

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ АТОМОВ В  
ДОЛГОЖИВУЩИХ (МЕТАСТАБИЛЬНЫХ И РЕЗОНАНСНЫХ)  
СОСТОЯНИЯХ НА ПРИМЕРЕ *He – Ne*.**

Бадр Абдул Хади

Магистрант кафедры оптики, Санкт-Петербургский государственный  
университет, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:**

Рассмотрены переходы между возбуждёнными состояниями (метастабильными и резонансными) в инертных газах. Основное внимание уделено таким переходам, которые либо возможны в рамках эксперимента, либо запрещены правилами отбора. Рассмотрен процесс изменения населенностей этих состояний различными причинами.

**Ключевые слова:** переходы, возбуждённые состояния (метастабильные и резонансные), населенность, плазма смесей инертных газов.

**INVESTIGATION OF THE KINETICS OF ATOM POPULATIONS IN  
LONG-LIVING (METASTABLE AND RESONANT) STATES ON THE  
EXAMPLE OF *He-Ne*.**

Badr Abdul Hadi

Master student, Department of Optics, St. Petersburg State University, St.  
Petersburg, Russia

**Annotation:**

Transitions between excited states (metastable and resonance) in inert gases are considered. The main attention is paid to such transitions that are either possible within the framework of the experiment or prohibited by the selection rules. The process of changing the populations of these states by various reasons is considered.

**Keywords:** transitions, excited states (metastable and resonant), population, plasma of mixtures of inert gases.

Нижние возбужденные состояния атомов можно разделить на две группы: метастабильные и резонансно-возбужденные. Из резонансно-возбужденных состояний атомов возможен излучательный переход в основное состояние с

испусканием дипольного фотона, т.е. излучательное время жизни резонансно-возбужденных атомов невелико. Для метастабильных состояний атомов излучательный переход в нижние состояния запрещен, т.е. они обладают большим временем жизни по отношению к излучению. [1]

Метастабильные атомы играют исключительную роль в формировании свойств плазмы. В этих состояниях накапливается значительная доля энергии, вводимой в плазму, основной механизм ионизации – электронным ударом – обусловлен их присутствием в плазме, они являются непосредственным источником появления заряженных частиц вследствие парных столкновений, наконец, источником заселения возбужденных состояний атомов –партнеров по столкновениям вследствие передачи возбуждения.

Мне хотелось бы познакомить вас с экспериментом в *Ne*, чтобы продемонстрировать, с одной стороны, сложность решения задачи, и с другой – возможность ее решения при правильном подходе. Заметим, что тяжелые инертные газы имеют отличное от *He* строение возбужденных уровней, поскольку внешняя оболочка содержит *p* - электроны. Поэтому при устранении одного *p* - электрона из замкнутой оболочки  $2p^6$  возможно образование двух ионных состояний:  $2P_{1/2}$  и  $2P_{3/2}$ , причем последний лежит заметно глубже. (В частности, это говорит о том, что у атомов инертных газов существуют автоионизационные возбужденные состояния). Прибавляя к этим ионным состояниям один электрон, можем получить набор термов, стремящихся к двум пределам  $2P_{1/2}$  и  $2P_{3/2}$ .

(**Рис.1**, на котором представлено изменение разницы энергий (расстояний между термами  $P^5ns2P_{3/2}$  и  $P^5ns2P_{1/2}$ ). То, термы  $1P_1$  и  $3P_0$  относятся к иону  $2P_{1/2}$ , а  $3P_2$  и  $3P_1$  – к иону  $2P_{3/2}$ . Упоминание об этом вот зачем. При теоретическом анализе вероятностей электронно-стимулированных переходов между возбужденными уровнями получен следующий результат: *переходы между уровнями, относящимися к различным ионным состояниям*, или, как говорят, с изменением полного момента атомного остова, *значительно менее вероятны*.

Этот вывод требует экспериментального подтверждения, которое может быть получено, в частности, при анализе процессов в неоновой плазме.

Схема уровней первой возбужденной конфигурации  $2P^53s$  (Рис.2) такова, что, в силу близости уровней имеет место их эффективное «перемешивание» при взаимодействии с электронами, которое в значительной степени определяет скорость разрушения обоих метастабильных  $3P_0$  и  $3P_2$  состояний за счет переходов в резонансные состояния  $1P_1$  и  $3P_1$  соответственно. По этой же причине в кинетике населенностей этой группы уровней не разобраться, если не анализировать их совместно в одном эксперименте Мы изучаем смесь  $He - Ne$ . Смысл добавления гелия в том, что He обладает меньшей массой и большим сечением упругого рассеяния электрона, так что релаксация температуры электронов при изменении напряженности «подогревающего» электрического поля происходит намного быстрее, чем в  $Ne$ , что позволяет осуществить такой режим измерений, когда время установления значительно меньше характерных времен изменения плотностей электронов и метастабильных атомов в распадающейся плазме.[3]

Поэтому **первая задача** – измерение  $n_e(t)$  в распадающейся плазме.

Условия эксперимента (давления компонентов смеси  $He - Ne$ , плотность электронов  $n_e$ ) таковы, что есть основания полагать, что в стадии распада плазмы реализуется механизм диссоциативной рекомбинации:  $Ne_2^+ + e \rightarrow Ne^* + Ne$  причем плотность молекулярных ионов равна плотности электронов  $[Ne_2^+] = n_e$ . Но тогда распад плазмы описывается простым уравнением:[2]

$$\frac{dn_e}{dt} = -\alpha n_e^2 \Rightarrow n_e(t) = \frac{n_e(t=0)}{1 + \alpha n_e(t=0) \cdot t}$$

Где  $t = 0$  – время начала стадии распада плазмы,  $\alpha$  – коэффициент ДР.

**вторая задача** – изучение распада уровней  $3P_0$ ,  $3P_1$ , и  $3P_2$ .

Распад уровней  $3P_0$ ,  $3P_1$  и  $3P_2$  происходит по следующим причинам (рис.3)[3]:

Для уровня  $3P_0$ :

1) электронные столкновения:

$Ne(3P_0) + e \rightarrow Ne(3P_1) + e$  теоретически невозможен но требует

проверки в эксперименте

$Ne(3P_0) + e \rightarrow Ne(3P_2) + e$  теоретически невозможен но требует

проверки в эксперименте

$Ne(3P_0) + e \rightarrow Ne(1P_1) + e$  теоретически *возможен!*

2) трехчастичная реакция конверсия:

$Ne(3P_0) + Ne + Ne \rightarrow Ne_2^* + Ne$

$Ne(3P_0) + Ne + He \rightarrow Ne_2^* + He$

3) атомные столкновения:

$Ne(3P_0) + Ne \rightarrow Ne(3P_2) + Ne$  теоретически *возможен!*

$Ne(3P_0) + He \rightarrow Ne(3P_2) + He$  теоретически *возможен!*

$Ne(3P_0) + Ne \rightarrow Ne(3P_1) + Ne$  теоретически *возможен!*

$Ne(3P_0) + He \rightarrow Ne(3P_1) + He$  теоретически *возможен!*

4) пеннинговская ионизация:

$Ne(3P_0) + Ne(3P_2) + \rightarrow + Ne^+ + e$  ,  $Ne_2^+ + e$

$Ne(3P_0) + Ne(3P_1) + \rightarrow Ne^+ + Ne + e$  ,  $Ne_2^+ + e$

$Ne(3P_0) + Ne(3P_0) + \rightarrow Ne^+ + Ne + e$  ,  $Ne_2^+ + e$

5) обратные процессы электронных ударов:

$Ne(3P_1) + e \rightarrow Ne(3P_0) + e$

$Ne(3P_2) + e \rightarrow Ne(3P_0) + e$  теоретически невозможен, но требует

проверки в эксперименте

$Ne(1P_1) + e \rightarrow Ne(3P_0) + e$  Возможен или невозможен – эти термины

принципиального характера, следующие из теории. Тот факт, что мы этот

процесс не учитываем есть следствие малости населенности  $Ne(1P_1)$ .

б) диссоциативная рекомбинация:

$Ne_2^+ + e \rightarrow Ne^* + Ne$  ( $Ne^* = Ne(3P_0)$ ). Считаем, что на  $3P_0$  идет  $1/4$  всего потока рекомбинации, т.е. поток делится поровну на все уровни  $2P^53s$ .

7) резонансный переход в основное состояние: невозможен

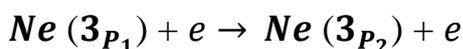
8) диффузия атомов на стенке .

тогда распад уровня  $3P_0$  описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{d[3P_0]}{dt} = & -n_e(k_{01} + k_{02} + k'_{01})[3P_0] - [3P_0]([Ne]^2\beta_1 + [Ne][He]\beta_2) \\ & - [3P_0](k_{02}^{Ne}[Ne] + k_{02}^{He}[He]) - [3P_0](k_{01}^{Ne}[Ne] + k_{01}^{He}[He]) \\ & - [3P_0][3P_2]k_i - [3P_0][3P_1]k_{i1} - [3P_0][3P_0]k_{i2} \\ & + n_e(k_{10}[3P_1] + k_{20}[3P_2]) + \alpha_{3P_0} \cdot n_e^2 - \frac{[3P_0]}{\tau_{Diff}} \end{aligned}$$

Для уровня  $3P_1$ :

1)электронные столкновения:



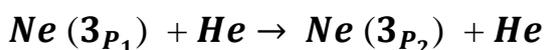
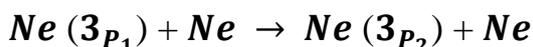
$Ne(3P_1) + e \rightarrow Ne(3P_0) + e$  теоретически невозможен, но требует проверки в эксперименте

$Ne(3P_1) + e \rightarrow Ne(1P_1) + e$  теоретически невозможен, но требует проверки в эксперименте

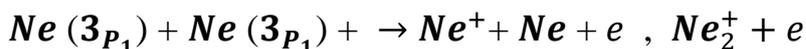
2)трехчастичная реакция конверсия:

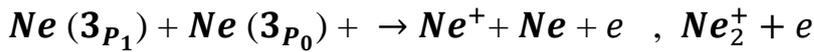
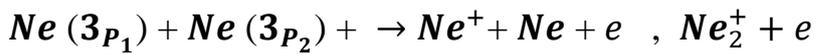


3)атомные столкновения:

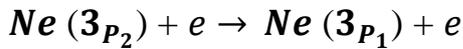


4)пенинговская ионизация:





5) обратные процессы электронных ударов:



проверки в эксперименте

$Ne(1P_1) + e \rightarrow Ne(3P_1) + e$  теоретически невозможен, В обработке эксперимента не учитывается, т.к. населенность  $Ne(1P_1)$  много меньше населенности остальных трех уровней  $2P^53s$ , на что указывают экспериментальные данные измерений поглощения на линии  $5852 \text{ \AA}$ .

6) диссоциативная рекомбинация:

$Ne_2^+ + e \rightarrow Ne^* + Ne$  ( $Ne^* = Ne(3P_1)$ ) Считаем, что на  $3P_0$  идет  $1/4$  всего потока рекомбинации, т.е. поток делится поровну на все уровни  $2P^53s$ .

7) резонансный переход в основное состояние:



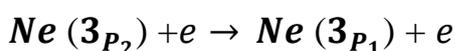
8) диффузия атомов на стенке .

тогда распад уровня  $3P_1$  описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{d[3P_1]}{dt} = & -n_e(k_{10} + k_{12} + k_{11})[3P_1] - [3P_1]([Ne]^2\beta_1 + [Ne][He]\beta_2) \\ & - [3P_1](k_{12}^{Ne}[Ne] + k_{12}^{He}[He]) - [3P_1][3P_2]k_i - [3P_1][3P_1]k_{i1} \\ & - [3P_1][3P_0]k_{i2} + n_e(k_{21}[3P_2] + k_{01}[3P_0]) + \alpha_{3P_1} \cdot n_e^2 - \frac{[3P_1]}{\tau_{res}} \\ & - \frac{[3P_1]}{\tau_{Diff}} \end{aligned}$$

Для уровня  $3P_2$ :

1) электронные столкновения:



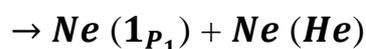
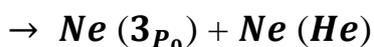
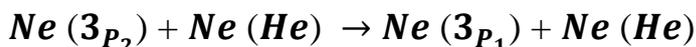
$Ne(3P_2) + e \rightarrow Ne(3P_0) + e$  теоретически невозможен, но требует проверки в эксперименте

$Ne(3P_2) + e \rightarrow Ne(1P_1) + e$  теоретически невозможен но требует проверки в эксперименте

2)трехчастичная реакция конверсия:

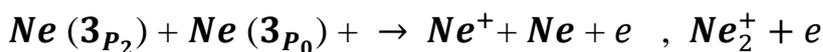
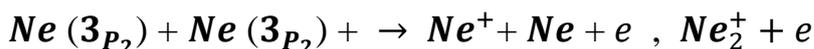
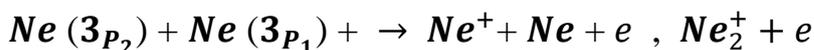


3)атомные столкновения:

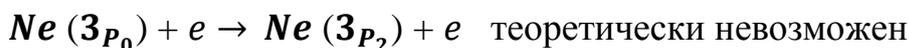
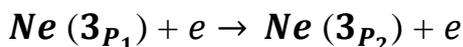


Возможны все эти процессы, просто скорости процессов, требующих большой (по сравнению с кинетической энергией атомов), например,  $Ne(3P_2) + Ne(He) \rightarrow Ne(3P_1) + Ne(He)$  много меньше скоростей обратных процессов (например,  $Ne(3P_1) + Ne(He) \rightarrow Ne(3P_2) + Ne(He)$ )

4)пенинговская ионизация:



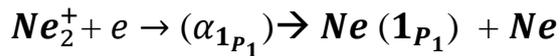
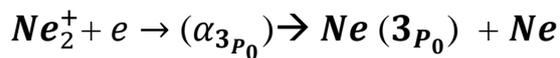
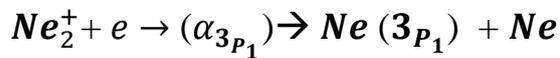
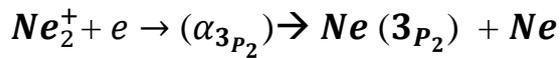
5)обратные процессы электронных ударов:



требует проверки в эксперименте. В обработке эксперимента не учитывается, т.к. населенность  $Ne(1P_1)$  много меньше населенности остальных трех уровней  $2P^53s$ , на что указывают экспериментальные данные измерений поглощения на линии  $5852 \text{ \AA}$ .

б)диссоциативная рекомбинация:

$Ne_2^+ + e \rightarrow Ne^* + Ne$  ( $Ne^* = Ne(3P_2)$ ) - не только  $3P_2$ , но и остальные уровни  $2P^53s$ . Считаем, что на  $3P_2$  идет  $1/4$  всего потока рекомбинации, т.е. поток делится поровну на все уровни  $2P^53s$ .



и мы предполагаем, что эти процессы идут с одинаковой скоростью, то есть константы скоростей  $\alpha_{3P_2} = \alpha_{3P_1} = \alpha_{3P_0} = \alpha_{3P_1} = \alpha_{DR}/4$ , где  $\alpha_{DR}$  - константа скорости диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов  $Ne_2^+$  с электронами в плазме. Полный *поток рекомбинации* равен  $\alpha_{DR} [Ne_2^+] n_e$  (в квадратных скобках – плотность ионов) – в уравнении для  $3P_2$  мы пишем  $\alpha_{3P_2} \cdot n_e^2$ , так как в наших условиях все ионы молекулярные, так что  $[Ne_2^+] = n_e$

7) резонансный переход в основное состояние: невозможен - запрещен по правилам отбора, которые надо знать!

8) диффузия атомов на стенке .

тогда распад уровня  $3P_2$  описывается следующим дифференциальным уравнением:

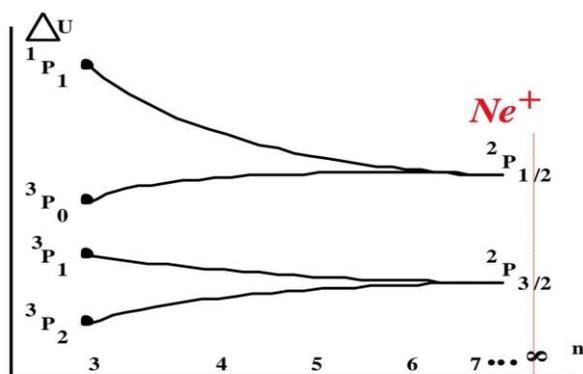
$$\begin{aligned} \frac{d[3P_2]}{dt} = & -n_e(k_{21} + k_{20} + k'_{21})[3P_2] - [3P_2]([Ne]^2\beta_1 + [Ne][He]\beta_2) \\ & - [3P_2][3P_1]k_i - [3P_2][3P_2]k_{i1} - [3P_2][3P_0]k_{i2} \\ & + n_e(k_{12}[3P_1] + k_{20}[3P_0]) + \alpha_{3P_2} \cdot n_e^2 - \frac{[3P_2]}{\tau_{Diff}} \end{aligned}$$

## Литературы.

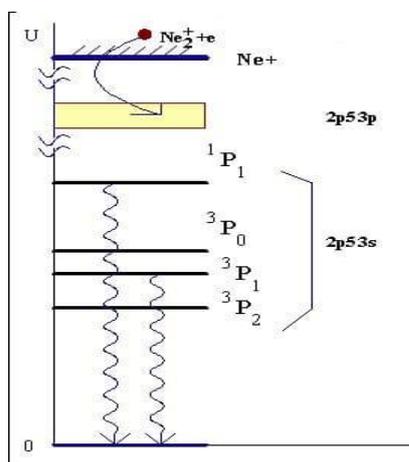
1. Б.М.Смирнов, Физика атома и иона .

2. В.А.Иванов, Энциклопедия низкотемпературной плазмы, 2008, Том " Оптика низкотемпературной плазмы ".

3. V.A.Ivanov, Electron-impact-induced excitation transfer between 3s levels of the neon atom, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 31 (1998) 1765.



**Рис.1.** изменение разницы энергий (расстояний между термами  $P^5ns2P_{3/2}$  и  $P^5ns2P_{1/2}$ .



**Рис.2.** Схема уровней первой возбужденной конфигурации  $2P^53s$

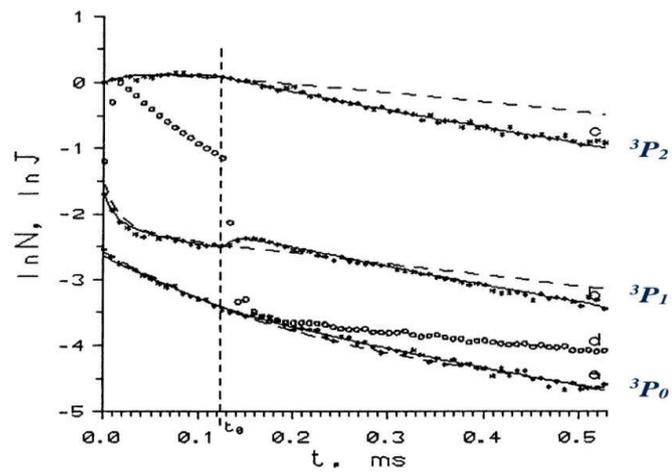


Рис.3. падение населения уровней  $3P_0$ ,  $3P_1$  и  $3P_2$