

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЫЛИ И ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ГАЗА ТУМАННОСТИ СЕД 201

И.А.СИМОНΙΑ

Поступила 22 июля 2021

Принята к печати 20 октября 2021

Рассмотрены физико-химические свойства пыли туманности СЕД 201. Люминесцентные эмиссии замороженных углеводородных частиц и алмазной пыли выявлены в спектре этой туманности. Представлен краткий каталог флуоресцентных эмиссий атомов и ионов газовой компоненты вещества туманности. Обсуждены некоторые другие аспекты проблемы.

**Ключевые слова:** *туманность:пыль:органическое вещество:люминесценция*

1. *Введение.* Электромагнитное и корпускулярное излучения звезд туманностей различных типов могут вызывать люминесценцию пыли и флуоресценцию газа этих туманностей. При этом испускаемые звездами потоки рентгеновского и ультрафиолетового излучений, а также анизотропные потоки электронов и протонов различных энергии могут вызывать фотолюминесценцию - флуоресценцию и рекомбинационное излучение нейтральных и ионизованных компонентов газа этих туманностей. Пыль отражательных, протопланетарных и планетарных туманностей может интенсивно люминесцировать под воздействием излучения от центральных звезд, причем люминесцентные эмиссии могут располагаться в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра туманностей.

Различные туманности, как комплексные газо-пылевые объекты, диффузные образования галактики, могут испускать люминесцентное излучение твердого вещества (пыли) и флуоресцентное излучение газа. При этом, эмиссионный спектр туманности может быть достаточно сложным, состоящим из стандартных эмиссий атомов, ионов газа и люминесцентных эмиссий минеральной и ледяной пыли соответствующей туманности. Эти относительно слабые люминесцентные эмиссии пыли зачастую остаются неидентифицированными, вызывая особый интерес исследователей. Оптические спектры туманностей и других газо-пылевых образований галактики могут быть усложнены также расширенной красной эмиссией пыли в диапазоне 5400-9400 Å . Эта широкая, бесструктурная полоса также имеет люминесцентную природу.

В работах [1,2] мы предложили модели замороженных углеводородных

частиц (ЗУЧ) пыли туманностей, показав, что под воздействием ультрафиолетового излучения центральных звезд ледяная пыль (в виде комплексов ЗУЧ) туманностей может люминесцировать в оптическом диапазоне спектра. Мы применили нашу теорию к туманности СЕД 201 и выявили в оптических спектрах этой туманности ряд линий и полос люминесцентной природы, принадлежащих ЗУЧ. Нами применялся стандартный метод выявления люминесцентных эмиссий спектров определенных регионов туманности СЕД 201. К настоящему моменту сформировались следующие существенные обстоятельства: 1) опубликованные спектральные данные (таблицы, каталоги эмиссий) по туманности СЕД 201 ограничены, разрозненны; 2) часть спектров туманности СЕД 201, полученных нами ранее при помощи 2-м телескопа обсерватории ТЛС, Германия, остаются неизученными в рамках настоящей проблемы. Беря во внимание эти обстоятельства, мы изучили один из полученных нами спектров туманности СЕД 201, ранее не подвергавшийся анализу.

*2. Наблюдения и обработка данных.* Нами были произведены спектроскопические наблюдения туманности СЕД 201 при помощи 2-м телескопа и призменного спектрографа фокуса Нэсмита обсерватории ТЛС (октябрь-ноябрь, 2001). Были получены спектры этой туманности в диапазоне 3700- 8500 Å . Средняя дисперсия применявшегося призменного спектрографа 225 Å /мм. Длина щели 3.24 аркмин. Приемник излучения ССД 800 x 2024. Время экспозиции туманности в пределах 540-600с. Была проведена экстракция спектров, фильтрация космических частиц, деление на плоское поле, калибровка и др. Из полученных спектров туманности были вычтены спектры ночного неба. Щель спектрографа была ориентирована соответствующим образом, вырезая как темную, так и светлую области туманности (вне звезды). Первичная и последующая обработки спектров туманности проводились программными пакетами MIDAS и DECH20T.

*3. Ледяная пыль и газ туманности СЕД 201.* Основными задачами настоящей работы являлись: а) выявление наиболее интенсивных (в шкале относительной интенсивности) люминесцентных эмиссий спектра туманности СЕД 201; б) отождествление интенсивных, стандартных газовых эмиссий спектра той же туманности; с) установление некоторых физико-химических свойств твердого вещества ледяной пыли этой туманности. С целью эффективного решения этих задач, обработка откалиброванного спектра проводилась пошагово, с разделением спектра на последовательные малые участки (по возрастанию длин волн). Доплеровское смещение спектральных линий (лучевая компонента пространственной скорости туманности) учитывалось. Было улучшено качество процедуры сравнительного анализа, а именно: точность

сравнительного анализа; учет сходства профилей спектральных линии (наблюденных и лабораторных); применение более обширных и современных баз и источников сравнительных данных. Сравнение проводилось с точностью  $\pm 0.5 \text{ \AA}$ . В качестве источников сравнительных данных нами применялись [3-19]. Эти источники содержали спектры люминесцентных эмиссий замороженных смесей полициклических ароматических углеводородов и алифатических углеводородов, различных минералов, а также спектры и каталоги запрещенных линий, эмиссий планетарных туманностей, эмиссий искусственных источников излучения, включая ртуть и натрий и др.

Относительная нерегулярность, неоднородность сравнительного материала, выражавшаяся в различиях точности лабораторных измерений, применявшихся шкал длин волн, а также чувствительности приемников излучения, вызывала определенные сложности в процессе сравнительного анализа. К примеру, атласы спектров люминесценции замороженных углеводородов практически не содержат эмиссии в длинноволновой области спектра  $\lambda > 7000 \text{ \AA}$ . Это обуславливало в свою очередь потерю 3-5% полезных данных. Получение более однородных и обширных лабораторных данных по люминесценции замороженных углеводородов положительно сказалось бы на эффективности сравнительного анализа в пределах интересов астрофизики.

Ориентация щели применявшегося призмного спектрографа предопределила достаточно высокую информативность полученных спектров туманности. Как уже отмечалось, щель вырезала одновременно как яркую, так и темную часть туманности СЕД 201. Следовательно, оптический спектр этой туманности может содержать люминесцентные эмиссии ледяной и минеральной пыли и флуоресцентные эмиссии газа туманности (атомов и ионов). Газовая составляющая туманности сосредоточена вблизи освещающей звезды, тогда как пыль различного химико-минералогического состава сосредоточена на большем удалении от освещающей звезды занимая, периферические области туманности. Такое пространственное подразделение газа и пыли имеет несколько условный характер, учитывая тот факт, что диффузные объекты галактики представляют собой взаимопроникающие и взаимозамещающие пространственные газопылевые образования. Это подразделение газа и пыли необходимо рассматривать в контексте принятого в настоящее время отношения содержания пылевой и газовой материи в галактике. В случае отражательных туманностей нам представляется, что не менее 80% сегмента туманности, освещаемого центральной звездой, будет участвовать в процессе люминесценции пыли. То есть, 80% пылевых и ледяных частиц освещенной части туманности будут люминесцировать под воздействием коротковолнового излучения от центральной звезды. Необходимо отметить также, что под люминесценцией пыли туманности мы понимаем явления фотолюминесценции, катодолюминесценции твердого

вещества пылинок, а под флуоресценцией газа - нетепловое свечение атомов и ионов возбуждаемые ультрафиолетовым излучением центральной звезды. Вместе с тем нельзя исключать, что свечение газовой компоненты этой туманности может быть частично обусловлено явлением излучательной рекомбинации.

Полученный нами оптически спектр туманности СЕД 201 приведен на рис.1. Во время сравнительного анализа и последующей идентификации соответствующих спектральных особенностей мы опирались в целом на предложенные нами ранее модели ЗУЧ и теорию их люминесцентного свечения. Однако в настоящей работе важным приоритетом для нас являлось выявление наиболее интенсивных нетепловых эмиссий замороженных углеводородных частиц с привлечением более обширных лабораторных данных. Необходимо отметить, что энергетический выход люминесценции (как отношение энергии испускаемых люминесцентных фотонов к поглощенной энергии

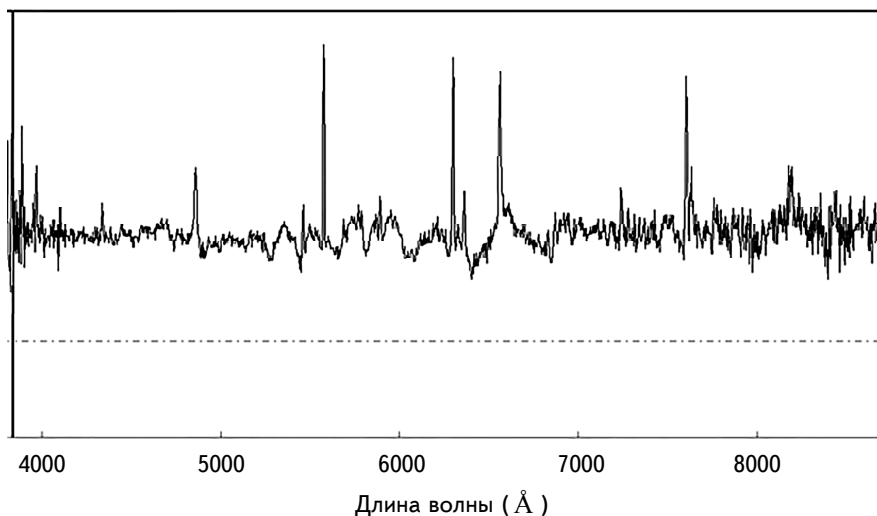


Рис.1. Спектр туманности СЕД 201.

фотонов возбуждающего излучения) замороженной сложной органики при  $T < 80$  К в лабораторных условиях меняется в пределах 0.5-0.9. Эти же значения можно ожидать для случая замороженных углеводородных частиц туманностей.

В коротковолновой области оптического спектра туманности СЕД 201 нам удалось идентифицировать две фотолюминесцентные эмиссии ЗУЧ на длинах волн  $3804.37 \text{ Å}$  и  $4018.37 \text{ Å}$ . За эти фотолюминесцентные эмиссии соответственно отвечают ЗУЧ следующего химического состава: 9,10 диметилантрацен в н-гептане ( $3804 \text{ Å}$ ), 3-метилантрацен в н-октане ( $4018.55 \text{ Å}$ ) [18]. Наблю-

денные и лабораторные фотолюминесцентные эмиссии хорошо коррелируют по спектральным положениям и профилям в пределах наших критериев сравнительного анализа, рис.2, 3. Необходимо отметить, что в лабораторных условиях замороженные смеси ароматических и алифатических углеводородов

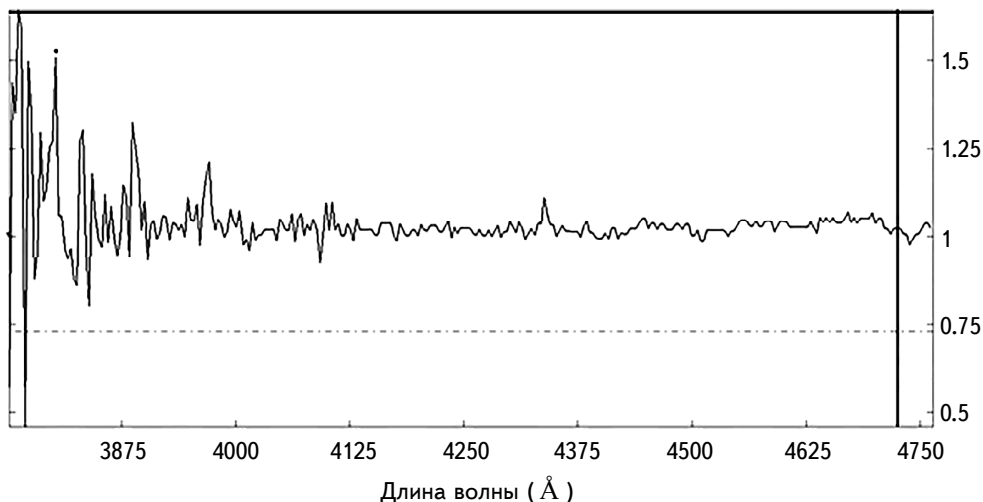


Рис.2. Люминесцентная эмиссия ЗУЧ (3804.37 Å) в спектре туманности СЕД 201.

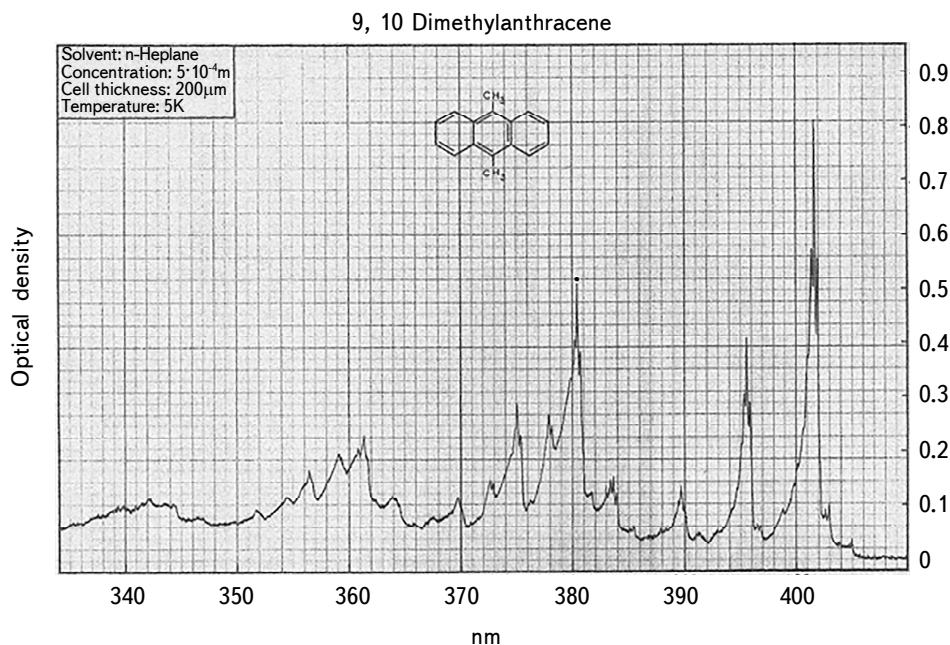


Рис.3. Эмиссия (3804 Å) в спектре люминесценции замороженной смеси углеводородов.

указанного состава характеризуются интенсивными фотолюминесцентными эмиссиями, схожими с эмиссиями туманностей (спектральные положения и профили), при температуре замороженных смесей  $T = 5$  К. Можно предположить, что потоки ультрафиолетового излучения от освещающей звезды возбуждают фотолюминесценцию сложных органических ледяных частиц периферической области туманности СЕД 201, причем температура ЗУЧ в этой области должна быть  $T < 10$  К. Само присутствие ЗУЧ (в веществе туманности) источников достаточно узких люминесцентных эмиссий в спектре туманности свидетельствует об относительном постоянстве указанных температурных значений. Возможное увеличение температуры замороженных углеводородных частиц туманности незамедлительно привело бы к значительному уширению соответствующих фотолюминесцентных эмиссий. Здесь имеется в виду уширение люминесцентных эмиссий до широких бесструктурных полос, схожих с расширенной красной эмиссией пыли некоторых туманностей, легко обнаруживаемой наземными оптическими инструментами. Идентифицированные нами две фотолюминесцентные эмиссии спектра туманности СЕД 201 не обнаруживались нами ранее [1,2]. Высокая интенсивность фотолюминесцентных эмиссий может быть предопределена весьма низкой температурой вещества ЗУЧ, высокой пространственной концентрацией этих ледяных частиц и высоким квантовым выходом люминесценции конкретных замороженных смесей (ПАУ+АУ). Эффективность выявления этих фотолюминесцентных эмиссий была обусловлена применением новых баз данных [18]. Мы идентифицировали также в спектре туманности СЕД 201 одну люминесцентную эмиссию алмазной пыли, а именно эмиссию на длине волны  $7940.40 \text{ \AA}$  [17,19]. В лабораторных условиях под воздействием ультрафиолетового излучения мелкодисперсная алмазная пыль люминесцирует на длине волны  $7940 \text{ \AA}$  [19]. Имеет место хорошая корреляция спектральных положений и профилей наблюдаемой и лабораторной эмиссий.

Касаясь пространственного распределения ЗУЧ и алмазных частиц в пылевой материи туманности СЕД 201, можно предположить, что на малых расстояниях от звезды может превалировать алмазная пыль, а на значительных удалениях разнодисперсные ЗУЧ. Беря во внимание модель ЗУЧ, предложенную нами в [1,2] (ЗУЧ как углистое ядро+замороженная органическая мантия), можно заключить, что вблизи освещающей звезды в условиях относительно высоких температур превалируют алмазные пылинки, а на больших удалениях от звезды в условиях низких температур превалируют ЗУЧ ледяные частицы - ядро+ мантия. При этом пространственные процессы очевидны. Алмазная пыль вблизи звезды хорошо прогревается, но будучи "выметаемой" лучевым давлением, начинает охлаждаться, сопровождаясь процессом конденсации или десублимации газа на холодных микро и наноядрах. Это в свою очередь

приведет со временем к образованию органических мантий ЗУЧ. Эти явления могут свидетельствовать о том, что темная и холодная области туманности СЕД 201 могут содержать молекулы углеводородов в газовой фазе. Для выявления пространственного распределения ЗУЧ и алмазных пылинок туманности СЕД 201 необходимо будет провести дополнительные спектроскопические наблюдения этой туманности с целью получения ее оптических спектров при различных ориентациях щели спектрографа.

По результатам сравнительного анализа нам не удалось идентифицировать следующие эмиссии спектра туманности СЕД 201: 7342.05 Å ; 7634.67 Å ; 7866.15 Å ; 7984.07 Å ; 8088.89 Å ; 8154.40 Å ; 8180.61 Å . Все эти 7 эмиссий остались в статусе неидентифицированных. Как показано в работах [1,2] оставшиеся неидентифицированными эмиссии могут принадлежать, в качестве составных компонентов, к расширенной красной эмиссии пыли туманности СЕД 201. И в данном случае мы придерживаемся аналогичного объяснения. Здесь необходимо добавить, что для однозначного выявления расширенной красной эмиссии в спектрах туманностей применяются спектрографы низкой дисперсии. В нашем же случае применялся спектрограф средней дисперсии. В спектре туманности СЕД 201 мы выявили также две линии поглощения 4739.01 Å и 5813.42 Å . Сравнительный анализ показал, что данные абсорбции не принадлежат к межзвездным линиям поглощения, включая диффузные межзвездные полосы. По-видимому, эти абсорбции имеют пекулярный характер и обусловлены поглощением излучения освещающей звезды газопылевой материей конкретного химико-минералогического состава. В результате сравнительного анализа мы идентифицировали также в спектре туманности СЕД 201 ряд линий, представляющих собой флуоресцентные эмиссии атомов и ионов газовой компоненты этой туманности. Ультрафиолетовое излучение освещающей звезды возбуждает флуоресценцию составных компонентов газа туманности с характерным временем релаксации  $10^{-8}$  с. В табл.1 мы приводим результаты нашего сравнительного анализа по идентификации флуоресцентных эмиссий газа туманности СЕД 201. Фактически данная таблица является первым кратким каталогом эмиссии нейтральных атомов и ионов газа этой туманности. В первой колонке таблицы приводятся длины волн газовых эмиссий спектра туманности в ангстремах (исправленных за доплеровское смещение), в колонке 2 - эквивалентные ширины эмиссии в ангстремах, в колонке 3 - длины волн лабораторных эмиссий в ангстремах, в колонке 4 - идентификация, соответствующие атомы и ионы.

Необходимо отметить, что эмиссии некоторых компонентов газа туманности СЕД 201 характеризуются определенным уширением. Это может быть обусловлено движением некоторых компонентов газа туманности под определенным углом к лучу зрения. Итак, спектр туманности СЕД 201 имеет

Таблица 1

## ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЕ ЭМИССИИ ГАЗА ТУМАННОСТИ СЕД 201

| $\lambda_{\text{набл.}}$ | Эквивалентная<br>ширина | $\lambda_{\text{лаб.}}$ | Атом, ион |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| 3830.57                  | 1.549                   | 3830.29                 | OII       |
| 3843.67                  | 0.117                   | 3843.18                 | OII       |
| 3856.78                  | 0.654                   | 3856.29                 | SiII      |
| 3887.35                  | 2.371                   | 3887.44                 | HeII      |
| 3970.33                  | 1.263                   | 3970.07                 | HI        |
| 3996.54                  | 0.321                   | 3996.30                 | [CaV]     |
| 4105.72                  | 0.484                   | 4106.02                 | OII       |
| 4337.20                  | 0.823                   | 4336.86                 | OII       |
| 4359.04                  | 0.207                   | 4359.33                 | [FeII]    |
| 4385.24                  | 0.246                   | 4384.98                 | NeII      |
| 4861.30                  | 3.110                   | 4861.33                 | HI        |
| 5049.11                  | 0.218                   | 5048.85                 | NiI       |
| 5464.02                  | 0.883                   | 5464.28                 | FeI       |
| 5498.96                  | 0.383                   | 5499.06                 | FeII      |
| 5577.57                  | 4.264                   | 5577.34                 | [OI]      |
| 5603.78                  | 0.081                   | 5604.00                 | [KVI]     |
| 5690.84                  | 0.360                   | 5690.43                 | SiI       |
| 5892.04                  | 0.811                   | 5850-5894               | CIII      |
| 5953.18                  | 0.767                   | 5952.94                 | HeII      |
| 6302.58                  | 2.474                   | 6302.51                 | FeI       |
| 6328.79                  | 0.202                   | 6328.39                 | NII       |
| 6363.73                  | 0.960                   | 6363.78                 | [OI]      |
| 6564.63                  | 5.161                   | 6562.85                 | HI        |
| 6874.72                  | 0.620                   | 6874.60                 | CIV       |
| 6896.56                  | 0.352                   | 6896.20                 | [FeII]    |
| 7241.60                  | 0.915                   | 7241.78                 | NII       |
| 7280.90                  | 0.598                   | 7281.35                 | HeI       |
| 7918.56                  | 0.259                   | 7918.44                 | NI        |
| 7949.13                  | 0.471                   | 7948.30                 | CIV       |
| 7962.23                  | 0.377                   | 7962.30                 | HeI       |
| 8032.11                  | 0.748                   | 8029-8077               | CII       |
| 8127.91                  | 1.118                   | 8127.50                 | OIII      |
| 8196.41                  | 1.740                   | 8196.48                 | CIII      |

комплексный характер. Нам удалось обнаружить в спектре люминесцентные эмиссии ЗУЧ и флюоресцентные эмиссии газа этой туманности. Обращают на себя внимание эмиссии ионов [KVI], [CaV], CIV. Высокая степень ионизации этих атомов свидетельствует о мощном ультрафиолетовом излучении освещающей звезды BD + 69°1231. Присутствие же запрещенных линии в спектре этой туманности может свидетельствовать о высокой степени разреженности газа, обуславливающей нахождение атомов и ионов газа в



метастабильных состояниях в течение продолжительного периода времени. Роль излучения хромосферы освещающей звезды должна быть рассмотрена отдельно в пределах абсолютной спектрофотометрии туманности СЕД 201 и освещающей звезды.

4. *Заключение.* Мы продолжили изучение люминесценции замороженных частиц пылевой материи туманности СЕД 201. Нам удалось выявить две люминесцентные эмиссии в спектре этой туманности. За эти люминесцентные эмиссии отвечают ЗУЧ сложного химического состава. Ультрафиолетовое излучение освещающей звезды возбуждает фотолюминесценцию ЗУЧ с характерным периодом послесвечения. Нам удалось подтвердить и расширить полученные нами раннее результаты. Мы показали также что газовая составляющая туманности флуоресцирует под воздействием коротковолнового излучения освещающей звезды. Потоки электронов и протонов от освещающей звезды также участвуют в возбуждении люминесценции вещества туманности СЕД 201. Было бы целесообразным продолжение спектроскопических исследований этой туманности телескопами большей светосилы, спектрографами высокой разрешающей силы в оптическом и инфракрасном диапазонах спектра.

Автор выражает благодарность Х.Лиману за участие в наблюдательных экспериментах. Автор благодарен анонимному рецензенту за ценные замечания.

Факультет естественных наук и медицины государственного университета им. Или, e-mail: irakli\_simonia@iliauni.edu.ge

## LUMINESCENCE OF DUST AND FLUORESCENCE OF GAS OF CED 201 NEBULA

I.A.SIMONIA

Physical and chemical properties of CED 201 nebula dust are considered. Luminescence emissions of frozen hydrocarbon particles and diamond dust were revealed in the spectrum of this nebula. The short catalog of atomic and ionic fluorescence emissions of gaseous component of nebula matter is presented. Some other aspects of the problem are discussed.

Keywords: *nebula: dust: organic substance: luminescence*

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.А.Симония, *Астрофизика*, **47**, 625, 2004, (*Astrophysics*, **47**, 530, 2004).
2. И.А.Симония, *Астрофизика*, **48**, 445, 2005, (*Astrophysics*, **48**, 374, 2005).
3. C.D.Keyes, L.H.Aller, W.A.Feibelman, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **102**, 59, 1990.
4. R.J.Rudy, R.D.Cohen, G.S.Rossano *et al.*, *Astrophys. J.*, **380**, 151, 1991.
5. D.E.Osterbrock, H.D.Tran, S.Veilleux, *Astrophys. J.*, **389**, 305, 1992.
6. C.Waelkens, H. Van Winkel, N.R.Trams *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **256**, L15, 1992.
7. S.Hyung, L.H.Aller, W.A.Feibelman, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **269**, 975, 1994.
8. J.-P.Baluteau, A.Zavagno, C.Morisset *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **303**, 175, 1995.
9. S.Hyung, L.H.Aller, W.A.Feibelman *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **318**, 77, 2000.
10. J.Bernard-Salas, S.R.Pottasch, D.A.Beintema *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **367**, 949, 2001.
11. S.Hyung, L.H.Aller, W.A.Feibelman *et al.*, *Astrophys. J.*, **563**, 889, 2001.
12. Y.Zhang, X.-W.Liu, *Astron. Astrophys.*, **404**, 545, 2003.
13. L.M.Hobbs, J.A.Thorburn, T.Oka *et al.*, *Astrophys. J.*, **615**, 947, 2004.
14. S.Hyung, W.A.Feibelman, *Astrophys. J.*, **614**, 745, 2004.
15. Y.Zhang, X.-W.Liu, S.-G.Luo *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **442**, 249, 2005.
16. X.Fang, X.-W.Liu, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **415**, 181, 2011.
17. Б.С.Горобец, А.А.Рогожин, *Минеральное сырье*, №11, 2001.
18. L.A.Nakhimovsky, M.Lamotte, J.Joussot-Dubein, *Handbook of Low Temperature Electronic Spectra of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, Elsevier, 1989.
19. M.Gaft, R.Reisfeld, G.Panczer, *Modern Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials*, Springer, 2005.