

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

В.А. Курнаев

# Плазма – XXI век

*Рекомендовано к изданию УМО «Ядерные физика и технологии»*

Москва 2008

УДК 621.039.6  
ББК 22.333  
К62

*Курнаев В.А. Плазма – XXI век.* – М.: МИФИ, 2008. – 80 с. + 8 с. цв. вклейка.

В книге в популярной форме рассказано о плазменном состоянии вещества, роли плазмы в явлениях во Вселенной, на Земле и о некоторых из многочисленных применений плазмы, которые активно развиваются в настоящее время и будут широко применяться в наступившем веке. Основное внимание уделено новейшим примерам использования плазмы, включая медицину и нанотехнологии, многие из которых появились уже в этом веке. Изложение сопровождается очень ограниченным числом элементарных физических понятий, характеризующих плазменное состояние вещества. Уровень этих понятий соответствует школьному курсу физики, поэтому издание должно быть доступно школьникам. Выбор материала, как и характер изложения, носит свободный характер, опирается на личный опыт автора и имеет форму популярной лекции с примерами из жизни кафедры физики плазмы и других подразделений МИФИ.

Книга рассчитана на старшеклассников, широкую публику, так как с единых позиций описывает окружающие нас явления, показывая на примере плазмы физическое единство мира. Определенный интерес приведенный материал может представлять и для специалистов в других областях для расширения их представлений о плазме и возможностях ее применений.

Книга подготовлена в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент: д-р физ.-мат наук, профессор *О.Б. Ананьин*

**ISBN 978-5-7262-1119-0**

© *Московский инженерно-физический институт*  
(государственный университет), 2008

Редактор *Т.В. Волвенкова*

Подписано в печать 24.02.2009. Формат 60×84 1/16.  
Уч.-изд. л. 5,5 Печ. л. 5,5. Тираж 300 экз. Изд. № 2/6 Заказ №

---

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет).*  
*115409, Москва, Каширское ш., 31*

*Типография издательства «Тровант». г. Троицк Московской области*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	4
1. Введение в плазму.....	7
2. Большой Взрыв, как зажигаются звезды .....	11
3. Земля в плазменной короне.....	20
4. Когда же переполюсовка.....	30
5. Плазменные эффекты в атмосфере.....	34
6. И губительная и врачующая .....	43
7. Как плазма работает в «плазме» .....	46
8. Плазменные нано и (не только) технологии.....	48
9. О золотом руне и алмазах в «плазменных пещерах» .....	58
10. Плазменный меч и плазменный щит.....	61
11. Круг замыкается – природа едина.....	64
12. Заключение – неразгаданные загадки и неотвратимые свершения.....	69
Список литературы .....	80

*Посвящается моей жене, гуманитаршу,  
слишком доверчиво относящейся к тому,  
что показывают по телевидению,  
но проявившей завидное терпение,  
чтобы, наконец, узнать точку  
зрения вечно занятого мужа*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Опрометчивое решение заведующего кафедрой написать популярную брошюру с хлестким названием возникло в прошлом году, когда составлялся план изданий в рамках Инновационно-образовательной программы МИФИ. На это меня спровоцировал многолетний опыт проведения Дня открытых дверей факультета экспериментальной и теоретической физики МИФИ для школьников и абитуриентов, во время которого необходимо было коротко и доходчиво рассказать и о самой физике плазмы, и о ее многочисленных применениях. Введенный несколько лет назад для второкурсников нашего факультета курс профориентации, на котором заведующий каждой кафедры в течение двухчасовой лекции должен был рассказать о специальности и о том, чем занимаются на кафедре, давал определенный опыт обобщения и выделения из нашей области знаний самых значимых и интригующих моментов. Кроме того, за последние 5 лет накопился большой материал по новому курсу «Актуальные проблемы физики плазмы», в рамках которого студенты кафедры готовили презентации по различным наиболее интересным темам. И мне казалось, что этого вполне достаточно, чтобы не в ущерб основной деятельности обобщить все это в виде связного и интересного повествования. Как же я был наивен! Последний год принес так много нового и захватывающего интересного в нашей области и в космосе, и в плазменных нанотехнологиях, и в медицинских применениях плазмы, что впору было бить отбой моему возможному литературному творчеству! Как тут не вспомнить Козьму Прутков с его «Нельзя объять необъятное!».

Но тут в противоречие с элементарным инстинктом самосохранения вступили педагогические принципы. Ведь мы учим студентов обязательности – в МИФИ мы всячески развиваем творческие способности, но ни в коем случае не в ущерб дисциплине. Необузданная самодеятельность в атомной энергетике кончается Черно-

былем! Поэтому пришлось смирить желание рассказать обо всех интересных и актуальных применениях плазмы и найти такой способ изложения, чтобы к оговоренному сроку успеть рассказать о главном.

Что же главное в предлагаемой книжке? Главным я считаю не столько последовательное популярное изложение удивительных свойств плазмы и способов ее применения, сколько демонстрацию величия, красоты и фантастической важности для человеческой цивилизации физики и ее интереснейшего раздела – физики плазмы. Прекрасно понимая, что нельзя сомневаться в исключительной полезности других областей знаний, не могу не процитировать великого Резерфорда: «В науке важна только физика, остальное – собирание марок». К сожалению, наше чрезмерно коммерциализированное (и потому практически безответственное) телевидение, играя на естественном человеческом инстинкте любознательности, обрушивает на недостаточно подготовленного зрителя такую массу откровенной ахинеи, что лишнее напоминание о единых физических законах, которым подчиняется окружающий мир, кажется не только уместным, но и своевременным.

Для облегчения своей задачи я решил связать рассказ о плазме и ее применениях с МИФИ и нашей кафедрой физики плазмы. И не только потому, что ее номер удачно совпадает с номером начавшегося столетия. Очевидно, что интерес представляют научные истины и достижения, а также и то, как они получаются. Наша кафедра «Физика плазмы» – первая с таким названием – была создана в МИФИ более 45 лет назад и сейчас, по моим оценкам, является крупнейшей кафедрой, готовящей специалистов в области физики и применения плазмы. На кафедре кроме штатных преподавателей МИФИ преподают сотрудники и Курчатовского института, и ТРИНИТИ, и ИТЭФ, и ИОФРАН, у кафедры №21 теснейшие связи с ВНИИЭФ, ФИАН, ИФХ РАН, ИРЭ РАН, ИВТАН и многими другими отечественными и зарубежными институтами. Туда же идут на работу наши выпускники. Приступая с 3–4 курса к научно-исследовательской работе в этих научных центрах, они расширяют наши представления о проводимых там исследованиях, рассказывая о своих исследованиях на научных сессиях МИФИ, во время защиты курсовых и дипломных работ, а позже кандидатских и докторских диссертаций. Мне трудно определить жанр предлагаемой

книжки. Ссылаясь на конкретных людей, я ни в малейшей степени не претендую на историографию науки или на принятую в научных изданиях пунктуальную точность в указании авторских приоритетов. Скорее всего, это довольно свободный и, пожалуй, пристрастный рассказ человека, проработавшего на кафедре физики плазмы МИФИ более 40 лет.

Очень хотелось бы при объяснении основных свойств плазмы ограничиться школьным курсом физики.

Надеюсь, что эта книжка будет полезна любознательным школьникам, а особенно тем из них, у которых развито воображение.

Автор выражает свою признательность профессорам МИФИ С.Г. Рубину, О.Б. Ананьину и доценту И.В. Визгалову за ценные замечания по тексту рукописи, а также студентам кафедры, подготовившим хорошие презентации по курсу «Актуальные проблемы физики плазмы».

*Автор*

*Ignorantia non est argumentum!*  
(Незнание – не довод!)

## 1. ВВЕДЕНИЕ В ПЛАЗМУ

Каждое важное дело принять начинать с гимна. На собраниях, связанных с государственными событиями, поют гимн России, в университетах – *Guadeamus Igitur*. В Японии для настройки сотрудников на самоотверженный труд во благо компании поют корпоративный гимн. Такой гимн есть и у нас. Он был сочинен более 20 лет назад замечательным мифическим (но более чем реальным) поэтом Андреем Михайловичем Копытиным.

### ***Плазменный гимн***

Она! Вселенную собою сотворила...  
Сиянье звезд галактикам дала,  
И светом мрак холодный озарила,  
И разум к пробуждению позвала...

Мгновеньями! Приливом и отливом  
Космический волнует океан,  
Вздымает солнцам огненные гривы,  
В планеты конденсирует туман...

И нас она спиралями Лармора  
Через миры парсеками вела,  
Чтоб навсегда решить проблему спора,  
Когда чему праматерью была?!

Разгневанная, в аспидном разряде,  
Вдруг ослепит величием своим,  
Но станет укрошенной в термояде!  
А за ценою мы не постоим...

Путь опалит ее нас жаркий ветер,  
Сломает мачты, слижет паруса, –  
Путь человечества, он будет ею светел!  
Романтики! Раскроем чудеса!..

*А.М. Копытин*

Очень хотелось, чтобы все сказанное в этом гимне (в музыкальном исполнении его можно услышать в прилагаемом к этой брошюре CD диске) стало бы абсолютно понятным после прочтения всей книжки. Поэзия физиков выгодно отличается от поэзии просто лириков тем, что использует куда более богатый понятийный аппарат и не допускает несуразностей типа цитированных в свое время известным советским пародистом Александром Ивановым «вириш»: «Площадь круга, площадь круга – два пи эр, где же ты моя подруга...и.т.д.».

Так что же такое плазма? Это слово сейчас широко распространено, его можно часто увидеть и на рекламных плакатах. Слово «плазма» на них подразумевает плазменные панели, разработанные в России (но успешное производство которых налажено в Южной Корее). Определение плазмы, которое я даю на первой лекции по физике плазмы студентам 4-го курса, выглядит так:

**Плазма – это квазинейтральный газовый ансамбль заряженных частиц, размер которого превышает радиус Дебая.**

Строго говоря, под плазмой и плазмоподобными средами понимают совокупность не только заряженных частиц, но и нейтральных – атомов, молекул, квантов излучения, при этом наличие в этом ансамбле разноименно заряженных частиц с примерно одинаковыми суммарными зарядами обязательно!

Почему «квазинейтральный»? Да потому, что возникающие при избытке одного из зарядов электрические поля тут же «разнесут» этот замечательный ансамбль! Действительно, вспомним плоский конденсатор и представим, что при концентрации зарядов, например,  $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$  разноименные заряды разделились на расстояние  $l$  в один миллиметр, тогда напряженность поля между заряженными плоскостями составит

$$E \approx \frac{nql}{\epsilon_0} = \frac{10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{-3} \text{ м}}{8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} / \text{В} \cdot \text{м}} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ В/м}. \quad (1)$$

Это огромное поле, которое может даже вырвать из нейтрального атома электрон!

Радиус Дебая – это важнейшая характеристика плазмы. Недавно при входе на кафедру висит заклинание, придуманное в свое время студентом Андреем Горяевым: «Всяк сюда входящий пренебреженно должен знать радиус покойного Дебая!». Так что же это

за величина? Это расстояние, на котором один из зарядов как бы перестает чувствовать поле другого заряда за счет того, что ближе расположенные заряды его экранируют. Значение этого радиуса может быть получено из простых соображений. Действительно, из кинетической теории газов известно, что кинетическая энергия частиц при температуре газа  $T$  порядка  $kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К. Сделав естественное предположение, что частица с зарядом  $q$  и с кинетической энергией  $kT$  полностью затормозится на расстоянии  $r_D$ , если ее потенциальная энергия кулоновского взаимодействия в поле другого заряда составит  $qEr_D = kT$ , и подставив выражение для поля (1), в котором в качестве расстояния выбрано  $r_D$ , получим:

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{nq^2}}. \quad (2)$$

Это выражение может быть записано в удобной для вычислений форме:

$$r_D \approx 70 \sqrt{\frac{T}{n}}. \quad (3)$$

Напомним, что в системе СИ длина выражается в метрах, а температура в градусах Кельвина. В системе же СГС, принятой в отечественной литературе по физике плазмы, радиус Дебая будет иметь вид

$$r_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi nq^2}}, \quad (4)$$

где длина выражена в сантиметрах, а так называемое «мнемоническое» или удобное для запоминания выражение для радиуса Дебая примет совсем «сказочный» вид:

$$r_D \approx 7 \sqrt{\frac{T}{n}}. \quad (5)$$

Казалось бы, самый простой способ превращения вещества в плазменное состояние – это его нагрев. Да, уже в пламени свечи при температуре порядка тысячи градусов на хвосте максвелловского распределения появляются электроны с энергиями, достаточными для ионизации. Но только таких электронов очень мало, и плазма свечи оказывается очень слабоионизованной. Даже как-то

рука не поднимается называть такое состояние плазмой – скорее это слабоионизованный газ. Вот именно с ионизации газа мы и начнем историю приручения человеком плазмы. Самый простой способ – это ускорить электроны до энергий, когда они смогут, соударяясь с атомами, их ионизовать, то есть передать атомным электронам энергию выше энергии ионизации. Для того, чтобы электроны разогнать до нужных энергий, проще всего приложить к среде, в которой могут присутствовать (или быть специально созданы) заряженные частицы, ускоряющее электрическое поле и организовать разряд. Это может быть, например, разряд с накаливаемым катодом, когда при нагреве в результате термоэлектронной эмиссии над катодом появляются электроны, преодолевшие потенциальный барьер на границе металл-вакуум. Они-то и могут участвовать в ионизации среды. Возникает несамостоятельный разряд. (Если же, приложив напряжение к разрядному промежутку, мы получили ток без эмиссии электронов из электродов, то значит, что эти электроны уже были в этом промежутке.) Ленгмюр в 1928 году назвал плазмой светящийся столб ионизованного газа, который веком раньше получил Фарадей, зажигая разряд в стеклянной трубке с разреженным газом. Ленгмюровскими называются и самые естественные колебания, которые могут возникать в плазме, – колебания электронов относительно тяжелых ионов. Мы не будем приводить уравнения, описывающие эти колебания. Для определения их частоты достаточно знать уже известный нам радиус Дебая и сообщить, что электроны движутся со скоростью, определяемой их

температурой,  $v_e \sim \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}}$ . Тогда частота колебаний из соображений

размерности – это  $v_e/r_D$ . Тут же получаем точное выражение для частоты этих плазменных (или ленгмюровских) колебаний

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi n q^2}{m_e}}. \quad (6)$$

Итак, газовая плазма – это вечно движущийся ансамбль частиц. Причем электроны с плазменной частотой колеблются относительно ионов. Не надо думать, что в твердом теле этих колебаний не существует. Только там ионы (или атомы решетки) почти неподвижны (абсолютно неподвижны лишь при абсолютном нуле), а вот

под действием каких-либо возмущений электронная подсистема свободных электронов колеблется. И частота таких колебаний описывается точно такой же формулой, а сами колебания плотности электронов уже называются плазмонами.

## 2. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ, КАК ЗАЖИГАЮТСЯ ЗВЕЗДЫ

Начинать надо *ab ovo*, (с яйца или с самого начала), было ли в начале слово, науке неизвестно, а вот тому, что ВСЕ началось с **Большого Взрыва**, имеется множество подтверждений: и оставшееся реликтовое излучение, и расширяющаяся Вселенная, и множество других свидетельств, непротиворечивая экстраполяция которых назад по временной шкале приводят нас к моменту времени примерно 13,7 млрд лет назад, когда и произошел этот этот Биг Бэнг (Big-Bang) (не путайте с Биг Беном!). Последовательность событий, отражающих эволюцию Вселенной, как сейчас она представляется науке, приведена на рис.1 (см. цветную вклейку).

Слова типа «чудовищной силы взрыв» не могут описать события, когда из сверхплотного сгустка (точнее сингулярности с плотностью вещества  $10^{93}$  г/см<sup>3</sup> и температурой  $1,3 \cdot 10^{32}$  К), которым являлась вся наша Вселенная, образовались элементарные частицы, из них по мере расширения и охлаждения вещества образовались кварки, лептоны, а затем нуклоны – протоны и нейтроны – эти кирпичики привычных химических элементов. Правильно отразить временной масштаб с помощью бытовых терминов невозможно. Вот и, казалось бы, такое быстрое событие, как мгновение (мигание) ока ( $\sim 0,1$  с), при внимательном рассмотрении оказывается в  $10^{40}$  раз более длительным, чем то время, на протяжении которого Вселенная увеличилась до размеров атомного ядра. Словесных выражений для обозначения этого числа не существует. Да и не надо – язык физики оказывается куда более богатым при описании окружающего мира, так давайте им и пользоваться! Но вернемся к происхождению Вселенной. В первые моменты после Взрыва вещество представляло собой **кварк-глюонную плазму** – «суп» из электронов, кварков и других частиц. Обратите внимание на показатель степени в значении температуры! Через микросекунду Вселенная уже настолько расширилась и охладилась, что кварки смог-

ли «слипнуться» в нуклоны (протоны и нейтроны). А через секунду протоны и нейтроны уже начинают образовывать ядра более тяжелых, чем водород, элементов. Добавим к двум протонам еще пару нейтронов и получим гелий. Через 300 тыс. лет температура опустилась до уровня, при котором положительно заряженные протоны смогли удерживать электроны (напомним, что энергия связи электрона и протона – простейшего атома – атома водорода составляет 13,6 эВ). Соотношение между энергией в электрон-вольтах и температурой, выраженной в градусах Кельвина  $E = kT$  ( $k$  – постоянная Больцмана), следующее:

$$1 \text{ эВ} = 11600\text{К} \approx 10^4 \text{ К.}$$

(Рекомбинация электрона с протоном эффективно идет при температуре ниже 10000К). Примерно через триста тысяч лет уже остывшее до минус 200 градусов разлетающееся в виде атомов вещество по неумолимым законам физики под действием гравитационного притяжения начинает сжиматься там, где из-за флуктуации плотность вещества оказалась больше. Чем больше плотность вещества в возникшей флуктуации, тем быстрее происходит сжатие. Сила этого взаимодействия хорошо известна из школьного курса физики, начиная с 17 века, когда великий Ньютон открыл этот универсальный закон:

$$F = \gamma_m \frac{M_1 M_2}{r^2}.$$

Правда, вспоминая легендарное яблоко, оставившее согласно легенде шишку на голове великого Ньютона, для силы, которая ускорила это яблоко, мы пишем:

$$F = M_{\text{я}} g,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли.

Так что же происходит с веществом Вселенной под действием этой силы? Естественно, оно в местах большего скопления (флуктуациях плотности) начинает сжиматься в некие сгустки, плотность которых по мере увеличения массы вещества нарастает, то есть сокращаются расстояния между соседними атомами и увеличивается скорость атомов, значит, растет и температура. Все более энергичные атомы, сталкиваясь, начнут терять электроны, электроны покинут связывавшие их силами Кулона протоны – и мы опять пе-

рейдем к плазме. Огромные сгустки этой плазмы и представляют собой звезды. Температуру такой плазмы мы уже можем легко оценить из ранее приведенных рассуждений. Вот тут нам надо вспомнить еще одного великого физика, определившего закон, которому подчиняется распределение частиц по скоростям в веществе с температурой  $T$  – это распределение Максвелла. Оказывается, что скорость частиц, связанная с кинетической энергией их движения  $E = Mv^2/2$  в равновесной, т.е. неподверженной воздействию извне, системе многих частиц, распределена по закону Максвелла. Согласно которому есть частицы медленные и более быстрые, но максимальное их число приходится на энергию, которую и называют наиболее вероятной энергией теплового движения или температурой  $E_{\text{н.в.}} = kT = (Mv_{\text{н.в.}}^2)/2$ .

Так как есть частицы, скорость (а значит, и энергия) которых во много раз больше, чем наиболее вероятная скорость (энергия) теплового движения, то именно они и имеют шанс достаточно близко приблизиться к другим положительно заряженным протонам плазмы. При лобовом столкновении два протона должны сблизиться на расстояние  $r_{\text{min}}$ , когда энергия их кинетического движения сравняется с потенциальной энергией отталкивания положительно заряженных ядер с зарядами  $q_1$  и  $q_2$ . Для двух сталкивающихся протонов эти заряды равны единичным зарядам  $e$ , откуда и получаем формулу, из которой легко найти минимальное расстояние между частицами:

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{e^2}{r_{\text{min}}}. \quad (7)$$

(Для простоты мы предположили, что одна из частиц первоначально покоилась.)

И вот тут, чтобы сделать самый решительный шаг в понимании эволюции Вселенной, надо снова вернуться к первым моментам после Большого взрыва и несколько слов сказать о ядерных взаимодействиях. Мы знаем, что небесные тела (например, планеты Солнечной системы) движутся под действием сил гравитационного притяжения. При столкновении заряженных частиц в основном «работает» закон Кулона, а вот когда частицы сближаются на расстояния, сравнимые с размерами ядер, а это примерно еще в сто

тысяч раз меньше, чем размеры атомов (которых сейчас любой любознательный школьник может увидеть с помощью сканирующего туннельного микроскопа), то начинают работать межъядерные силы. Под действием этих сил ядра могут меняться. При делении ядра образуются новые элементы с меньшими массами, при синтезе (объединении) из двух легких образуется одно тяжелое ядро. Но при всех этих ядерных превращениях неумолимо работает закон сохранения числа нуклонов, т.е. число протонов и нейтронов до и после реакции сохраняется, и, конечно, закон сохранения энергии. При этом, правда, могут образовываться и разные элементарные частицы: электроны, позитроны (положительно заряженные частицы с массой электрона), нейтрино (частицы без заряда и очень малой массой), кванты электромагнитного излучения и другие частицы, рассказ о которых – содержание отдельной остросюжетной новеллы (см, например, [2]). И вот тут мы приходим к главному достижению физики прошлого века, связываемому с гениальным Эйнштейном, которое мне хочется помимо известной формулы представить словами Михаила Иосифовича Пергамента<sup>1)</sup>

*Эйнштейн ведь умный был мужик,  
Придумал много разных штук  
И молвил нашему он брату,  
Что E равно Mc квадрату!*

$$E = Mc^2. \quad (8)$$

Вот гениальная формула, которая позволит нам расставить все по местам! Итак, если в процессе реакции, например, синтеза, масса образовавшихся частиц меньше, чем она была у исходных, то дефицит массы обязан в соответствии с этой замечательной формулой выделиться в виде энергии. Простой пример: возьмем реакцию, с которой Человечество, прежде всего, связывает свои надежды на управляемый термоядерный синтез. Это реакция синтеза тяжелого изотопа водорода дейтерия D (который на нейтрон тяжелее привычного нам протия) со сверхтяжелым – тритием T. У последнего в ядре помимо протона еще два нейтрона. Итак, для того, чтобы вероятность реакции стала заметной величиной, нам надо

---

<sup>1)</sup> Кстати, автора замечательной книжки «Как задавать вопросы природе». – М.: МИФИ. 2003. – 180 с.

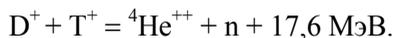
сблизить эти две частицы на расстояние порядка размеров ядра, т.е. примерно на расстояние  $10^{-12}$  см. Но, если атомы нейтральные, т.е. у них есть электроны, то при низкой температуре они могут сблизиться лишь на расстояние, при котором образуется молекула DT. Происходит обычная химическая реакция – два атома объединились в молекулу, подобно тому, как кислород, соединяясь с двумя атомами водорода (протия), образует обычную воду. Поступим просто, возьмем дейтрон – положительно заряженный ион (атом без электрона) и разгоним его до скорости, при которой он сможет сблизиться с ядром трития до нужного расстояния.

Найти эту энергию чрезвычайно просто, если воспользоваться соотношением (7). Подставляя нужное нам межъядерное расстояние в (7), получим, что энергия дейтрона должна составлять  $10^{-14}$  Дж или примерно 150 000 эВ. Именно при такой энергии можно надеяться преодолеть тот самый кулоновский барьер, который не позволял одноименно заряженным частицам сблизиться до расстояния, на котором возможны межъядерные взаимодействия. Вероятность такого взаимодействия зависит от взаимного расстояния между ядрами и даже при меньших энергиях, чем мы подсчитали, она имеет конечное значение. В физике вместо вероятности взаимодействия используют понятие «сечение взаимодействия». Его геометрическая интерпретация чрезвычайно проста. Сечение – это та площадка, попав в которую, налетающая частица обязательно «заденет» атом мишени. Так, для двух сталкивающихся атомов с размерами 0,1 нм (1 ангстрем) сечение составит  $(0,1)^2 = 0,01 \text{ нм}^2$ . Таким образом, для ядерного взаимодействия с межъядерным расстоянием  $10^{-12}$  см сечение примерно равно  $10^{-24} \text{ см}^2$ . Эта характерная для ядерных взаимодействий величина носит специальное название *барн*. Так вот, судя по приведенной на рис. 2 (см. цветную вклейку) зависимости сечения реакции DT синтеза от энергии, в максимуме оно составляет порядка 5 барн. Что же получится в результате этой реакции? Образуется ядро гелия (альфа-частица) и нейтрон



Легко проверить, что число протонов и нейтронов в правой и левой частях этого соотношения одинаково. А вот сумма масс слева и справа разная. Если согласно (8) подсчитать, какой энергии эта

разность масс соответствует, то получим 17,6 МэВ. Ядерные реакции так и пишут с обозначением в правой части выделяющейся (или поглощенной) энергии:



В случае *эндотермической* реакции (т.е. идущей с поглощением энергии) перед ее значением ставят знак минус. Из закона сохранения импульса легко определить, как будет распределена энергия между продуктами реакции. Если импульс налетающей частицы  $P$ , то полная выделившаяся в реакции энергия равна

$$E = \frac{P^2}{2} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)$$

и распределяется между фрагментами обратно пропорционально их массе

$$E_1 = \frac{EM_2}{M_1 + M_2}.$$

Для приведенной выше реакции получим, что альфа-частица будет иметь энергию  $\sim 3,5$  МэВ, а нейтрон  $\sim 14,1$  МэВ.

Именно разогрев сжимающегося вещества до таких температур, когда ионы плазмы, преодолевая кулоновское расталкивание, могут приближаться друг к другу на расстояния, при которых оказываются возможными ядерные реакции, и приводит к зажиганию звезд. Однако цикл ядерных превращений, являющийся основой выделения энергии звезд, достаточно сложный и не ограничивается приведенной выше реакцией. На рис. 3 (см. цветную вклейку) показана последовательность превращений, происходящих в веществе звезды на протяжении ее жизни. Там же приведены две реакции синтеза, характерные для начальных периодов жизни звезд. Это реакция синтеза тяжелых изотопов водорода – дейтерия, а затем при увеличении температуры – реакция синтеза протонов. (Дейтерий же может образоваться из синтеза протона с нейтроном.) Если в первой реакции по аналогии с реакцией синтеза (9) возможные продукты реакции легко определяются ( ${}^3\text{He} + n + 3,3$  МэВ или  $T + p + 4,0$  МэВ), то в выражении для реакции протонов появляются новые частицы. Это позитрон  $e^+$  – частица с массой электрона, но с положительным знаком заряда, и нейтрино  $\nu_e$  – нейтральная

частица с массой на много порядков меньшей массы электрона. Именно так называемый протонный цикл лежит в основе источника энергии самой важной для нас звезды – Солнца (рис. 4, см. цветную вклейку). Образовавшееся в первой реакции цикла нейтрино свободно покидает Солнце, а позитрон аннигилирует с электроном, образуя гамма-квант  $\gamma$ . Вероятность этой реакции очень мала, и большое количество энергии, которое излучает Солнце, определяется просто огромным количеством содержащихся в нем протонов. (Причем, кванты излучения, поглощаясь и переизлучаясь, добираются до его поверхности через сотни тысяч лет!) Образовавшийся дейтрон в реакции синтеза с протоном образует изотоп гелия  $^3\text{He}$ . А вот дальнейшие превращения могут происходить по одному из 3-х перечисленных на рисунке путей, но в итоге реализации любого пути из четырех протонов образуется два ядра  $^4\text{He}$  и выделяется 26,7 МэВ в виде нейтрино и гамма-квантов.

Кроме протонного может реализовываться и углеродно-азотный цикл, при котором в результате взаимодействия углерода  $^{12}\text{C}$  с протоном образуются более тяжелые изотопы и элементы (N, O), но в итоге получается  $^{12}\text{C}$ , гелий  $^4\text{He}$  и выделяется 24,7 МэВ энергии. Реакция эта идет при более высоких температурах и при  $T > 1,7 \cdot 10^7 \text{ K}$  по скорости превосходит пр реакцию, но ее доля в энергобалансе Солнца не превышает 2 %.

Табл.1 иллюстрирует длительность каждого из показанных на рис.3 циклов. Как мы видим из приведенных реакций, в результате синтеза появляются более тяжелые, чем водород и гелий, элементы – литий и бериллий. Синтез трех ядер гелия приводит к образованию углерода, а синтез гелия с углеродом – к появлению кислорода. Столкновения углеродных ядер друг с другом могут приводить к образованию неона  $^{20}\text{Ne}$  и натрия  $^{23}\text{Na}$ , а ядер гелия с ядрами неона – к образованию магния, в столкновениях которого с ядрами гелия, в свою очередь, синтезируется кремний (рис. 5а, см. цветную вклейку). Горение кремния приводит к образованию железа с максимальной энергией связи на нуклон (рис. 5б) и образованию более тяжелых элементов в результате термоядерного синтеза на этом прекращается.

Итак, термоядерный синтез в недрах нашей звезды не только обеспечивает тепло поддержание жизни на Земле, но и живем мы на «звездном кладбище»! Возможно, не мы одни во Вселенной, так как наша звезда одна из огромнейшего их количества (рис. 6,

см. цветную вклейку). Возникает вопрос, если цикл термоядерных превращений закончился на железе, то как же более тяжелые элементы, например, золото, свинец, откуда они взялись на Земле и почему присутствуют на Солнце? Причиной дальнейших превращений элементов может быть очень большая энергия сталкивающихся частиц, как, например, это происходит на ускорителях тяжелых ионов, при синтезе все новых химических элементов, продолжающих таблицу Менделеева. Но откуда берется такая энергия? Ответ дает последний этап звездной эволюции на рис. 3 – это взрыв сверхновой звезды. При нем за короткое время выделяется чудовищная энергия, а значит, уносящие ее частицы и электромагнитные кванты также должны обладать огромной энергией. Вот так при столкновениях тяжелых ионов в эндотермических реакциях, в том числе под действием космических лучей и при поглощении нейтронов, и происходит образование более тяжелых элементов.

Таблица 1. Параметры циклов на рис.3

Стадия	Температура в центре, К	Плотность в центре, кг/м <sup>3</sup>	Продолжительность
Горение водорода	$10^7$	$5 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^6$ лет
Горение гелия	$2 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$ лет
Горение углерода	$8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	600 лет
Горение неона	$1,2 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	1 год
Горение кислорода	$2 \cdot 10^9$	$10^{10}$	6 месяцев
Горение кремния	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	1 день
Коллапс ядра	$5,4 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{12}$	0,2 секунды
Взрыв ядра	$2,3 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{17}$	Миллисекунды

Звезды – совершенно разные, время их существования различно, но конечно! Так, долго ли будет светить Солнце? Время горения зависит от массы звезды: чем она больше, тем оно короче (рис.7).

Из графика на рис.7 следует, что продолжительность жизни нашей звезды составляет порядка 10 млрд лет.

Из рис. 3, отражающего эволюцию звезд, и табл. 1 видно, что самый продолжительный период их существования приходится на водородный цикл, оценки и измерения показывают, что возраст нашего светила 4,5 млрд лет, так что до начала гелиевого цикла и все убыстряющихся изменений времени еще много. Кроме того, приведенная на рис. 3 эволюция заканчивается взрывом сверхновой и характерна для звезд с массой, на порядок большей нашего Солнца, поэтому его судьба – это превращение в красного гиганта (см. рис. 6), а затем со сбросом внешней оболочки – в белого карлика с последующим угасанием. Этих трансформаций жизнь на Земле не перенесет, но, надеемся, Человечество что-нибудь придумает, если до этого не погибнет от других причин.

А причин таких (кроме глупости и невежества, которые, к счастью, исправляются хорошим образованием) может быть очень много. И одна из них определяется солнечно-земными связями, взаимодействием солнечной плазмы с Землей. Для того, чтобы понять, что может произойти, необходимо пояснить, что собой представляет наша планета по отношению к падающему на нее излучению и потокам плазмы.

Следует отметить, что не только гравитационное сжатие отвечает за формирование межзвездных облаков, но и электромагнитное взаимодействие текущих токов и создаваемых ими магнитных полей тоже могут приводить к сжатию вещества – это так называемый пинч-эффект.

Более подробно об устройстве нашей Вселенной можно узнать из увлекательной и популярной книжки профессора МИФИ Сергея Георгиевича Рубина [2].



Рис. 7. Поверхностная температура, светимость и время жизни звезд на Главной последовательности в зависимости от массы звезды по сравнению с массой Солнца

### 3. ЗЕМЛЯ В ПЛАЗМЕННОЙ КОРОНЕ

Итак, Солнце – огромный плазменный шар, внутри которого при высокой температуре порядка 10 млн градусов идут термоядерные реакции сжигания водорода. Однако структура Солнца неоднородна. Сама «поверхность» Солнца имеет мизерную по сравнению с термоядерной температуру – менее 10000 градусов. Такая температура (и даже большая) элементарно достигается в широко распространенных плазмотронах, с помощью которых режут металл, обрабатывают поверхность колесных пар, чтобы придать им более высокую твердость, генерируют наночастицы и т.д. При такой температуре (в энергетических единицах менее 0,5 эВ), которая много меньше энергии ионизации водорода, плазма становится слабоионизованной, т.е. большую часть ее составляют нейтральные атомы водорода, и переходы между уровнями возбуждения водородных атомов формируют спектр излучения. Но именно эта «низкая» температура фотосферы Солнца в значительной степени определила возможность возникновения органической жизни на Земле. Известно, что каждое нагретое тело излучает электромагнитные волны со спектром, зависящим от его температуры. Если приблизите руку к горячему чайнику, то почувствуете невидимое глазу инфракрасное излучение. Спектр видимого света можно увидеть в каплях дождя, когда в них отражается солнечный свет, или на небе, когда видна радуга. Вспомнив стишок про охотника и фазана, легко представить себе и ультрафиолетовое излучение, опять же невидимое глазу, причем достаточно опасное для людей, особенно неумеренно загорающих. Так вот по мере повышения температуры тела спектр испускаемого им электромагнитного излучения сдвигается во все более коротковолновую область. Если взглянуть на шкалу электромагнитных волн (рис.8), то по мере повышения энергии кванта или уменьшения длины волны  $\lambda$

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad \text{или} \quad E(\text{эВ}) = 1239,5/\lambda(\text{нм}) \quad (10)$$

мы переходим последовательно от неощутимого воздействия радиоволн с энергиями в тысячные доли электрон-вольта к видимому свету (единицы эВ), а затем к ультрафиолету (диапазон 380–10 нм и энергии 3,3–120 эВ). Сначала к мягкому, потом жесткому, а затем к экстремальному (ЭУФ), который граничит с мягким рентгеном.

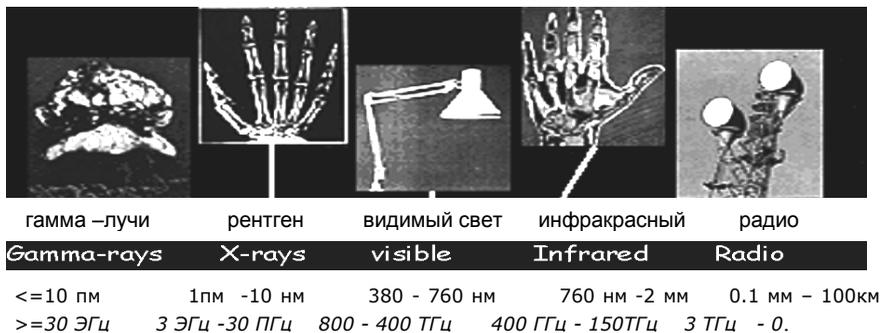


Рис. 8. Шкала электромагнитных волн

По мере уменьшения длины волны мы переходим уже к хорошо проникающему рентгеновскому излучению (десятки и сотни кэВ) и, наконец, к гамма-излучению, энергия квантов которого, простирается от МэВ до  $\sim 10^{20}$  эВ (значительно больше, чем можно получить на самых больших ускорителях частиц).

Каждый, кто побывал в рентгеновском кабинете, знает, что рентген – это опасно, а при большой дозе даже смертельно. Так вот, плазма с температурой, много выше указанной температуры солнечной короны, давала бы спектр так называемого тормозного излучения, которое возникает в рентгеновской области спектра при торможении заряженных частиц при их столкновениях. То есть жесткие кванты такого излучения разрушали бы «нежные» биологические клетки, так как энергии такого кванта уже достаточно для возбуждения и ионизации атомов. Поэтому при другой звезде с жизнью на Земле были бы большие проблемы. А так ультрафиолетовая часть спектра (если пробьется сквозь иногда очень загрязненный слой атмосферы) приводит к образованию в теле человека витамина D, препятствуя развитию рахита у детей, дает приятный загар модницам, дезинфицирует воду.

Вернемся к роли Солнца в нашей жизни и посмотрим на Землю как на физический объект, с которым взаимодействует то, что испускает Солнце. А ведь кроме излучения с нужным спектром Солнце «дует» на нас своим *солнечным ветром*. Что это за ветер? Это потоки частиц, в основном ионы водорода, гелия и электроны, распространяющиеся от Солнца со скоростью чуть меньше 1000 км/с. Таким образом, кроме излучения энергии, генерируемой

внутри Солнца в реакциях синтеза, оно теряет свою массу за счет непрерывной эмиссии потоков частиц. Почему же вместо гравитационного притяжения всего, что попадает в сферу притяжения, Солнце обильно «поливает» окрестности своим веществом? Прошедшее недавно полное солнечное затмение дало новые картинки самой внешней его части – плазменной короны (рис. 9, см. цветную вклейку). Огромные плазменные протуберанцы – струи плазмы – распространяются на расстояния, сравнимые с радиусом Солнца. Их возникновение и поведение определяется сложным взаимодействием текущих в них токов с магнитным полем Солнца и с теми полями, которые сами эти струи создают. NASA опубликовала фотографии, показывающие фантастические "фонтаны огня", вылетающие с поверхности Солнца (рис. 10, см. цветную вклейку). "Фонтаны огня" представляют собой петлевые потоки наэлектризованного газа, который и раскаляет атмосферу Солнца до температуры в несколько миллионов градусов. Высота этих петель может достигать 450 тыс. километров, максимальная температура петли (до 40 млн К и выше) достигается на высоте в десятки тысяч километров, что и вызывает колоссальное нагревание короны Солнца.

Известно, что любой ток порождает вокруг себя магнитное поле. Величина этого поля (или индукция)  $\vec{B}$  обратно пропорциональна расстоянию  $R$  от проводника с током:

$$B = 0,2I/R. \quad (11)$$

В этой формуле  $B$  выражено в гауссах (Гс), ток в амперах (А), а расстояние в сантиметрах (см). Плазма состоит из заряженных частиц, значит, она легко может быть проводником. Если сопротивление плазмы маленькое, а это происходит при повышении ее температуры, то магнитные силовые линии как бы приклеиваются к плазме. Куда плазма, туда и силовые линии. Говорят, что при этом магнитное поле вморожено в плазму. В этом нет ничего удивительного, если вспомнить закон электромагнитной индукции, согласно которому любое изменение магнитного поля порождает электродвижущую силу (ЭДС). Под действием этой ЭДС в проводящей плазме тут же возникает ток, который, в свою очередь, создает магнитное поле, препятствующее изменению первоначального. Таким образом, в плазменной короне текут токи и существуют

сильные магнитные поля. Почему сильные? Да потому, что если по плазме течет ток, то текущие в одном направлении токи слипаются, образуя так называемые филаменты.

Из школьного курса известно, что на движущийся заряд  $q$  действует сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}]. \quad (12)$$

Квадратные скобки обозначают, что вектор силы  $\vec{F}$  перпендикулярен и вектору скорости  $\vec{v}$ , и вектору поля  $\vec{B}$ . Так как ток  $I$  – это заряд в единицу времени,  $I dl = q dl/dt$ , то сила, действующая на единицу длины проводника  $dl$ , выражается через ток в виде закона Ампера:

$$\vec{F} = dl[\vec{I} \cdot \vec{B}]. \quad (13)$$

А теперь проверьте, как будет направлена сила, действующая на ток со стороны магнитного поля соседнего параллельного тока (только не забудьте правило буравчика для векторного произведения!). Ну, конечно, параллельные токи притягиваются. А если токи становятся более сильными, то и создаваемое ими магнитное поле согласно (11) увеличивается. И вот теперь представим ситуацию, когда начинают двигаться навстречу друг другу два тока или области плазмы с вмороженным в нее магнитным полем противоположной направленности (рис. 11, см. цветную вклейку). Из приведенных выше рассуждений следует, что на границе между разнонаправленными полями должен существовать слой тока. В этой области происходит пересоединение (перезамыкание) силовых линий, как показано на рисунке. Движущиеся навстречу друг другу силовые линии перезамыкаются и уходят в перпендикулярном направлении. Таким образом, происходит одновременно подпитка и нагрев токового слоя и ускорение частиц плазмы в перпендикулярном направлении. Именно перезамыкание силовых линий магнитного поля считается сейчас одним из основных источников высокой температуры плазменной короны (на много порядков более высокой, чем в видимой нами фотосфере Солнца) и одновременно причиной вспышек на Солнце, сопровождающихся резкими выбросами солнечной массы [4]. На рис. 12 (см. цветную вклейку) приведена иллюстрация недавно предложенного механизма того, как в результате перезамыкания образуется огромная область плазмы с

вмороженными в нее токами и магнитным полем, которая, отрываясь от поверхности Солнца, несет с собой во внешнее пространство огромный сгусток частиц и магнитных полей.

Как уже понятно, физика Солнца таит в себе еще много загадок, несмотря на постоянный мониторинг нашего светила с Земли, непрерывно регистрирующий излучение Солнца в разных диапазонах спектра (эксперимент SOHO и видеоролик с таким же названием в прилагаемом CD диске). Мы надеемся, что ответы на многие вопросы будут даны после подготовляемого в институте Астрофизики МИФИ под руководством Юрия Дмитриевича Котова запуска спутников КОРОНАС ФОТОН, а затем ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, с помощью которых будет изучаться наше светило, в том числе невидимые с Земли его полярные области.

Итак, вещество Солнца подходит к Земле в виде солнечного ветра, иногда после больших вспышек на Солнце многократно усиленного. И вот тут-то заряженные частицы солнечного ветра попадают в магнитное поле Земли. По структуре оно похоже на поле Солнца и на поле, создаваемое круговым витком с током, – поле диполя (рис. 13, 14, см. цветную вклейку). А что происходит с заряженными частицами в магнитном поле? Они под действием силы Лоренца (12) начинают двигаться по окружности с радиусом Лармора

$$\rho = \frac{Mv}{qB}. \quad (14)$$

Это тот радиус, при котором центробежная сила  $Mv^2/\rho$  как раз и уравнивается силой Лоренца. Правда, движение по окружности происходит только для тех частиц, которые попадают в магнитное поле строго под прямым углом к его направлению. В общем случае, когда есть хотя бы небольшая составляющая вектора скорости вдоль поля, то частица движется вдоль силовой линии по спирали. Ведь согласно (12) на частицу, движущуюся вдоль поля, сила Лоренца не действует! Итак, заряженные частицы устремились вдоль силовых линий к Южному и Северному магнитным полюсам Земли, И мы их видим в виде полярных сияний. Конечно, мы не видим частицы солнечного ветра, но видим излучение атомов и молекул верхних слоев атмосферы, возникающее при их возбуждении энергетичными частицами солнечного ветра (рис. 15, 16, см. цветную вклейку).

Зеленое свечение вызвано атомарным кислородом на длине волны 577,7 нм, кислород же дает и линию красного дублета 630-636,4 нм, а молекулярный азот придает пурпурный оттенок. Кроме того, под действием солнечного излучения может происходить и свечение атмосферы, которое вызвано рекомбинацией диссоциированных солнечным излучением молекул.

Но далеко не все из заряженных частиц гибнут в столкновениях с атомами земной атмосферы. Если посмотреть внимательно на рис.14а, то мы увидим, что у магнитных полюсов магнитные силовые линии сгущаются. Это значит, что поле становится сильнее. И тут надо сказать о физическом законе, который в средней школе не проходят. Дело в том, что кроме энергии и импульса сохраняются еще некоторые величины. В рассматриваемом нами случае сохраняется отношение кинетической энергии вращательного движения частиц к величине магнитного поля. Это приводит к тому, что некоторые частицы, у которых продольная (вдоль поля) энергия кинетического движения недостаточно велика, отражаются от области более сильного магнитного поля (магнитной пробки). От пробки одного полюса отразились, потом от пробки у другого полюса отразились, да и остались «болтаться» между полюсами, как говорят физики – захватились в магнитную ловушку, которую представляет собой магнитное поле Земли.

Более подробно последовательность взаимодействия плазменного сгустка солнечного ветра с магнитосферой Земли показана в видеоприложении. Видно, что магнитное поле Земли не симметрично по отношению к Солнцу – обращенная к нему сторона поля похожа на поле диполя со сферическими магнитными поверхностями, в то время как удаленные от Солнца магнитные силовые линии вытягиваются, образуя так называемую магнотопазу (см. рис. 14а). Плазма деформирует силовые линии, обтекает Землю. Проникновение частиц солнечного ветра в радиационные пояса Земли возможно через особые точки магнитосферы (так называемые дневные полярные каспы), а также через так называемый нейтральный слой в хвосте магнитосферы (с её ночной стороны). Во время магнитных бурь, когда Земли достигают мощные потоки солнечной плазмы, на расстоянии 3—5 радиусов Земли образуется кольцевой ток протонов. Магнитное поле этого тока деформирует силовые линии магнитосферы, при этом полярные сияния наблюдаются значительно ближе к экватору. Считается, что радиационные пояса заполняются также протонами, которые образуются при распаде нейтронов. А последние возникают из атомов атмосферы под действием космических лучей.

Мы объяснили, что такое солнечный ветер, полярные сияния, настал черед рассказать о магнитных бурях и вообще о зависимости от Солнца геомагнитной обстановки, о которой так часто упоминают в прогнозах погоды. Попробуем объяснить, почему ваши бабушки и дедушки дополнительно принимают лекарства, когда на нашем светиле наблюдаются вспышки и выбросы плазмы. Достигая орбиты Земли, выброшенная плазма начинает взаимодействовать с магнитным полем Земли и не только путем заселения магнитных силовых линий движущимися вокруг них заряженными частицами. Еще одна характеристика плазмы нам понадобится для того, чтобы все стало предельно ясно. Это ее давление  $p = nkT$ . Это такое же давление плазмы, как и у газа с концентрацией  $n$  и температурой  $T$  ( $k$  – постоянная Больцмана). У магнитного поля тоже есть свое давление (способность силового воздействия на проводники с током)  $p_m = B^2/2\mu_0$  (здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). Если индукцию магнитного поля подставить в теслах, то давление, как и положено в системе СИ, будет в паскалях. Так вот, если давление пришедшей от Солнца плазмы оказывается больше магнитного давления поля Земли (а это и происходит, когда выбросы плазмы на Солнце сильные и, соответственно, высока концентрация заряженных частиц), то магнитные силовые линии прогибаются под действием более высокого давления плазмы, и, следовательно, магнитное поле Земли слегка меняется. А что происходит, когда меняется величина магнитного потока (поток  $\Phi$  – это произведение индукции поля  $B$  на площадь контура  $S$ ) через какой-нибудь проводящий контур? Закон электромагнитной индукции известен с 7-го класса:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (15)$$

Ну конечно, в контуре наводится ЭДС  $\varepsilon$  и в нем течет ток. Ток именно такого направления, чтобы вызываемое им магнитное поле препятствовало изменению начального магнитного поля. Так вот, достаточно слабое изменение магнитного поля Земли, но в контуре большой площади может привести к большому изменению магнитного потока. Ну, а если это происходит достаточно быстро ( $\Delta t$  мало), то согласно (15) жди большого ЭДС. Именно так и произошло в канадской провинции Квебек, когда после вспышки на Солнце

вышла из строя вся система электроснабжения. Люди застряли в лифтах, оттаяли холодильники, началась паника и прочие неприятности нашего электрифицированного мира в момент внезапного отключения электричества. Небольшое изменение магнитного потока через охватываемый линиями высоковольтных передач большой по площади контур привело к возникновению такой ЭДС, что сгорели все предохранительные элементы. Возможно, нечто похожее происходит и в человеческой голове. Ведь внутри у нас тоже плазма (плазма крови), но это совсем другая плазма, а вообще-то наша кровь представляет собой электролит, в котором есть положительно и отрицательно заряженные ионы, и эти ионы под действием внезапно возникшего в пределах контура нашей головы электрического поля тоже начинают двигаться. В этот момент и велика вероятность различных сбоев в работе мозга, у пилотов и машинистов возникают неожиданные сбои и ошибки, а у пожилых людей – головные боли. Я далек от медицины, возможно, механизмы нарушений значительно сложнее, но из физики слов не выкинешь. Если есть заряды и поля, то под их действием заряды должны двигаться!

Хорошо известно, что «непогода» на Солнце начинает сказываться на самочувствии людей значительно раньше (за 2-3 дня), чем солнечный ветер достигнет окрестностей Земли и изменит ее магнитное поле. Так что же действует на людей – усиление потока электромагнитной энергии, наблюдаемой при вспышках? Нет, все значительно сложнее и интереснее. Итак, мы знаем, что Землю окружают различные слои заряженных частиц. Самый близкий начинается на высоте ~ 100 км над ее поверхностью. Это ионосфера, название подсказывает, что там находятся ионы и электроны, т.е. плазма. Таким образом, над нами находится слой плазмы. Плазма эта образована в основном за счет ионизации нейтральных атомов и молекул «жесткими» компонентами солнечного излучения в ультрафиолетовом и более коротковолновом диапазоне энергий, поэтому ее концентрация зависит от энергетического спектра и интенсивности солнечного излучения. Естественно, что в дневное и ночное время концентрация плазмы над нашими головами разная. Но мы знаем, что от концентрации плазмы  $n_e$  зависит и частота плазменных колебаний  $\omega_p$  (см. формулу (6)), а значит? и длина волны отраженных от плазмы электромагнитных волн, которые мы вдруг решили на нее направить. Вы знаете, что с изобретением в

начале прошлого века радио (Попов) человечество передает с помощью радиоволн огромное количество информации. Взгляните на диапазон настройки радиоприемника – длинные (километры), средние (сотни метров), короткие (десятки метров), наконец, ультракороткие (метры) – на всех диапазонах волн можно послушать интересующую нас радиостанцию. На современных приемниках, правда, диапазоны отсчитывают в частотах. Если вспомнить, что электромагнитные волны распространяются со скоростью света  $c$ , то связь между длинами волн и их частотой очевидна, см. формулу (10).

А вы не задумывались, почему на длинных и средних волнах можно слушать станции хоть из Южной Америки, уверенный прием в УКВ-диапазоне ограничен только прямой видимостью передающей антенны, а для обеспечения мобильной телефонной связью ( $f = 900$  МГц или 33 см) все обитаемое пространство «утыкали» передающими или ретрансляционными вышками? Пора объяснить, какую роль в дальней радиосвязи играет ионосфера. Кажется вполне понятным, что если частота попадающих в плазму электромагнитных колебаний много меньше ленгмюровской частоты, то такая волна через плазму не пройдет по простой причине. Электроны в электрическом поле волны начнут колебаться, поглощая энергию волны. Другое дело, если частота падающей волны такова, что они за короткое время ее определенной направленности не успевают сдвинуться. Такая волна свободно проходит сквозь плазму. И граничная частота для отражения либо прохождения электромагнитных волн как раз и задается формулой (6) для  $\omega_p$ . Для того чтобы подсчитать, какие волны пройдут сквозь ионосферу, а какие отражатся, надо учесть, что в формуле (6) приведено значение круговой частоты (радианы в секунду), поэтому  $f = \omega_p / 2\pi$ . Если плотность плазмы в ионосфере, например,  $n_e = 10^5 \text{ см}^{-3}$  (день, высота  $\sim 100$  км), то  $\omega_p = 7,6 \cdot 10^7$  рад/с,  $f \approx 12$  МГц или 25 м. Поэтому при такой концентрации плазмы в ионосфере волны большей длины отражаются от нее и могут быть «пойманы» радиоприемником на значительно большем расстоянии. Не следует забывать, что волны могут отражаться и от проводящей поверхности Земли и океана. Вот и сверхдальняя связь на коротких волнах! В момент вспышки на Солнце интенсивность излучения возрастает во много раз, соответственно должна возрастать и концентрация плазмы в ионосфере.

Более короткие волны начинают отражаться и распространяться на большие расстояния. Очевидно, что дневная и ночная ионосферы имеют разную концентрацию плазмы, следовательно, радиосвязь будет определяться и этим обстоятельством.

Но все это только полезная преамбула к ответу на вопрос о чувствительности людей к магнитным бурям. Оказывается, проводящий слой ионосферы и поверхность Земли образуют некий резонатор, в котором, как в любом резонаторе, особенно хорошо раскачиваются волны вполне определенной частоты (частот). Этот резонатор называется резонатором Шумана, и его характерные частоты показаны на рис.17.

Кроме этого резонатора Поляковым был обнаружен еще один резонатор между проводящими слоями ионно-сферы, расположенными на высотах ~150 и ~1000 км. В этом резонаторе существует свой спектр электромагнитных колебаний в диапазоне 0,25-4 Гц. Так как эти колебания связаны с альфвеновскими волнами, особыми поперечными волнами, возникающими в замагниченной плазме, этот резонатор Поляковым был назван альфвеновским.

Хотя эти колебания поля составляют очень малую долю от магнитного поля Земли, они являются некими характерными естественными частотами, которые могут воздействовать на наш организм. Давайте сравним характерные частоты, наблюдаемые у человека при снятии энцефалограмм и измерении пульса. Во-первых, все могут померить свой пульс – основную частоту, с которой сокращается сердечная мышца (60–70 Гц, в спокойном состоянии). Кроме того, известны  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ -ритмы, характерные для коры головного мозга. Глубокий сон –  $\delta$ -ритм 0,3–3 Гц, человек засыпает или уже спит –  $\theta$ -ритм 3–7 Гц, человек в расслабленном состоянии –  $\alpha$ -ритм 8–13 Гц, состояние активного бодрствования –  $\beta$ -ритм 13–30 Гц. Тонкие измерения пульсаций геомагнитного поля в широком диапазоне частот от 0,1 Гц до 30 МГц в сравнении с мониторингом биометрической информации различных функциональных систем организма, проведенные научной школой А.Г. Колесника из Томска, показали

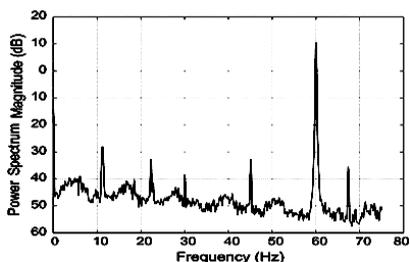


Рис. 17. Спектр частот резонатора Шумана

Хотя эти колебания поля составляют очень малую долю от магнитного поля Земли, они являются некими характерными естественными частотами, которые могут воздействовать на наш организм. Давайте сравним характерные частоты, наблюдаемые у человека при снятии энцефалограмм и измерении пульса. Во-первых, все могут померить свой пульс – основную частоту, с которой сокращается сердечная мышца (60–70 Гц, в спокойном состоянии). Кроме того, известны  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ -ритмы, характерные для коры головного мозга. Глубокий сон –  $\delta$ -ритм 0,3–3 Гц, человек засыпает или уже спит –  $\theta$ -ритм 3–7 Гц, человек в расслабленном состоянии –  $\alpha$ -ритм 8–13 Гц, состояние активного бодрствования –  $\beta$ -ритм 13–30 Гц. Тонкие измерения пульсаций геомагнитного поля в широком диапазоне частот от 0,1 Гц до 30 МГц в сравнении с мониторингом биометрической информации различных функциональных систем организма, проведенные научной школой А.Г. Колесника из Томска, показали

четко фиксируемую корреляцию вариации энцефалограмм мозга испытуемых с вариациями внешней магнитной активности, а биоритмическая активность сердечно-сосудистой системы коррелирует (на 30 %) с резонансными модами альфвеновского резонатора. Что же в этом удивительного? Органическая жизнь зародилась на Земле не только в тепле нашего светила, но и в ритмах, задаваемых естественными резонаторами. Вот, наверное, почему через 8 минут после вспышки на Солнце, когда поток электромагнитного излучения достигает Земли, в магнитосфере увеличивается концентрация плазмы, меняются частоты и амплитуды переменной составляющей электромагнитного фона на Земле, происходит как бы некоторая расстройка ритмов метеозависимых людей, и возникают проблемы со здоровьем. И только через двое суток солнечная плазма с замороженным в ней магнитным полем в соответствии с законом электромагнитной индукции сильно меняет основную составляющую магнитного поля Земли и вызывает сбои в аппаратуре, нарушение связи, замыкания.

#### **4. КОГДА ЖЕ ПЕРЕПОЛЮСОВКА?**

Как известно, активность Солнца имеет одиннадцатилетний цикл. Что на протяжении этого периода происходит с Солнцем? А все дело в изменении электромагнитной структуры Солнца. В спокойной фазе магнитное поле Солнца имеет, как и поле Земли, дипольную структуру с значением поля (на поверхности фотосферы) в единицы гаусс, т.е. всего в несколько раз больше поля Земли. На полюсах же, где концентрируются магнитные силовые линии, поле значительно больше. Но, главное, оно там непостоянно. Примерно через два года от максимума активности Солнца поле на полюсах исчезает совсем, а затем меняет свое направление – происходит переполюсовка! А потом все повторяется. Таким образом, возникновение дипольной структуры Солнца с характерной для нее минимальной активностью происходит через 11 лет, а возвращение направления магнитного поля через 22 года. Зная, что причиной возникновения магнитного поля является ток, можно предположить, что именно круговой ток под поверхностью Солнца в так называемой конвективной зоне и является источником дипольного поля. Откуда этот ток берется? Но ведь Солнце быстро вращается!

Период полного оборота внешних слоев на экваторе составляет немало больше 24 дней (а у полюсов 34 дня), но из-за огромного радиуса Солнца линейная скорость вращения на экваторе более 7 тыс. км/ч. Вращающаяся плазма захватывает магнитное поле, оно накапливается до значений, когда, наконец, начинает «выбиваться» на поверхность. Но, если вращать проводящую жидкость или газ, то легко представить образование в ней так называемого гидромагнитного динамо. (На Земле, вероятно, то же самое, для генерации дипольного поля Земли нужна вращающаяся проводящая жидкость!)

Более точно, предполагается, что поле Земли образовано за счет *турбулентного динамо*. Возникающие в проводящей жидкости малые возмущения магнитного или электрического полей, имеют тенденцию усиливаться. Известно, что магнитные силовые линии «вморожены» в идеально проводящую жидкость, причем напряженность поля меняется пропорционально «растяжению» силовой линии. Но при турбулентном движении две любые близкие частицы жидкости с течением времени в среднем расходятся. В результате силовые линии растягиваются, а магнитное поле усиливается! Турбулентность может возникать за счет сил Архимеда из-за неравномерной плотности вещества и сил инерции (сила Кориолиса), связанных с вращением Земли.

Но в отличие от Земли, расплавленные слои железа и никеля которой закрыты сверху твердой корой, ничто не мешает току на Солнце всплыть на его поверхность. Действительно, согласно закону Ампера (13), ничем не удерживаемый виток с током должен расширяться, так как противоположные участки витка отталкивают друг друга, и, соответственно, «всплывать». Данное объяснение опирается лишь на не очень богатый запас знаний из школьного курса физики и не может объяснить, почему следующие 11 лет ток течет в другую сторону. Но аналогия с земным полем вызывает законный вопрос. А возможна ли переполусовка магнитного поля Земли? Согласно сообщениям из печати, поле Земли уменьшается, магнитные полюса на Земле постоянно дрейфуют, а скорость этого движения в последнее время даже усилилась! Из недавнего сообщения [*lenta.ru* от 20.08.2008] следует, что магнитное поле Земли быстро ослабляется (на 10 % за последние 150 лет, в то время как за предшествующие 10 тыс. лет на 30 %), а Северный магнитный полюс быстро смещается из Канады на территорию России. Экстраполяция вперед даст нулевое значение поля уже через тысячу лет! Но доподлинно известно (по анализу ледников километровой

толщины или горных пород), что поле Земли неоднократно меняло свое направление, последний раз 750 тыс. лет назад. Какие последствия можно предвидеть при исчезновении магнитной ловушки для поступающих из космоса заряженных частиц? Ну, в первую очередь, пострадают спутники с их тонкой аппаратурой (и соответственно, системы глобальной спутниковой связи и ориентации), так как приходящие от Солнца заряженные частицы солнечного ветра не будут более «перехвачены» магнитными силовыми линиями, и радиационная обстановка на спутниках резко ухудшится. Почему это повлияет на их работу? Да потому, что в электронике и в материалах, из которых изготовлены спутники, возникнут так называемые *радиационные дефекты*. Природа их физически очень проста, они возникают, если каким-то образом выбить атом из того положения в решетке твердого тела, в котором он находился в первоначальном состоянии. Электронные и оптические свойства материала также нарушатся, если из атома будет удален электрон. Передать атому энергию кинетического движения, превышающую энергию связи в решетке  $E_c$ , можно любой частицей – другим атомом, нейтроном или электроном. А из закона сохранения энергии и импульса (т.е. при упругих столкновениях) следует, что максимальная переданная энергия связана с массами налетающего  $M_1$  и покоящегося  $M_2$  атомов простым соотношением

$$E_2 = E_1 \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (16)$$

которое, кстати, массовым образом подтверждается при игре в бильярд. При лобовом столкновении шаров одинаковой массы налетающий шар останавливается, а ранее покоившийся приобретает энергию (а значит, и скорость) налетающего шара. При нелобовом соударении углы разлета шаров однозначно зависят от так называемого *прицельного параметра*, т.е. расстояния между центром одного из них и прямой, по которой движется центр налетающего шара. Придумать автомат, который бы с большой точностью работал по такому простому алгоритму, кажется абсолютно тривиальной задачей, поэтому не могу себя заставить восхищаться этой игрой. Между прочим, роль прицельного параметра в физике атомных столкновений, которая определяет и ионизацию атомов, и ядерные превращения, огромна! Таким образом, достаточно быст-

рые, а мы уже точно знаем насколько, частицы, выбивая атомы из их положений, в процессах на наноуровне создают настолько много дефектов в твердом теле, что изменяются его макроскопические свойства, уменьшается электропроводность, повышается хрупкость и т.д. Выбитые из атомов электроны, (а это можно сделать не только быстрыми частицами, но и квантами электромагнитного излучения), меняют электрические свойства, цвет материала<sup>1</sup>.

Итак, физические основы воздействия радиации на материалы (и ткани человека!), кажется, понятны. И понятна также огромная роль образованной магнитным полем Земли ловушки для заряженных частиц, которая перехватывает быстрые частицы, концентрируя их в радиационных поясах Земли. Магнитное поле Земли служит ориентацией не только для людей с компасами, но и для животных. Так что при ослаблении земного магнитного поля возможны катаклизмы в их поведении, радиационная нагрузка на Землю также возрастет.

Магнитный диполь Земли неидеален. Над Южной Атлантикой в районе Бразильской магнитной аномалии поле ослаблено. Предполагается, что за это поле Земли отвечает расплавленное железное ядро Земли, с радиусом примерно равным половине земного. Быстрые (за месяцы) изменения этого поля вызывают беспокойство ученых. Ведь мы пока так мало знаем о Земле и вряд ли готовы сейчас активно влиять на ее характеристики такого масштаба!

Ну а если придется, то кто будет обосновывать и разрабатывать проект? Ну, конечно, физики, ведь чтобы создать поле или скомпенсировать его ослабление всего-то надо создать ток. Уже есть не только низкотемпературные сверхпроводники, для поддержания тока в которых нужен жидкий гелий с температурой 4,2 К (на производство которого и компенсацию неизбежных потерь за счет нагрева нужно много энергии)<sup>2</sup>, но и очень быстро прогрессируют

---

<sup>1</sup> Поэтому-то на ускорителе электронов в МИФИ могут придавать невзрачным драгоценным камням необходимый цвет! Кстати, там же занимаются и радиационной стойкостью элементов микросхем, а ведь чем меньше составляющие их элементы, тем воздействие излучения на каждый из них становится заметнее. Недаром американские военные не используют микросхемы с размерами элементов менее 0,13 мкм!

<sup>2</sup> Кстати, именно в России на предприятии Росатома изготовлен самый длинный в мире сверхпроводящий кабель из сплава ниобия с оловом!

так называемые высокотемпературные сверхпроводники. Сейчас уже обсуждаются перспективы перехода на сверхпроводники в линиях электропередач! И эта задача становится одной из важнейших в программе развития инновационных энерготехнологий Росатома.

То, что в космосе полно плазмы, легко понять, ведь там мощные источники энергии, высокоэнергичные частицы и кванты электромагнитного излучения, легко ионизирующие атомы. Не так давно, еще в конце прошлого века, считали, что основная масса вещества во Вселенной на 99 % находится в виде плазмы. Но вот, в 1998 году открыли темную энергию, управляющую судьбой космоса. Теперь полагают, что обычное вещество составляет ~ 5 %, а остальное – эта самая темная энергия (70 %) и темная материя (25 %) [1]! Но это отдельная тема. Любопытных отошлю к Интернету или интереснейшей статье в журнале «В мире науки» №6 за 2007 год [3].

## 5. ПЛАЗМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ В АТМОСФЕРЕ

Кроме магнитного поля поверхность Земли защищает еще и слой атмосферы, при взаимодействии с атомами и молекулами которой быстрые частицы теряют свою энергию. На Земле привычная для нас температура ~ 300 К, при которой ионизации частиц не происходит. Так есть ли плазма в привычном окружающем нас мире? Ну конечно есть! И самые яркие и громкие ее проявления мы видим во время грозových разрядов в виде молний. Но разряды бывают не только между облаками или облаком и поверхностью Земли. Любые электрические разряды в газовой среде сопровождаются появлением *газоразрядной плазмы*. Прежде чем перейти к рукотворным разрядам, которые Человек давно поставил себе на службу, любопытно обсудить *атмосферное электричество*. Тем более, после интригующих передач о Николе Тесла, которому некоторые приписывают фантастическую способность управлять земным электричеством и в качестве примера приводят якобы его эксперимент, известный как чудовищный взрыв знаменитого Тунгусского метеорита. Точная природа этого события пока не установлена, как и природа шаровых молний. Но многое о земном электричестве уже известно.

Итак, природа молнии. Известно, что электрический разряд происходит, когда разность потенциалов между электродами пре-

вышает пробойное напряжение. Наверняка, вам в школе показывали электрофорную машину. Вращая диск и разделяя заряды, разность потенциалов поднимают до тех пор, пока между раздвинутыми на некоторое расстояние шариками не произойдет электрический пробой. Для пробоя сантиметрового промежутка в воздухе необходимо примерно 30 000 В. Молнии зафиксированы длиной до десятка километров. Так что, разность потенциалов достигает десятка миллиарда вольт? Нет. Так как же формируется молния? Прежде всего, разность потенциалов в атмосфере возникает точно так же, как и в электрофорной машине, или совсем просто, как при трении пластмассовой расчески о волосы, т.е. за счет трения, трения о воздух падающих капель в облаках. Между облаком и землей (или разными частями облака) происходит разделение зарядов и повышение разности потенциалов. Так возникает электрическое поле. Если поле такое большое, что заряженная частица до своего очередного столкновения с другой частицей – молекулой успевает набрать в поле так много энергии, что ионизует эту молекулу, образуя электрон и положительно заряженный ион, то происходит лавинное умножение числа зарядов: 2 электрона, 4, 8 и т.д. – возникает лавина. Электроны движутся в одну сторону, положительно заряженные ионы в другую и, достигая электродов, нейтрализуют на них заряды, которые привели к возникновению разности потенциалов. Не будем дальше углубляться в интереснейшую физику газового разряда, а зададимся вопросом, а откуда взялся тот первый электрон, с которого все началось? Вот тут-то надо вспомнить, что Земля – космическое тело и подвергается облучению частицами и квантами самых разных энергий вплоть до самых высоких. А если это так, если атмосферу (да и нас с вами) непрерывно пронзают космические лучи, то в воздухе всегда присутствует некоторое количество ионизированных атомов и электронов. Внимательный читатель скажет, но ведь тогда космическое излучение ответственно и за пробой в опыте с электрофорной машиной! Совершенно верно, точнее, верно в случае, если шары электрофорной машины идеально гладкие и не имеют острых выступов для усиления напряженности поля и появления полевой эмиссии электронов. Но попадающее на Землю космическое излучение неоднородно и во времени, и в пространстве. Кроме более-менее равномерного космического «дождя» радиотелескопы регистрируют и всплески жесткого рент-

геновского излучения, когда его интенсивность возрастает на порядки по величине.

Источниками этих мощных потоков энергии являются пульсары – нейтронные звезды, небольшие по размеру, но обладающие чудовищной массой. В начале мы говорили о том, что размеры ядра  $r_n$  примерно в десять тысяч раз меньше размеров атомов  $r_a$ . Так вот, если представить вещество, состоящее целиком из ядер, то его плотность должна быть уже в  $(r_n/r_a)^3$  раз больше. Такая огромная масса при небольшом размере звезды создает огромное гравитационное поле, которое «сгребает» все окружающее вещество. Мы уже упоминали, что движущаяся с ускорением  $\bar{a}$  заряженная частица излучает электромагнитные волны с интенсивностью, пропорциональной  $|\bar{a}|^2$ . Падение – аккреция вещества на вращающуюся с большой скоростью звезду происходит в области ее полюсов. Оттуда и выходит это очень интенсивное излучение. В тот момент, когда Земля «видит» полюс пульсара, его излучение попадает на Землю. Нейтронная звезда вращается, следовательно, и излучение будет в виде периодических вспышек.

Всего лишь несколько лет назад была замечена корреляция между возникающими молниями и этими всплесками жесткого излучения. Мощное излучение на какое то время ионизует воздух, создавая облегченные условия для прохождения тока. Но это не лавина, которая образуется в разряде между электродами. Распространение молнии определяется так называемым *стримером*. Стримеры представляют собой хорошо проводящие каналы, которые, сливаясь, дают начало каналу с высокой проводимостью — ступенчатому лидеру молнии.

Движение лидера к земной поверхности происходит ступенями в несколько десятков метров со скоростью  $\sim 5 \times 10^7$  м/с, после чего его движение приостанавливается на одну десятитысячную секунды, а затем продолжается такими же быстрыми шагами. По мере продвижения лидера к Земле (рис. 18, 19) напряжённость поля на его конце усиливается, и под его действием из выступающих на поверхности Земли предметов выбрасывается ответный стример, соединяющийся с лидером. В заключительной стадии по ионизованному лидером каналу следует обратный, или главный, разряд с токами от десятков до сотен тысяч ампер и большой скоростью продвижения, доходящей до  $\sim 10^8$  м/с. Температура канала при главном разряде может превышать  $25\,000$  °С, а диаметр – несколько сантиметров. Длительность протекания основного тока составляет сотые или даже десятые доли секунды. При этом выделяется большая энергия. Ее можно оценить (правда, после второго курса МИФИ). Во-первых, энергия уходит на разогрев канала, во-вторых, на создание магнитного поля. Оцен-

ки дают значения выделяющейся энергии в десятки гигаджоулей. Мы знаем, что быстрое выделение энергии – это взрыв. Так вот, быстрое выделение 1 МДж эквивалентно взрыву гранаты массой 250 г тринитротолуола (ТНТ). Поэтому гром – это как бы серия взрывов с соответствующим звуковым эффектом.

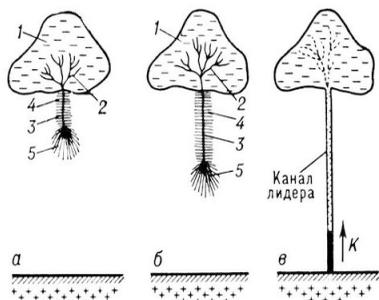


Рис. 18. Схема развития наземной молнии: 1 – облако, 2 – стримеры, 3 – канал ступенчатого лидера, 4 – корона канала, 5 – импульсная корона на головке канала

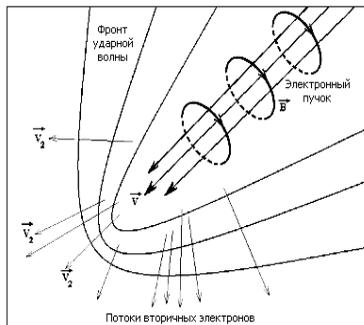


Рис. 19. Процессы во фронте лидера молнии

На рис. 20 показаны разные виды молний. Молния, ударяющая в одиноко стоящее дерево, – предупреждение об опасности так укрываться во время грозы. Токовая струя справа – это сток электрического заряда по каналу, оставленному линейной молнией или высокоэнергетичной космической частицей. В низу рисунка – множество молний во время грозы над городом. В прилагаемом CD эпизоде можно не только увидеть, но и услышать, как развивается молния длиной в десятки километров. «Функции» молний – не только пугать наших пращуров и авиадиспетчеров, но и снабжать почву связанным азотом, необходимым для растений удобрением. Молнии возникают не только в облаках, но и в пепле извергающихся вулканов. Во время знаменитого извержения вулкана Толбачик на Камчатке известный теоретик, более 50 лет преподававший в МИФИ теорию плазмы, профессор кафедры Борис Андреевич Трубников (увлекавшийся альпинизмом и на лыжах спустившийся с Эльбруса) по интенсивности выброса пепла и его распределению по размерам точно рассчитал частоту возникновения (раз в 4 минуты) этих молний над жерлом вулкана.



Рис. 20. Различные виды молний: а) молния, ударяющая в дерево, б) токовая струя после молнии, в) гроза над городом

Велика сила теории, хотя Лев Андреевич Арцимович призывал экспериментаторов относиться к теории как к хорошенькой женщине: брать от нее все, что она может дать, но не доверять ей беспредельно. Тем не менее, школа по теории плазмы Михаила Александровича Леонтовича в Курчатовском институте, к которой принадлежат Б.А. Трубников и другие преподаватели кафедры (теоретики В.И. Ильгисонис, С.К. Жданов, Д.Х. Морозов), до сих пор считается сильнейшей в мире. Именно Б.А. Трубников и С.К. Жданов в своей книге про квазичаплыгинские среды объяснили 56 встречающихся в Природе неустойчивостей, включая неустойчивость холодного слоя воды над теплым – одну из возможных причин бесследного исчезновения кораблей в Бермудском треугольнике. И еще один неожиданный пример. Б.А.Трубников, анализируя частицы пепла на вулкане Толбачик, предложил очень простую аппроксимацию для их распределения по размерам  $\exp(-x/2,73)$ . Совершенно удивительным оказалось то, что этому простому закону подчиняются распределения не только частиц по массам, не только космические лучи по энергии, но и животные по размерам, города, и даже фирмы по численности сотрудников. Закон оказался настолько универсальным, что его используют даже в трудах по экономике.

Однако кроме воздействия на Землю и на людей (сколько людей погибает ежегодно от неправильного поведения во время грозы!) молнии оказывают воздействие и на внешние от земной атмосферы слои. Только недавно были обнаружены загадочные феи и эльфы – цветные образования и красивые струи, бьющие не вниз на Землю, а, наоборот – в область космоса (рис. 21 на цветной вклейке)!

И ведь зачем-то это надо! Действительно, некоторые грозовые разряды сопровождаются генерацией столь мощных электромагнитных колебаний (послушайте радиоприемник на длинных или средних волнах во время грозы!), что возбуждают колебания в околоземной плазме, например, приводя к очищению от заряженных частиц пространство, по которому летают космонавты. Но это только одно из недавно открытых фантастических проявлений плазмы, намного дольше Человечество бьется над загадкой шаровой молнии (рис. 22). Думаю, что многие видели замечательный полет шаровой молнии в фильме Михалкова «Утомленные солнцем», когда светящийся и шипящий шар размером с футбольный мяч влетел в помещение, «погулял» там и удалился через открытое окно. Впечатляющее, но главное непонятное и потому пугающее явление! Сколько же гипотез придумано для его объяснения!

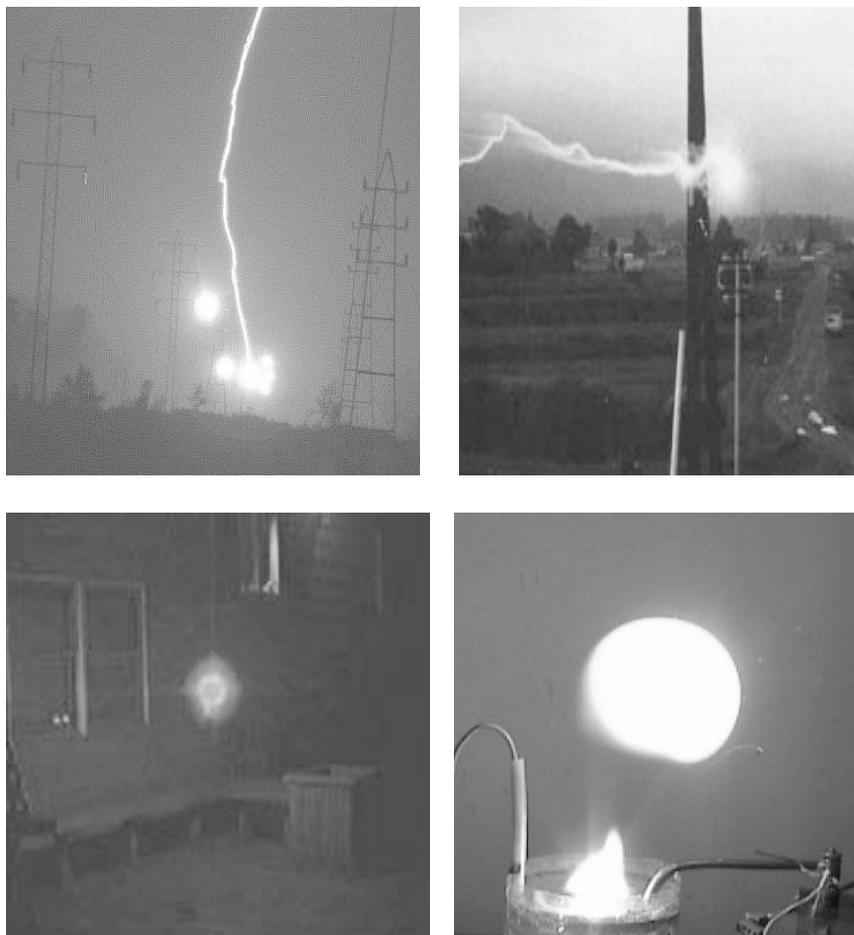


Рис. 22. Различные примеры шаровых молний

Одна из них, предложенная теоретиком нашей кафедры Вячеславом Михайловичем Смирновым, мне очень нравится. Шаровые молнии очень сильно различаются как по виду, так и по запасенной в них энергии. Изучив огромную статистику шаровых молний, он придумал их своеобразную классификацию. Бывают небольшие еле светящиеся объекты (по классификации В.М. Смирнова – это «мыши»), которые могут внезапно «перебежать» дорогу, бывают молнии побольше «собаки» – это как в фильме «Утомленные солн-

цем», но и бывают «слоны», выделяющие при разрушении огромную энергию. Примером подобного «слона» служит наблюдавшаяся под Хабаровском молния, которая как большой мерцающий шар свободно прошла сквозь ветви большого дерева, а под ним взорвалась. Причем на этом месте образовался диск из сплавленного песка толщиной около полуметра и диаметром около полутора метров, а в сотне метров от взрыва перегорели все провода. Знающим толк людям легко подсчитать количество выделившейся при этом энергии (взять объем расплавленного песка, количество энергии, затраченное на его расплавление). Получается, что выделилось 8 ГДж энергии. Согласно приведенному нами ранее соотношению о тротиловом эквиваленте – это соответствует взрыву двухтонной бомбы! Тогда вопрос, а в каком же виде эта энергия была запасена, что молния свободно прошла сквозь густую листву? Гипотеза Смирнова заключается в том, что вся энергия молнии была сосредоточена в крошечном, размером в сотни микрон токовом кольце, но не простом кольце с током, которое, как мы знаем, под действием собственного магнитного поля обязано расширяться. Кольцо с током должно быть помещено в сильное продольное поле. Молния несет большой ток, который создает вокруг себя сильное магнитное поле. При искривлении токового канала возможно пере замыкание магнитных силовых линий и образование замкнутой магнитно-токовой конфигурации. (Пропуская кольцевой ток вокруг линейного тока плазмы, можно создать сфермак – сферическую плазменную конфигурацию с кольцевым током с продольным по отношению к нему магнитным полем.) Такая конфигурация оказывается довольно устойчивой. Следует отметить, что именно в придуманных к Курчатовском институте в середине пятидесятых годов прошлого века магнитных конфигурациях плазмы типа токамака с кольцевым током в сильном тороидальном поле плазма «живет» дольше всего! Эта история заслуживает отдельного рассказа. И об этом коротко будет сказано в последней части этой книжки и более подробно на прилагаемом CD. Поэтому отсылаю читателя к проблеме управляемого термоядерного синтеза в установках с магнитным удержанием плазмы, изложенной в популярных книжках преподавателей нашей кафедры Геннадия Степановича Воронова [5] и Сергея Ва-

сильевича Мирнова [6].<sup>1</sup> Но вернемся к гипотезе Смирнова. Если ток маленький по размерам, то каким он должен быть по величине, чтобы запасенная энергия составила  $10^8$  Дж?

Это легко прикинуть, если знать, чему равна энергия, запасенная в кольце с током. Из элементарной электротехники следует, что эта энергия равна  $W = LI^2/2$ , где  $L$  – известная из справочников индуктивность кольца с током. Так вот ток должен составлять гигаамперы.

Сразу возникают два вопроса, первый – как через воздух можно пропустить такой большой ток? Ну, конечно, должна быть сверхпроводимость. И второй вопрос – какой величины должно быть магнитное поле, создаваемое этим током. Ведь физически именно в магнитном поле сосредоточена запасенная энергия, так как плотность этой энергии – это всего лишь  $B^2/8\pi$  (в гауссовой системе единиц). Используя простую формулу для напряженности магнитного поля, создаваемой на расстоянии  $R$  от него протекающим током  $I$  (см. формулу (11)), учитывая малые размеры этого токового кольца, получаем  $10^{10}$  Гс. Это фантастические поля, при которых согласно современным физическим представлениям происходит квантование уровней энергии (появляются уровни Ландау). То есть мы имеем дело как бы с магнитным макроатомом. И такие поля – это не выдумки ученых – такие поля существуют в недавно открытых *магнетарах* – нейтронных звездах с сильным магнитным полем [1]. Поистине, удивительное рядом. Сверхсильные магнитные поля в страшно удаленных от нас элементах Вселенной и какой-то трактор под деревом. Но ведь именно в этом вся необычайная притягательность и могущество физики – зная физические законы, постараться понять и объяснить все сущее.

---

<sup>1</sup> На международной конференции по физике плазмы в Фукуоке (Япония) в сентябре 2008 года в юбилейной лекции, посвященной 50-летней истории термоядерных исследований, 1968 год был отмечен как год триумфа советской науки, триумфа токамаков, которые оказались самыми лучшими магнитными ловушками из всех придуманных в мире. Вот почему первый международный термоядерный реактор ИТЭР, строительство которого началось недавно во Франции, является токамаком. Но как это получается и почему эта система лучше, узнают уже студенты 4 курса МИФИ.

## 6. И ГУБИТЕЛЬНАЯ, И ВРАЧУЮЩАЯ

Итак, мы от звезд все-таки опустились на Землю. Как же Человечество, только в 20 веке познакомившись с новым для себя состоянием вещества, распоряжается плазмой? К сожалению, первая самая серьезная и внушительная плазма была создана в военных целях. Для людей, находившихся еще на стадии полудикого общественного сознания, не научившихся владеть своими эмоциями и инстинктами, погрязших в катастрофическом противостоянии в мировых войнах, логика немедленного овладения только что открывшимися ученым тайнами высвобождения энергии деления ядер и, конечно же, значительно более мощной энергией их синтеза в виде ядерного и термоядерного оружия была вполне естественной. Затратив огромные материальные и интеллектуальные усилия, Человечество добралось до звездной энергии, но в какой уничтожительной и чудовищной форме! Взрыв термоядерной бомбы, при котором была осуществлена неуправляемая реакция термоядерного синтеза, сопровождался созданием плазмы с температурой значительно большей, чем на поверхности Солнца, и сравнимой с температурой его центральной части – выше 100 миллионов градусов. Испытания все более мощных бомб дошли до логического конца, когда на Новой Земле взорвали бомбу мощностью более 50 Мт. Начинаем множить и сравнивать. Пятьдесят миллиардов килограмм ТНТ (тринитротолуола) равны по нашей формуле  $5 \cdot 10^{10} \text{ кг} \cdot 4 \text{ МДж/кг} = 2 \cdot 10^{17} \text{ Дж}$ . А сколько же мы получаем от Солнца? Легко прикинуть, взяв среднее значение мощности излучения Солнца, попадающего на Землю  $\sim 1 \text{ кВт/м}^2$  (с учетом отражения), и умножив на видимую от Солнца поверхность  $S = \pi R^2_3$ , что при радиусе Земли 6300 км дает  $\sim 125$  млн квадратных километров или  $1,25 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$ . Если учесть, что часть энергии попадает под небольшими углами и отражается, то получим примерно  $1,3 \cdot 10^{17} \text{ Дж/с}$ . Масштаб «игр с петардами» понятен? То есть энергии выделилось бы столько, сколько получает Земля в течение почти 2 секунд! Всей биосистеме планеты для получения такой энергии от Солнца через фотосинтез потребуется почти полчаса. Говорить о том, что от солнечной энергии зависит погода на Земле, надеюсь не надо. Тогда понятно, что человечество (почему-то в данном случае мне хочется написать это слово с маленькой буквы) по-

дошло вплотную к границе допустимого воздействия на ту самую Природу, которую оно так стремилось покорять! Человечество подошло к грани своего существования как вида!

Но теперь только о хорошем, о гуманистическом. О той пользе, которую человек научился извлекать, применяя плазму. Начну с *медицины и экологии*. Теперь уже не вдаваясь в физические (тем более, что они уже скорее биологические) подробности, расскажу о том, что узнал от своих студентов (в основном студенток, которые, как правило, в качестве подготавливаемой ими презентации выбирали медицинские применения плазмы). Плазма стерилизует медицинский инструмент и делает это лучше всех других способов. Плазменные стерилизаторы используют не только для уничтожения всех вредоносных микробов на поверхности металлического инструмента, например скальпеля, но также для обработки тканей, кожи живого человека. Но может возникнуть вопрос, как же это плазма, для ионизации которой необходима высокая температура, может быть холодной? Не верите? На рис. 23 показан плазменный прибор, который я сам держал в руках и гладил плазмой себя по



Рис.23. Лечение плазменным инструментом

коже в учебно-научном центре «Плазма» у Анатолия Диамидовича Хахаева в Петрозаводске. Дело в том, что небольшой температуры вытекающей струи слабоионизованной плазмы (это в основном струя газа) достаточно для того, чтобы электроны из

хвоста распределения возбуждали в этом газе излучения атомов, которые светят, в том числе и в ультрафиолетовом диапазоне, а также для появления радикалов и ионов (радикал – это часть молекулы, у которой после отрыва одного или нескольких атомов остаются незаполненные связи). Ультрафиолет, как известно, губителен для микробов и микроорганизмов, всяких там стафилококков и стрептококков, радикалы и ионы, также активно взаимодействуя с ненужными образованиями на поверхности, разрушают их, кроме того, излучение и активные частицы служат стимуляторами полезных процессов в плазме крови (поэтому раны, обработанные такой

плазмой, быстро заживают). Вот и получается, плазма есть, а тепла нет.

Можно пойти по другому пути – сделать плазменные разряды очень короткими по времени (в десятки наносекунд), тогда температура просто не будет успевать повышаться, а все полезные свойства плазмы в полной мере проявятся. Может иметь место и еще одна физически понятная гипотеза селективно полезного воздействия плазмы на больные органы. Бактерии, как правило, значительно меньше клеток человека, а значит, соотношение поверхности к объему у них больше, вот и получается, что под действием плазмы в отличие от клеток они быстро погибают! Самое интересное, как показали последние исследования, злокачественные клетки меланом после воздействия плазмы продолжают гибнуть еще в течение многих часов.

Другой пример, когда тепло уже есть – это плазменный скальпель. Зачем нужен плазменный скальпель, зачем тело человека надо обязательно прожигать, а не резать? Дело вот в чем: при «высокой» температуре кровь свертывается и вместо того, чтобы течь из раны или перерезанных мелких сосудов, просто коагулирует! Это позволяет проводить бескровные операции, что очень важно, особенно в микрохирургии столь деликатных органов, как глаза и т.д.

Умение разрушать (иногда очень вредные для человека) молекулы можно активно использовать для того, чтобы защитить нас от вредных выбросов. Это уже не медицинское, а *экологическое применение плазмы*. Например, применяя импульсный коронный разряд в потоке выходящих из какой-нибудь печи или другого дымного производства газов (как это делает в предложенных им устройствах профессор нашей кафедры, научный сотрудник ТРИНИТИ Юрий Семенович Акишев), можно резко уменьшить содержание вредных окислов и серосодержащих веществ, превращая их после плазменного воздействия в другие формы, выпадающие в виде твердого осадка. Уже безопасные твердые отходы затем используют, например, в строительстве. Рассказывать о том, какие процессы при этом происходят и как можно улучшить экологическую обстановку не буду. Отошлю к книжке Ю.С. Акишева, специально написанной для студентов МИФИ [7]. Могу только привести пример из своего общения в минувшем году с представителями фирмы НИССАН, которые приезжали к нам в МИФИ в поисках способов снижения вредных выбросов и повышения экономичности двигателя с применением плазменных процессов. Вопросы, которые мы

с ними обсуждали, касались предложения доцента нашей кафедры Игоря Владимировича Цветкова использовать в двигателе внутреннего сгорания для высокоточного впрыска и одновременного предварительного разложения на радикалы топлива вместо клапана напуска и свечи зажигания специального факельного разряда. Применение особым образом организованного такого разряда снижает расход топлива на 20 %. А плазменные (точнее электроразрядные) дожигатели выхлопа на больших грузовиках в Японии уже используются. Да и по моим ощущениям, несмотря на большее количество машин, воздух в Токио заметно чище, чем на московских магистралях! Так что есть, над чем работать!

Не удержусь от еще одного убедительного примера использования плазмы. Во многих городах мира существуют трудности с утилизацией мусора. Наверное, помните из новостей проблему мусора в Неаполе: и картинки заваленного горами мусора города, и разговоры о неаполитанской мафии. Проблема в том, что негде складывать этот мусор, места уже не хватает. Так надо его перерабатывать! Но если просто сжигать, то вред здоровью человека можно нанести еще больший. Вот здесь на помощь и пришли плазменные мусоросжигательные заводы. Один пример: построенный год назад в Израиле такой завод не только не убыточен, но и пополняет городской бюджет за счет выпуска необходимых для дорожного строительства материалов.

## **7. КАК ПЛАЗМА РАБОТАЕТ В «ПЛАЗМЕ»**

Было бы странно для человека после прочтения книжки про плазму не уметь рассказать любимым родственникам, а как же, собственно, работает их плазменный телевизор. Поэтому не из-за нетерпения поделиться, а из-за невозможности опустить столь пространственный пример применения плазмы кратко расскажу о принципах устройства плазменных панелей.

Принцип действия каждой ячейки плазменной панели основан на свечении специальных люминофоров под действием ультрафиолетового излучения плазмы, возникающей в маленьком разрядном промежутке. Благодаря подаче управляющих сигналов на вертикальные и горизонтальные проводники, нанесенные на внутренние поверхности стекол панели, которая состоит из таких ячеек, осуще-

ствляется "строчная" и "кадровая" развертка изображения. При этом яркость каждого элемента изображения определяется временем свечения соответствующей ячейки плазменной панели: самые яркие элементы "горят" постоянно, а в наиболее темных местах они вообще не "поджигаются". Поэтому плазменные панели контрастнее, чем жидкокристаллические экраны. Кстати, первые, еще несовершенные и монохромные плазменные панели, были разработаны и выпускались в Рязани в НПО «Плазма». Как работает современная плазменная панель показано на рис. 24.

Генерирующий ультрафиолет разряд зажигается в смеси из Ne и Xe, находящейся под низким давлением (так, чтобы электроны на длине своего пробега успели набрать энергию для возникновения лавины и зажигания самостоятельного тлеющего разряда).

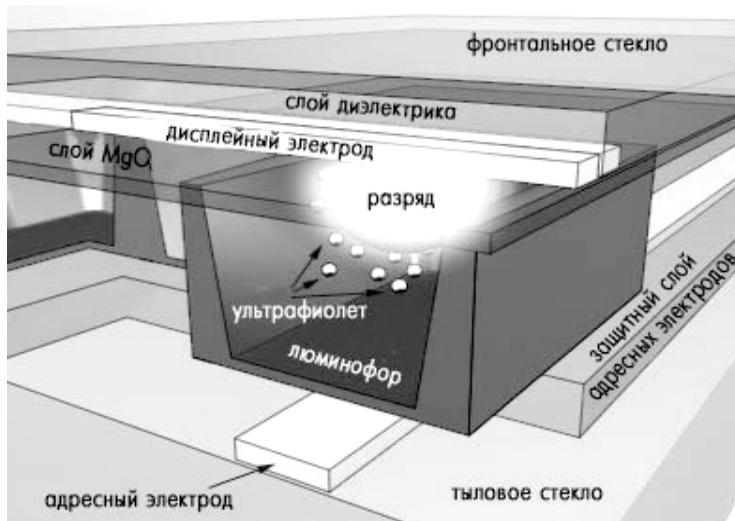


Рис.24. Устройство ячейки плазменного дисплея

Однако хитрость в том, что разряд между двумя дисплейными электродами (сверху над ячейкой), разделенными диэлектриком и диэлектриком же отделенными от разрядной ячейки, возникает лишь после подачи напряжения на адресный электрод. Поэтому разряд в каждой данной ячейке вспыхивает при совпадении подачи сигналов управления (напряжения) на взаимно перпендикулярные дисплейные электроды (строки) и управляющие электроды.

## 8. ПЛАЗМЕННЫЕ НАНО- И НЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Для того, чтобы быть здоровым и жить в безопасном мире, человеку надо больше знать, лучше слышать, дальше видеть, больше уметь, больше помнить, иметь надежных помощников – машин и.т. И для всего этого необходимы *плазменные технологии*. Возьмем материалы, которые человек использует. Все знают, сначала был каменный век, потом бронзовый, потом наступило время железа. А какой материал сейчас самый главный? А главного-то и нет! Могут возразить, в нашей теперь рыночной экономике самый важный материал – золото. Ведь это Ленин мечтал, что наступит время, когда золото будет нужно разве что для изготовления унитазов! Так почему золото играет такую роль в сознании людей, почему стало всеобщим меновым эквивалентом? Да потому, что золото – вечный металл, не портится, не окисляется, красиво блестит. Храниться может вечно. Недаром главной задачей алхимиков было превращение ртути в золото. А причем здесь плазма? Оказывается именно она и может сделать то, что не удалось алхимикам, но об этом, позже. Благодаря плазме создано покрытие, которое блестит, как золото, но еще меньше подвержено коррозии.. Недаром им стали покрывать купола храмов, и даже купола Храма Христа Спасителя в Москве! И дешевле, и дольше сохраняется (если быть точным, то в 5 раз дольше в достаточно агрессивной атмосфере наших городов, чем покрытие из золота). Речь идет о *нитриде титана*, который теперь можно встретить, где угодно в быту, на ручках дверей, и что еще интереснее, на поверхности режущего инструмента, так как этот материал намного тверже инструментальной стали, и его применение увеличивает производительность труда.

Мое желание немного подробнее рассказать об этом покрытии объясняется не только тем, что его можно получить исключительно в плазме, но и как повод для того, чтобы напомнить, что плазменный метод его создания, широко используемый во всем мире, был изобретен в СССР. История была типичной для научных исследований. Исследования были очень серьезные – по программе управляемого термоядерного синтеза в рамках Министерства среднего машиностроения. Для создания очень высокого вакуума было предложено использовать титан (а он очень хорошо при нагревании испаряется), при напылении на охлаждаемую поверхность ти-

тан активно связывал молекулы остаточного газа, обеспечивая высокую скорость откачки установок. При распылении титана были обнаружены какие-то желтые пленки, которые невозможно было удалить. Чтобы не отвлекаться на выяснение природы этих пленок, исследования данной проблемы из Ленинградского научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры передали в Харьковский физико-технический институт. И в лаборатории Падалки не только изучили свойства этого покрытия, которое образуется в плазме при соединении титана с ионами азота, но стали выпускать установки «Булат» для массового производства таких покрытий. Например, сразу догадалась заменить золотые коронки на коронки из стали, покрытые нитридом титана. Вид был не хуже, а служили они намного дольше. Знаю по личному опыту. И тогда Министерство среднего машиностроения (нынешний Росатом) продал за миллион долларов эту лицензию на Запад с уговором, что мы используем эту технологию в странах соцлагеря, а они в остальных странах. Этот пример интересен тем, что еще раз доказывает непреложный факт – при проведении фундаментальных исследований часто возникают необычайно экономически выгодные прикладные результаты.

Бывает и наоборот, прикладные исследования буквально спасают фундаментальную науку. В начале 1990-х, когда финансирование науки полностью прекратилось, и как-то надо было выживать, сохранять научные коллективы, у нас на кафедре в группе профессора Леона Богдановича Беграмбекова наладили производство установок для нанесения нитрида титана на всякие товары народного потребления (см. рис. 25 с образцами подобного рода, сделанными в группе Леона Богдановича). Конечно, установки были намного дешевле и эффективнее, чем



Рис. 25. Покрытые нитридом титана на нашей кафедре различные бытовые изделия

«Булаты», иначе мы не смогли бы их продать! И именно эти первые деньги, полученные от только что возникшего бизнеса, позволили сохранить научный коллектив кафедры, главной задачей которого все-таки было не получение денег, но получение знаний о природе вещей. Пример, когда прикладная разработка позволила продолжить фундаментальные исследования. Здесь, конечно, уместно сказать и об уникальной образовательной системе МИФИ, которая сочетает глубокую физико-математическую подготовку с инженерной, что и позволяет физические идеи быстро превращать в реальные изделия или технологии. Ну, если мы заговорили об улучшении жизни людей, то уже всем ясно, что без **нанотехнологий** это невозможно. Вопрос, а при чем здесь плазма? Ведь нанобъекты, это объекты наноразмеров, т.е. размеры которых составляют менее 100 нм. Скорее создание таких структур относится к физике твердого тела или к физике поверхности. И главная здесь – квантовая механика, а не физика плазмы. Действительно, в данном случае речь идет об объекте, в котором настолько мало атомов, что свойства этого объекта начинают отличаться от свойств обычного вещества – металла, полупроводника.

Наверное, «продвинутые школьники» знают, что отдельные уровни энергии, которые существуют в изолированном атоме, при сближении нескольких таких атомов начинают расширяться, и при достаточно большом их количестве «расплываются» в зоны. Так, у металлов есть зона проводимости, образованная из внешних электронов, в которой для перемещения электронов достаточно приложить лишь небольшую энергию (что и определяет проводимость металлов), и заполненные зоны, в которые объединяются электроны внутренних оболочек атомов. Так, при небольшом количестве атомов в некотором кластере, электронные его свойства начинают отличаться и от свойств проводника, и от свойств диэлектрика. Вот именно здесь и начинается самое интересное. Объекты небольших размеров начинают обладать совершенно новыми свойствами, что и определяет огромный интерес к нанотехнологиям. Наноточки – это как бы искусственные атомы с совершенно новыми свойствами. Несколько атомов, помещенных рядом в некоторую «конструкцию», например, с помощью атомного силового микроскопа, из-за присущих им сил взаимодействия перестраивают эту свою конструкцию (как известно, стремясь к минимизации энергии). То есть квантовые точки – самоорганизующиеся объекты!

Плазменная обработка нужна для того, чтобы «закрепить» созданную конфигурацию.

Плазменное «кондиционирование» оказывается и быстрее, и дешевле, чем «поатомная» сборка. (Как показал Константин Остриков на последнем плазменном конгрессе в Фукуоке, плазменное осаждение атомов германия на кремниевую подложку позволяет сразу же создать однородные квантовые точки). Поэтому плазменная нанотехнология вещь не только внутренне непротиворечивая, но и наоборот, необходимая для наноконструирования, так как позволяет управлять процессами самоорганизации нанобъектов (рис. 26).

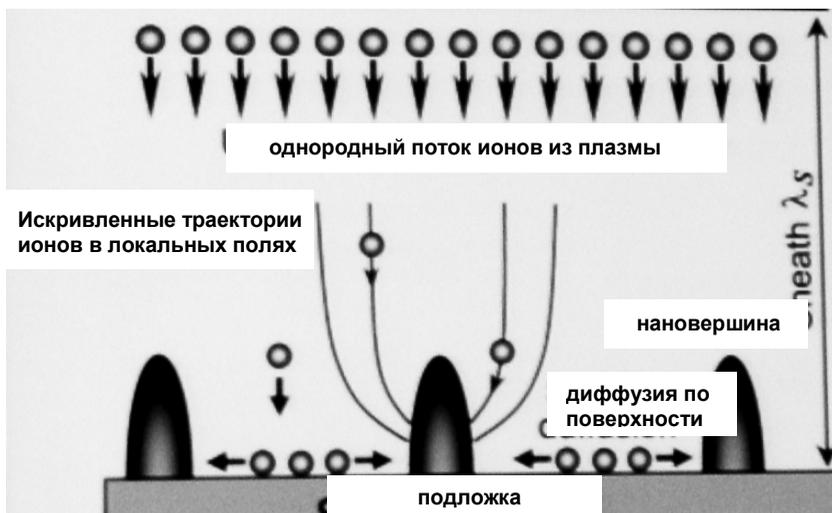


Рис.26. Процесс самоорганизации наноструктуры на поверхности под действием плазменного облучения (материал любезно предоставлен Костей Остриковым)

Так как XXI век начинался с революции в нанотехнологиях, и в значительной мере наша жизнь, ее продолжительность и качество будет определяться уровнем и масштабами использования таких технологий, остановимся несколько подробнее на применении плазмы в этом великом цивилизационном свершении, а именно, на *плазменных нанотехнологиях*. Получение нанопорошков или ультрадисперсных материалов открывает фантастические возможности во всех сферах человеческой деятельности. От нанокапсулирования лекарств до порошков, добавки которых в материалы, краски и дорожные покрытия резко улучшают их свойства.

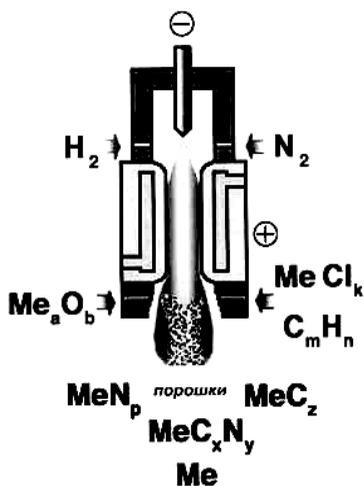


Рис. 27. Плазменно-струйный метод получения нанопорошков

Одним из наиболее применяемых методов получения этих порошков является плазменный (рис. 27). Между катодом и цилиндрическим охлаждаемым анодом зажигается дуга, в которую подают как различные чистые газы, так и газообразные соединения металлов. В дуге с добавлением инертного газа образуется низкотемпературная плазма (не забудем, что таковой она называется вплоть до 100 000 градусов), в которой и происходят реакции соединения различных элементов. Так получают порошки металлов, сплавов, оксидов, нитридов, боридов и карбидов с размерами частиц от 10 до

1000 нм, а кроме того, частицы цирконата-титаната свинца для изделий из пьезокерамики. Достаточно упомянуть наночастицы из оксида вольфрама, которые при добавлении в пластмассы резко повышают их износостойчивость.

В плазме достаточно легко получать строительные углеродные «нанокирпичики» для различных применений – это фуллерены и углеродные нанотрубки. В дуге, горящей между двумя графитовыми электродами, получают в изобилии и те, и другие. Установка настолько проста, что опыты по получению в плазме фуллеренов успешно проводились несколько лет назад школьниками в нашем лицее № 1511. Нанотрубки обладают удивительными свойствами – они в 20 раз прочнее самой прочной стали, в 1000 раз лучше проводят ток, чем медь, и в 2 раза лучше проводят тепло, чем самый теплопроводный материал – алмаз. В настоящее время на базе углеродных нанотрубок разработаны транзисторы, светоизлучающие элементы, а компания NEC, владеющая патентом на эти технологии, обещает представить первый чип на нанотрубках к 2010 году.

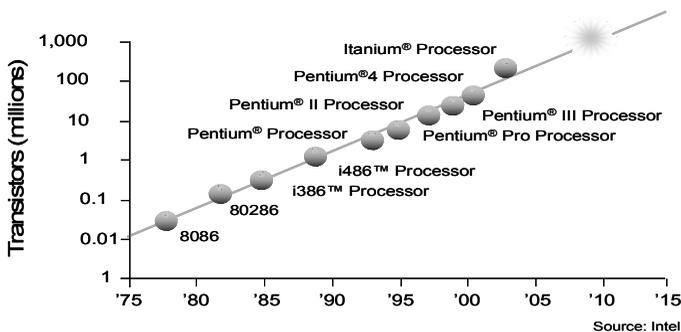


Рис. 28. Закон Мура, описывающий рост производительности компьютеров со временем

В современных информационных (ИТ) технологиях (компьютеры и запоминающие устройства), оказывается, без плазмы тоже мало, что можно сделать. Прежде, чем объяснить, где и как используется плазма в микро- и нанoeлектронике, несколько слов надо сказать о том, что собой представляют элементы этой электроники – сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) или чипы. Чип включает в себя целое семейство различных логических элементов, необходимых для обработки цифровых сигналов – это и транзисторы, и соединяющие их элементы, и электрически разъединяющие их слои диэлектриков и т.д. Для того чтобы увеличить быстродействие и число элементов на единицу объема, размеры элементов делают все меньше. Согласно закону Мура, количество транзисторов на единице поверхности удваивается каждые полтора года (рис. 28), а сами их размеры переходят в нанометровую область. Технология изготовления СБИС заключается в том, что сначала «рисуют» на поверхности большой (так все получается намного дешевле) кремниевой пластины очень мелкий рисунок нужных схем, а затем разными методами формируют необходимые логические элементы и соединения между ними. Для этого на поверхность наносят фоторезисты – материалы, которые изменяют свои свойства под действие электромагнитного излучения, а затем проводят облучение (экспонирование) через маску (фотошаблон) или «рисуют» тонким электронным лучом (электронно-лучевая литография). В неприкрытых маской местах свойства фоторезиста под действием облучения изменяются. Например, полимерные волокна смешивают с фоточувствительным веществом, которое под дейст-

вие облучения электромагнитным излучением приводит к полимеризации фоторезиста и затрудняет его дальнейшее растворение в «проявителе». Возможен и совершенно другой процесс, когда под действием облучения фоторезист становится растворимым в проявителе. И в том, и в другом случае на поверхности полупроводникового или иного материала образуется тонкий рисунок. Однако такое мокрое проявление в растворителе изотропно, т.е. происходит одинаково во всех направлениях. Для перехода к микронным размерам элементов с четкими краями необходимо было использовать анизотропное травление, которое в направлении, перпендикулярном поверхности, происходит намного быстрее. Именно таким процессом оказалось так называемое сухое травление с помощью плазмы. Добавляя к инертному газу (например, аргону) дополнительно  $\text{CF}_4$ , который в плазме диссоциировал с образованием очень активных атомов фтора, можно было получить все преимущества *плазмохимии* – активные фрагменты молекул, соединяясь с раствориваемым веществом, образовывали летучие соединения и уносились из плазмохимического реактора, ускоренные ионы аргона распрыскивали атомы подложки. Таким образом, достигались высокие скорости травления, большая однородность и возможность получения глубоких «тренчей» (рис. 29), необходимых для изоляции элементов микросхем и создания элементов конденсаторов или элементов памяти. Создание чипов предполагает еще множество процессов, в том числе оксидирование и напыление слоев металлов.

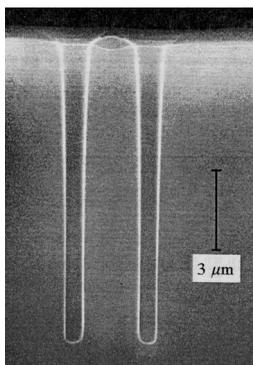


Рис.29. «Тренчи» в Si, полученные плазменным травлением

Оксиды кремния, одни из основных составных частей чипов на кремнии, формируются в кислородной плазме при существенно более низких температурах и имеют множество преимуществ перед оксидами, созданными термическим окислением.

Так вот, плазменный метод магнетронного напыления оказался одним из лучших, так как позволял наносить разные материалы, как простые, так и соединения. Пример использования подобных плазменных технологий для создания совер-

шенно экзотических структур субмикронных масштабов показан на рис. 30.

Подобные технологии все шире применяются не только для элементов, используемых в информационных (IT) технологиях, но и в микромеханике, создании миниатюрных сенсоров (например, биочипов) и во многих других областях. В качестве забавного приложения расскажу, следуя С.Ю. Шаповалу, о перчатках, наделяющих любого человека возможностями популярного киногероя – человека-паука. Известно, что мухи свободно передвигаются по потолку. Более того, значительно более тяжелые гекконы свободно перемещаются по мраморным стенам греческих храмов. А почему? Рис. 31 показывает структуру лапки геккона, состоящей из множества тонких отростков. Вот именно множество этих отростков и обеспечивают хорошее сцепление с любой поверхностью. Не клейкое вещество, а просто множество атомов, которые могут близко соприкоснуться с атомами поверхности, и, соответственно, образовать с ними связи. Это похоже на известные плитки Иогансона – тщательно отполированные пластины, которые после соприкосновения друг с другом трудно разъединить.

Так вот, если структуру, подобную показанной на рис. 32,а, нанести на гибкую подложку, то мы получим эту «чудо-перчатку» (рис. 32,б), которая выдерживает груз в  $400 \text{ г/см}^2$ . Зная свой вес и посчитав площадь своей ладони, каждый легко определит, сможет ли он в таких перчатках «ходить» по потолку.

Но перейдем к серьезно-му – к закону Мура (см. рис. 28) о повышении производительности компьютеров. Оказывается, следующий шаг в уменьшении размеров микросхем тоже связан с плазмой.

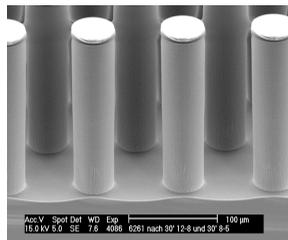


Рис. 30. Столбчатая структура, полученная плазменным травлением

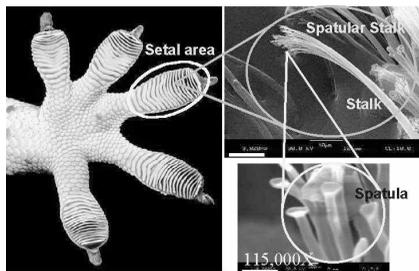


Рис. 31. Строение лапки геккона

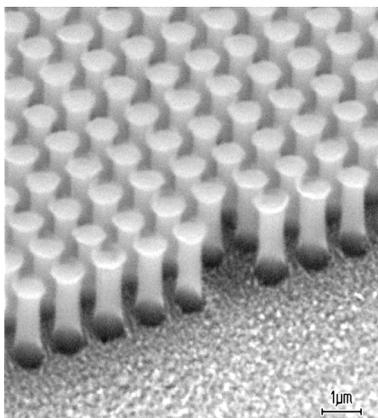


Рис. 32. «Липучка»: а) структура, выращенная с помощью плазменной технологии и перенесенная на гибкую основу, б) ладонь игрушки, на которую нанесен этот «материал» выдерживает вес в  $400\text{г}/\text{см}^2$

Понятно, что очень трудно сделать размеры необходимых нам канавок при «рисовании» микросхем меньше длины волны излучения, с помощью которого происходит литография. Следовательно, для дальнейшей миниатюризации необходимо уменьшать длину волны. С помощью специальных иммерсионных линз удалось уменьшить размеры «линий» до 45 нм. Что дальше? Настоящий прорыв связывают с резким уменьшением длины волны. Такую возможность представляет так называемый *экстремальный ультрафиолет* (ЭУФ) с длиной волны 13,5 нм. Излучать эту длину волны могут атомы ксенона. Поэтому в мире идет настоящий бум в разработке подобных источников. Для высокоточной литографии источник должен обладать возможно меньшими размерами, а вот для приемлемой производительности (сейчас обрабатываются кремниевые пластины диаметром 300 мм, и уже есть пластины с диаметром 450 мм) мощность такого источника должна быть не менее 1кВт с малым разбросом по длине волны относительно 13,5 нм. На рис. 33 показана реализация подобного источника в виде пучка кластеров ксенона, облучаемых лазерным пучком. Образующаяся под действием лазерного импульса плазма и является источником вожделенного излучения. В России пошли другим путем, и в ТРИНИТИ (Троицкий институт термоядерных и инновационных исследований) выпускником МИФИ профессором

В.М. Борисовым был предложен более простой способ создания такого излучения. Например, это может быть микропинчевый разряд в ксеноне.

Два слова о микропинче. На кафедре физики плазмы МИФИ работают несколько микропинчевых установок, и действуют они следующим образом. Между двумя электродами, к которым подсоединена мощная конденсаторная батарея, с помощью специального дополнительного поджига зажигается очень сильноточный, но короткий во времени разряд.

Так как отдельные филаменты тока притягиваются друг к другу, то в некоторый момент образуется так называемая плазменная точка микронных размеров, но с очень плотной и горячей (более десяти миллионов градусов) плазмой. Именно она и является точечным источником излучения. Еще лучшим источником ЭУФ, чем ксенон, оказалось олово. Еще в 2000 году американцами был продемонстрирован литограф на длину волны 13,5 нм, созданный в сотрудничестве тремя крупнейшими американскими национальными лабораториями. Но пока, несмотря на многие миллиарды долларов, потраченные на этот радикальный в уменьшении размеров микросхем шаг, в производстве ни один литограф не используется (первый – в музее). Дело в том, что для массового производства чипов необходима мощность излучения на этой длине порядка 2 кВт. Идея разработанного в ТРИНИТИ под руководством Борисова источника ЭУФ показана на рис. 34.

Под действием лазера, направленного на поверхность жидкого олова, происходит абляция металла, и уже в его парах в разряде конденсатора с энергозапасом всего в несколько джоулей и возникает микропинч с образованием источника ЭУФ.

Переводя лазер и разряд в частотный режим (несколько килогерц), можно повысить мощность излучения. Созданные на этом принципе под руководством В.М. Борисова источники сейчас являются лучшими в мире. И есть большая надежда, что именно ра-

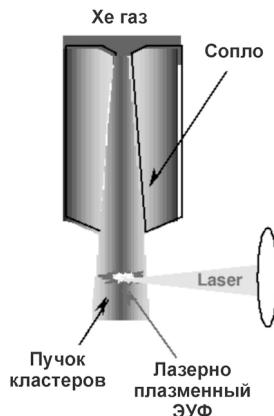


Рис. 33. Лазерно-плазменный источник ЭУФ на кластерах ксенона

ботающие в ТНИИТИ молодые физики обеспечат следующий прорывной шаг в развитии нашей цивилизации.

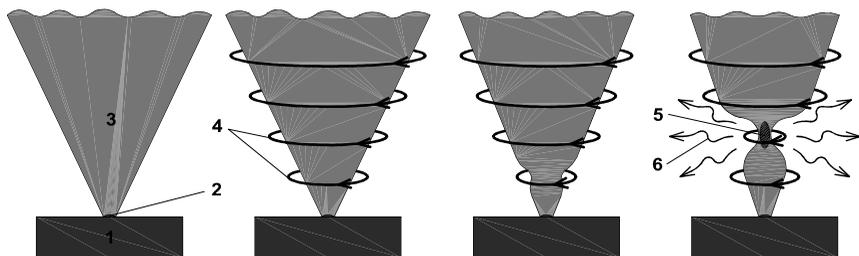


Рис. 34. Возникновение ЭУФ при инициированном лазером микропинче: 1 – катод, 2 – катодный факел, 3 – плазма, 4 – магнитное поле, 5 – микропинч, 6 – ЭУФ излучение

## 9. О ЗОЛОТОМ РУНЕ И АЛМАЗАХ В «ПЛАЗМЕННЫХ ПЕЩЕРАХ»

Из огромного множества примеров того, как плазменные методы могут украшать наш мир и не только своей привлекательной функциональностью (вспомните Чернышевского: полезное – значит красивое), но и в буквальном смысле, украшая прекрасную половину человечества, я выбрал два – это плазменное «окрашивание» и выращивание бриллиантов. Для первого случая выберу факт из истории нашей кафедры, когда в конце 80-х годов прошлого века в результате серьезных фундаментальных исследований физики газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях группой молодых аспирантов под руководством профессора Игоря Константиновича Фетисова были обнаружены две новые формы сильноточных квазистационарных разрядов («квази-» значит мнимый, т.е. разряд приобретает все черты стационарного, но длится недолгое время – несколько десятком миллисекунд). В этом разряде образуется достаточно плотная плазма ( $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), из которой на электрод попадают очень интенсивные потоки плазмы (сотни и тысячи ампер). За короткое время из бомбардируемого ионами плазмы катода распыляется много атомов, которые затем осаждаются на некую подложку. Время осаждения столь коротко, что подложка не успевает даже нагреться. Тогда возник вопрос, а можно ли таким образом нанести металл на нетермостойкую бумагу? Оказа-

лось можно, и на кафедре появились «написанные» металлической плазмой надписи на бумажных листах. Следующий вопрос, а можно ли так напылять металл на мех? Сказано – сделано. Старый каракулевый воротник папиного пальто оказался в разрядной камере. Несколько импульсов, и что бы вы думали? Мы получили то, за чем с такими страшными испытаниями плавали в древнюю Колхиду аргонавты – золотое руно! То есть мех овцы золотого вида. И сколько мы ни старались отодрать эту «позолоту», у нас ничего не получилось! Ведь ионы металла внедрились в ворсинки так глубоко, что не стрясти, не смыть. Слово «позолота» я написал в кавычках, практичные физики вместо строго учитываемого драгметалла для эксперимента, конечно же, использовали дешевую бронзу, но кто отличит по внешнему виду, характерному золотому блеску?

Вы спросите, почему же «мифические» женщины не щеголяют в золотых шубах? Задача у нас была другая – напылить очень прочные и непрозрачные для света металлические покрытия на сцинтилляторы для мониторинга местности после Чернобыльской аварии. А вот недавно по телевизору я видел сюжет, как инженер-технолог по текстилю из Иванова с большим успехом продает французским домам моды самые разные ткани с металлическими золотыми и серебряными узорами, пользуясь подобными технологиями. Но физику дела, надеюсь, вы поняли (и кто все это впервые реализовал, теперь тоже знаете).

Меняя режимы и состав газа в разрядной камере, можно получать покрытия со всеми цветами радуги и наносить прочнейшие декоративные покрытия на самые разнообразные материалы. А стекла золотистого цвета, очки там всякие? Мощными плазмотронами обрабатывают даже стены домов, придавая им изысканный и несмываемый колер.

Теперь к бриллиантам. Захватывающие истории об огромных бриллиантах и их владельцах, возможно, занимали вас в детстве. Кто не знает про «шутки» графа Монте-Кристо? Но можете ли вы представить себе алмаз чистойшей воды во много раз больше самого большого из когда-либо найденных? Легко, скажут студенты нашей кафедры, побывавшие на экскурсии в ИОФ РАН, где работает установка по выращиванию этих самых алмазов. Но только установка работает круглосуточно не для удовлетворения прихотей подруг олигархов. Дело значительно серьезнее. Алмаз не только

самый прочный материал в природе, но, являясь диэлектриком, он обладает очень высокой теплопроводностью. И вот, когда встала задача ввести в плазму термоядерной установки мощное электромагнитное излучение для ее нагрева до термоядерных температур, физики столкнулись с проблемой, что обычные керамические материалы, через которые это излучение проходит от генератора к установке, не выдерживают больших мощностей. Из всех материалов лучшим оказался алмаз. Но как из него сделать большое (диаметром в несколько десятком сантиметров и толщиной в несколько миллиметров) алмазное окно?

И здесь снова вспомнили про плазму. Так же, как и в предыдущем примере, в разряде на стенки камеры можно осаждать не только металлы, но и углерод. Можно зажигать разряд в смеси углеводородов, и на подложку будет осаждаться углерод в самых различных формах. Подбирая температуру и скорость осаждения можно получить и обычную сажу, и графит, и **алмазоподобные пленки**. То есть атомы углерода в этом случае при осаждении образуют не гексагональную легко расщепляющуюся по слоям структуру графита (который мы так эффективно используем в карандашах), а характерную для алмаза плотноупакованную кристаллическую решетку. Соответствующая затравка со структурой алмаза и медленность процесса осаждения в высокочастотной плазме в среде металла обеспечивают выращивание столь больших алмазных окон.

Но кроме столь экзотического и ювелирного применений алмазные и алмазоподобные пленки – это, прежде всего, прекрасный инструмент в металлообработке, резко повышающий точность и производительность. Недаром наша «нефтянка» использует алмазные буры! Ни рис. 35 показана выращенная в Курчатовском институте сверхтвердая алмазоподобная пленка толщиной 8 мкм, (при нагрузке 20 Н ее твердость составляет 60 ГПа).

А вообще, если говорить о чудесах, создаваемых при осаждении в плазме углеводородов, то можно найти множество удивительных применений. Достаточно упомянуть антинакипийные покрытия, которые были разработаны на

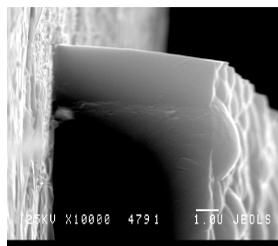


Рис. 35. Алмазоподобная фольга, выращенная плазменным методом

нашей кафедре профессором Леоном Богдановичем Беграмбековым. Главное свойство этих полимерных покрытий, наносимых на стенки трубопроводов, что при достижении определенной толщины накипь перестает удерживаться на поверхности такой пленки. То есть труба сама себя очищает.

## 10. ПЛАЗМЕННЫЙ МЕЧ И ПЛАЗМЕННЫЙ ЩИТ

Многие наверно помнят знаменитые «Звездные войны» Джоржа Лукаса и лазерные мечи, и плазменные бластеры, из которых активно палили киногоерои. Время выхода этих фильмов предшествовало не фантастическим, но вполне реальным намерениям американских авторов Стратегической оборонной инициативы (СОИ) создать звездное оружие. В эпоху военного паритета сверхдержав, адекватный, хотя, возможно, и несимметричный ответ разрабатывался и в институтах СССР. Одним из активных разработчиков новых видов плазменного оружия был академик Ремелий Авраменко. Он даже опубликовал в газете «Известия» схему создания мощных плазмидов, которые могли бы уничтожить головные части межконтинентальных ракет. К нам в МИФИ он приехал с предложением исследовать физику странных факельных разрядов, с помощью которых можно было создавать длинные плазменные «шпаги». Почему странных, выяснилось потом, когда мы изготовили такой небольшой торч (рис. 36) (торч по английски – факел) и убедились, что острое короткоживущее «жало» этого разряда длиной в несколько десятков сантиметров элементарно прожигает металлическую плоскую пластину, помещенную у него на пути, но никак не воздействует на обычный лист бумаги. Разряд проходил по поверхности плексигласовых втулок, вызывая их эрозию. Понятно, что в атмосфере воздуха продукты разложения этого органического материала как-то химически доокислялись (дожигались), образуя достаточно долгоживущую плазменную «спицу». Но почему же тогда разряд не действовал на тонкий лист бумаги? Исследования показали, что значительная часть энергии плазменного образования сосредоточена не в нагретом газе, а в магнитно-токовой структуре разряда (вспомните шаровую молнию). Диэлектрик этот ток прерывал, а проводник расплавлялся при его прохождении за счет выделения джоулева тепла!

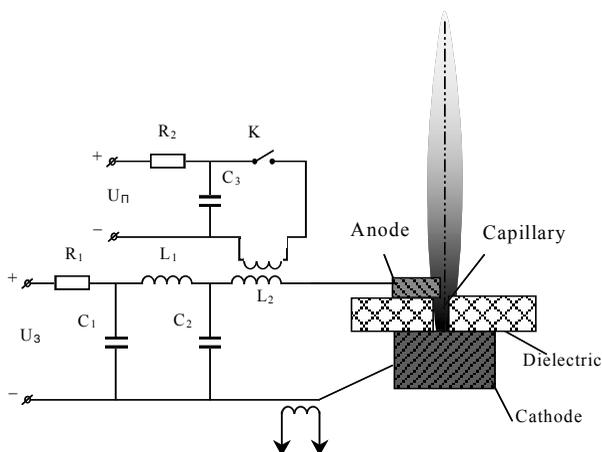


Рис. 36. Факельный разряд и его электрическая схема

Такой «бластер» в качестве реализованного воплощения фантазий Лукаса мы и сейчас демонстрируем школьникам на Дне открытых дверей факультета ЭТФ, предлагая им самим сделать эксперимент с фольгой и бумагой. Кроме того, такой несложный и небольшой плазменный объект оказался удобным для проведения нашими студентами лабораторных работ по диагностике импульсной плазмы.

Но в программе СОИ были и куда более «серьезные» предложения. Так, созданный американцами на Аляске мощный излучатель ВЧ волн должен был генерировать плазменные образования в атмосфере. И главное предназначение этой плазмы – не тепловое воздействие на нечто летящее, а электромагнитное: прервать связь, вывести из строя системы управления. Известно, что при входе в атмосферу связь с космонавтами в спускаемом аппарате на время прерывается, прерывается именно потому, что при взаимодействии атомов верхних слоев атмосферы с материалом обшивки аппарата возникает плазма, окружающая спускаемый аппарат.

Не могу не упомянуть и о совершенно мирном, более того, совершенно гуманитарном применении подобной технологии, предложенной учеными ИОФ РАН. Если два мощных ВЧ излучателя направить в одно место в верхних слоях атмосферы, то там возникнет плазма и пойдут плазмохимические реакции, в том числе с разрушением фреонов и накоплением иона  $O_3$  – т.е.озона. Про озоновые дыры в нашей атмосфере слышали? Озон разрушается под действием выбрасываемого из аэрозольных баллончиков

вместе с дезодорантами фреона, а без слоя озона – Земля беззащитна по отношению к коротковолновой (и самой опасной) части солнечного спектра излучения. Сейчас озоновая дыра – над Антарктикой, ну а если будет над Европой? Кто и как ее будет «латать»?

Как было показано при обсуждении резонатора Шумана и отражения коротких волн от ионосферы, плазма может не только отражать, но и поглощать радиоволны. Значит, закрыв летящий объект плазмой с нужными параметрами, можно сделать его «невидимым» для радаров.

Но куда более фантастические перспективы создания абсолютно невидимых объектов открывает другое проявление плазмоподобных сред! В журнале «В мире науки» №8 за 2007г. рассматривается возможность использования эффекта генерации плазменных волн – плазмонов в тонких слоях на границе металла и диэлектрика. Как известно, плазменная или ленгмюровская частота зависит от концентрации носителей заряда (6). Так вот, на поверхности раздела разных сред могут существовать плазмоны (квазичастицы с частотой, определяемой (6)) в большом диапазоне частот. В этом случае тончайший нанослой можно использовать для одновременной передачи огромного количества сигналов на разных частотах. Логическим элементом для такой системы вместо транзистора может стать *плазмистор*, способный обеспечить передачу такого объема информации, который современным компьютерам (и даже тем, которые будут созданы с помощью ЭУФ излучения на длине волны 13,5 нм) не снился!

Причем же здесь все-таки невидимки? Подбирая параметры таких плазмодов (собственно, не проводников плазмы, а проводников плазмонов), можно сделать искривленные поверхности, которые заставят попадающий электромагнитный сигнал во всем спектре присутствующих в нем частот обогнуть защищаемый объект, так что для наблюдателя он станет абсолютно невидимым. Эдакий плащ-невидимка.

Ну, уж если мы заговорили о плазме и летательных аппаратах, то расскажу об эксперименте, сделанном нашими ребятами (Леша Махин) много лет назад в аэродинамической трубе ЦАГИ. Идея была проста – создать плазму в слое обтекающего крыло газа. Если параметры взаимодействия набегающего потока воздуха с крылом изменятся – не уменьшится ли аэродинамическое сопротивление? Был использован тот же простой факельный разряд, и в момент его

зажигания динамометром регистрировалась сила сопротивления. Так вот, при возникновении разряда – сопротивление упало! А если окружить все крыло плазмой с помощью барьерного или ВЧ разряда, так сопротивление упадет существенно, а значит, при той же мощности двигателя можно будет достичь значительно более высоких скоростей! Вот путь к гиперзвуковым самолетам. Ударные волны, генерируемые скользящими электрическими разрядами, по видимому, могут использоваться для изменения газодинамики обтекания поверхности потоком воздуха и тем самым для управления движением летательного аппарата. Может быть, светящиеся (значит, окруженные плазмой) НЛО поэтому так быстро двигаются и меняют направление своего движения? На этот и другие интересные вопросы, скорее всего, ответы придется искать уже вам, дорогие читатели.

## 11. КРУГ ЗАМЫКАЕТСЯ – ПРИРОДА ЕДИНА

Чтобы замкнуть круг нашего повествования, надо было бы вернуться к началу – к Большому взрыву. Точнее к веществу, которое появилось в первые мгновения существования Вселенной. А это была кварк-глюонная плазма. И Человечество уже начинает интенсивные исследования этого вещества, реализовав проект Большого Адронного Коллайдера (БАК или LHC). Первый запуск 10 сентября 2008 года уже произошел, но вот эксперименты пока приостановились из-за аварии в сверхпроводящей магнитной системе ускорителя. Произошло то, что может иногда происходить в сверхпроводниках. При недостаточном охлаждении или из дефектов катушки сверхпроводящая катушка перешла из сверхпроводящего состояния в нормальную фазу. Ток мгновенно упал. А куда делась запасенная в магнитном поле катушки энергия? Она-то и вызвала в ней серьезные повреждения. К сожалению, такие аварии иногда случаются на крайне сложных электрофизических установках. Представьте только – длина сверхпроводящей системы ускорителя составляет 27 км. И все это на глубине 100 м под поверхностью. Такие проекты реализуются сообща и стоят огромных денег. Не могу не отметить, что МИФИ является полноправным участником этого гигантского проекта. Под руководством профессора МИФИ Бориса Анатольевича Долгошеина был создан уникальный детек-

тор ALICE для регистрации продуктов реакций, происходящих при столкновениях ускоренных частиц. Частицы в этом ускорителе должны разогнаться до 10 ТэВ, при их лобовом столкновении и возникает кварк-глюонная плазма, в ее исследование и расчеты элементарных процессов внес безвременно скончавшийся летом этого года профессор МИФИ Валерий Михайлович Емельянов. Именно он выступил на прошлой зимней научной сессии МИФИ с обзорным докладом о предстоящих экспериментах на LHC.

Но прежде, чем рассмотреть подробности создания кварк-глюонной плазмы в лабораторных условиях, расскажу о новой идее ускорения заряженных частиц в компактных устройствах, где Гэв-ные энергии можно получить на длине всего около 1 метра. И в этом ключевую роль играет плазма. Я имею в виду *лазерно-плазменные ускорители* частиц.

Ускорение частиц в них происходит на гребне создаваемой в лазерной плазме электромагнитной волны, как в серфинге. Когда лазерный луч (или пучок заряженных частиц) проходит через плазму, в ней может возникать мощное продольное электрическое поле. Легко подсчитать плотность энергии в лазерном импульсе при  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, если сообразить, что при длительности 30 фс длина «цуга» волн всего  $c \cdot \tau \sim 3 \cdot 10^{10}$  см/с  $\cdot$   $30 \cdot 10^{-15}$  с  $\approx 10^{-3}$  см. Если вспомнить, что плотность  $W$  энергии, запасенной в электрическом поле  $E$ ,  $W = E^2/8\pi$ , то получаем напряженности электрического поля, которые могут легко срывать электроны с атомов. В результате возникают области избытка положительных и отрицательных зарядов. Возмущение образует волну, которая перемещается в плазме почти со скоростью света. Мощное электрическое поле, направленное от области положительного заряда к области отрицательно-го, ускоряет попавшие в него заряженные частицы.

На рис. 38 показаны результаты компьютерного моделирования такого поля, сделанные аспиранткой кафедры Женей Калинниковой в Институте прикладной математики РАН. Чтобы не тратить время на более сложные объяснения, процитирую одного из авторов новой физики ускорения Чандрашекара Джоши [8]:

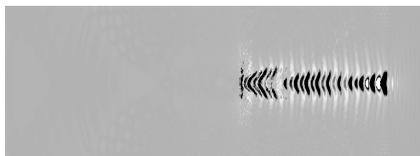


Рис. 38. Моделирование поля и плазмы в коротком лазерном импульсе

«Световое давление лазерной «пули» настолько велико, что электроны «выдуваются» наружу во всех направлениях. Покинутые ими ионы притягивают их обратно, и электроны устремляются к оси, вдоль которой распространяется лазерный импульс, проскакивают ее и снова движутся наружу. В результате возникают волнообразные колебания, которые называются лазерным кильватерным полем. Электроны образуют своеобразный пузырь диаметром приблизительно 10 мкм. Около его фронта движется лазерный импульс, создающий плазму. Внутренняя часть пузыря состоит из ионов, а электрическое поле в нем напоминает чрезвычайно высокую океанскую волну. Возможны и другие конфигурации, но в режиме пузыря ускорение электронов обеспечивается наиболее надежно. Когда электронная пушка впрыскивает электроны в то место плазмы, где они уже есть в избытке, новые частицы под действием электрического поля устремляются к положительным зарядам внутри пузыря. Волна движется вперед со скоростью света, поэтому инжектируемые электроны должны иметь околосветовую скорость, чтобы поймать волну и получить от нее дополнительную энергию. Согласно теории относительности, дальнейшее увеличение энергии электронов происходит главным образом за счет увеличения их массы, а не скорости. Поэтому они не опережают плазменную волну, а как бы скользят на ее гребне, приобретая все большую энергию. Некоторые электроны самой плазмы точно так же захватываются и ускоряются, словно пена, подхваченная гребнем океанской волны».

Недавно было продемонстрировано увеличение энергии электронов более чем на 4 ГэВ на расстоянии всего в 10 см (сравни с ЛНС!). Было также показано, что плазма улучшает фокусировку электронного пучка в два раза. Однако получить с помощью лазерно-плазменных ускорителей энергии масштаба ТэВ и, особенно, для тяжелых ионов довольно сложно.

Итак, от плазмы к плазме. Чтобы получить кварк-глюонную плазму в земных условиях надо столкнуть на большой скорости тяжелые частицы. На рис. 39 показано, как сталкиваются «лоб в лоб» (центральное столкновение) два ядра золота  $^{197}\text{Au}$ .

Пусть вас не удивляет странная форма этих ядер – в поперечнике они в 14 раз больше, чем в направлении движения. Ведь это – релятивистское уменьшение длины при скорости, близкой к световой. Кварк-глюонная плазма образуется на стадии 2, а при разлете ядер уже, как и при Большом взрыве, начинают образовываться адроны (стадия 3). Четвертая стадия соответствует газу взаимодействующих между собой адронов – мезонов и барионов.

Адроны – частицы, испытывающие сильные взаимодействия, делятся на две основные группы: мезоны, которые состоят из одного кварка и одного антикварка, и барионы – состоят из трёх кварков трёх цветов. Частью барионов являются нуклоны – протоны и нейтроны, из которых состоит

окружающее нас вещество. Парадокс в том, что в отличие от обычной плазмы из частиц с кулоновскими зарядами, у кварков сила взаимодействия не падает, а растет с расстоянием. Поэтому фазовый переход от адронного газа к кварк-глюонной плазме, (которая, вообще говоря, является жидкостью), в которой глюоны как бы обобществлены, характеризуется появлением экранирования взаимодействия и, соответственно, радиуса Дебая.

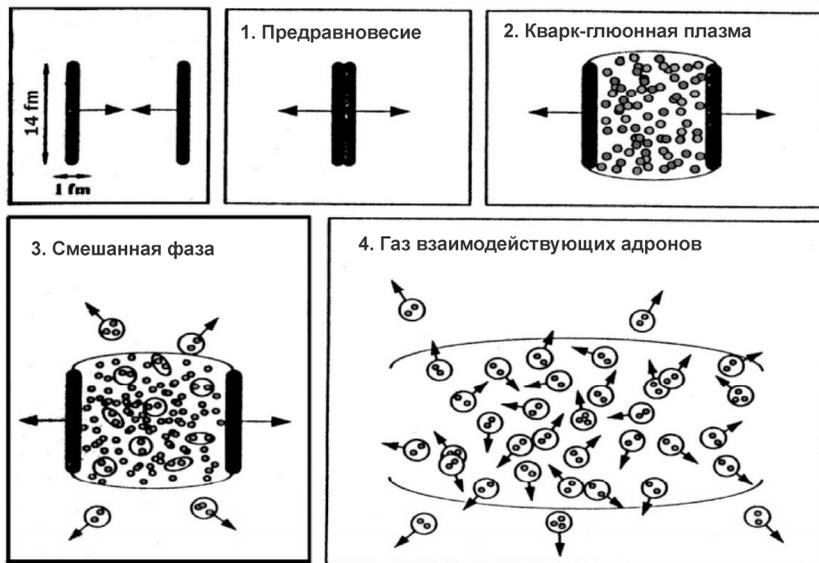


Рис. 39. Процессы при центральном столкновении релятивистских ядер золота (из доклада В.М. Емельянова, В.А. Окорочкова и М.Н. Стриханова на зимней научной сессии МИФИ в 2006 году)

Полученная на ускорителе RHIC в 2006 году кварк-глюонная плазма (кстати, руководителем эксперимента STAR в Брукхейвене был нынешний ректор МИФИ Михаил Николаевич Стриханов) моделирует процессы при большом взрыве, а эксперименты на БАК с 30-кратным увеличением энерговклада позволят «разглядеть» и детали процесса.

И еще один пример удивительного единства Природы. Помните, чтобы получить плазму, надо было нагреть вещество. И лед по мере нагревания превращался в воду, вода в пар, а у потом при больших температурах у атомов отрывались электроны, и мы получали плазму. В конце 1980-х годов обнаружили, что при производстве

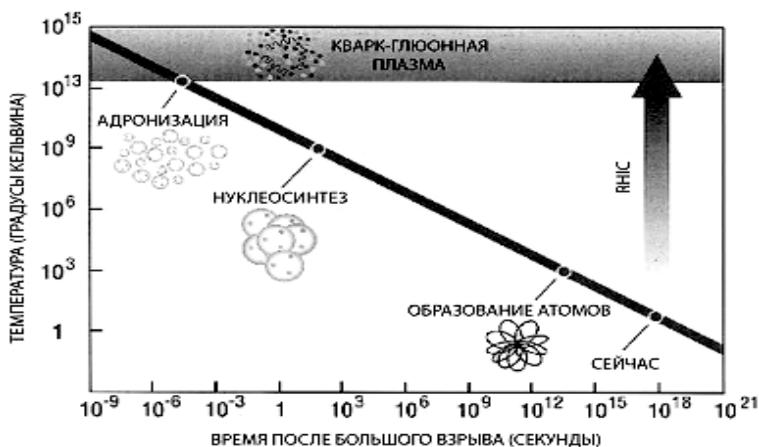


Рис. 40. Путь к «правеществу»

СБИС много брака было вызвано повреждениями обрабатываемых структур, какими-то большими частицами, попадающими на поверхность из плазмы. Так была обнаружена *пылевая плазма*, когда попавшие в обычную газоразрядную плазму (или появившиеся в ней в результате агломерации) частицы макроскопических размеров (пылинки) заряжались электронами до очень больших значений электрического заряда и, ускоряясь в пристеночном падении потенциала, разрушали структуры на поверхности. А если создать много пылевых частиц в плазме, специально подсыпав мелкую пыль? Вот тогда и было обнаружено, что заряженные пылинки выстраиваются в некую кристаллическую структуру. Так получили плазменный кристалл. Он обладает многими присущими кристаллам свойствами, у него есть хорошо измеряемая постоянная решетки, при возмущении по кристаллу пробегает волны и т.д. Оказывается, плазма с конденсированной фазой – это не редкостная экзотика, а очень распространенное состояние вещества. Этот вид плазмы относится к *сильнонеидеальной плазме*, так как энергия электростатического отталкивания заряженных частиц много больше тепловой энергии их движения. (Недавно такую плазму даже пытались назвать новым пятым состоянием вещества.) Пылевые облака в космосе, хвосты планет, наконец, пламя в земных условиях. На рис. 41 показан плазменный кристалл, недавно полученный в нашей лаборатории студентом Игорем Быковым в соб-

ранной им установке с ВЧ-разрядом. Для того, чтобы увидеть стройный ряд макрочастиц, он просвечивал плазму «лазерным ножом», используя цилиндрическую линзу, которая превращает луч лазера в тонкий и плоский. Более подробно о такой плазме можно прочитать в недавно вышедшей и прекрасно иллюстрированной книжке В.Е. Фортова. Итак, еще один круг наших знаний об окружающей природе замкнулся, доказывая единство физических законов, используя казалось бы столь трудно удерживаемую плазму, мы снова вернулись к упорядоченному состоянию вещества – кристаллу.

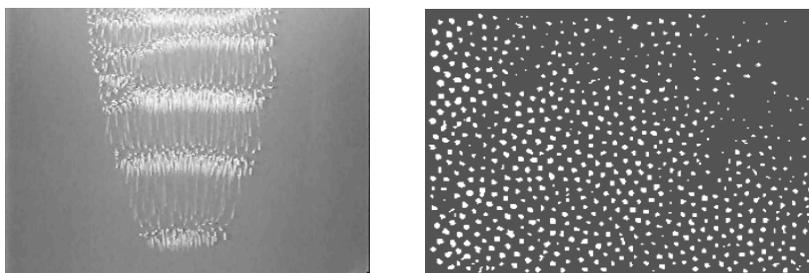


Рис. 41. Плазменные кристаллы: а) кристалл из сфер MgO размером в 2-3 мкм, б) волны в плазменном кристалле

Но развитие идет по спирали, и нас ждет еще больше открытий!

## 12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ – НЕРАЗГАДАНЫЕ ЗАГАДКИ И НЕОТВРАТИМЫЕ СВЕРШЕНИЯ

В короткой популярной книжке невозможно затронуть все удивительные ипостаси, в которых мы находим плазму и плазмоподобные среды, и те неожиданные применения, число которых, как и вообще знания, растет экспоненциально быстро. Поэтому в заключение попробую в конспективном режиме упомянуть лишь о том, что поразило мое воображение, и то, что не дает покоя своей загадочностью. Кроме того, считаю необходимым указать и на то, что в целом понятно, но пока не нашло своего завершеного воплощения. Я уже коротко говорил о шаровых молниях, пока однозначно не интерпретированных физиками. Но есть и другие, по меньшей мере, странные проявления атмосферного электричества

типа светящихся шаров, возникающих в одной из долин в Норвегии. Но это далеко, а вот феномен, открытый сотрудником нашей кафедры Димой Кирко (достоверность результатов подтверждается тем, что он защитил по этим работам кандидатскую диссертацию). При зажигании факельного разряда вблизи емкости с жидким азотом Дима неожиданно заметил, что после окончания разряда в глубине жидкого азота появляются светящиеся шарики, которые «живут», двигаясь по сосуду, десятки секунд. Специальные эксперименты показали, что такие шарики возникают и при освещении емкости с азотом мощным потоком ультрафиолетового излучения. Вопрос – они формируются при облучении или существуют внутри азота как невидимые сферические образования, которые лишь подсвечиваются и начинают флюоресцировать? Все еще будоражит воображение загадка Тунгусского метеорита. Согласно гипотезе профессора МИФИ Б.У. Родионова, тунгусский феномен – это результат направленного использования Николой Тесла текущих вокруг Земли огромных токов. Сейчас стало понятно, что количество выделяющейся энергии при магнитном соединении магнитосферы с межпланетным магнитным полем, замороженным в поток солнечного ветра, эквивалентно подключению ЭДС, равной 50–100 кВ, а суммарная сила всех токов близка к 10 МА, что по порядку величины равно мощности всей мировой электроэнергетики! Но как эту энергетику использовать?

Другой феномен обнаружен нашими коллегами из радиационно-ускорительной лаборатории МИФИ (А.В. Нестерович и другие). При разряде в струе жидкости (в воде) возникают светящиеся объекты правильной формы в виде многогранников, а материалы, с которыми происходит взаимодействие, вдруг приобретают неожиданные свойства. Происходит локальное упрочнение и изменение структуры металла. И что уж совсем странно, эти области с измененными свойствами могут неожиданно возникать после окончания разряда и непостижимым образом перемещаться в толще и по поверхности металлического образца!

Загадочное свойство плазмы упорядочиваться в виде правильных геометрических структур наблюдал в середине прошлого века Цквартхава (фигуры Цквартхавы). Импульсный разряд типа «плазменный фокус» при внимательном рассмотрении фотографий обнаруживал геометрически правильные шестиугольники и прочие

сложные структуры. Похожие наблюдения выпускника кафедры, сотрудника РНЦ «Курчатовский институт» В.А. Ранцева-Картинова привели его вообще к парадоксальному заключению, что все разряды в своей основе имеют геометрически правильную структуру и состоят из структурно организуемых филаментов (которые каждый может наблюдать даже в «игрушке» в виде шара с бегущими внутри токовыми нитями). Правда, для объяснения разрядов в токамаке ему пришлось привлечь представление о сверхпроводящих углеродных нанотрубках, практически всегда образующихся в разрядах при наличии углерода в установке и служащих как бы «каркасом» развивающегося разряда.

А чего стоит скандально известный эксперимент Л.И. Уруцкоева, когда после электрических разрядов в воде наблюдалось появление новых химических элементов. Титан превращался в золото! (Конечно, в небольших, но вполне достаточных для точного измерения современными масс-спектрометрическими средствами количествах.) А ведь для превращения одних элементов в другие необходимы ядерные энергии, т.е. на порядки по величине большие, чем прикладывались к конденсаторной батарее!

И, наконец, знаменитый «холодный синтез», когда многие лаборатории во всем мире бросились проверять сообщение Флейшмана и Понса (1989) о том, что при пропускании тока через палладиевые электроды, помещенные в банку с тяжелой водой ( $D_2O$ ), выделяется огромное количество энергии, а в воде появляется гелий, как в результате термоядерной DD реакции. Но для такой реакции надо, чтобы частицы приобрели энергию в десятки тысяч электронвольт, а к электродам в банке было приложено всего-то 110 В! И хотя через некоторое время в уважаемом американском журнале появилась статья под заголовком "Cold confusion" (холодный конфуз), решительно опровергающая пресловутых авторов многочисленными экспериментальными данными других авторов, активность в этом направлении и даже ежегодные конференции на эту тему продолжают и поныне. Дело в том, что нейтроны и быстрые частицы при насыщении водородоактивных материалов дейтерием наблюдались во многих лабораториях, (но никакого выигрыша энергии от такого синтеза не получалось).

Простое рассуждение показывает, откуда, например, могут взяться быстрые частицы. Палладий при насыщении водородом изменяет свое состояние решетки, постоянная решетка при определенной концентрации

скачком становится больше. Материал «трещит». А какие поля могут возникнуть между двумя слоями элементарных зарядов, внезапно разведенных на расстояние, допустим, в 10 мкм? Если представить плотность зарядов, равную плотности твердого тела  $n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , то разность потенциалов составила бы сотни миллионов вольт! Вот вам и ядерные реакции под действием укоренного такой разностью потенциалов оторвавшегося иона!

Теперь о том, что, несомненно, станет явью в этом веке. В-первых, Человечество поставит себе на службу **управляемый термоядерный синтез**. Строительство международного термоядерного реактора ИТЭР уже началось во Франции в Кадараше. В проекте, предложенном Россией в 1986 году, помимо Европы, США и Японии участвуют и Китай, и Индия, и Южная Корея (больше половины Человечества хочет воспользоваться таким источником энергии). В 2016 году его запустят. Все расчеты и скейлинги (экстраполяция на реактор больших размеров параметров плазмы, получаемых на современных токамаках) показывают, что превышение термоядерной энергии над вложенной составит около сотни раз, и вообще, возможно, удастся перевести этот реактор в режим самоподдерживающегося горения (за счет энергии рождающихся в реакции альфа-частиц с энергией 3,5 МэВ). Пока на ИТЭР будут делать эксперименты (~ 20 лет), спроектируют и построят реактор следующего поколения ДЕМО, которой уже будет давать электроэнергию, а затем к 40–50-м годам 21-го века появятся и промышленные термоядерные электростанции. И что для нас с вами весьма важно: только со стороны России для реализации этой программы необходимо подготовить тысячу специалистов высокого уровня, т.е. таких, каких готовят в МИФИ. И кафедра физики плазмы МИФИ, созданная в 1961 году именно для подготовки физиков-термоядерщиков, должна внести в это основной вклад. Я сознательно в этой книжке не рассматривал драматическую историю «термояда», хотя большая часть нашей профессуры занимается именно этим. Отошлю лишь к недавно вышедшей книжке профессора кафедры Сергея Васильевича Мирнова. Но не сказать о главном в нашей деятельности не могу. Поэтому в приложении вы найдете исторический фильм «Люди и атомы», в котором главными действующими лицами являются многие преподаватели нашей кафедры и те сотрудники института Ядерного синтеза Курчатовского научного центра, благодаря которым и были заложены и основные принципы нашего существования и тематика исследований. Вы

увидите бесподобного в своей артистичности Степана Юрьевича Лукьянова, благодаря инициативе которого появилась наша кафедра, и Александра Михайловича Андрианова (они беседуют за столом с Алексеем Баталовым), и возглавлявшего более 30 лет наш ГЭК выдающегося теоретика академика Бориса Борисовича Кадомцева, и тогда еще совсем молодого Вячеслава Сергеевича Стрелкова, и отца-основателя УТС академика Льва Андреевича Арцимовича, и блестящего теоретика академика Виталия Дмитриевича Шафранова. Отдельные сюжеты на диске покажут современные установки и то, как они работают, и то, каким будет первый международный термоядерный реактор ИТЭР.

Здесь же мне хотелось упомянуть о совершенно новом пути в управляемом термоядерном синтезе с магнитным удержанием плазмы, появившемся на нашей кафедре уже в нынешнем веке с легкой руки академика Шафранова. В конце прошлого века Хасегава, анализировавший данные со спутника Voyager, обратил внимание на то, что плазма около планет, обладающих, как мы знаем, дипольным магнитным полем, устойчива. Он же и предложил идею дипольного термоядерного реактора. Для реализации этой идеи американцы построили установку LDX с левитирующим витком из сверхпроводника, создающим такое поле. Но установка получилась большая и очень дорогая. У нас на кафедре пошли другим путем. В имевшуюся еще с советских времен вакуумную камеру средних размеров (рис. 41) поместили два витка, но с токами противоположной направленности. Получилась очень компактная установка, которая хорошо удерживала плазму внутри определенной поверхности – сепаратрисы (отделяющей область удержания от области, в которой плазма уходит из установки, двигаясь вдоль силовых линий). Отношение объема плазмы к объ-

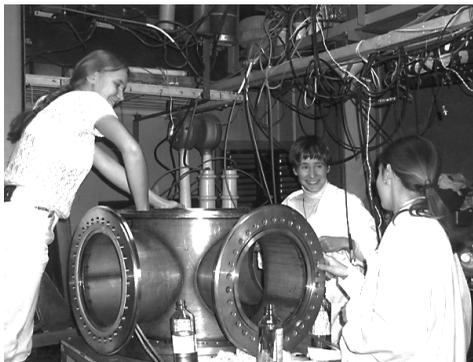


Рис. 41. Студентки кафедры (слева направо) Маша Бердникова, Галя Крашевская и Аня Вайтонене за сборкой установки «Магнетор»

ему магнитного поля получилось значительно лучше, чем в токамаке. Более того, в таком реакторе, если он будет построен, можно использовать бестритиевую DD реакцию, и что еще более важно – реакцию D-<sup>3</sup>He, в которой вообще нет нейтронов. Поэтому реактор получается экономичным и с намного меньшими тепловыми и нейтронными нагрузками на стенку. А это главная проблема в реализации коммерчески выгодного «термояда» с удержанием плазмы магнитным полем! Но кроме магнитного существует еще так называемое инерционное удержание плазмы или инерционный термоядерный синтез (ИТС). В его развитии выдающуюся роль сыграли выпускники МИФИ – академики Николай Геннадиевич Басов (нобелевский лауреат, много лет возглавлявший кафедру лазерной физики МИФИ) и Олег Николаевич Крохин (до настоящего времени преподающий в МИФИ). Именно они в 1976 году предложили лазерный термоядерный синтез, при котором мощные лазеры в коротком импульсе, облучая небольшую мишень из DT топлива и мгновенно разогревая до плазменного состояния оболочку этой мишени (как бы взрывая ее), создают в ней сферическую ударную волну отдачи (рис. 42). Эта волна сжимает вещество мишени до плотности в тысячи раз большей плотности твердого тела и разогревает ее до термоядерной температуры. Выделение термоядерной энергии синтеза происходит за короткое время, пока горячая плазма разлетается по инерции (поэтому синтез назвали инерционным). Время это легко оценить, зная, что при энергии в 10 кэВ дейтерон имеет скорость  $10^8$  см/с (1000 км/с). Тогда 1 см он пролетит за 0,01 мкс. Такой термоядерный реактор должен работать как двигатель внутреннего сгорания, только вместо

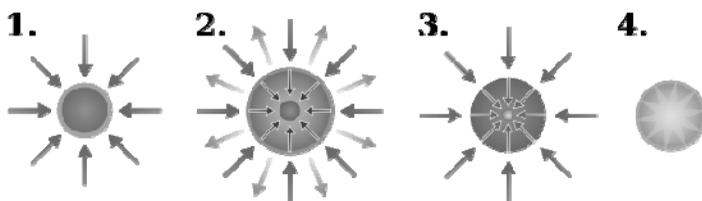


Рис. 42. Процессы при ИТС: 1 – образование плазменной короны под действием лазерного излучения, 2 – реактивное действие потоков газа сжимает шарик, 70 % вещества испаряется, остальное сжимается в 10 000 раз, 3 – ударная волна нагревает центр до 10 кэВ, 4 – термоядерное горение

порции впрыскиваемой воздушно-бензиновой смеси – дейтериво-тригетерий шарик, вместо сжимающего смесь поршня и свечи зажигания – мощный лазерный импульс.

Почему же такой термоядерный «мотор» до сих пор не работает? Самая важная причина – это плазменные неустойчивости. Что произойдет, если аккуратно налить воду на поверхность более легкой жидкости, например, масла и слегка тронуть сосуд? Более тяжелая жидкость провалится вниз – пример гидродинамической неустойчивости. То же самое происходит на поверхности шарика при образовании плотной горячей плазмы: ее давление  $P = nkT$  оказывается значительно выше, чем у нижележащих слоев вещества шарика. И если не сделать облучение идеально равномерным, то вместо радиального сжатия получим то, что показано на рис. 44. Поэтому установки ЛТС делают с большим числом лазерных лучей, чтобы добиться равномерности. (На самой большой американской установке NIF, которую должны построить к марту 2009 года, 192 пучка, и все пучки должны «сработать»

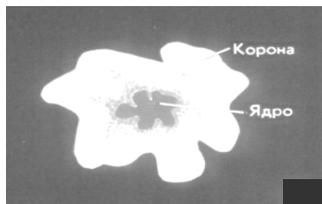


Рис. 44. Неустойчивость Релея-Тейлора

одновременно с большой точностью и выделить на мишени 1,8 МДж за 3 нс). Самая мощная в Европе лазерная установка ЛТС «Искра-5» (мощность 120 ТВт) была построена в г. Сарове в Институте лазерно-физических исследований, директором которого является выпускник нашей кафедры, член-корреспондент РАН Сергей Григорьевич Гаранин. На этой установке (рис. 45) удалось осуществить тысячекратное сжатие мишени. А сейчас там строится установка в несколько раз более мощная.

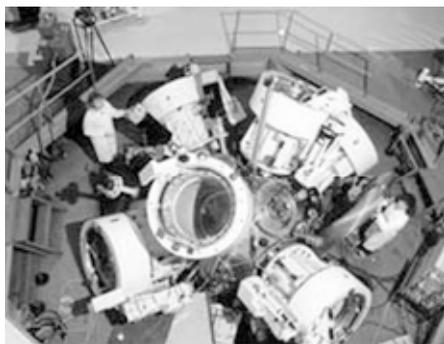


Рис. 45. Мишенная камера установки «Искра-5»

Следует отметить, что МИФИ внес огромный вклад в развитие представлений именно о лазерной плазме. Под руководством Юрия Алексеевича Быковского на кафедре №25 МИФИ была создана мощная научная школа по этому направлению. Число применений лазерной плазмы огромно, мне остается только отослать читателей к первой книге на эту тему, недавно изданной в МИФИ учеником Ю.А. Быковского Олегом Борисовичем Ананьиним с соавторами.

Чтобы обеспечить равномерное облучение мишени, придумали так называемый *хольраум*, небольшой лайнер из тяжелого металла. Когда лучи направляют на этот хольраум (рис. 46), он, превращаясь в плазму, дает рентгеновское излучение с температурой порядка 100 эВ, а вот это излучение уже равномерно облучает мишень.

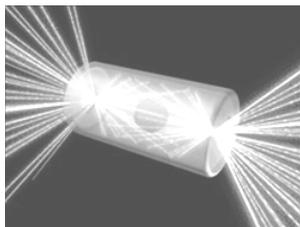


Рис. 46. Хольраум для непрямого сжатия в ИТС

Но если задача – получить мощный импульс рентгеновского излучения, то вместо лазера можно использовать и другой носитель мощности – *драйвер*. Можно использовать пучки тяжелых ионов, как делают под руководством еще одного мифиста, заведующего ка-

федрой № 60 МИФИ члена-корреспондента РАН Бориса Юрьевича Шаркова в Институте экспериментальной и теоретической физики (ИТЭФ). Или можно пропустить мегаамперные токи через окружающий мишень «забор» из тонких вольфрамовых нитей, как делают на установке «Ангара-5» в ТРИНИТИ. Возвращаясь к «неотвратимости» реализации управляемого термоядерного синтеза, замечу, что демонстрация «зажигания» реакции на установке NIF запланирована на 2010–2011 годы.

Еще два основных направления исследований на нашей кафедре не нашли своего отражения в книжке. Это проблема **взаимодействия плазмы с поверхностью обращенных к ней элементов термоядерных установок**. Эта тема заслуживает куда более подробного и пристрастного повествования, особенно учитывая, что в нынешнем году значительная часть коллектива кафедры была признана ведущей научной школой России по этой тематике. **Диагностика плазмы** – второе важнейшее направление нашей деятельности, для своего описания требует не популярных, а значительно более углубленных знаний. Но если среди читателей объявятся заинтересованные в том, чтобы предметно познакомиться с этим направлением, то могу рекомендовать издаваемую кафедрой на про-

тяжении нескольких лет серию «Учебная книга по диагностике плазмы».

Второе неотвратимое применение плазмы в 21-м веке – это космос. Для межпланетных полетов с участием человека необходим **плазменный двигатель**. Передаваемый ракете импульс  $mv$  при небольшой массе поднимаемого с Земли топлива (например, водорода) можно обеспечить за счет высокой скорости вылетающих частиц. Подобный проект для экспедиции на Марс уже несколько лет разрабатывается в США под руководством бывшего астронавта Диаса (проект VASIMR) (рис. 47, 48). Время путешествия на Марс с таким двигателем сокращается почти вдвое. Но в этом двигателе водород в плазме только разогревается и ускоряется. А если использовать термоядерный двигатель? Проект такого космолета на основе открытой магнитной ловушки обсуждался в МИФИ еще Игорем Николаевичем Головиным, соратником И.В. Курчатова. С таким двигателем возможности Человечества для экспансии в космос становятся неограниченными.

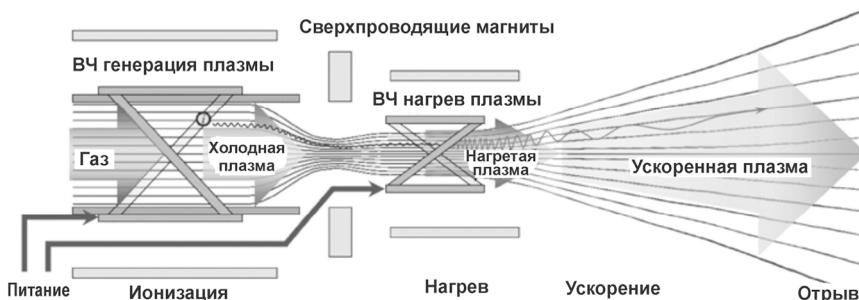


Рис. 47. Схема работы плазменного двигателя VASIMR

Первый же в мире электрореактивный (ионный) двигатель был создан под руководством Л.А. Арцимовича и запущен в космос в 1964 году. Профессору нашей кафедры Виктору Александровичу Храброву (кстати, выпускнику МИФИ) за разработку этого «движка» была присуждена Государственная премия, а при защите диссертации вместо кандидатской сразу же была присвоена степень доктора наук. Общеизвестен приоритет России в разработке плазменных двигателей, широко используемых для коррекции орбит спутников, а «движки» Алексея Ивановича Морозова – плазменные ускорители – до сих пор поставляются не только на отечественные, но и зарубежные космические аппараты. Надо сказать, что Алексей Иванович

Морозов создал целое новое направление в физике плазмы и ее технических приложений.

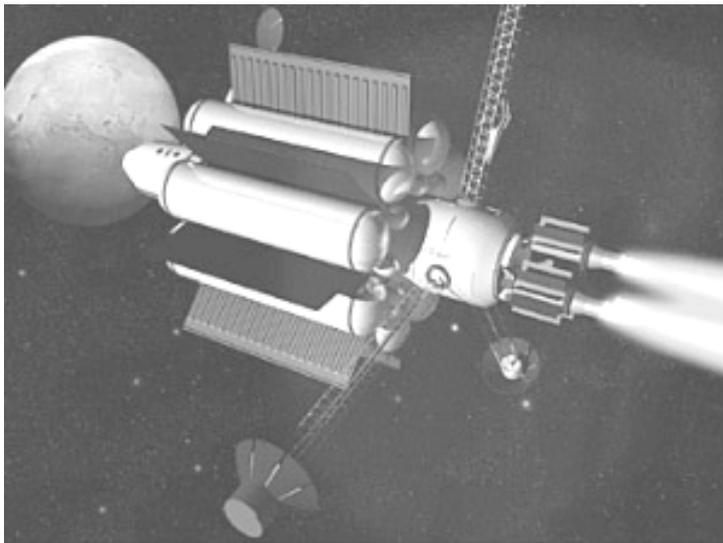


Рис. 48. Космический корабль с плазменными двигателями на пути к Марсу

Есть, конечно, и **проблемы**. На последнем большом конгрессе по физике плазмы, проходившем в Фукуоке в сентябре 2008 года, я удивился очень большому числу молодых японцев, студентов и аспирантов, которые представляли свои стендовые доклады сразу в трех огромных залах, где иногда на хорошем, а иногда не очень хорошем английском объясняли мне смысл своих достижений. Я спросил профессора Танабе (которого много лет знаю и с которым мы начинали сотрудничество между МИФИ и университетом Нагои еще в середине девяностых), а сколько, по его мнению, вообще в Японии студентов и аспирантов занимаются плазмой? По его оценке – это примерно 5 тысяч человек, из них проблемами управляемого термоядерного синтеза человек 500. Сравнение с нашей могучей державой, подарившей миру токамак, плазменные движки для космоса, плазменные ускорители, плазменные дисплеи, явно получилось грустным. По моим оценкам они опережают нас примерно на порядок по числу студентов, посвятивших себя исследованию и применению плазмы. Поэтому автор будет считать свою

миссию выполненной, если кто-нибудь из прочитавших эту книжку молодых, решающих, чему себя посвятить, заинтересуются теми фантастическими и неисчерпаемыми возможностями, которые дает для любознательного и настойчивого человека занятие физикой (и физикой плазмы, в частности).

Закончить я хочу стихотворением о любви к физике, написанным нашим мифистом А.М. Копытиным.

Отнесите ей сердце мое на ладони,  
Как умру я по ней от безмерной тоски,  
Пусть небрежно смеясь, равнодушно уронит,  
И оно распадется тогда на куски...

На осколки, на пыль, на частицы до кварка!  
Говорят, будто он ни на что не делим...  
И тогда все пространство осветится ярко!..  
Это значит! Я был ею все же любим!

О какие цвета и безумные звуки,—  
Разольются-то, словно, Жар-птицы взлетят,—  
Это боль и стремленья, страданья и муки  
Плоть людскую опять обрести захотят!

Время кротким младенцем в своей колыбели  
Тяжкий маятник вечности мерно качнет,  
И во имя любви, как единственной цели  
Вдруг Вселенная вновь созидаться начнет...

## Рекомендуемая литература и полезные ссылки

1. Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 264 с.
2. Рубин С.Г. Устройство нашей Вселенной. Фрязино: Век-2, 2006. – 316 с. (Наука для всех).
3. Конселис К. Невидимая рука Вселенной // В мире науки № 6, 2007. С. 23–29.
4. Холман Г. Загадка солнечных вспышек // В мире науки. № 6, 2006. С. 18–25.
5. Воронов Г.С. Штурм термоядерной крепости. М.: Наука. 1985. – 192 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 37) .
6. Мирнов С.В. Энергия из воды. Популярно об управляемом термоядерном синтезе. М.: МИФИ, 2007. – 128 с.
7. Акишев Ю.С. Неравновесная плазма в плотных газах, (физика, химия, техника и применение в экологии): Учебное пособие. М.: МИФИ, 2001. – 135 с.
8. <http://www.sciam.ru/2006/5/phizical.shtml>
9. Цыбин А.С. Физические основы плазменной и лазерной технологий. М.: МИФИ, 2002. – 184 с.
10. Этуотер Г. Плазмоника // В мире науки, № 8, 2007. С. 24–31.
10. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.Б., Быковский Ю.А, Крохин О.Н. Лазерная плазма. Физика и применения. М.: МИФИ, 2006. – 400 с.
11. <http://www.iter.org>
12. <http://www.adastravocket.com/vasimr.html>

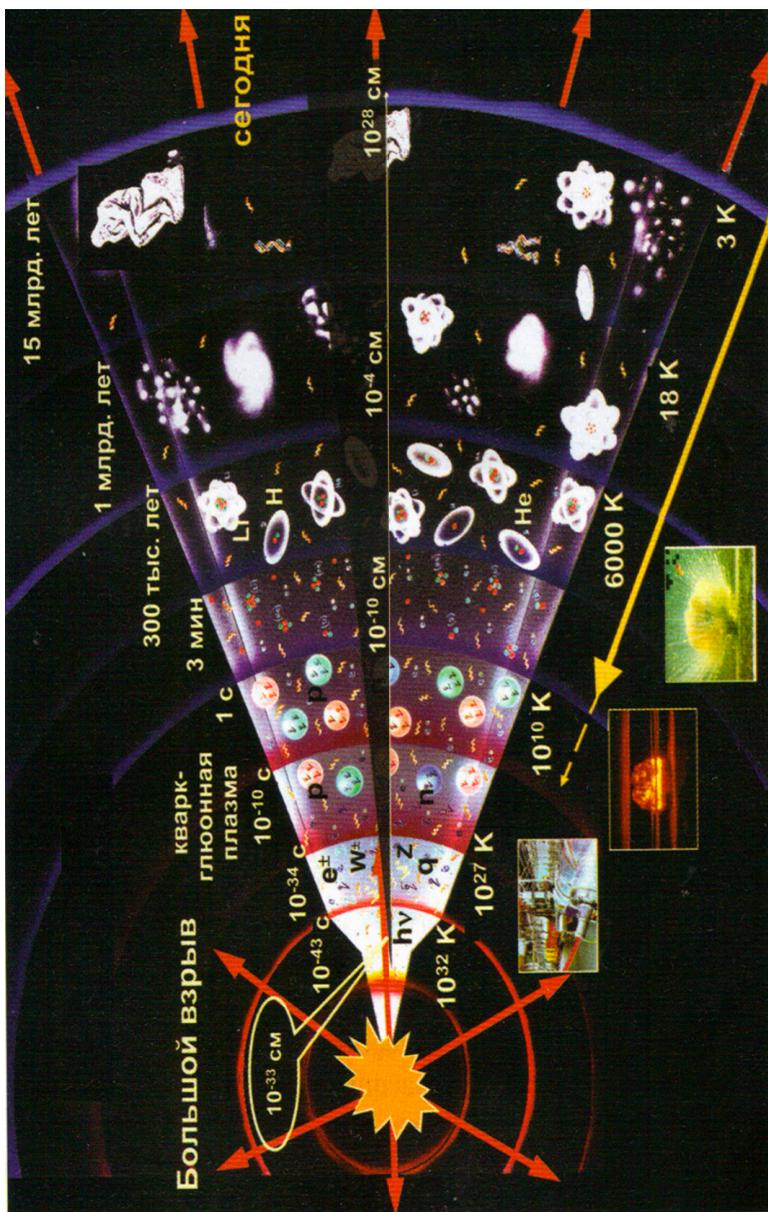


Рис. 1. Эволюция Вселенной согласно теории Большого Взрыва (по [1])

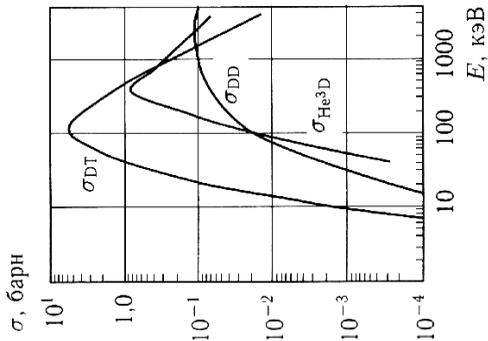


Рис. 2. Сечения наиболее эффективных реакций синтеза

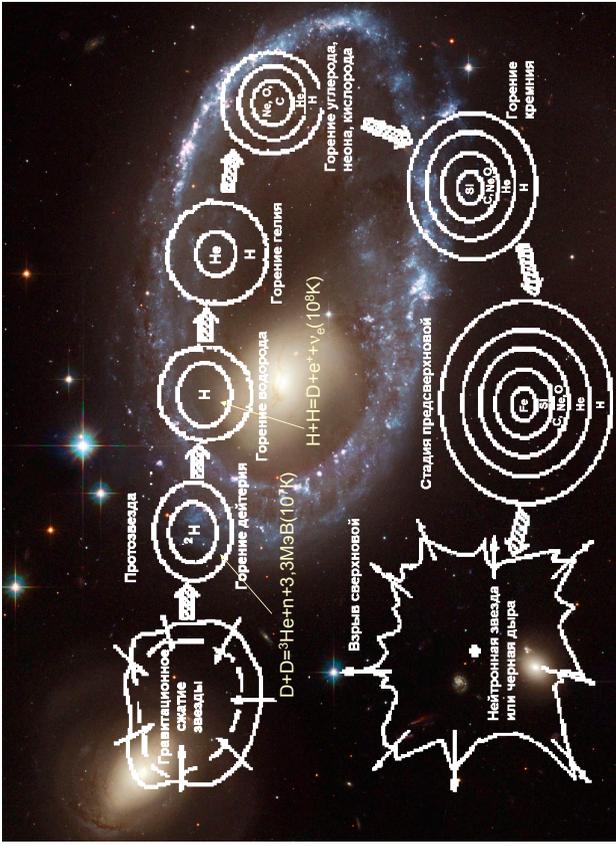


Рис. 3. Эволюция звезд при термоядерном горении.

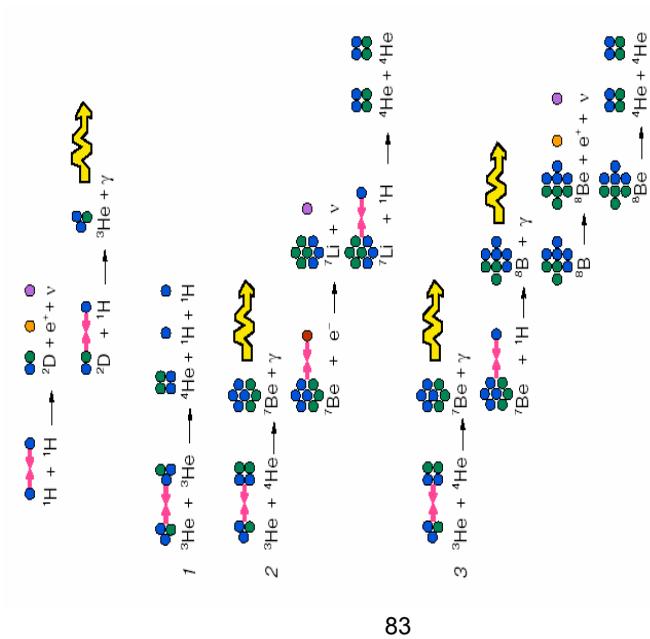


Рис. 4. Прогонный цикл ядерных превращений

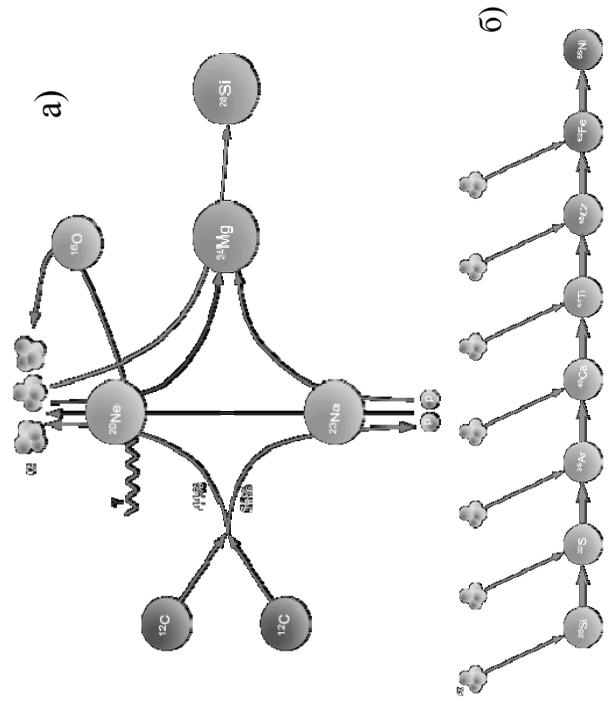


Рис. 5. Синтез более тяжелых элементов

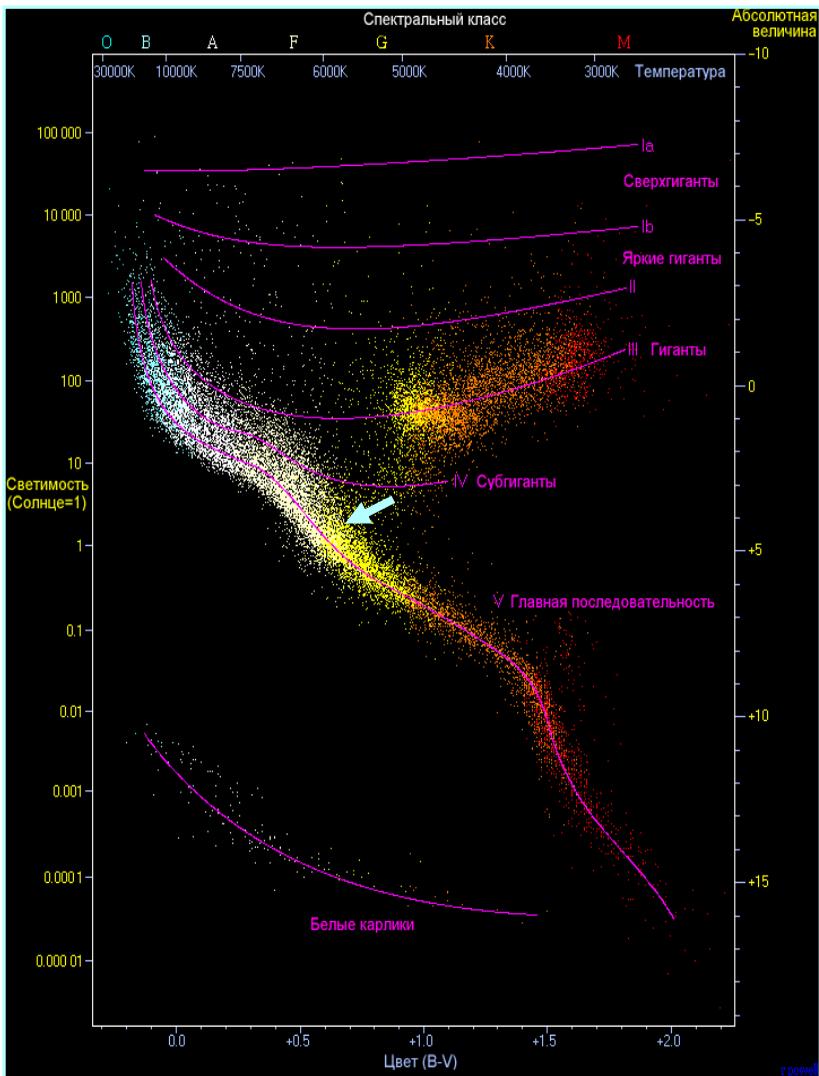


Рис. 6. Классификация наблюдаемых звезд. Стрелочкой указано место нашего Солнца



Рис. 9. Солнце во время лунного затмения

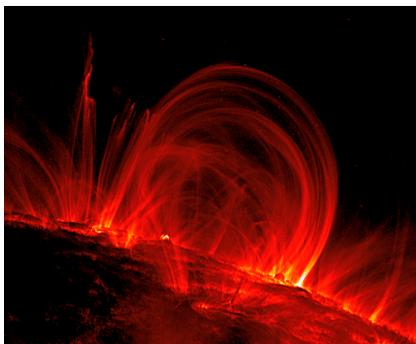


Рис. 10. «Фонтаны огня»

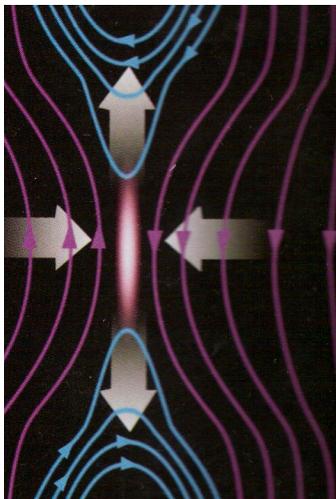


Рис. 11. Перезамыкание магнитных силовых линий

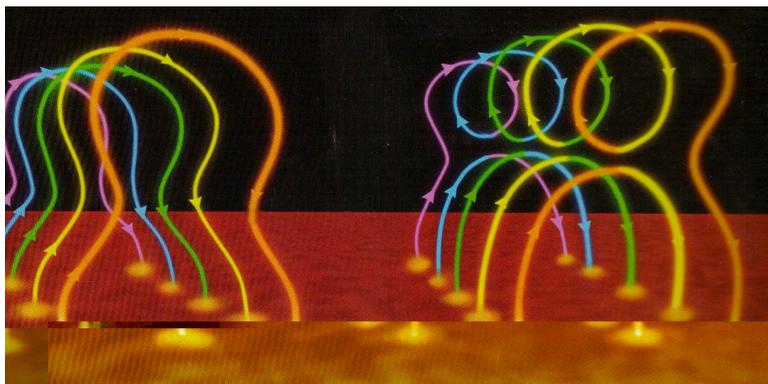


Рис. 12. К механизму образования области солнечной плазмы с захваченными токами и магнитным полем

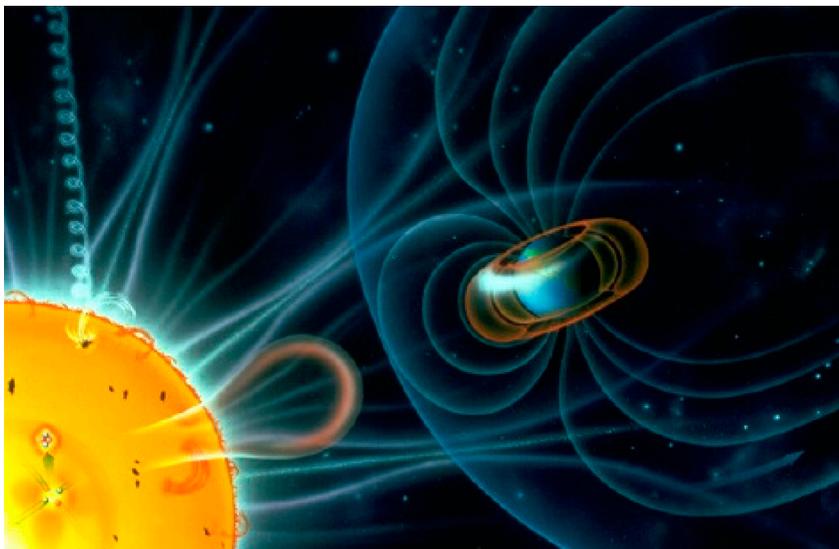


Рис. 13. Взаимодействие вылетевшей из Солнца плазмы и потоков частиц с Землей. Голубым цветом показаны магнитные поверхности поля Земли, оранжевым – радиационные пояса Земли

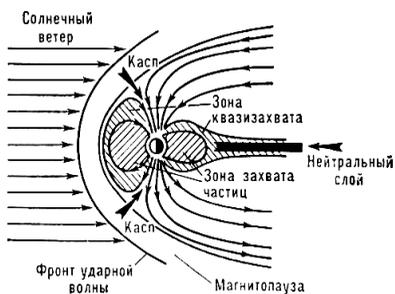


Рис. 14,а. Схема взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли с учетом его неоднородной структуры с дневной и ночной сторон

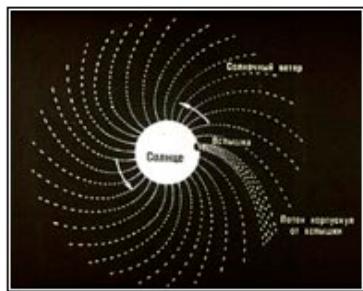


Рис. 14,б. Характер распространения солнечного ветра из-за вращения Солнца



Рис.15. Одно из наиболее красивых полярных сияний

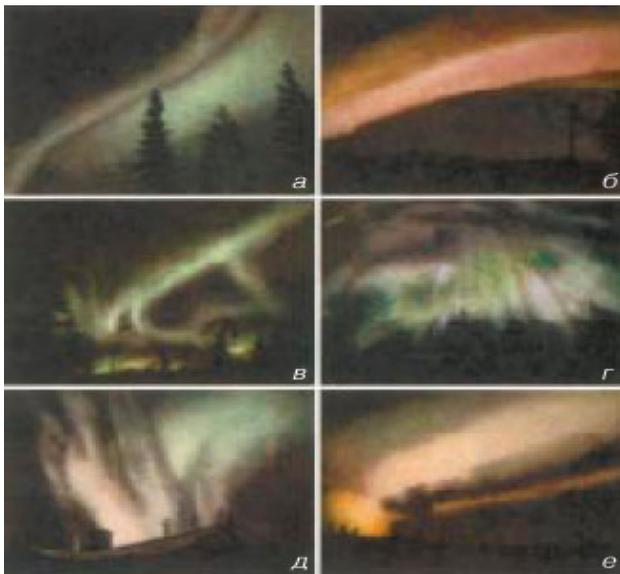


Рис. 16. Разные виды полярных сияний: *а* – спокойная диффузная дуга; *б* – аналогичная дуга с усиленным розовым свечением; *в*, *г* – лучистые полосы; *д*, *е* – складчатые полосы

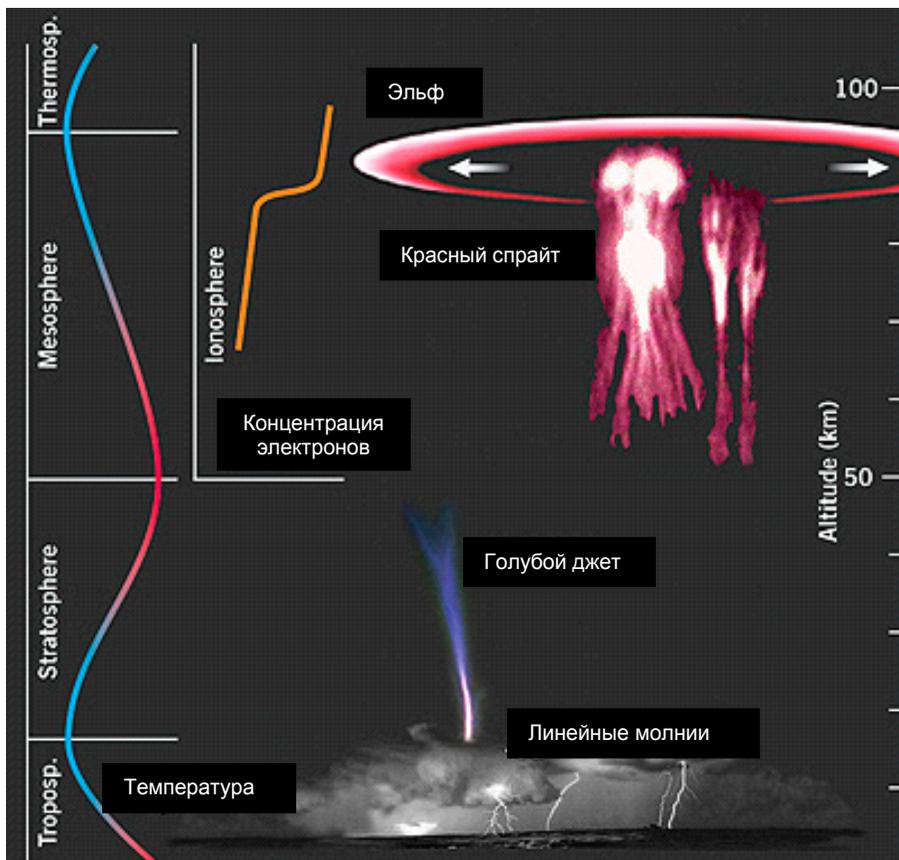


Рис. 21. Новые плазменные эффекты недавно обнаруженные в верхних слоях атмосферы