частиц можно назвать плазмой?

Вопрос 3: Каким образом любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется?

Вопрос 4: В высокотемпературной плазме встречаются нейтральные атомы?

Вопрос 5: Почему до сих пор не получают энергию в промышленных масштабах с помощью ТОКАМАКов?

# Источники:

1. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. М, Атомиздат, 1966.
2. Ерухимов Л.М. Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория, 1998.
3. Мякишев Г. Я., Буховцев Б.Б., Сотский Н.Н. Физика 10 кл., М. Просвещение, 2014.
4. Дик Ю.И., Кабардин О.Ф., Орлов В.А., Физика 10 кл., М. Просвещение, 1993.
5. Ораевский Н.В. Плазма на Земле и в космосе. К, Наукова думка, 1980.
6. Трубников Б. А., Введение в теорию плазмы. М., 1969.
7. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
8. Лекции по физике плазмы: Учебное пособие Автор/создатель: Котельников И.А., Ступаков Г.В. 1996.  
<http://window.edu.ru/resource/180/28180>
9. Унгефухт К.К. Основы физики плазмы. Элективный курс по физике "Основы физики плазмы".  
<http://plazmaosn.wordpress.com/2011/06/23/>
10. Поступаев В.В. «Физика плазмы»  
[http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl-postupaev/Plasma\\_2013\\_part\\_01.pdf](http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl-postupaev/Plasma_2013_part_01.pdf)
11. Мирнов С.В. Энергия из воды. Популярно об управляемом термоядерном синтезе. 2008.
12. Пикельнер С. Б., Основы космической электродинамики, 2 изд., М., 1966.
13. Акасофу С. И., Чепмен С., Солнечно-земная физика, пер. с англ., ч. 1 - 2, М., 1974 — 75.
14. Смирнов Б. М., Введение в физику плазмы, 2 изд., М., 1982.
15. Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З., Физика плазмы для физиков, М., 1979.
16. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы, М., 1982.
17. Райзер Ю. П., Физика газового разряда, М., 1987.
18. Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. М. Просвещение, 1969.
19. Гершензон Е.М., Малов Н.Н. Курс общей физики. Электричество и магнетизм. М. Просвещение, 1980.
20. Трофимова Т.И., Фирсов А.В. Курс физики с примерами решения задач. Т.1. М.: КноРус, 2010.

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**