

● *Плазма*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

(УФН) 1981 г. Апрель Том 133, вып. 4

● ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ГАЗОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

С. Браун

Brown Sanborn C. A Short History of
Gaseous Electronics.

Πλάσμα

Γод	Ποнятие	Αυτοры
1600	Ελεκτρίчество	Γильберт
1742	Искры	Дезагюлье
1808	Диффузия	Дальтон
1808	Дуга (разряд)	Дэви
1817	Подвижность	Фарадей
1821	Дуга (название)	Дэви
1834	Катод и анод	Фарадей
1834	Ионы	Фарадей
1848	Страты	Абриа
1860	Свободный пробег	Максвелл
1876	Катодные лучи	Гольдштейн
1879	Четвертое состояние вещества	Крукс
1880	Кривая Пашена	де ля Рю и Мюллер
1889	Распределение Максвелла — Больцмана	Нернст
1891	Электрон (заряд)	Стори
1895	Х-лучи	Рентген
1897	[Циклотронная] частота	Лодж
1898	Ионизация	Крукс
1899	Уравнения переноса	Таунсенд
1899	Уравнение роста энергии	Лоренц
1901	Коэффициенты Таунсенда	Таунсенд
1905	Диффузия заряженных частиц	Эйнштейн
1906	Электрон (частица)	Лоренц
1906	[Плазменная] частота	Рэлей
1914	Амбиполярная диффузия	Зеелигер
1921	Эффект Рамзауэра	Рамзауэр
1925	Дебаевская длина	Дебай и Хюккель
1928	Плазма	Лэнгмюр
1935	Функция распределения по скоростям	Эллис

Πλάσμα



Рис. 9. В круцовой трубке этого типа демонстрировалось свечение большого числа химических препаратов, минералов и пород, бомбардируемых катодными лучами.

Πλάσμα

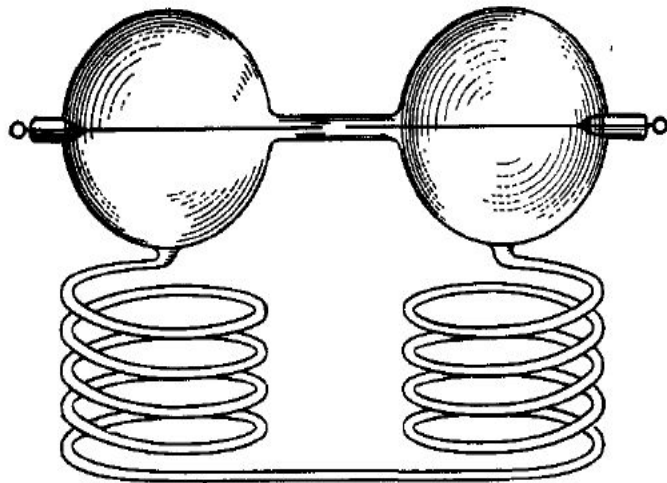


Рис. 2. Демонстрация эффекта Пашена.
Когда понижали давление в колбах, разряд горел
в длинной трубке, а не в маленьком зазоре между
металлическими электродами.

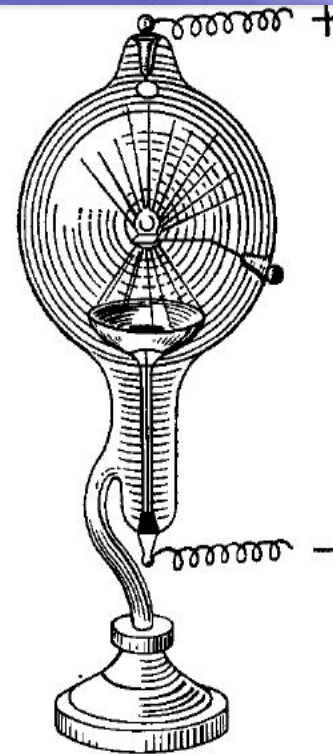


Рис. 3. Эффект нагрева катодными
лучами.

Отрицательный электрод был вогнутым, и
в центр сферы, частью которой был катод,
помещали кусочек платиновой фольги.
Когда катодные лучи фокусировались,
фольга раскалялась добела.

Πλάσμα

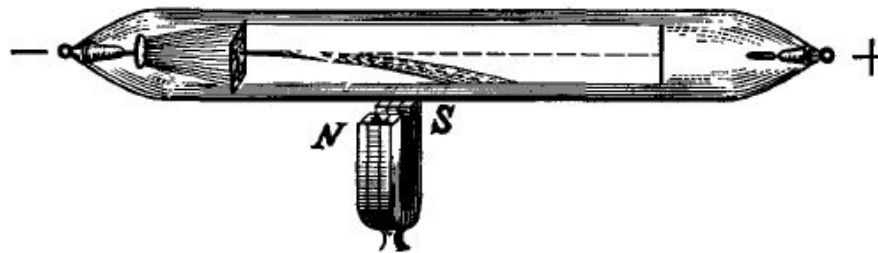


Рис. 4. Отклонение катодных лучей магнитным полем.

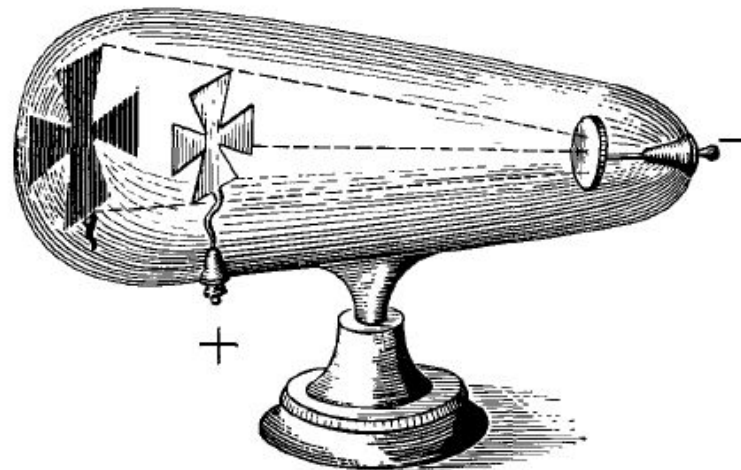


Рис. 5. Катодные лучи распространяются прямолинейно.

Положительным электродом служил крест, вырезанный из алюминиевого листа. На зеленом фоне стекла, возбуждаемого бомбардировкой катодных лучей, появлялась темная тень. Крест помещался на горизонтальном шарнире, так что его можно было убрать с пути лучей, и тень исчезала.

Πλάσμα

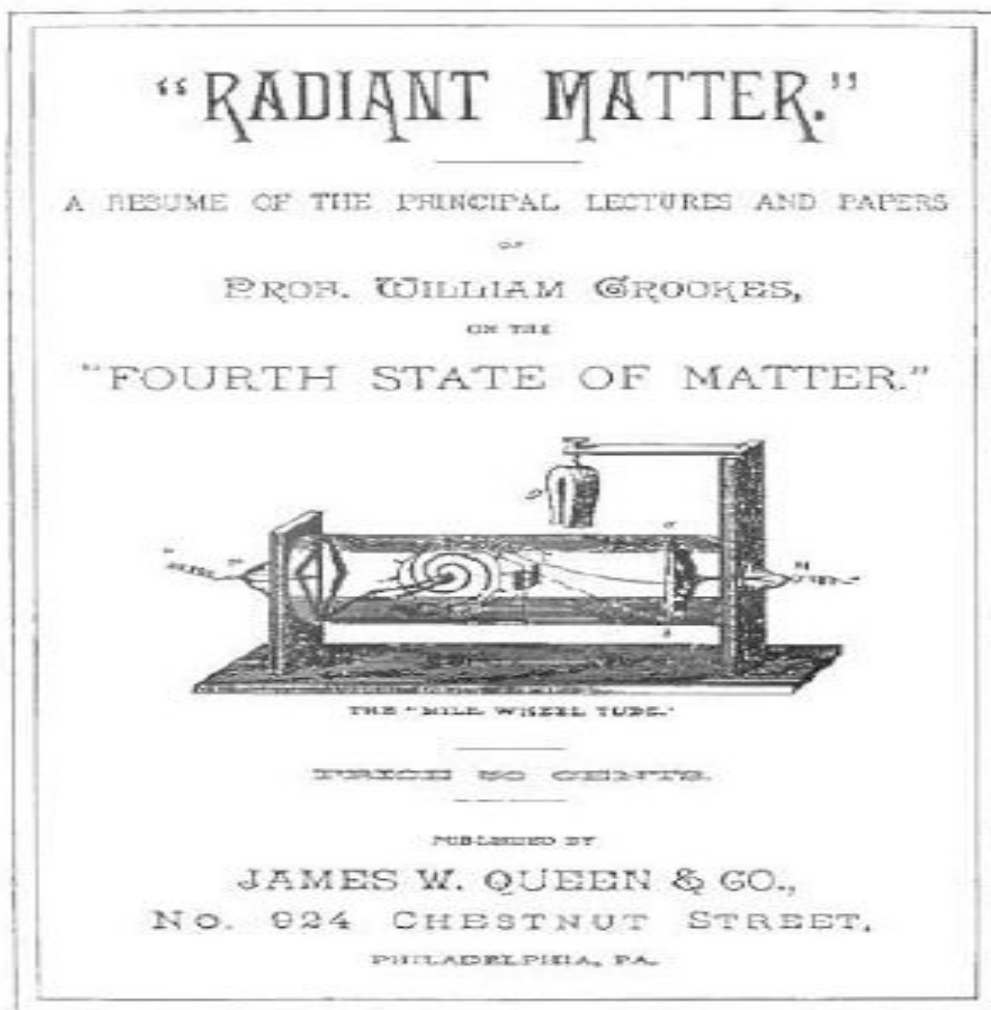


Рис. 3. Обложка книги «Излучающая материя. Четвертое состояние вещества» с лекциями В. Крукса

- плазма

- Четвертое состояние вещества

- «Эти явления настолько непохожи на происходящее в воздухе или газе при обычном давлении, что мы вынуждены предположить, что здесь мы оказались лицом к лицу с веществом в Четвертом Состоянии, в состоянии столь же далеком от газового состояния, как газ от жидкости.
- Изучая это Четвертое Состояние вещества, мы, кажется, наконец, ухватили и подчинили своему контролю маленькие неделимые частички, которые, как можно предположить с большой уверенностью, составляют физическую основу Вселенной ... Мы действительно соприкоснулись с гранью, где Вещество и Сила как бы проникают друг в друга, с призрачным царством между Известным и Неизвестным, к которому меня всегда особенно тянуло. Я осмелюсь думать, что величайшие научные проблемы будущего найдут свое решение в этой Пограничной Стране, и даже за ней; там, кажется мне, лежит Высшая Истина, нежная, глубокая, удивительная»

- (Уильям Крукс, 1879г.)

- плазма

- Четвертое состояние вещества

- Sir William Crookes (1832-1919)

- ^y У физики было не так много пророков, но сэр Уильям Крукс заслуживает того, чтобы считаться одним из них. Всю свою жизнь он проработал с «вакуумными» трубками, фокусируя таинственные лучи на светящиеся под их ударами минералы, раскручивая слюдяные «гребные колесики» этими лучами, пытаясь определить их характеристики задолго до того, как были открыты, в нынешнем смысле слова, электроны или ионы, задолго до того, как стали думать о том, чтобы хотя бы применить к его опытам представления о подвижности, диффузии, прилипанию или рекомбинации.

Πλάσμα

BY IRVING LANGMUIR

RESEARCH LABORATORY, GENERAL ELECTRIC CO., SCHENECTADY, N. Y.

Communicated June 21, 1928

In strongly ionized gases at low pressures, for example in the mercury arc, the free electrons have a Maxwellian velocity distribution corresponding to temperatures that may range from 5000° to $60,000^{\circ}$, although the mean free path of the electrons may be so great that ordinary collisions cannot bring about such a velocity distribution. Electrons accelerated from a hot cathode (primary electrons), which originally form a beam of cathode rays with uniform translational motion, rapidly acquire a random or temperature motion which must result from impulses delivered to the electrons in random directions.

In this laboratory we have been studying these phenomena¹ in detail during the last 4-5 years, but the mechanism underlying the Maxwellian distribution and its extremely short time of relaxation have not been understood. At an early date it occurred to me that electric oscillations of very high frequency and of short wave-length in the space within the tube might produce a scattering of the kind observed, but calculation showed that average field strengths of several hundred volts per centimeter would be necessary and this seemed an unreasonable assumption. Experiments capable of detecting oscillations of the electrodes with amplitudes greater than 0.2 volt failed to show such oscillations.

Ditmer² although unable to detect oscillations, concluded that oscilla-

Πλάσμα

Как важно найти правильное слово!

Дело было в Америке, ее открыл Христофор Колумб (Christóbal Colón), а назвал Америго Веспуччи (Américo Vespucci).

Из воспоминаний доктора Тонкса:

«Однажды Ленгмюр зашел в мою комнату в исследовательской лаборатории “General Electric” и сказал: “Слушайте, Тонкс, я ищу слово. В этих газовых разрядах мы называем область непосредственно вблизи стенки или электрода слоями, и это видимому, подходит; но как назвать основную часть разряда?... Там полная нейтрализация пространственного разряда. Не хочется изобретать слово, но оно должно описывать эту область, как отличающуюся от слоев. Что бы Вы предложили?”

Мой ответ был классическим: “Надо по-думать, д-р Ленгмюр”». На следующий день Ленгмюр влетел и объявил: «я знаю, как это назвать! Мы назовем это – плазма».

Πλάσμα

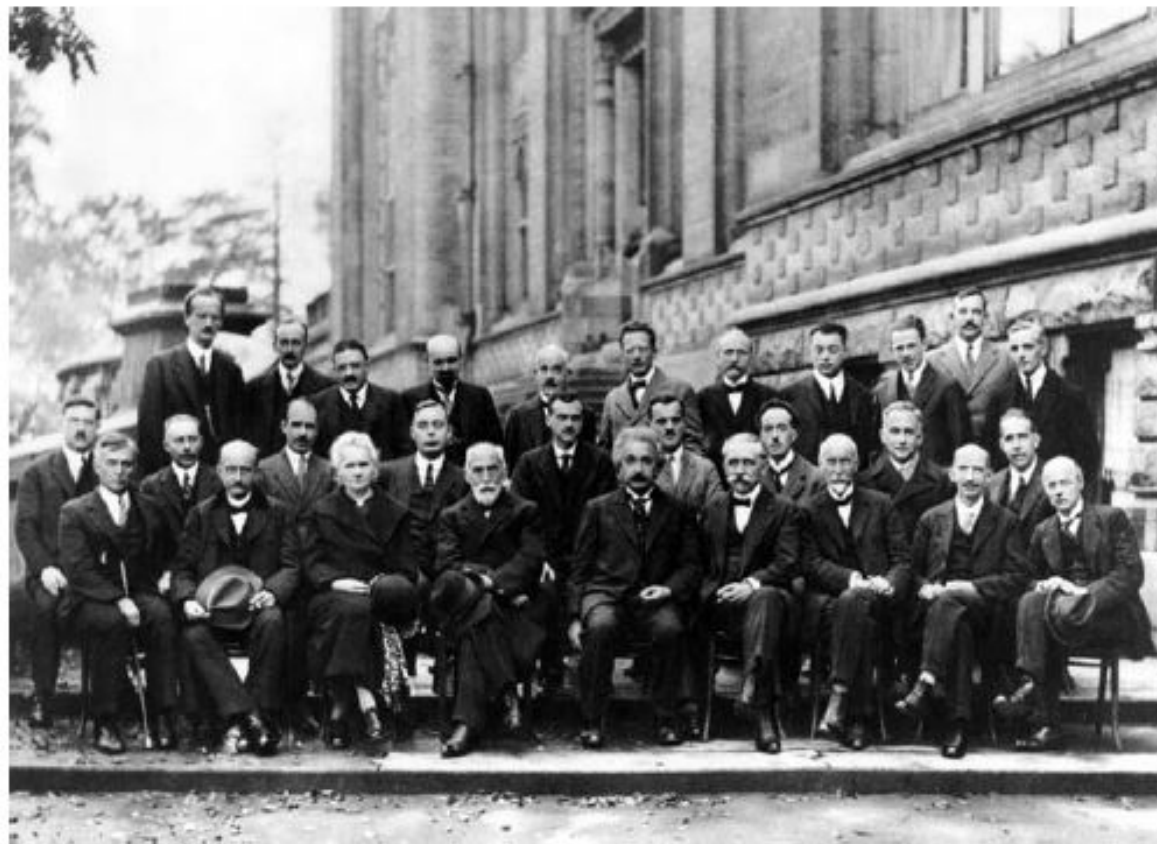
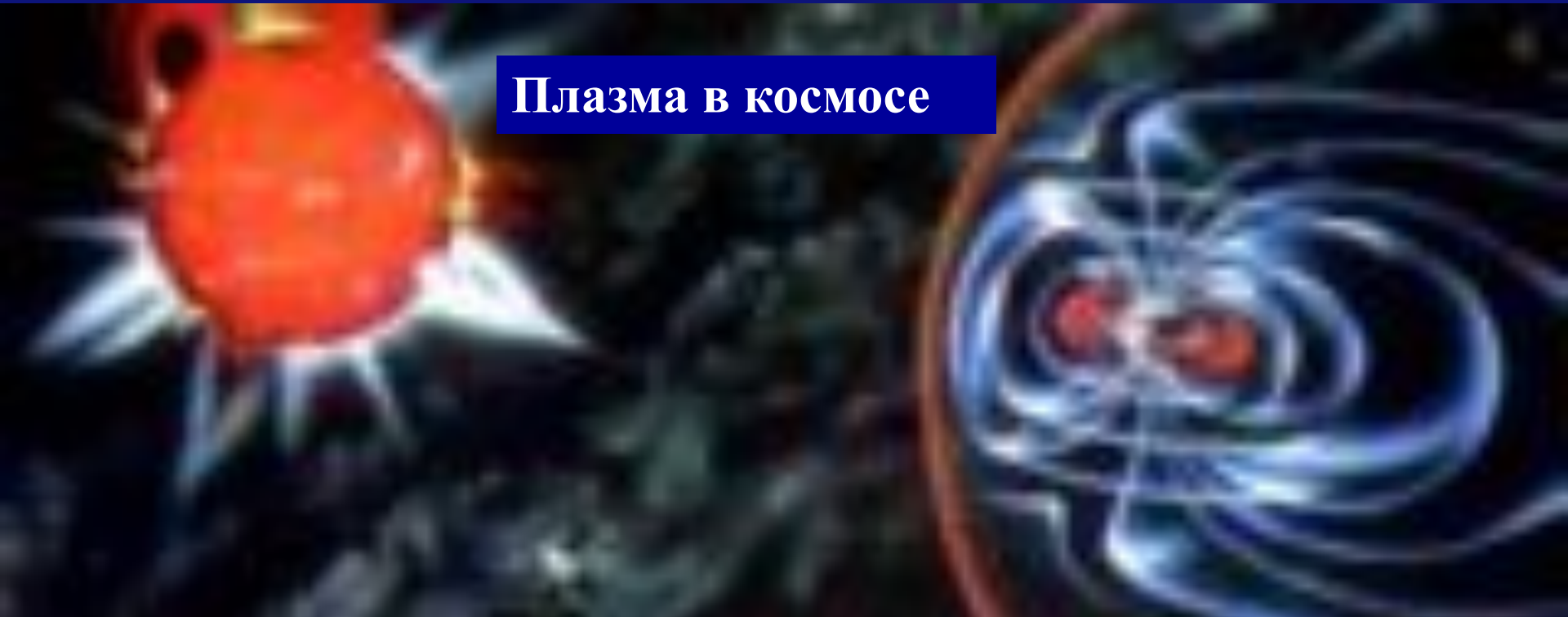


Рис. 2. Октябрь 1927 года, Брюссель. Участники 5-го Сольвеевского конгресса:
Auguste Antoine Piccard, E. Henriot, Paul Ehrenfest, Ed. Herzen, Théophile de Donder, Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, E. Verschaffelt, Wolfgang Ernst Pauli, Werner Karl Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Nicolas Brillouin; Peter Josef William Debye, Martin Hans Christian Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrick Anthony Kramers, Paul Adrien Maurice Dirac, Arthur Holly Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Henrik David Bohr; Irving Langmuir, Max Karl Ernst Ludwig Planck, Marie Curie, Hendrik Antoon Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles Eugene Guye, Charles Thomson Reese Wilson, Owen Williams Richardson

Плазма в космосе



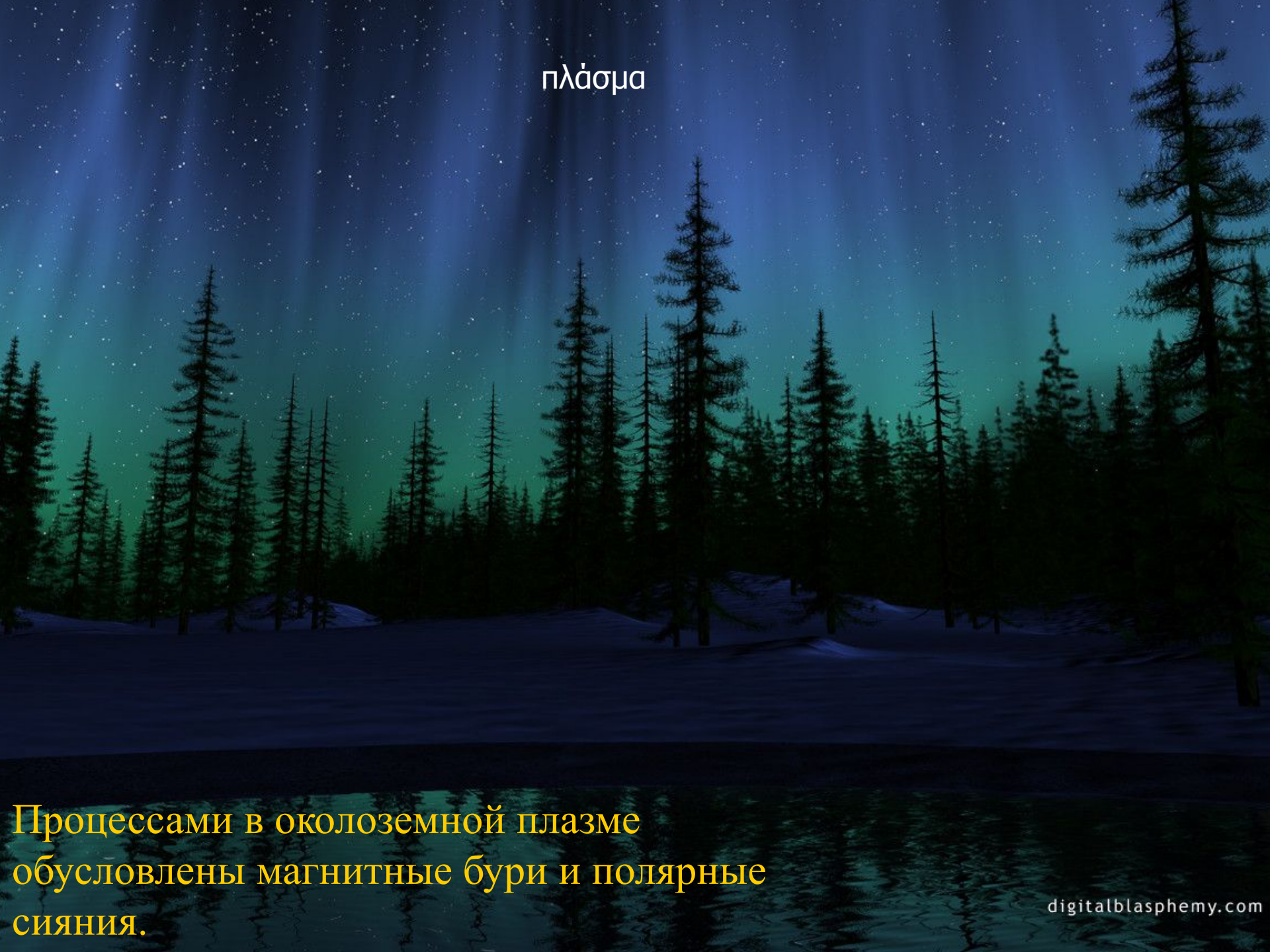
В состоянии плазмы находится подавляющая часть видимого вещества Вселенной — звёзды, звёздные атмосферы, туманности галактические и межзвёздная среда. Около Земли плазма существует в космосе в виде солнечного ветра, заполняет магнитосферу Земли (образуя радиационные пояса Земли) и ионосферу.

πλάσμα



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

Такую плазму называют слабонеидеальной.



πλάσμα

Процессами в околоземной плазме
обусловлены магнитные бури и полярные
сияния.

Плазма в космосе

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

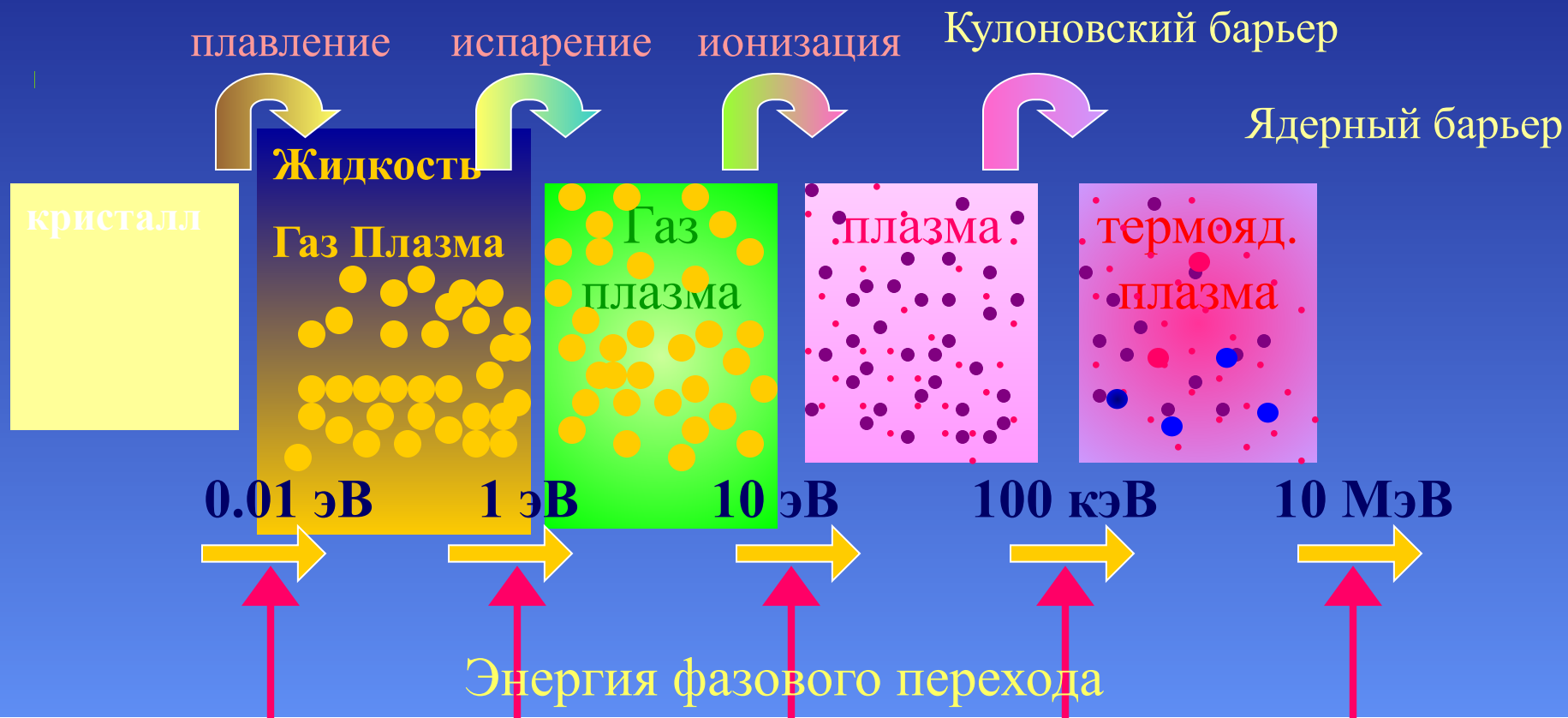
Плазма (от греч. πλάσμα — вылепленное, оформленное), частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

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

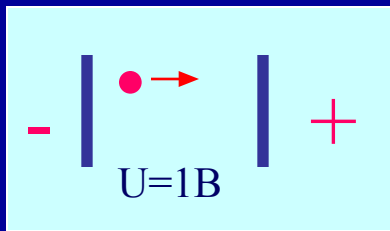
Что такое плазма?

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

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.



Единица 1 эВ



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

$$\begin{aligned} eU[\text{Дж}] &\rightarrow [\text{эВ}] \\ kT[\text{Дж}] &\rightarrow T[\text{эВ}] \end{aligned}$$

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1\text{эВ} \sim 10604,5 \text{ }^\circ\text{К}$$

$$1\text{эВ} = 8065,48 \text{ см}^{-1}$$

Плазма=квазинейтральный газ заряженных частиц

*кулоновское взаимодействие

*тепловое движение

*коллективные эффекты (согласованное движение частиц под действием различных полей и сил)

$$0 < \alpha = \frac{n_i}{n_0} = \frac{n_i}{n_a + n_i} \leq 1$$

$$n_e = \sum_m n_i^m$$

$$L_p > l_{\delta q} = r_d$$

:

Классическая и вырожденная плазма

Плотность:

n — число электронов в единице объема

Температура:

T — температура плазмы
в энергетических единицах

Классическая и вырожденная плазма.

m — масса электрона p — импульс электронов

$\hbar$ — постоянная Планка

«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 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:

$$W_E \ll W_k.$$

↑

↑

энергия кулоновского
взаимодействия частицкинетическая энергия
частиц

Идеальная

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

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

неидеальная плазма.

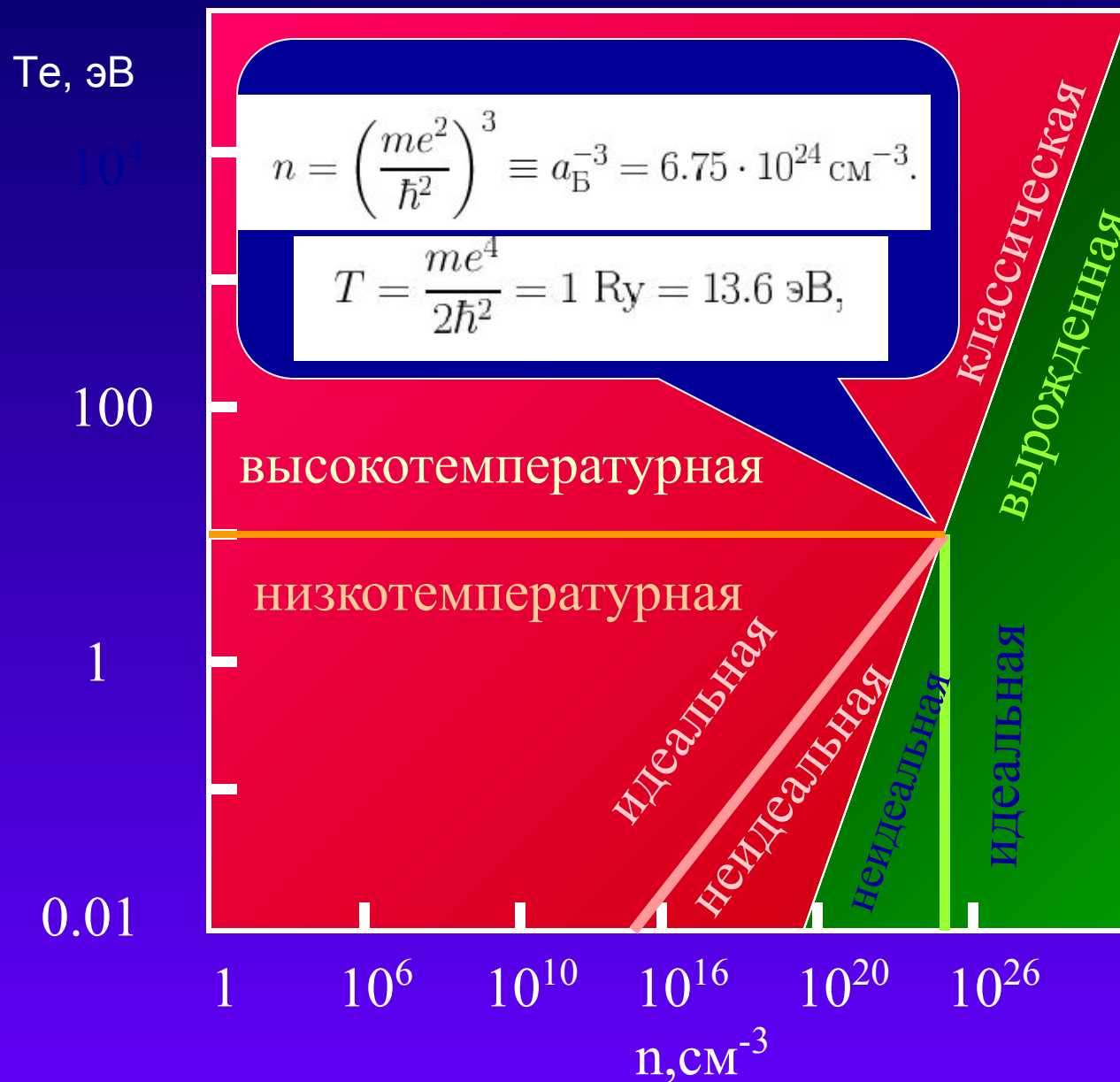
Плазменные электроны
- например Ферми-газ

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

 W_F — энергия Ферми

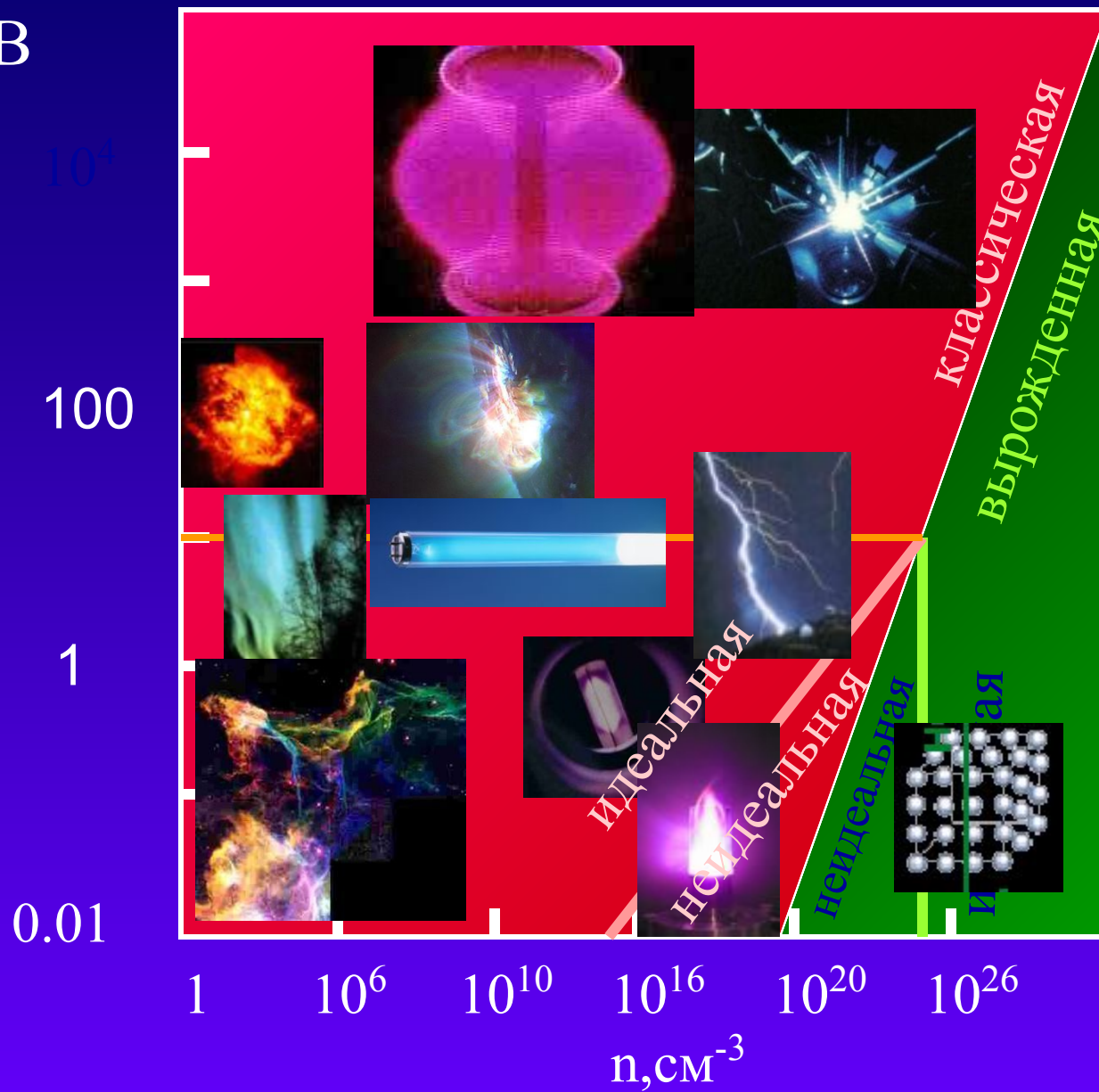
$$n \gg \left(\frac{me^2}{\hbar^2} \right)^3$$

Т-п диаграмма



Т – n диаграмма

$T_e, \text{эВ}$



T, n параметры различных плазм

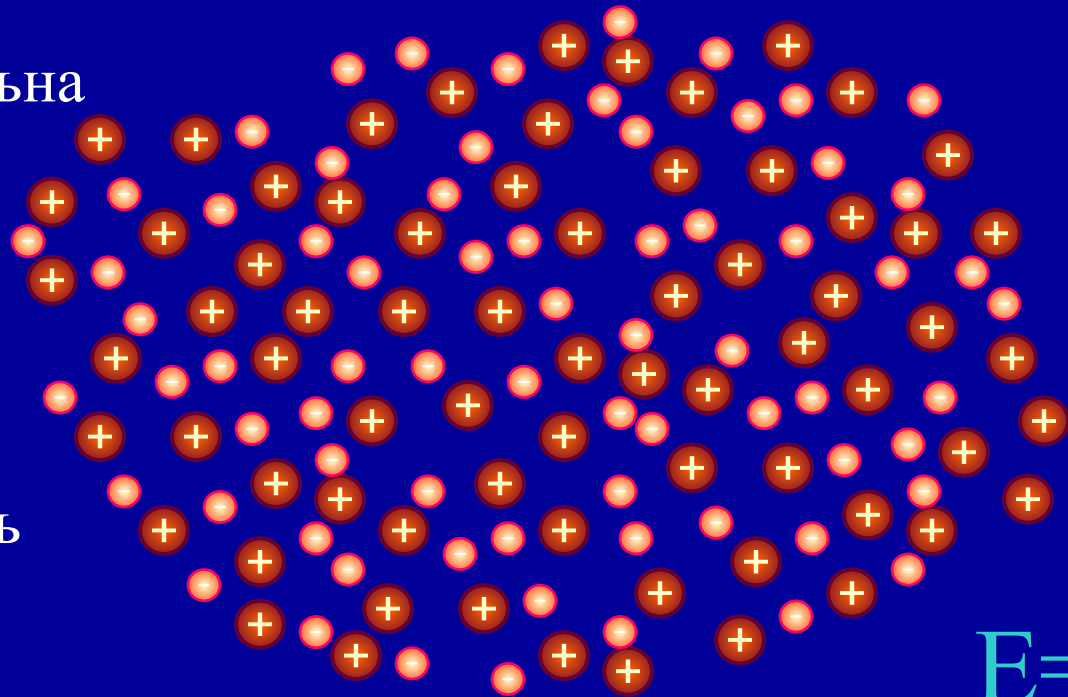
плазма	$n, \text{см}^{-3}$	$T, \text{эВ}$
Эксперименты по магнитному удержанию плазмы для УТС	$10^{12} \div 10^{15}$	$10^3 \div 10^4$
Эксперименты по инерциальному УТС	$10^{20} \div 10^{24}$	$10^2 \div 10^3$
Газовый разряд	$10^6 \div 10^{12}$	~ 1
Солнечный ветер	5	$10 \div 50$
Солнечная корона	10^6	200
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	$0.01 \div 1$

Критерии плазменного состояния:

1. Наличие свободных заряженных частиц. $\alpha = n_e/n_o > 0$
2. Квазинейтральность. $n_e \approx n_i$
3. Характерный размер плазменного объема больше характерного размера на котором возможно разделение зарядов. $L_{pl} > l_{dq}$

Плазма-квазинейтральна

На каком масштабе
сохраняется
квазинейтральность
плазмы?



$E=0$

На каком масштабе сохраняется квазинейтральность плазмы?

$$\boxed{\operatorname{div} E = 4\pi\rho} \rightarrow \frac{\delta E}{l} \approx 4\pi e\delta n \approx \frac{\delta\varphi}{l^2} \quad e\delta\varphi \approx Tn$$

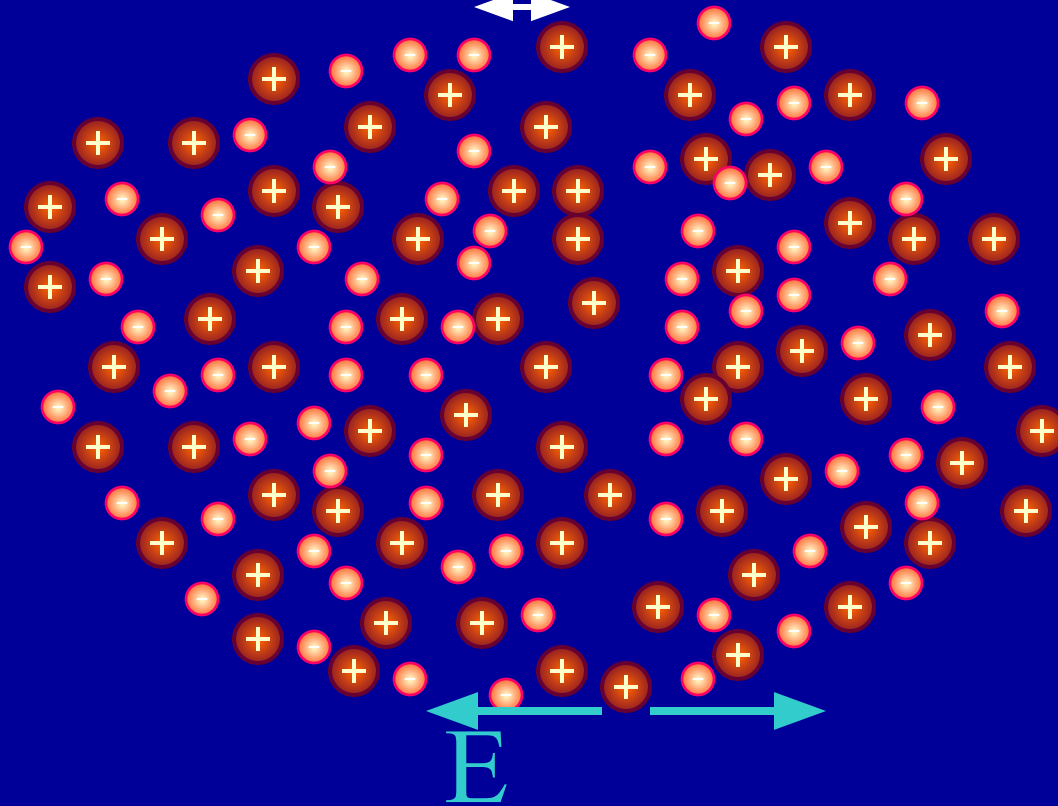
$$4\pi e^2\delta n \approx \frac{e\delta\varphi}{l^2} \approx \frac{T}{l^2}$$

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

Дебаевский
радиус

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

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

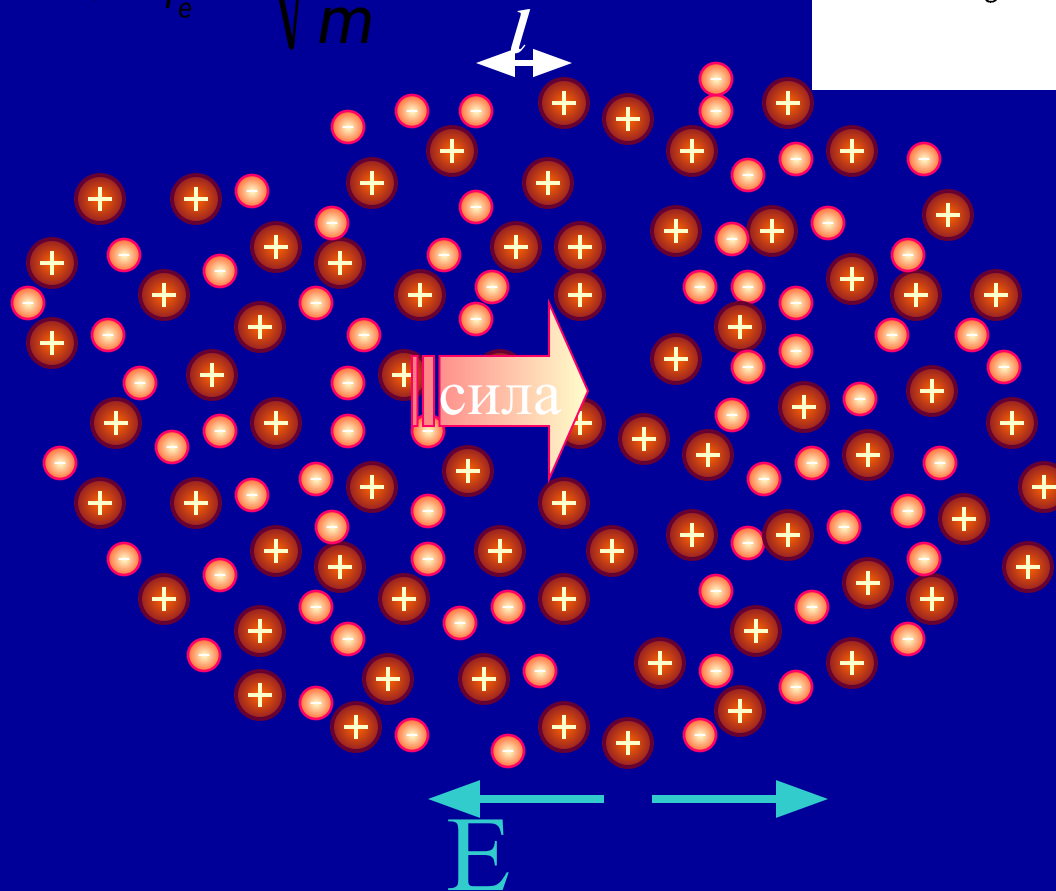


Дебаевский радиус есть **пространственный масштаб**,
на котором возможно спонтанное разделение зарядов

Временной масштаб:

$$e\delta\phi \approx T, V_{Te} = \sqrt{\frac{T}{m}}$$

$$t \approx \frac{r_D}{V_{Te}} = \frac{\sqrt{\frac{T}{4\pi ne^2}}}{\sqrt{\frac{T}{m}}} = \sqrt{\frac{m}{4\pi ne^2}}$$



За это время прилетят электроны и сравняют флуктуацию плотности зарядов

Макроскопическое отклонение от квазинейтральности ведет к появлению электрического поля.

Для плоского слоя плазмы: δx - смещение электронов

$$\frac{\delta E}{l} \approx 4\pi e \delta n$$

$$m \ddot{\delta x} = -e E_x = -4\pi n e^2 \delta x$$

Ленгмюровские колебания

Плазменная частота

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}$$

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

Дебаевская экранировка

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

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

Уравнение
Пуассона

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

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

В равновесии

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

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

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

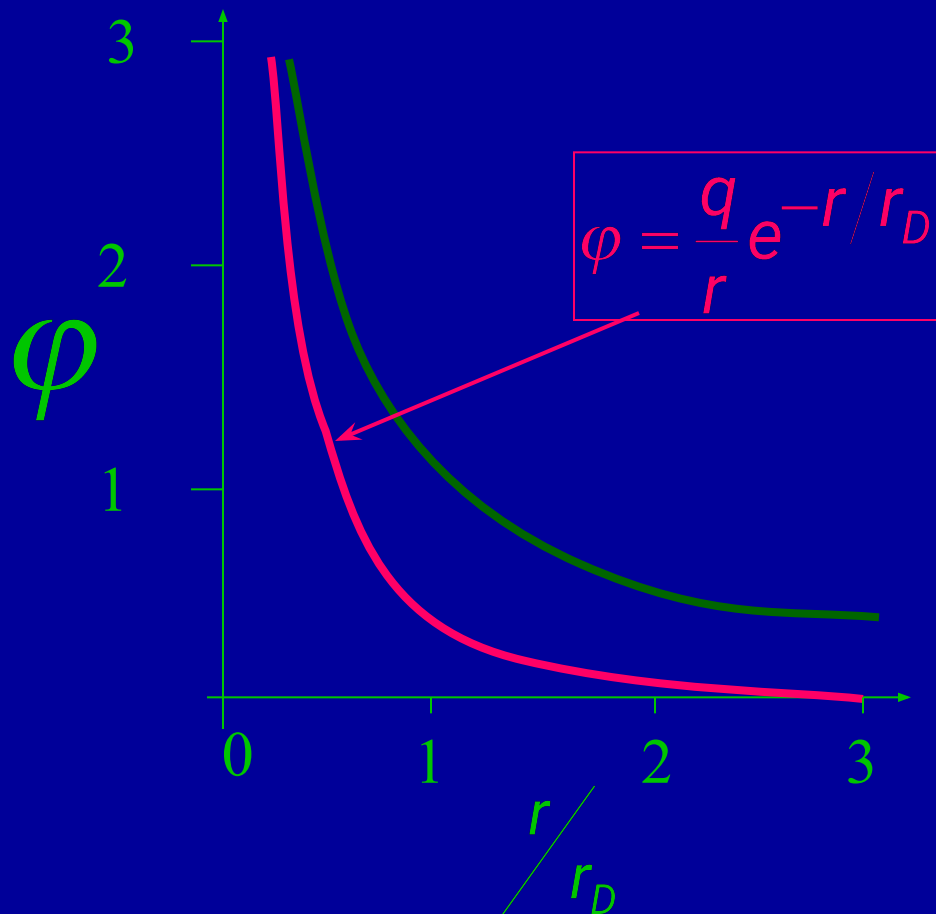
$$\varphi \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0, \quad \varphi \xrightarrow{r \rightarrow 0} \frac{q}{r} \quad \left(\text{через } \varphi = \frac{f(r)}{r}\right):$$

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

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

r_D — радиус Дебая.

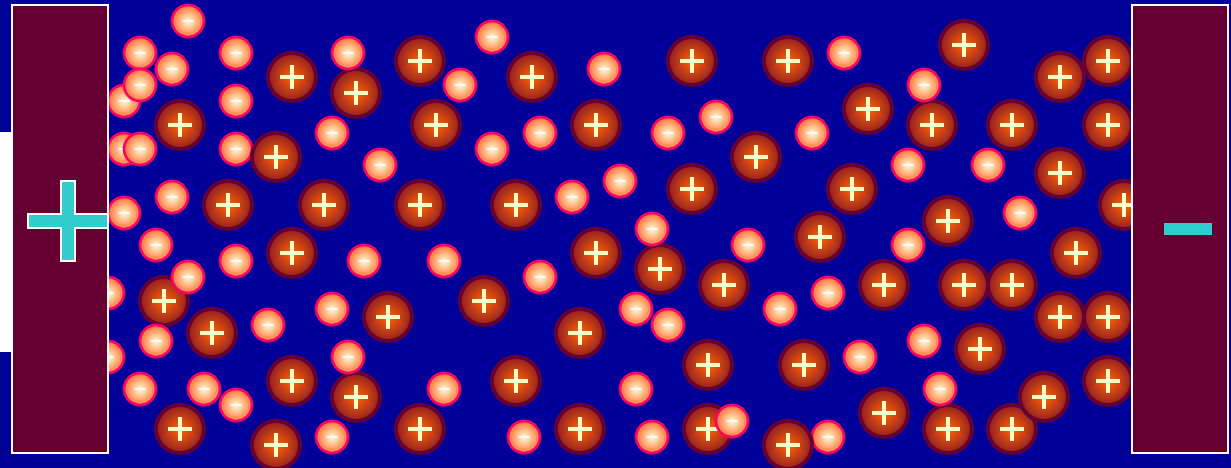
Дебаевский (красная линия) и кулоновский (зеленая линия) потенциал.



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

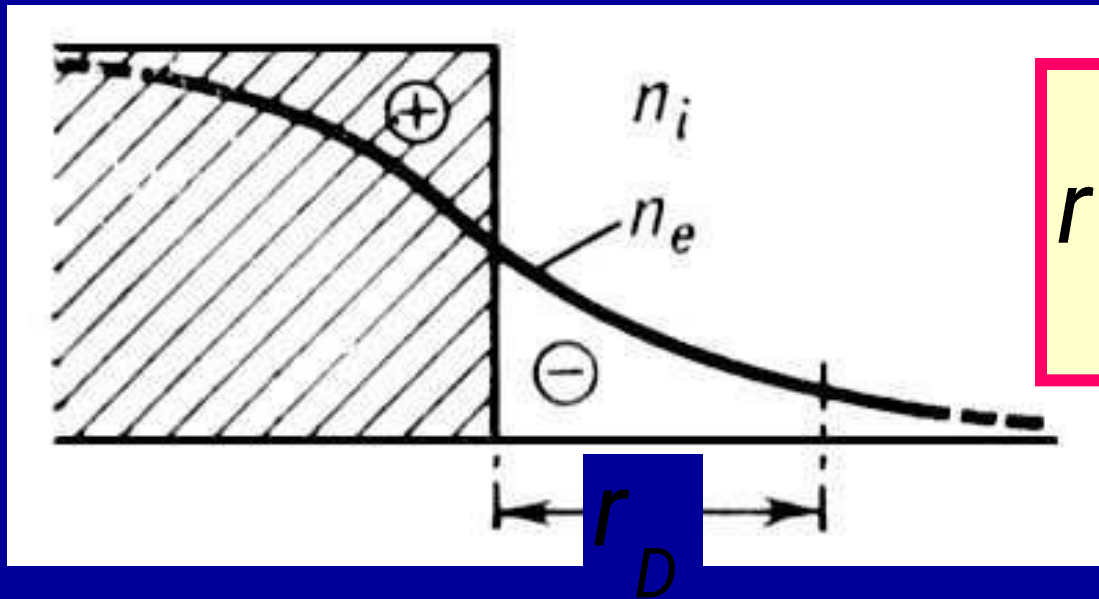
r_D — радиус Дебая.

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



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 $\sim r_D$.



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

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).

- Рассмотрим частицу плазмы как внешний заряд $\Rightarrow$ 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 $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $T = 100 \text{ эВ}$. Для такой плазмы $r_D = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$, $N_D = 1,7 \cdot 10^5$.

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

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

Энергия взаимодействия заряда q с окружающей плазмой

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

Энергия взаимодействия всех частиц плазмы:

$$w = -\frac{1}{2} \underset{\uparrow}{n_0} \frac{e^2}{r_D} = -\frac{n_0 e^2}{r_D}.$$

каждая частица учитывается дважды (как пробная и как плазменная) *полное число заряженных частиц в единице объема*

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

$$W_E = -\frac{e^2}{2r_D} = -\frac{T}{12N_D} \ll T$$

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

(чем он больше, тем плазма неидеальнее).

Не только интернет- библиотека !

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы
М. Атомиздат. 1964 г.
2. Смирнов Б.М. Введение в физику плазмы
М. Наука, 1975 г.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда
Издательский дом "Интеллект", 2009.
4. Мак А.А, Соловьев Н.А. Введение в физику
высокотемпературной плазмы.
Ленинград. 1991 г.
5. Лохте-Хальгренвен. Методы исследования плазмы.
Мир. 1971 г.
6. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. Госатомиздат
1961 г.
7. Радциг А.А., смирнов Б.М Справочник по атоиной и молекулярной физике.
Атомиздат. 1978 г.