Физика плазмы

Александр Владимирович Бурдаков
ИЯФ СО РАН, т.39-46-02

Спецкурс для магистрантов НГУ

Литература http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl.ru.shtml

семинары

		группы
Полосаткин Сергей Викторович.	Понедельник 307а, 19:20	2355, ..6, ..7,..8
Иванов Иван Анатольевич.	Среда 307а, 19:20	2351, ..2, ..3,..4
Солдаткина Елена Ивановна	Среда 307, 19:20	2363, ..4, ..5,
Ступишин Николай Валерьевич.	Пятница 307а, 17:45	2359, ..60, ..61,..62

семинары

		группы
Полосаткин Сергей Викторович.	Понедельник 307а, 19:20	2355, ..6, ..7,..8
Иванов Иван Анатольевич.	Среда 307а, 19:20	2351, ..2, ..3,..4
Солдаткина Елена Ивановна	Среда 307, 19:20	2363, ..4, ..5,
Ступишин Николай Валерьевич.	Пятница 307а, 17:45	2359, ..60, ..61,..62

Программа и вопросы

1. **Понятие плазмы.** Энергетическая единица измерения температуры-эВ. Квазинейтральность.
Дебаевская экранировка. Радиус Дебая. Потенциал пробной частицы в плазме.
Сравнение с кулоновским потенциалом.
Плазменные колебания. Характерный временной масштаб разделения зарядов. Плазменная частота.
Классическая и вырожденная плазма. Идеальная и неидеальная плазма.
Число частиц в дебаевской сфере. Влияние этого параметра на свойства плазмы.
Сравнение свойств плазмы, газа, твердого тела.
Характерные параметры лабораторной и космической плазмы.

2. **Элементарные процессы в плазме.** Ионизация и рекомбинация, основные процессы.
Корональное равновесие. Перезарядка, применение для диагностики и нагрева плазмы.

Степень ионизации. Формула Саха. Термодинамическое равновесие, ЛТР.
Зависимость степени ионизации от параметров плазмы, от потенциала ионизации.

3. **Столкновения частиц в плазме. Кулоновский логарифм.** Транспортное (кулоновское) сечение, зависимость от энергии и заряда. Сила на неподвижный рассеивающий центр.
Кулоновский логарифм для плазмы и газа. Траектории частиц в плазме и газе.
Излучение из плазмы. Тормозное и рекомбинационное: характерные
зависимости от параметров плазмы, спектр (максимум в зависимости от температуры, ширина).
Линейчатое: интенсивность линии, отношение интенсивностей линий; доплеровское уширение, штарковское расщепление, использование этих эффектов в диагностике плазмы.
Циклотронное излучение: частота, запирание излучения, интенсивность излучения черного тела.

3.**Релаксация импульса и энергии частиц в плазме.**
Характерное время потери направленного импульса для холодной и горячей плазмы,
отличия в зависимости от скорости частицы. Сравнение времен релаксации электронной компоненты,
ионной компоненты и времени выравнивания электронной и ионной температур.
Проводимость плазмы, поле Драйсера, убегающие электроны.

4. **Теоретические модели, используемые при исследовании плазмы.**
Кинетическое уравнение с самосогласованным полем.
Функция распределения, выражение параметров плазмы через нее.
Физический смысл кинетического уравнения. Коэффициенты электропроводности и
теплопроводности плазмы, их зависимость от температуры (плотности).

5. **Магнитная гидродинамика.** МГД-приближение. Макроскопические характеристики плазмы.
Одножидкостая МГД, уравнения непрерывности, движения, теплопереноса,
сокращенные уравнения Максвелла. Вмороженность силовых линий магнитного поля.

6. **Волны в плазме.** МГД-волны, альфвеновская волна. Звуковые волны.
7. Ленгмюровская волна. Затухание Ландау.
Электромагнитные электронные волны. Прохождение электромагнитной волны через плазму:
зависимость показателя преломления от частоты, критическая плотность, интерферометрия плазмы.
Понятие о плазменных неустойчивостях.

8. Движение частиц в магнитных полях. Циклотронный резонанс. Дрейфовое движение.
Электрический, центробежный и градиентный дрейф.адиабатические инварианты.
Дрейфовое движение в тороиде. Движение заряженной частицы в открытой ловушке

9. **Управляемый термоядерный синтез.** Проблемы энергетики. Радиационная опасность. Основы термоядерного синтеза. Энергия связи. Сечения реакций. Критерий Лоусона.

10. **Инерциальное удержание.** Термоядерная бомба. Лазерные системы. Быстрый поджиг. Сжатие рентгеновским излучением.

11. **Магнитное удержание.** Замкнутые системы. Токамак. Стелларатор. МГД неустойчивость. Перспективы систем с магнитным удержанием.
Пинч. Тета-пинч.

12. **Открытые магнитные ловушки**. Пробкотрон.
Неустойчивости. Тандем. Термобарьер. Амбиполярная ловушка. Газодинамическая ловушка. Многопробочная ловушка.

13. **Низкотемпературная плазма и плазменный разряд.** Понятие о Таундсеновской теории пробоя. Кривая Пашена.

14. **Плазменные технологии.** Принцип работы плазменного дисплея, плазменного двигателя.

15. **Плазма в космосе**

Основная литература

Эта литература имеется в электронном виде. Сайт НГУ и ИЯФ

Л.А.Арцимович, Р.З.Сагдеев. *Физика плазмы для физиков.* -М.,Атомиздат, 1979.

С.Ю. Лукьянов, Н.Г.Ковальский. *Горячая плазма и управляемый термоядерный М.1997*

Кролл, А., Трайвелпис. *Основы физики плазмы.* - М., Мир, 1975.

Д.Роуз, М.Кларк. *Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции.* М.,, 1963.

Дж. Дюдерштадт, Г. Мозес *Инерциальный термоядерный синтез, М., 1984*

Ред. Лохте-Хольтгревен *Методы исследования плазмы.М.1971*

Б.А.Трубников. *Теория плазмы. М.1996*

К.В.Лотов. *Физика плазмы.*
Спецкурс для магистрантов НГУ.

http://www.inp.nsk.su/plasma_chair/index.html.
\\csd\data\user\plasma\physplas*.pdf

И.А.Котельников, Г.В. Ступаков
Лекции по физике плазмы.Новосибирск.1996. *R:\plasma\VFP-book*/pdf*

Литература

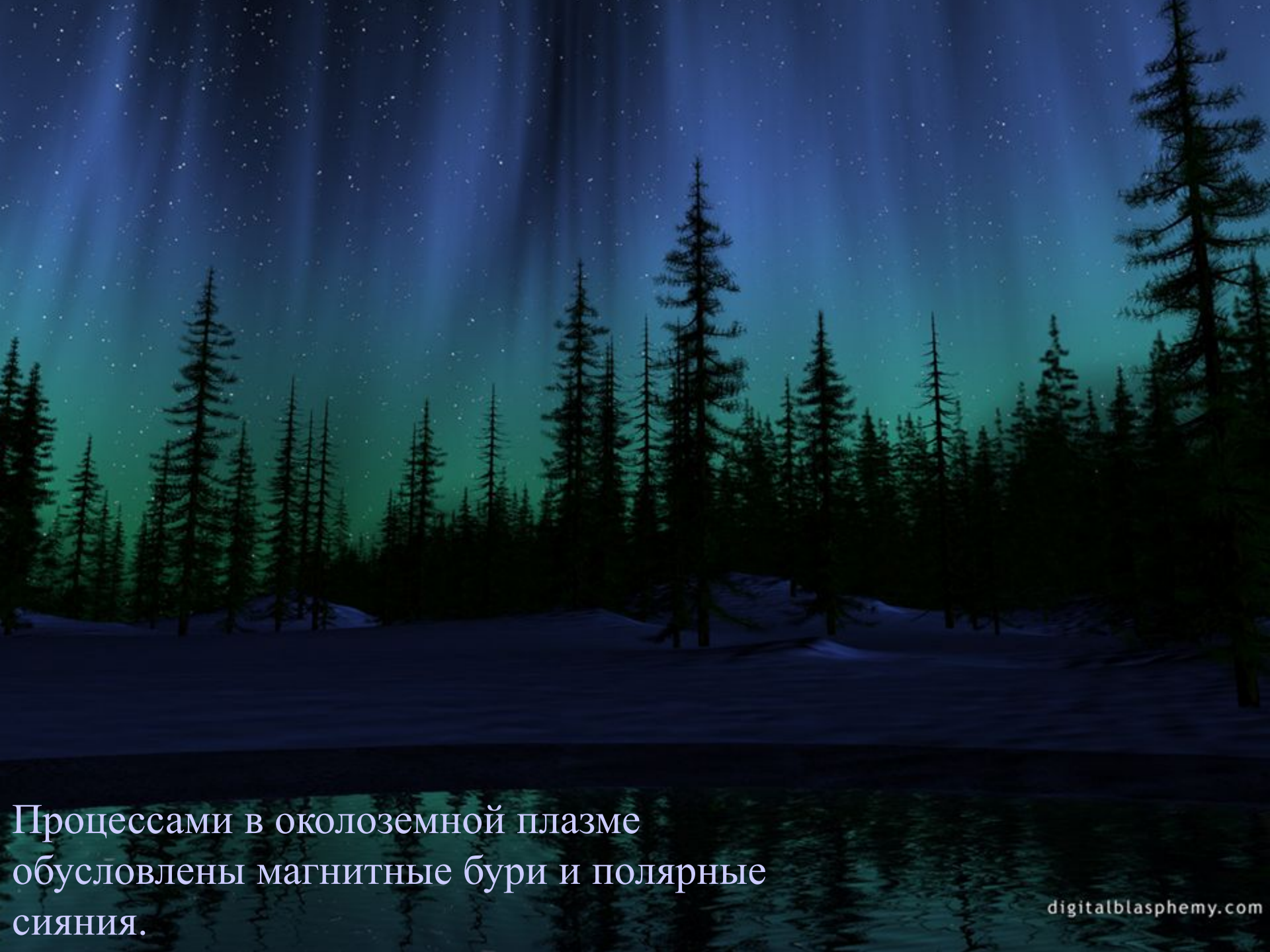
1. **Кролл, А., Трайвелпис** *Основы физики плазмы.* - М.: Мир, 1975.
2. **Л.Д. Ландау, Е. М.Лифшиц** *Электродинамика сплошных сред.* -
3. **Е.М. Лифшиц, Л.П.Питаевский** *Физическая кинетика.* - М.: Наука, 1992.
4. **Б.А.Трубников** *Теория плазмы.* - Энергоатомиздат, 1996.
5. **Б.Б.Кадомцев** *Коллективные явления в плазме.* - М.: Наука, 1979.
6. **Л.А.Арцимович, Р.З.Сагдеев** *Физика плазмы для физиков.* - М.: Наука, 1976.
7. **Ф.Чен** *Введение в физику плазмы.* - М.: Атомиздат, 1979.
8. **Д.А.Франк-Каменецкий** *Лекции по физике плазмы.* - М.: Мир, 1987.
9. **А.Ф.Александров, Л.С.Богданкевич, А.А.Рухадзе** *Основы электродинамики плазмы.* - М.: Атомиздат, 1964.
10. **С.И.Брагинский** *Явления переноса в плазме.* – сб. «Вопросы теории плазмы» (Под ред. М.А.Леонтовича). - М., Атомиздат, 1963, вып.1, с.183-272.
11. **В.Д.Шафранов** *Равновесие плазмы в магнитном поле.* – В сб. «Вопросы теории плазмы»' (Под ред. М.А.Леонтовича). - М., Госатомиздат, 1963, вып.2, с.92-131.
12. **Б.Б.Кадомцев** *Гидромагнитная устойчивость плазмы.* – В сб. «Вопросы теории плазмы» (Под ред. М. А. Леонтовича). - М., Атомиздат, 1963, вып.4, с.132-176.
13. **В.Д.Шафранов** *Электромагнитные волны в плазме.* – В сб. «Вопросы теории плазмы» (Под ред. М.А. Леонтовича). - М., Госатомиздат, 1963, вып. 3, с.3-140.
14. **Б.Б.Кадомцев** *Турбулентность плазмы.* – В сб. «Вопросы теории плазмы» (Под ред. М.А.Леонтовича). - М., Атомиздат, 1964, вып. 4, с.188-339.
15. **А.Б.Михайловский** *Теория плазменных неустойчивостей.* т.1 - М.: Атомиздат, 1975. Госатомиздат, 1963.
16. **Д.Роуз, М.Кларк** *Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции.* - М.:
17. **М.Митчелл, Ч.Кругер** *Частично ионизованные газы.* -
18. **К.Лонгмайр** *Физика плазмы.* - М.: Мир, 1976.
19. *Основы физики плазмы.* - М.: Атомиздат, 1966.
20. **Г.Бейтман** *МГД-неустойчивости.* - М.: Атомиздат, 1983, т.1.

Понятие плазмы

Понятие плазмы

В молнии $T \sim 2 \times 10^4$ К, $n \sim 2{,}5\ 10^{19}$ (число электронов или ионов в $см^3$) (плотность воздуха)

Такую плазму называют слабонеидеальной.



Процессами в околоземной плазме обусловлены магнитные бури и полярные сияния.

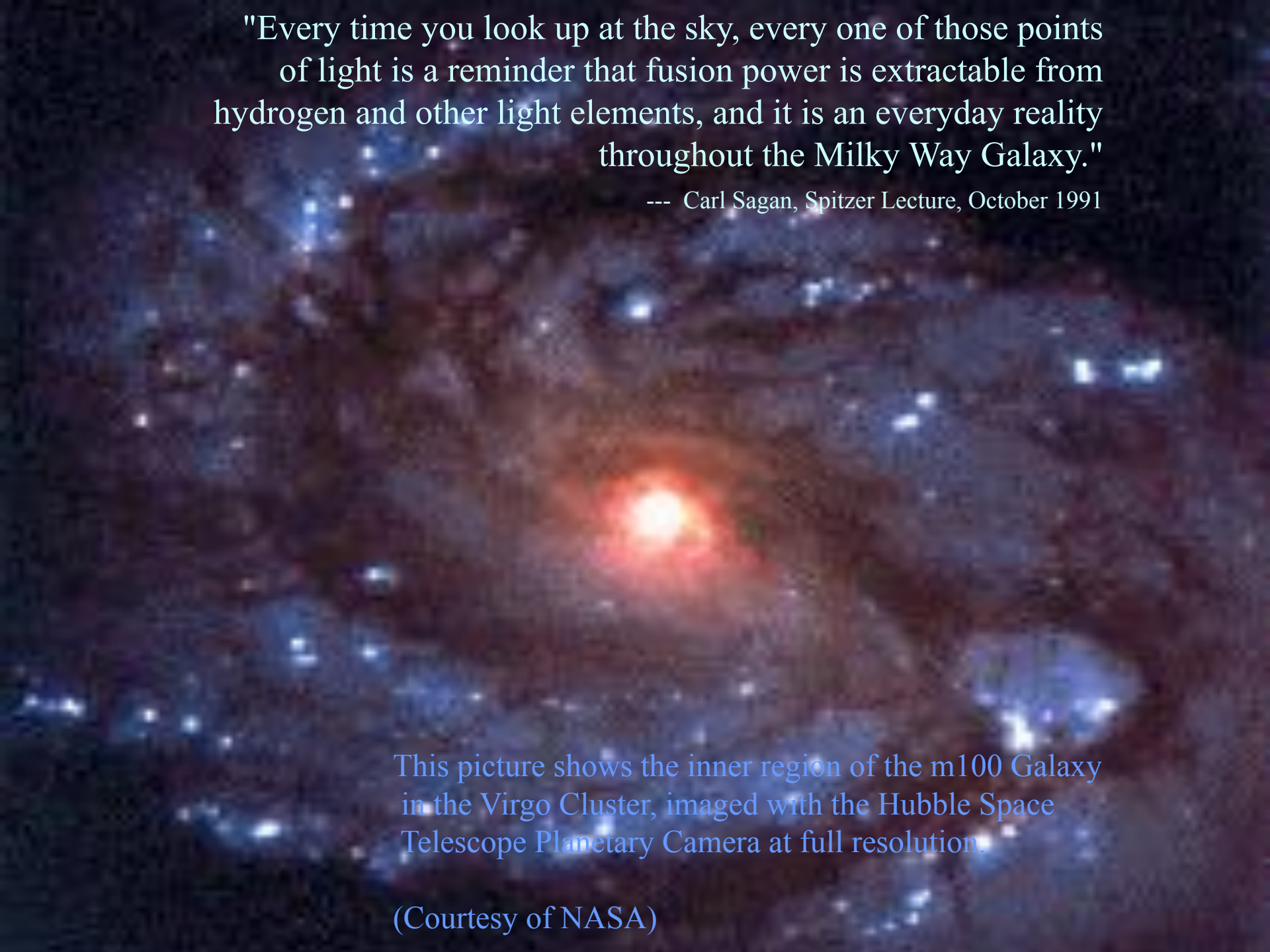
Плазма в космосе

NASA, ISAS, http://www.spacescience.org/

http://sec.gsfc.nasa.gov/

Плазма в космосе

В состоянии плазмы находится подавляющая часть видимого вещества Вселенной — звёзды, звёздные атмосферы, туманности галактические и межзвёздная среда. Около Земли плазма. существует в космосе в виде солнечного ветра, заполняет магнитосферу Земли (образуя радиационные пояса Земли) и ионосферу.



"Every time you look up at the sky, every one of those points of light is a reminder that fusion power is extractable from hydrogen and other light elements, and it is an everyday reality throughout the Milky Way Galaxy."

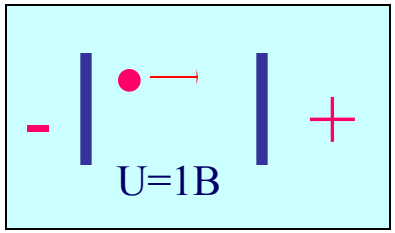
--- Carl Sagan, Spitzer Lecture, October 1991

This picture shows the inner region of the m100 Galaxy in the Virgo Cluster, imaged with the Hubble Space Telescope Planetary Camera at full resolution.

(Courtesy of NASA)

Система единиц-СГС

Единица измерения **1 эВ**



$$eU = \frac{mV^2}{2} \Rightarrow kT$$

eU[Дж] ⇒ [эВ]

kT[Дж] ⇒ T[эВ]

$$1\text{эв} \sim 10^4 \text{K}$$

Понятие плазмы.

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

Плазма (от греч. plasma — вылепленное, оформленное), частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

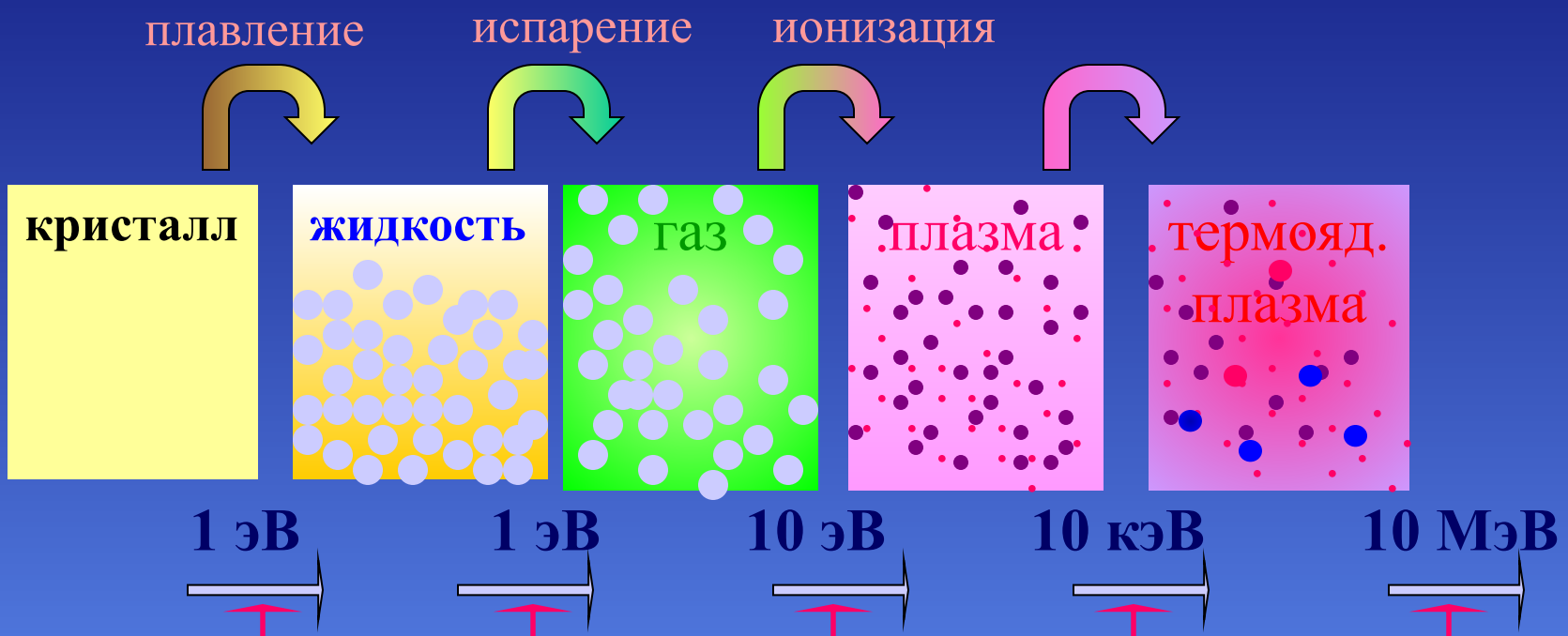
Термин «плазма» в физике был введён в 1923 американскими учёными И. Ленгмюром и Л. Тонксом, проводившими зондовые измерения параметров низкотемпературной газоразрядной плазмы.

Что такое плазма?

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

Ядерный барьер

Кулоновский барьер



При достаточно сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. Если увеличивать температуру и дальше, резко усилится процесс термической ионизации, т. е. молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, которые затем превращаются в ионы. Ионизация газа, кроме того, может быть вызвана его взаимодействием с электромагнитным излучением (фотоионизация) или бомбардировкой газа заряженными частицами.

Литература

Понятие плазмы.

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

* кулоновское взаимодействие
*коллективные эффекты (согласованное движение частиц)

В резком отличии свойств плазмы от свойств нейтральных газов определяющую роль играют два фактора. Во-первых, взаимодействие частиц плазмы между собой характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания, убывающими с расстоянием гораздо медленнее (т. е. значительно более «дальнодействующими»), чем силы взаимодействия нейтральных частиц. По этой причине взаимодействие частиц в плазме. является, строго говоря, не «парным», а «коллективным» — одновременно взаимодействует друг с другом большое число частиц.

Во-вторых, электрические и магнитные поля очень сильно действуют на плазму (в то время как они весьма слабо действуют на нейтральные газы), вызывая появление в плазме объёмных зарядов и токов и обусловливая целый ряд специфических свойств плазмы..

Понятие плазмы.

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

* кулоновское взаимодействие

*коллективные эффекты (согласованное движение частиц)

- **частично (не полностью) ионизованная плазма** — присутствует значительная доля нейтральных атомов;
- **заряженная (ненейтральная) плазма** — суммарный положительный заряд частиц сильно отличается от суммарного отрицательного;
- **электронно-дырочная плазма** в полупроводниках;
- и т.д.

Далее рассматриваем только квазинейтральную электрон-ионную плазму.

Классическая и вырожденная плазма.

Определения:

Плотность: n — *число электронов в единице объема*

Температура: T — *температура плазмы в энергетических единицах*

m — *масса электрона* p — *импульс электронов* $\hbar$ — *постоянная Планка*

Классическая и вырожденная плазма.

«Квантовый» масштаб-
длина волны Де-Бройля

$$\lambda_{d-B} \sim \frac{\hbar}{p} \sim \frac{\hbar}{\sqrt{mT}}$$

«Плазменный» масштаб-
расстояние между частицами

$$\lambda_n \sim n^{-1/3}$$

Классическая плазма: $\lambda_n \gg \lambda_{d-B}$

Классическая и вырожденная плазма.

Классическая плазма: $\lambda_n \gg \lambda_{d-B}$, и частицы можно рассматривать как точечные заряды.

Вырожденная плазма: $\lambda_n \lesssim \lambda_{d-B}$, и существенны квантовомеханические эффекты.

Граница между режимами: $\lambda_n \sim \lambda_{d-B}$,

$$T \sim \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{m}$$

Идеальная и неидеальная плазма.

Идеальная плазма: $W_E \ll W_k.$

W_E — энергия кулоновского взаимодействия частиц

W_k — кинетическая энергия частиц

Идеальная

$$W_k \sim T, \quad W_E \sim \frac{e^2}{\lambda_n},$$

$$\boxed{T \gg e^2 n^{1/3}}$$

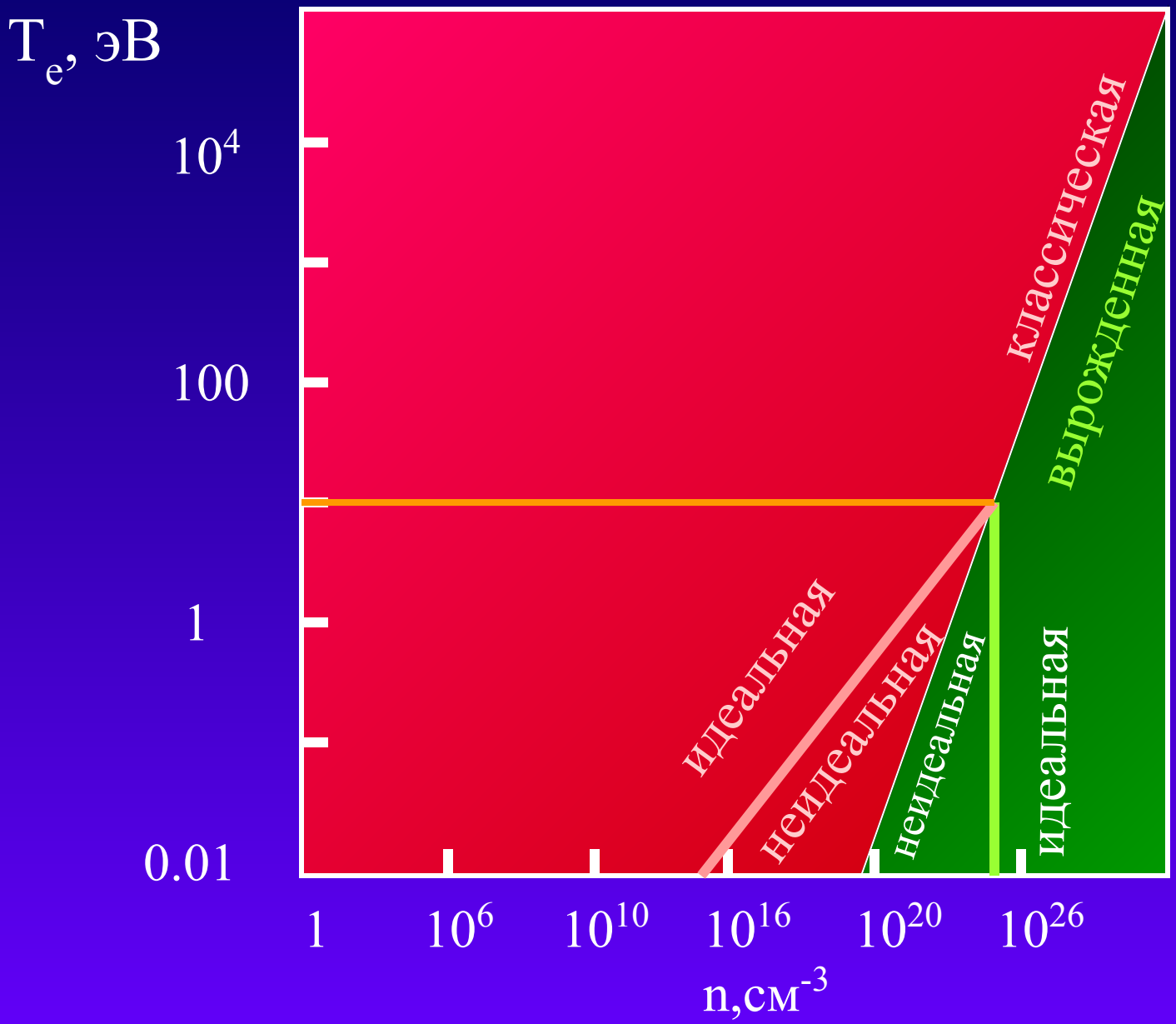
неидеальная плазма.

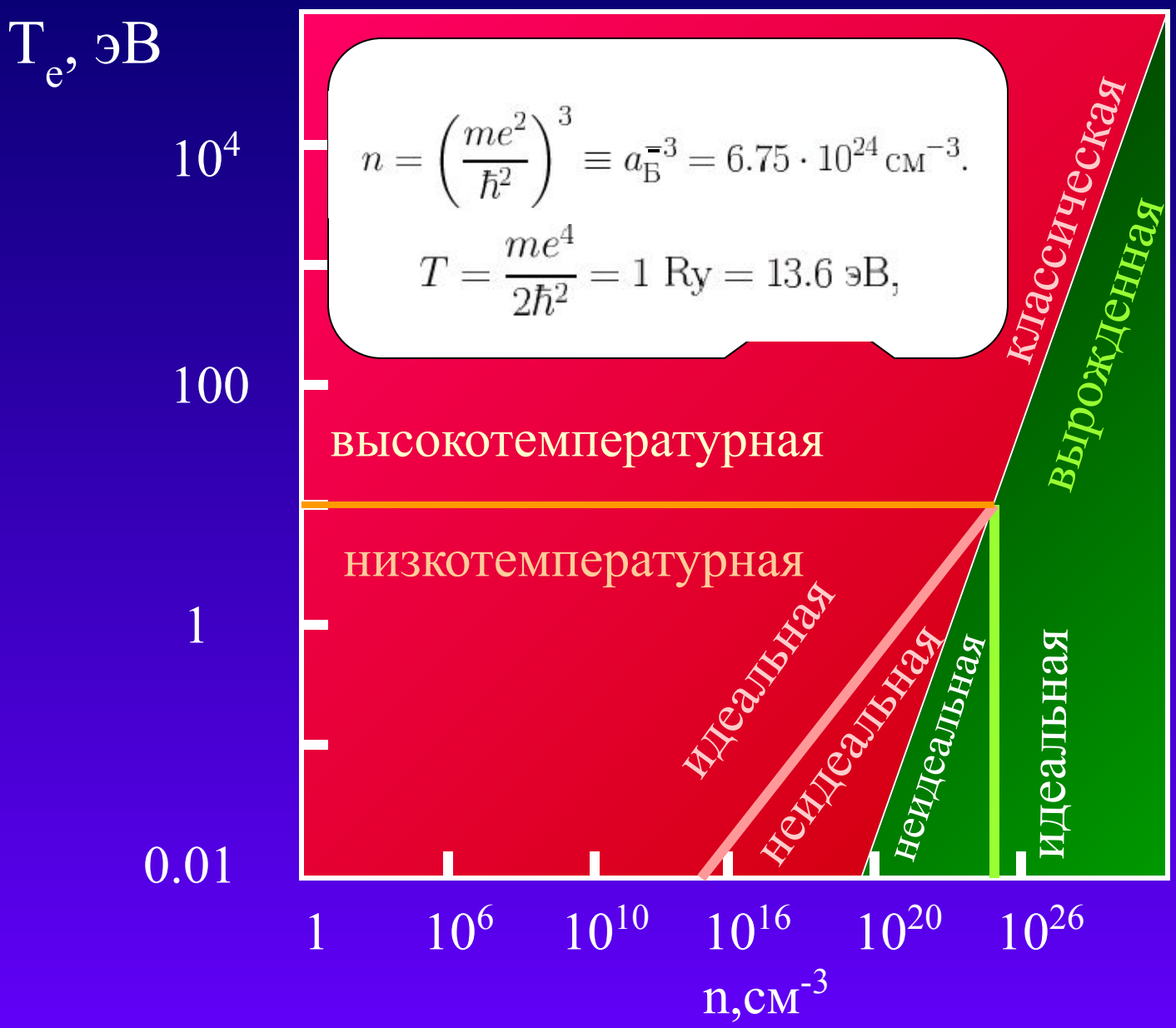
Плазменные электроны -это Ферми-газ

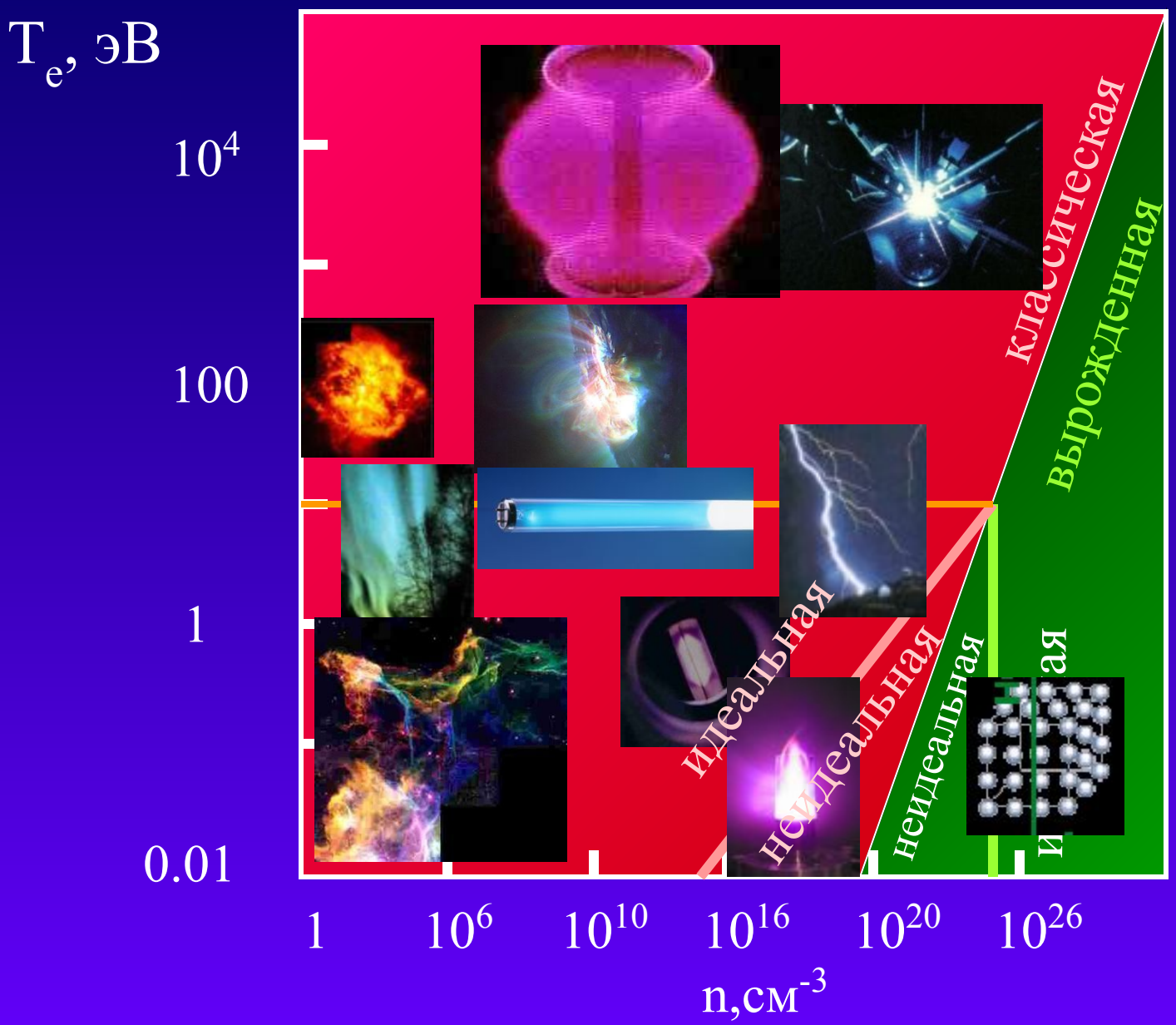
$$W_k \sim \frac{p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{m} \sim W_F,$$

W_F — *энергия Ферми*

$$\boxed{n \gg \left(\frac{me^2}{\hbar^2}\right)^3}$$


T_e, эВ
10^4
100
1
0.01
1
10^6
10^{10}
10^{16}
10^{20}
10^{26}
n,см$^{-3}$
классическая
вырожденная
идеальная
неидеальная
неидеальная
идеальная


T_e, эВ
10^4
100
1
0.01
$n = \left(\frac{me^2}{\hbar^2}\right)^3 \equiv a_Б^{-3} = 6.75 \cdot 10^{24}\,см^{-3}.$
$T = \frac{me^4}{2\hbar^2} = 1\ Ry = 13.6\ эВ,$
высокотемпературная
низкотемпературная
классическая
вырожденная
идеальная
неидеальная
неидеальная
идеальная
1
10^6
10^{10}
10^{16}
10^{20}
10^{26}
n,см$^{-3}$


T_e, эВ
10^4
100
1
0.01
1
10^6
10^{10}
10^{16}
10^{20}
10^{26}
n,см$^{-3}$
классическая
вырожденная
идеальная
неидеальная
неидеальная
идеальная

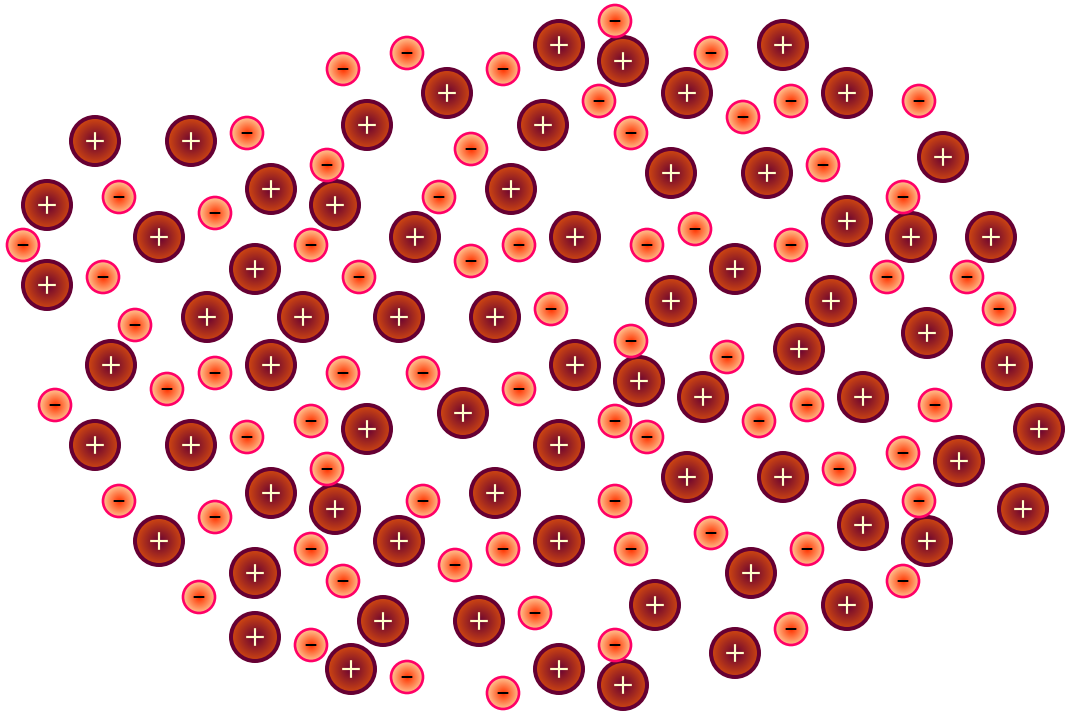
плазма	n, см$^{-3}$	T, эВ
Эксперименты по магнитному удержанию плазмы для УТС	$10^{12} \div 10^{15}$	$10^3 \div 10^4$
Эксперименты по инерциальному УТС	$10^{20} \div 10^{24}$	$10^2 \div 10^3$
Газовый разряд	$10^6 \div 10^{12}$	~ 1
Солнечный ветер	5	$10 \div 50$
Солнечная корона	10^6	200
Солнечная атмосфера	10^{14}	1
Солнечное ядро	10^{25}	100
Твердое тело (металл)	$10^{24} \div 10^{25}$	0.01
Ионосфера Земли	5	$10 \div 50$
Межзвездный газ	1	$0.01 \div 1$

Мы будем рассматривать классическую идеальную плазму

Дебаевская экранировка

Плазма-квазинейтральна

На каком масштабе сохраняется квазинейтральность плазмы?



E=0

Дебаевская экранировка

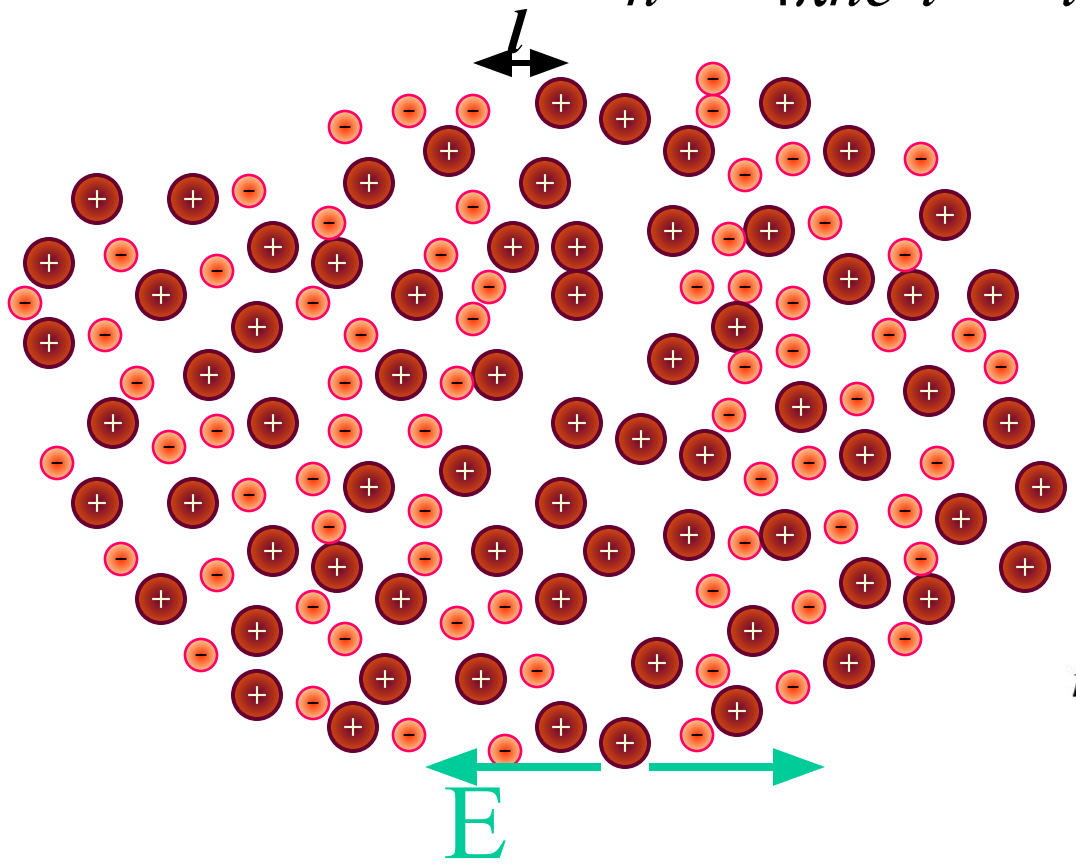
На каком масштабе сохраняется квазинейтральность плазмы?

$$divE = 4\pi\rho \quad \rightarrow \quad \delta E/l \approx 4\pi e\delta n \approx \delta\varphi/l^2 \qquad e\delta\varphi \approx T$$

$$4\pi e^2\delta n \approx e\delta\varphi/l^2 \approx T/l^2 \quad \rightarrow \quad \frac{\delta n}{n} \approx \frac{T}{4\pi n e^2 l^2} = \frac{r_D^2}{l^2}$$

$$r_D = \sqrt{\frac{T}{4\pi n e^2}}$$

Дебаевский радиус



$$r_D\,[\text{см}] = 740\sqrt{\frac{T\,[\text{эВ}]}{n\,[\text{см}^{-3}]}}$$

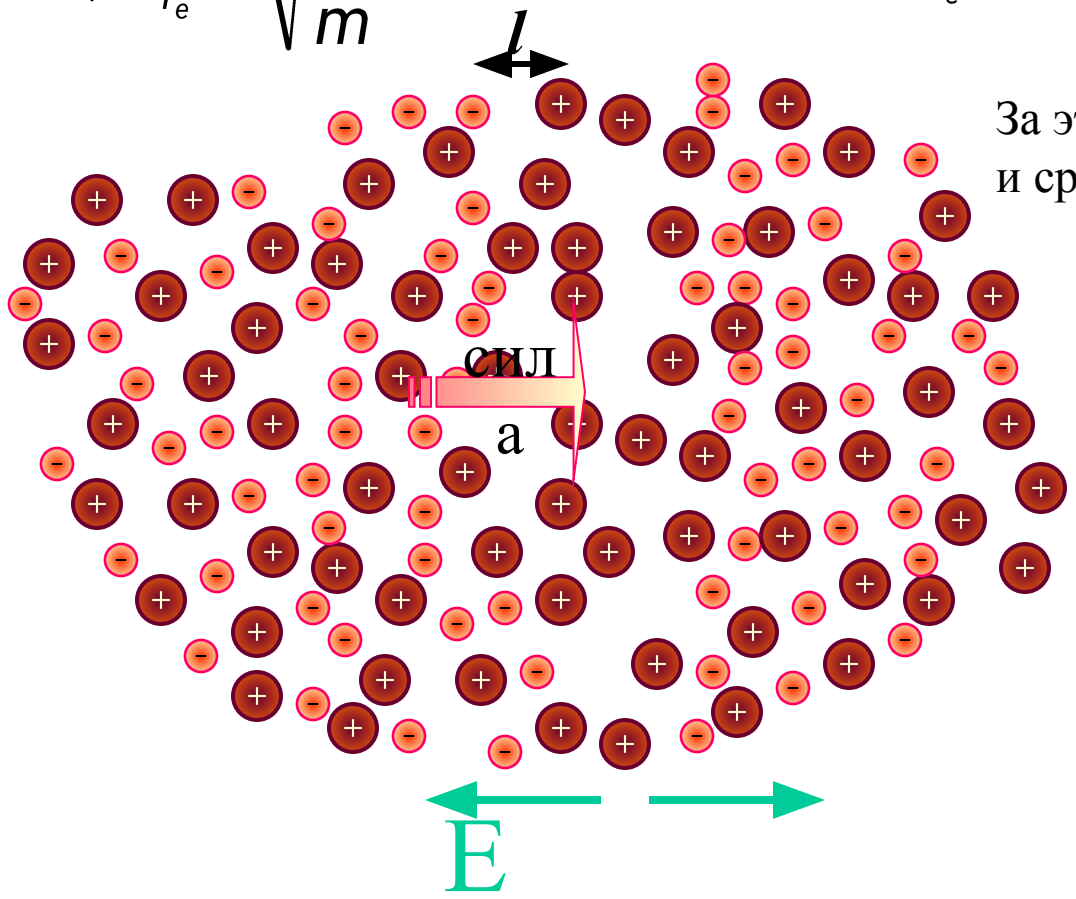
Дебаевский радиус есть пространственный масштаб ,
на котором происходит разделение зарядов

Временной масштаб:

$$e\delta\varphi \approx T,\ V_{T_e} = \sqrt{\frac{T}{m}}$$

$$t \approx \frac{r_D}{V_{T_e}} = \frac{\sqrt{\frac{T}{4\pi n e^2}}}{\sqrt{\frac{T}{m}}} = \sqrt{\frac{m}{4\pi n e^2}}$$

За это время прилетят электроны
и сравняют флуктуацию



Плазменные колебания

Макроскопическое отклонение от квазинейтральности ведет к появлению электрического поля.

Для плоского слоя плазмы: δx -смещение электронов

$$m\ddot{\delta x} = -eE_x = -4\pi ne^2 \delta x$$

Ленгмюровские колебания

Плазменная частота $\omega_p = \sqrt{\dfrac{4\pi ne^2}{m}}$

$$\omega_p\,[\text{с}^{-1}] = 5{,}6\cdot 10^4 \sqrt{n\,[\text{см}^{-3}]}$$

Дебаевская экранировка

Найдем потенциал φ, создаваемый в плазме маленьким неподвижным точечным зарядом q. Пусть ионы — однозарядные, тогда

$$\Delta\varphi = 4\pi e\,(n_e - n_i) \stackrel{\text{def}}{=} 4\pi e\,\delta n.$$

n_i, n_e — число ионов и электронов в единице объема, Δ — лапласиан

Уравнение Пуассона

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho$$

В равновесии $\quad n_e = n_0 \exp\left(\dfrac{e\varphi}{T_e}\right) \approx n_0\left(1 + \dfrac{e\varphi}{T_e}\right), \qquad n_i \approx n_0\left(1 - \dfrac{e\varphi}{T_i}\right),$

$$\delta n = n_0\, e\varphi\left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_i}\right),$$

T_i, T_e — температуры ионов и электронов
n_0 — невозмущенная плотность электронов и ионов

откуда

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial\varphi}{\partial r} - 4\pi n_0\, e^2\varphi\left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_i}\right) = 0.$$

Ищем решение $\quad \varphi \xrightarrow[r\to\infty]{} 0, \quad \varphi \xrightarrow[r\to 0]{} \dfrac{q}{r} \quad \left(\text{через } \varphi = \dfrac{f(r)}{r}\right):$

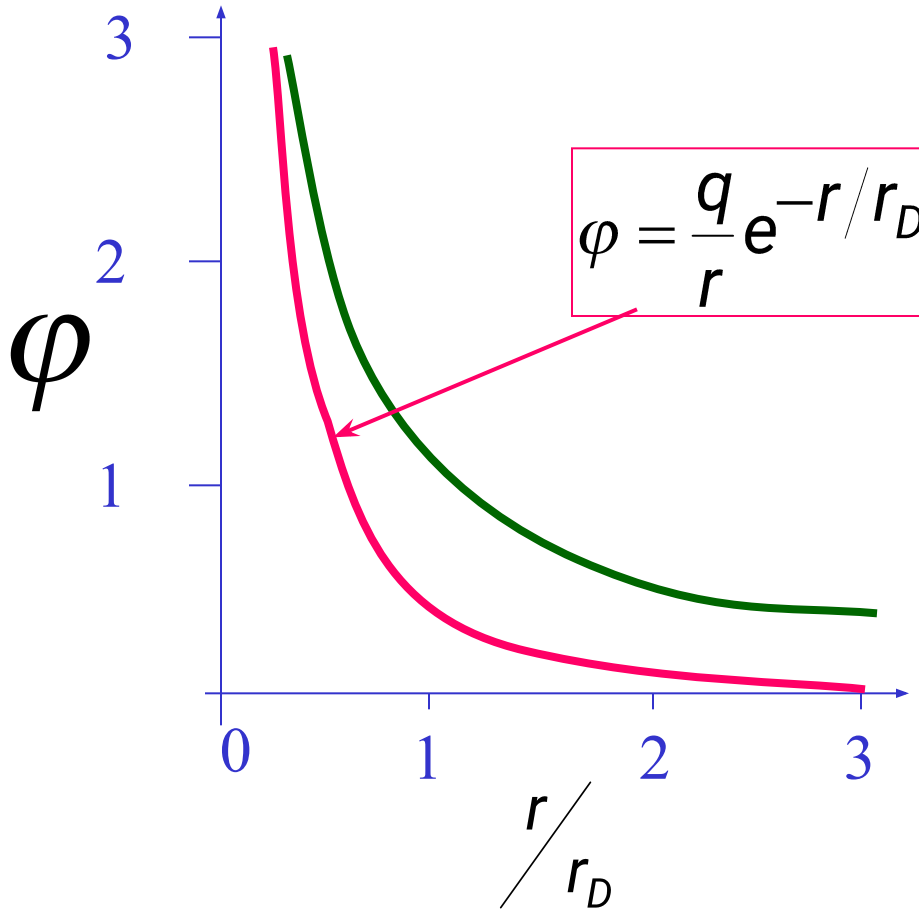
$$\varphi = \frac{q}{r} e^{-r/r_D}$$

$$r_D = \left[4\pi n_0\, e^2\left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_i}\right)\right]^{-1/2}$$

r_D — **радиус Дебая.**

Дебаевская экранировка

Дебаевский (красная линия) и кулоновский (зеленая линия) потенциал.



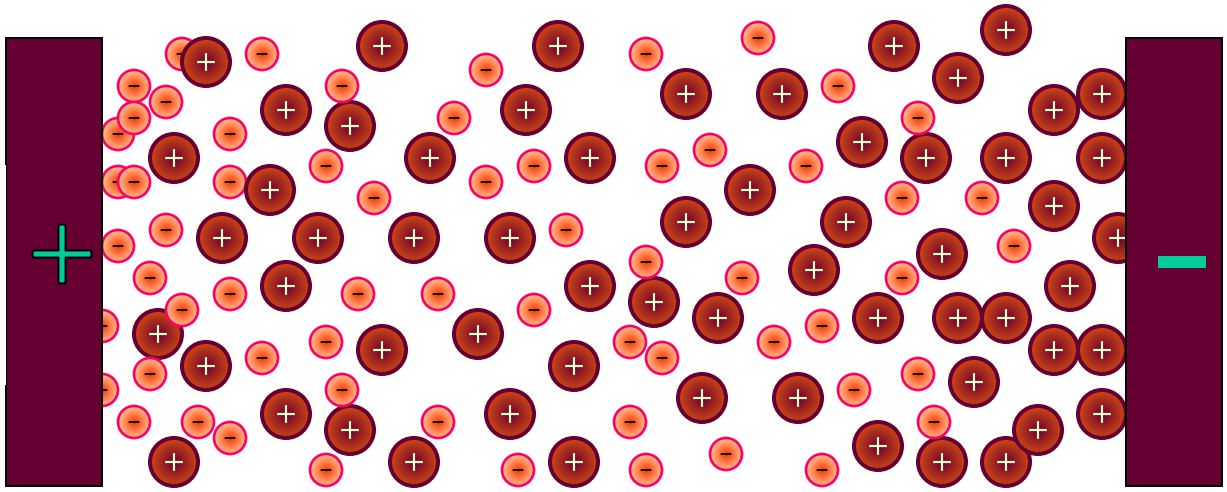
$$\varphi = \frac{q}{r} e^{-r/r_D}$$

$$r_D = \left[4\pi n_0 e^2 \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_i} \right) \right]^{-1/2}$$

r_D — **радиус Дебая.**

Дебаевская экранировка

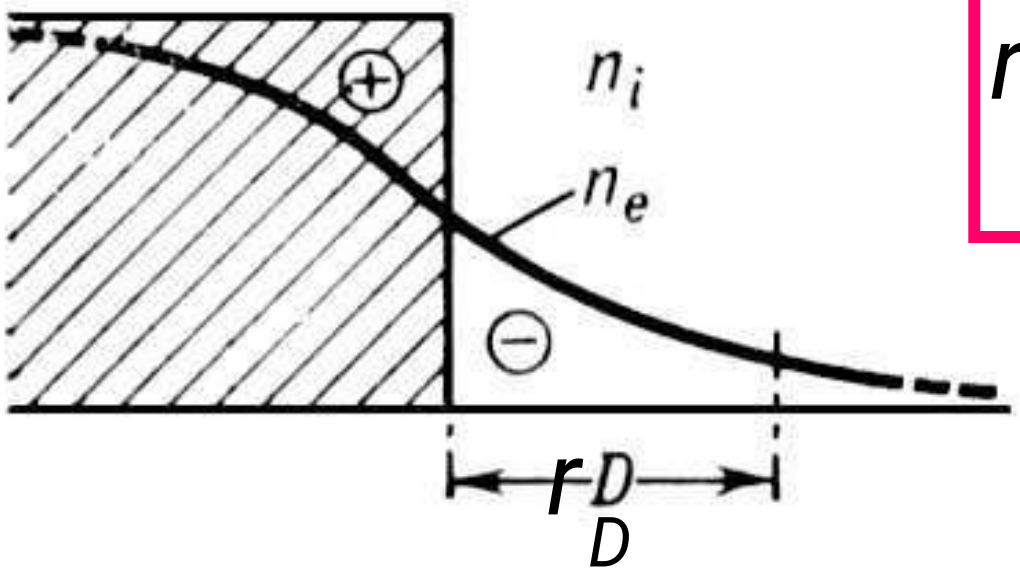
$$\varphi \propto e^{-|x|/r_D}.$$



Электростатическое поле проникает в плазму не глубже r_D

Электрическое поле отдельной частицы в плазме «экранируется» частицами противоположного знака, т. е. практически исчезает, на расстояниях порядка r_D от частицы. Величина r_D определяет и глубину проникновения внешнего электростатического поля в плазму (экранировка этого поля также вызывается появлением в плазме компенсирующих полей пространственных зарядов). Квазинейтральность может нарушаться вблизи поверхности плазмы, где более быстрые электроны вылетают по инерции за счёт теплового движения на длину $\sim r_D$.

Дебаевская экранировка



$$r_D = \sqrt{\frac{T}{4\pi n e^2}}$$

Электроны, вылетая по инерции из плазмы, нарушают квазинейтральность на длине порядка дебаевского радиуса экранирования r_D и повышают потенциал плазмы (n_i, и n_e — соответственно, плотности ионов и электронов).

Дебаевская экранировка

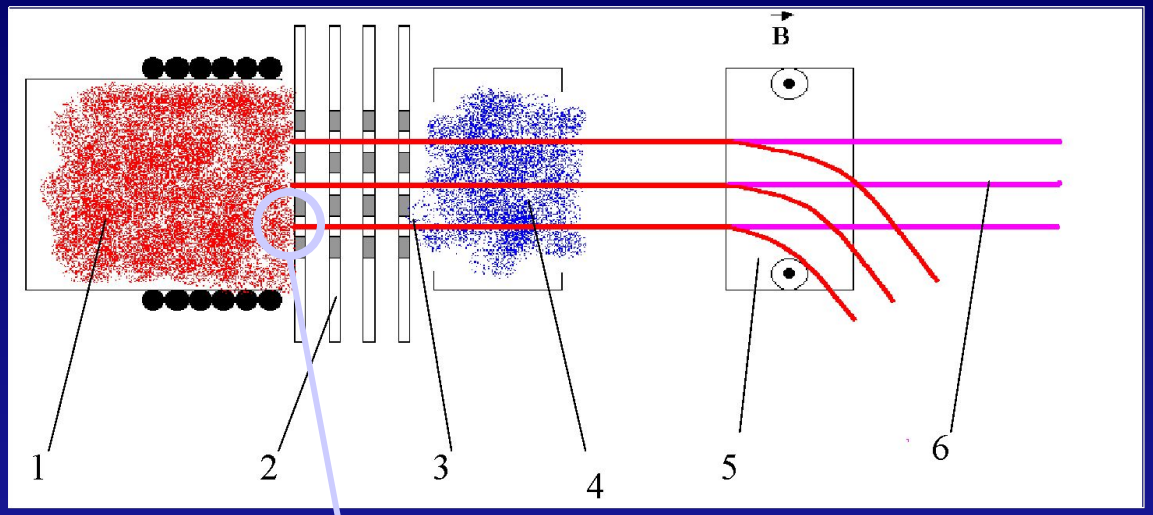
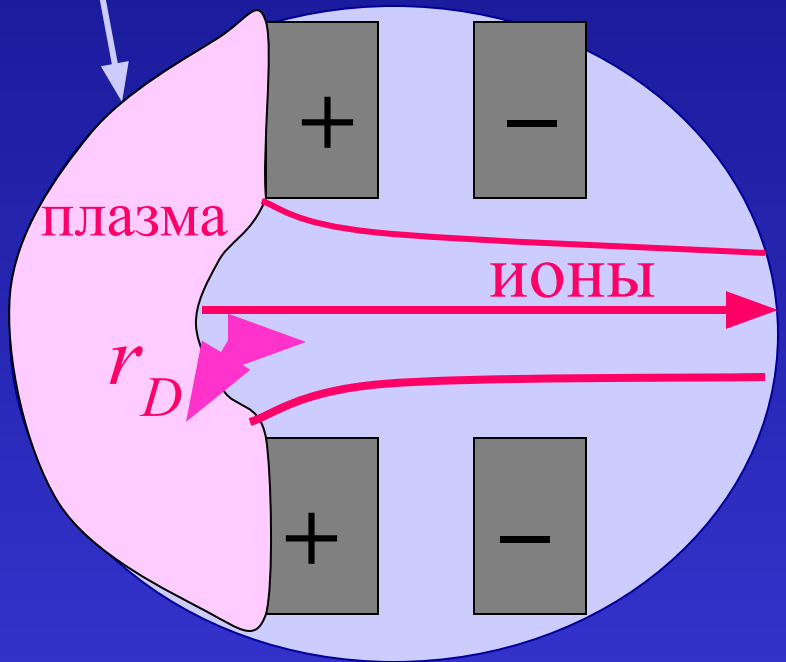


Рис.1. Схема формирования атомарного пучка большой энергии.
1-плазменный эмиттер, 2-ионно-оптическая система, 3-пучок протонов,
4-газовая мишень, 5-магнит сепаратор, 6-атомарный пучок.



Дебаевская экранировка

- Рассмотрим частицу плазмы как внешний заряд ⇒ Плазма проявляет свои коллективные свойства только в больших объемах ($L \gg r_D$).

Число частиц в дебаевской сфере:

$$N \sim N_D \stackrel{\text{def}}{=} \frac{4\pi}{3} n_0 r_D^3 \sim \left(\frac{T}{e^2 n^{1/3}}\right)^{3/2} \gg 1$$

N_D — **число Дебая.**

Для ориентировки в порядке величин оценим N_D для плазмы с параметрами $n = 10^{14}$ см$^{-3}$ и $T = 100$ эВ. Для такой плазмы $r_D = 7{,}4 \cdot 10^{-4}$ см, $N_D = 1{,}7 \cdot 10^5$.

Параметр неидеальности плазмы

Найдем энергию взаимодействия частиц между собой в двухкомпонентной плазме с однозарядными ионами. В среднем, потенциал вокруг каждой частицы равен

$$\frac{q}{r}e^{-r/r_D} = \frac{q}{r} + \text{потенциал экранирующих частиц плазмы.}$$

Потенциал экранирующих частиц

$$\varphi_{pl} = \frac{q}{r}\left(e^{-r/r_D} - 1\right) \xrightarrow[r\to 0]{} -\frac{q}{r_D}.$$

Энергия взаимодействия заряда q с окружающей плазмой

$$= -\frac{q^2}{r_D}.$$

Энергия взаимодействия всех частиц плазмы:

Параметр неидеальности

Энергия взаимодействия всех частиц плазмы:

$$w = -\frac{1}{2}\, 2n_0\, \frac{e^2}{r_D} = -\frac{n_0\, e^2}{r_D}. \qquad (6)$$

↑ каждая частица учитывается дважды (как пробная и как плазменная)

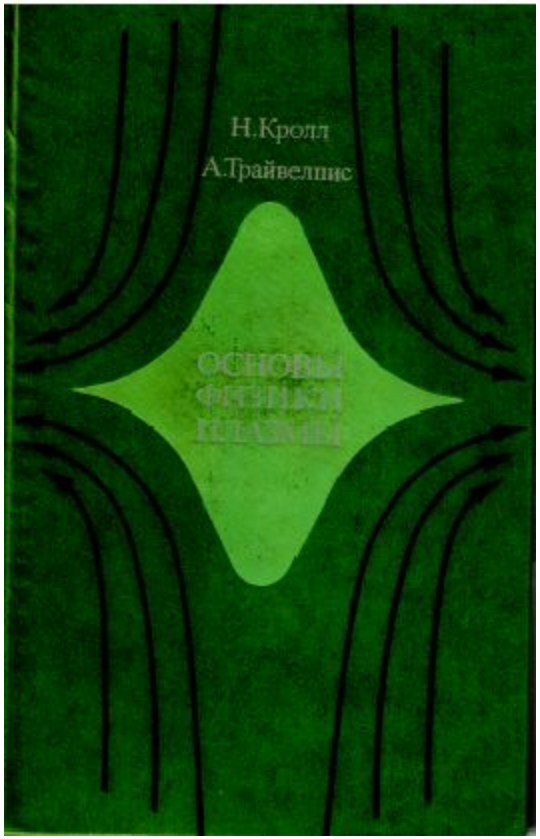
↑ полное число заряженных частиц в единице объема

Энергия на одну частицу ($T_e = T_i = T$):

$$\boxed{W_E = -\frac{e^2}{2r_D} = -\frac{T}{12N_D} \ll T} \qquad (7)$$

$\frac{1}{N_D}$ — **параметр неидеальности плазмы**

(чем он больше, тем плазма неидеальнее).



К.В.Лотов. *Физика плазмы.*
Спецкурс для магистрантов НГУ.

http://www.inp.nsk.su/plasma_chair/index.html.
\\csd\data\user\plasma\physplas*.pdf

И.А.Котельников, Г.В. Ступаков
Лекции по физике плазмы.Новосибирск.1996. *R:\plasma\VFP-book*/pdf*