

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля

## **Неравновесные процессы в остатках сверхновых**

Выпускная квалификационная работа  
студента 121 группы  
Шидловского Дмитрия Сергеевича

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Блинников Сергей Иванович

Долгопрудный, 2015

## Содержание

1	Введение	2
2	Постановка задачи	3
3	Процессы рекомбинации	4
4	Формулы для расчета коэффициентов скорости рекомбинации	4
5	Сравнение коэффициентов	6
6	Сравнение процессов	7
7	Результаты	10

# 1 Введение

Остатки сверхновых представляет большой интерес для науки, поскольку их изучение может значительно помочь в исследовании механизмов взрывов сверхновых. Также остатки сверхновых возможно являются источником космических лучей. Наблюдения остатков в рентгеновском спектре имеет большое значение и является основным инструментом их изучения.

В обзорной статье "*Supernova remnants: the X-ray perspective*" [1] (Vink, 2012) подробно рассматриваются достижения науки в области изучения остатков сверхновых. В первой части этого обзора обсуждается физика остатков и разнообразные процессы в них. Вторая часть рассматривает успехи в области рентгеновской спектроскопии и изучения остатков, в том числе с помощью космических рентгеновских телескопов.

Численное моделирование также активно используется в изучении сверхновых. Совмещение самых последних моделей взрыва сверхновой с моделированием эволюции остатка и новых данных для рентгеновского излучения дает возможность получить рентгеновский спектр остатка сверхновой. Сравнение результатов моделирования с наблюдениями позволит нам лучше понять механизм взрыва. Подробнее об этом в статье [2] (Kosenko, D.; Hillebrandt, W.; Kromer, M.; Blinnikov, S. I.; Pakmor, R.; Kaastra, J. S; 2015).

Численное моделирование остатков сверхновых проводится уже очень давно, но поскольку физика этих объектов очень богата, она полностью еще не включена ни в одну компьютерную программу в мире. Причем на разных стадиях эволюции существенными могут быть разные физические процессы.

Моделирование молодых остатков сверхновых с помощью кода SUPREMNA (Supernova Remnants) рассмотрено в статье "*Динамика и излучение молодых остатков сверхновых типа Ia: важные физические процессы*" (2004 г. Е. И. Сорокина, С. И. Блинников) [3]. В данной работе, как и во многих других по моделированию остатков сверхновых, учитываются процессы нестационарной ионизации. Расчеты проводились для всех ионов 15 наиболее распространенных в космосе элементов (H, He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni). При этом учитывались ионизация электронным ударом, автоионизация, фото- и диэлектронная рекомбинация и перезарядка (Arnaud & Rothenflug 1985 [4]; Verner & Iakovlev 1990 [5]; Verner & Ferland 1996 [6]; Seaton 1959 [7]; Shull & Steenberg 1982 [8]; Nussbaumer & Storey 1983 [9]).

Также, моделирование остатков сверхновых с помощью новой версии кода SUPREMNA, которая учитывает космические лучи описано в работе [10] (Kosenko, D.; Blinnikov, S. I.; Vink, J.; 2011).

## 2 Постановка задачи

Программа NECI (non-equilibrium collisional ionization) является частью упомянутого выше кода SUPREMNA, используемого для моделирования остатков сверхновых. Её задача моделирование неравновесных процессов в веществе и построение истории ионизации - зависимости концентраций различных ионов от времени при заданных начальных и конечных условиях. В NECI для учета процессов рекомбинации ионов используются устаревшие данные для расчета коэффициентов скорости рекомбинации.

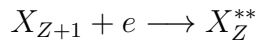
Цель данной работы замена старых данных для расчета коэффициентов скорости рекомбинации на более актуальные и сравнение истории ионизации, построенной программой с использованием новых данных, с результатами старой версии кода. Замена производится для ионов всех 15 элементов, учитываемых в программе SUPREMNA.

### 3 Процессы рекомбинации

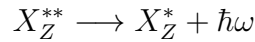
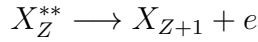
В данной задаче рассматриваются только два процесса рекомбинации: фоторекомбинация и диэлектронная рекомбинация. В процессе фоторекомбинации ион и электрон рекомбинируют с испусканием фотона



В процессе диэлектронной рекомбинации ион захватывает электрон, образуя промежуточное (дважды возбужденное) состояние в котором один из уже имеющих у иона электронов переходит в возбужденное состояние.



Получающееся в результате захвата дважды возбужденное состояние неустойчиво и может распадаться либо путем автоионизации, либо путем излучения кванта.



Процесс трёхчастичной рекомбинации в этой задаче не учитывается, поскольку моделирование производится для вещества с очень низкой плотностью (порядка 1 атома на  $cm^3$ ), при которой данным процессом можно смело пренебречь.

### 4 Формулы для расчета коэффициентов скорости рекомбинации

Для учета процесса фоторекомбинации ранее использовалась аппроксимация, описанная в статье [11] (Aldrovandi & Peguinot 1973).

$$\alpha_{rad} = A \left( \frac{T_e}{10^4} \right)^{-\eta} \quad (1)$$

Данные для всех ионов содержатся в статье [4] (Arnaud & Rothenflug 1985). Предыдущая формула была заменена на новую, описанную в работе "*Radiative Recombination Data for Modeling Dynamic Finite-Density Plasmas*" [12] (Badnell 2006). где коэффициент для фоторекомбинации задается выражением

$$\alpha_{RR}(T) = A \left[ \sqrt{T/T_0} \left( 1 + \sqrt{T/T_0} \right)^{1-B} \left( 1 + \sqrt{T/T_1} \right)^{1+B} \right]^{-1} \quad (2)$$

для ионов с малым зарядом нужно произвести замену

$$B \rightarrow B + C \exp(-T_2/T).$$

В статье [12] имеются данные для ионов всех изоэлектронных последовательностей от водорода до натрия. Данные для последовательностей магния и алюминия совместно с данными по диэлектронной рекомбинации содержатся в следующих статьях [13] и [14].

Для диэлектронной рекомбинации использовалась аппроксимация предложенная в статье Aldrovandi & Peguinot (1973) [11] и применяемая для температур выше  $10^4$  К.

$$\alpha_{di} = A_{di} T_e^{-3/2} \exp(-T_0/T_e) (1 + B_{di} \exp(-T_1/T_e)) \quad (3)$$

Данные для всех ионов имеются в статье Shull & Steenberg (1982) [8].

Для низких температур в диапазоне от  $10^3$  К до  $6 * 10^4$  К дополнительно использовалась формула из Nussbaumer & Storey (1983) [9]

$$\alpha_D = 10^{-12} (a/t + b + ct + dt^2) t^{-3/2} \exp(-f/t) \quad (4)$$

Сочетание формул (3) и (4) заменяется аппроксимацией, описанной в статье "*Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. I. Goals and methodology*" (Badnell и др. 2003) [15], где коэффициент скорости для диэлектронной рекомбинации задается формулой

$$\alpha_{DR} = \frac{1}{T^{3/2}} \sum_i c_i \exp(-E_i/T) \quad (5)$$

Это выражение с хорошей точностью описывает зависимость коэффициента скорости рекомбинации от температуры в диапазоне  $(10^1 - 10^7) Z^2$  К. Значения параметров для этой формулы, как и для фоторекомбинации, вычислены для ионов всех изоэлектронных последовательностей от водородной до последовательности алюминия. Данные по каждой изоэлектронной последовательности представлены отдельно в серии статей "*Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas.*" (в частях II-XIV) [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 13, 14].

## 5 Сравнение коэффициентов

В первую очередь сравним значения коэффициентов фоторекомбинации, полученных с помощью формул (1) и (2), в зависимости от температуры. Для примера выбран ион азота  $N^{3+}$ . На рис. 1 видно, что значения коэффициентов примерно равны при температуре меньше  $10^7$  К, но заметно отличаются при больших температурах.

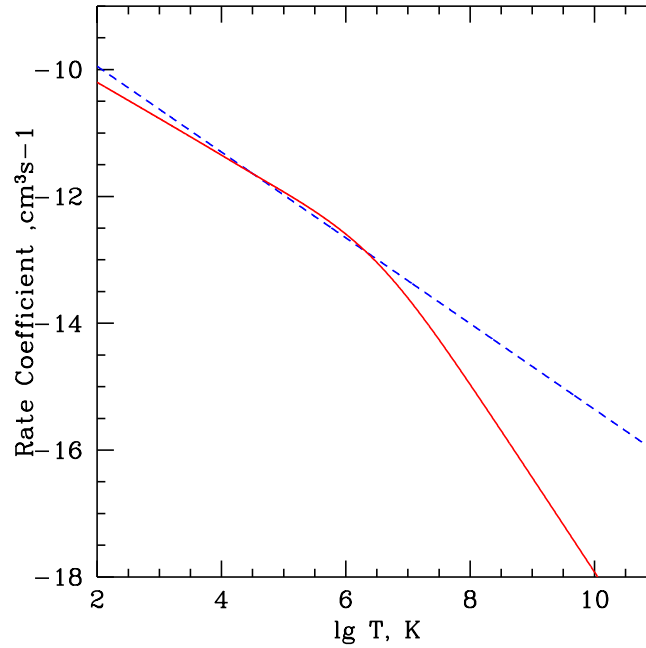


Рис. 1: Коэффициенты скорости фоторекомбинации иона  $N^{3+}$ , вычисленные по формулам из Arnaud & Rothenflug (1985) (пунктирная линия) и Badnell (2006) (сплошная линия)

Далее рассмотрим значения коэффициентов диэлектронной рекомбинации, полученных с помощью упомянутых выше аппроксимаций (3), (4) и (5), в зависимости от температуры. Для примера снова возьмем ион азота  $N^{3+}$ , поскольку это один из числа ионов, для которых использовалась формула (4) из Nussbaumer & Storey (1983) для области низких температур. На графике, изображенном на рис. 2, видно, что формула (4) из Nussbaumer & Storey (1983) дает значение коэффициента только в небольшой области низких температур, а формула (3) из Aldrovandi & Peguinot (1973) в области более высоких температур, в то время как формула (5) применима в более широком диапазоне температур и дает результат, сравнимый с тем, что дают две выше упомянутые формулы.

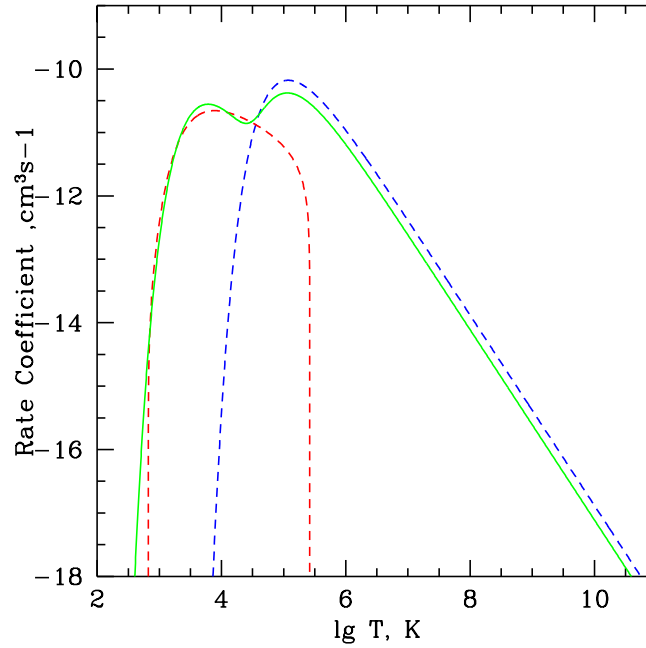


Рис. 2: Коэффициенты диэлектронной рекомбинации для иона  $N^{3+}$ : Nussbaumer & Storey (1983) (левая пунктирная линия), Aldrovandi & Peguinot (1973) (правая пунктирная линия) и Vadnell (2003) (сплошная линия)

## 6 Сравнение процессов

Для анализа изменений рассмотрим историю ионизации кремния, поскольку все его ионы относятся к изоэлектронным последовательностям, для которых используются новые формулы расчета коэффициентов скорости рекомбинации. Рассмотрим два случая: в первом начальная и конечная температуры равны соответственно  $2 \cdot 10^4$  К и  $10^5$  К, а во втором  $2 \cdot 10^4$  К и  $10^8$  К.

История ионизации в первом случае показана на рис. 3 с использованием старых данных и на рис. 4 с использованием новых данных. На графиках видно, что результаты в обоих случаях отличаются незначительно, и различия есть. Например, во втором варианте установившаяся концентрация иона  $SiV$  немного меньше, а иона  $SiIII$  наоборот, больше.

История ионизации во втором случае показана на рис. 5 с использованием старых данных и на рис. 6 с использованием новых данных. Сравнивая два этих графика, можно видеть, что заметные различия в истории ионизации при большом изменении температуры отсутствуют.



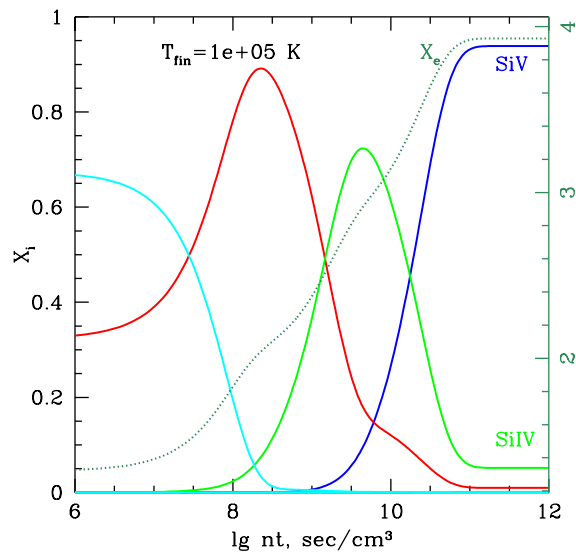


Рис. 3: История ионизации кремния при изменении температуры от  $2 \cdot 10^4 \text{ K}$  и  $10^5 \text{ K}$  с использованием старых данных

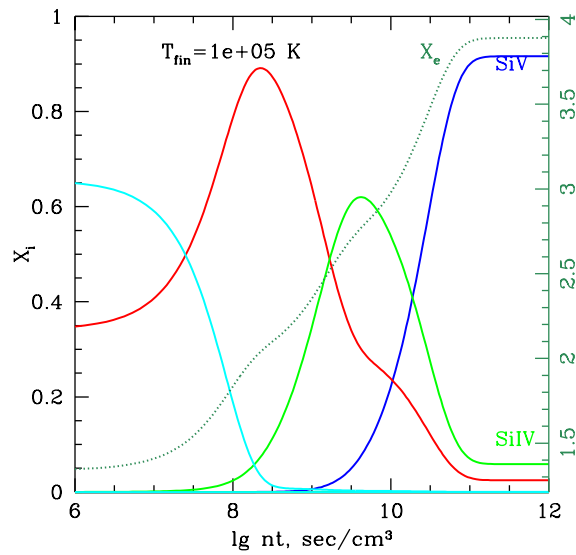


Рис. 4: История ионизации кремния при изменении температуры от  $2 \cdot 10^4 \text{ K}$  и  $10^5 \text{ K}$  с использованием новых данных

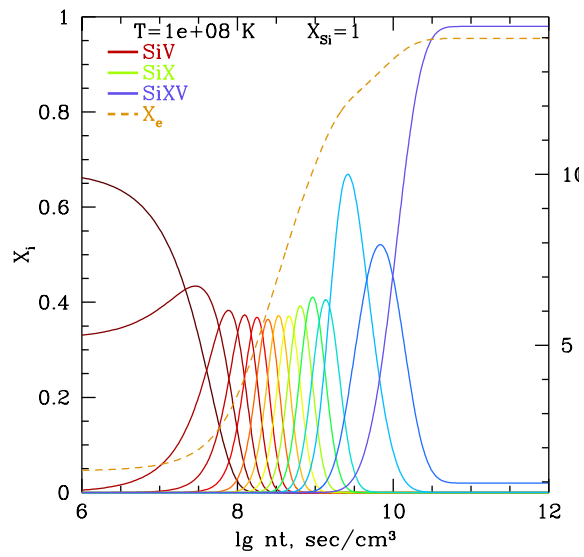


Рис. 5: История ионизации кремния при изменении температуры от  $2 \cdot 10^4 \text{ K}$  и  $10^8 \text{ K}$  с использованием старых данных

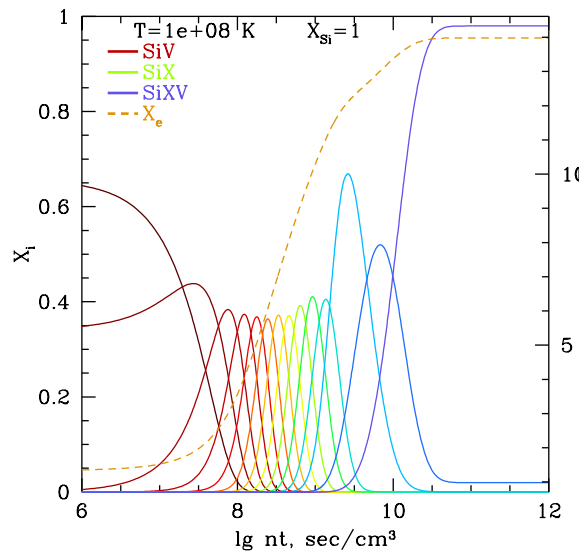


Рис. 6: История ионизации кремния при изменении температуры от  $2 \cdot 10^4 \text{ K}$  и  $10^8 \text{ K}$  с использованием новых данных

## 7 Результаты

При изменении формул для расчета коэффициентов скорости рекомбинации, выдаваемая программой NECI история ионизации для кремния изменилась незначительно. Таким образом, можно сделать вывод, что для моделирования неравновесных процессов в остатках сверхновых можно использовать оба варианта расчета коэффициентов скорости рекомбинации. Также можно судить о том, что в процессе выполнения работы не было допущено серьезных ошибок, поскольку результаты хорошо соотносятся между собой.

## Список литературы

- [1] Vink J. Supernova remnants: the X-ray perspective // *Astron.Astrophys.Rev.*. 2012. Т. 20. с. 49.
- [2] Oxygen emission in remnants of thermonuclear supernovae as a probe for their progenitor system / D. Kosenko, W. Hillebrandt, M. Kromer [и др.] // *MNRAS*. 2015. Т. 449. С. 1441–1448.
- [3] Dynamics and Radiation of Young Type-Ia Supernova Remnants: Important Physical Processes / E. I. Sorokina, S. I. Blinnikov, D. I. Kosenko [и др.] // *Astronomy Letters*. 2004. Т. 30. С. 737–750.
- [4] Arnaud M., Rothenflug R. An updated evaluation of recombination and ionization rates // *Astron.Astrophys.Suppl.*. 1985. Т. 60. С. 425–457.
- [5] Verner D. A., Iakovlev D. G. Photoionization models for QSO's intervening absorption clouds // *Astrophys.Space Sci.*. 1990. Т. 165. С. 27–40.
- [6] Verner D. A., Ferland G. J. Atomic Data for Astrophysics. I. Radiative Recombination Rates for H-like, He-like, Li-like, and Na-like Ions over a Broad Range of Temperature // *Astrophys.J. Suppl.*. 1996. Т. 103. с. 467.
- [7] Seaton M. J. Radiative recombination of hydrogenic ions // *MNRAS*. 1959. Т. 119. с. 81.
- [8] Shull J. M., van Steenberg M. The ionization equilibrium of astrophysically abundant elements // *Astrophys.J. Suppl.*. 1982. Т. 48. С. 95–107.
- [9] Nussbaumer H., Storey P. J. Dielectronic recombination at low temperatures // *Astron.Astrophys.*. 1983. Т. 126. С. 75–79.

- [10] Kosenko D., Blinnikov S. I., Vink J. Modeling supernova remnants: effects of diffusive cosmic-ray acceleration on the evolution and application to observations // *Astron.Astrophys.* . 2011. T. 532. c. A114.
- [11] Aldrovandi S. M. V., Pequignot D. Radiative and Dielectronic Recombination Coefficients for Complex Ions // *Astron.Astrophys.* . 1973. T. 25. c. 137.
- [12] Badnell N. R. Radiative Recombination Data for Modeling Dynamic Finite-Density Plasmas // *Astrophys.J. Suppl.* . 2006. T. 167. C. 334–342.
- [13] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. XIII. The magnesium isoelectronic sequence / Z. Altun, A. Yumak, I. Yavuz [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2007. T. 474. C. 1051–1059.
- [14] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. XIV. The aluminum isoelectronic sequence / S. A. Abdel-Naby, D. Nikolić, T. W. Gorczyca [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2012. T. 537. c. A40.
- [15] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. I. Goals and methodology / N. R. Badnell, M. G. O’Mullane, H. P. Summers [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2003. T. 406. C. 1151–1165.
- [16] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. II. The oxygen isoelectronic sequence / O. Zatsarinny, T. W. Gorczyca, K. T. Korista [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2003. T. 412. C. 587–595.
- [17] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. III. The beryllium isoelectronic sequence / J. Colgan, M. S. Pindzola, A. D. Whiteford [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2003. T. 412. C. 597–601.
- [18] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. IV. The carbon isoelectronic sequence / O. Zatsarinny, T. W. Gorczyca, K. T. Korista [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2004. T. 417. C. 1173–1181.
- [19] Colgan J., Pindzola M. S., Badnell N. R. Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. V: The lithium isoelectronic sequence // *Astron.Astrophys.* . 2004. T. 417. C. 1183–1188.
- [20] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. VI. The boron isoelectronic sequence / Z. Altun, A. Yumak, N. R. Badnell [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2004. T. 420. C. 775–781.
- [21] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. VII. The neon isoelectronic sequence / O. Zatsarinny, T. W. Gorczyca, K. Korista [и др.] // *Astron.Astrophys.* . 2004. T. 426. C. 699–705.

- [22] Mitnik D. M., Badnell N. R. Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. VIII. The nitrogen isoelectronic sequence // *Astron.Astrophys.*. 2004. T. 425. C. 1153–1159.
- [23] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. IX. The fluorine isoelectronic sequence / O. Zatsarinny, T. W. Gorczyca, J. Fu et al. // *Astron.Astrophys.*. 2006. Vol. 447. P. 379–387.
- [24] Badnell N. R. Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. X. The hydrogen isoelectronic sequence // *Astron.Astrophys.*. 2006. T. 447. C. 389–395.
- [25] Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. XI. The sodium isoelectronic sequence / Z. Altun, A. Yumak, N. R. Badnell [и др.] // *Astron.Astrophys.*. 2006. T. 447. C. 1165–1174.
- [26] Bautista M. A., Badnell N. R. Dielectronic recombination data for dynamic finite-density plasmas. XII. The helium isoelectronic sequence // *Astron.Astrophys.*. 2007. T. 466. C. 755–762.