

На правах рукописи



ЗУБАРЕВ Сергей Николаевич

**РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ НЕКОТОРЫХ
ТИПОВ ЗВЕЗД НА ОСНОВЕ ВУ-ФОТОМЕТРИИ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедре технической физики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор

Селезнёв Владимир Дмитриевич

Научный консультант: доктор физико-математических наук

Мартюшев Леонид Михайлович

Официальные оппоненты: **Уваров Александр Викторович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета;

Попель Петр Станиславович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет», профессор кафедры физики и математического моделирования

Ведущая организация: **ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург**

Защита состоится «03» июня 2016 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д **212.285.02** на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=255483>

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Энтропия и ее производство уже более века являются важнейшими величинами не только для термодинамики и неравновесной статистической физики, но и для всего естествознания. Эти величины первостепенны при обсуждении степени неравновесности теплофизических процессов, вариационных принципов неравновесной физики, вопросов порядка и беспорядка в природе, проблем необратимости и направления времени и т.д.

Необходимо отметить, что удобное с точки зрения теории понятие производства энтропии, является не всегда удобным для экспериментального определения: ее измерения проводятся лишь косвенно, желательны специальные условия, в которых находится неравновесная система (например, ее изолированность или стационарность, локальное равновесие). Это накладывает серьезные ограничения на точность измерения этой величины и на круг объектов, у которых эту величину можно экспериментально определить. Очень интересным является нахождение производства энтропии у неравновесных систем, имеющих естественное происхождение, возникших самопроизвольно в ходе эволюции нашего мира. Таких систем много в окружающем нас космосе. Начиная с трудов Р. Клазиуса с его концепцией тепловой смерти Вселенной, работы, связанные с исследованием энтропии космических объектов, являются очень важными для развития теплофизики.

Звезды являются важнейшими объектами Вселенной, они сосредотачивают в себе более 97% массы видимого нами космического вещества. Звезды бывают различных типов, они рождаются, живут, стареют и умирают; без их существования во Вселенной вряд ли могла возникнуть жизнь. Но чему равно их производство энтропии, как оно зависит от типа звезды, от времени ее жизни? На эти вопросы не удастся найти ответа в современной литературе, несмотря на то, что необходимые для расчета производства энтропии величины известны. Помимо оценок производства энтропии для Солнца [Aoki, 1983; Kennedy, 1997], никакой другой информации об этой величине нет. Это связано, с одной стороны, с тем, что астрофизикам мало интересно производство энтропии так как: (1) оно прямо не измеряется, а рассчитывается косвенно на основе фотометрических измерений (в частности для длин волн 435 и 550 нм - так называемой BV-фотометрии); (2) оно дает лишь некую интегральную информацию о тех неравновесных процессах, которые происходят в звездах. С другой стороны для теплофизиков, чьи интересы связаны с энтропией и ее производством, звезды обычно оказываются слишком экзотичными и далекими объектами от их традиционных «земных» объектов преимущественно технологического происхождения.

Таким образом, важнейшая с точки зрения теплофизики величина, производство энтропии - не рассчитывалось и не анализировалось для важнейших объектов Вселенной – звезд. Первым шагом в направлении ликвидации этого парадокса и явилась данная работа.

Цель настоящей работы: разработка методики определения производства энтропии звезд по фотометрическим BV-данным астрономических наблюдений и выявление связи производства энтропии звезд с их типом и основными термодинамическими характеристиками.

В рамках этой цели решались следующие задачи:

1. Определение и обоснование формул для расчета основных теплофизических характеристик звезд (температуры, светимости, полного и удельного производства энтропии звезд) на основе данных BV- фотометрии.

2. Написание программных комплексов для расчета теплофизических характеристик звезд, расчет этих характеристик и анализ погрешности полученных данных.

3. Для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах в звездах, получение и анализ зависимостей производства энтропии звезд различных типов от температуры и светимости.

Научная новизна:

1. С использованием неравновесной термодинамики для прерывных систем, а также полуэмпирических калибровок для температуры и светимости впервые предложен алгоритм расчета производства энтропии звезд на основе существующих данных BV-фотометрии.

2. Впервые для десятков тысяч звезд различных типов из рассеянных и шаровых звездных скоплений на основе современных методик и с использованием специально разработанных программных комплексов, произведен расчет с удовлетворительной точностью теплофизических параметров звезд: эффективной температуры, светимости, полного и удельного (на единицу объема, массы) производства энтропии.

3. Впервые найдено поведение удельного и полного производства энтропии в зависимости от светимости и эффективной температуры для звезд разных типов (звезд главной последовательности (ГП), субгигантов, гигантов и супергигантов).

4. Впервые обнаружено, что для звезд ГП удельное производство энтропии на объем практически одинаково вне зависимости от массы звезды (а также температуры, светимости) и близко по величине к солнечному.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты представляют собой основу для дальнейшего исследования звездной эволюции с точки зрения теплофизики. В частности, эти результаты значимы при анализе справедливости вариационных принципов неравновесной термодинамики, связанных с производством энтропии, для различных этапов развития звезд.

Методология и методы диссертационного исследования. Работа представляет собой теоретическое исследование, ставящее своей целью расчет, обобщение и анализ теплофизических данных, напрямую связанных с излучением звезд в видимой области.

Основной теоретический метод работы основан на классическом аппарате равновесной и неравновесной термодинамики (в варианте для прерывных систем). С помощью него получены используемые в работе основные соотношения, связывающие производство энтропии с температурой и светимостью.

Для расчета теплофизических величин звезд использовались имеющиеся в литературе полуэмпирические калибровочные зависимости, которые связывают эти величины с исходными фотометрическими данными.

Для анализа полученных в работе данных использовались базовые методы математической статистики, включающие построение частотных гистограмм, расчет дисперсии, медианы, моды, коэффициентов эксцесса и асимметрии. С целью автоматизации данного анализа и расчета теплофизических параметров реализован ряд программных инструментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Производство энтропии звезд главной последовательности, субгигантов, гигантов и супергигантов в наибольшей степени определяется процессами теплопереноса в их среднем и приповерхностном слое, равно радиационному потоку энтропии от поверхности фотосферы и может быть рассчитано на основе BV-фотометрии с удовлетворительной точностью.

2. Полное производство энтропии зависит от светимости L степенным образом (коэффициент корреляции более 0.99): для звезд главной последовательности она имеет вид $\Sigma \propto L^{0.88 \pm 0.00}$ ($R^2 = 0.997$), для субгигантов $\Sigma \propto L^{1.10 \pm 0.00}$ ($R^2 = 0.987$) и для гигантов $\Sigma \propto L^{1.03 \pm 0.00}$ ($R^2 = 0.998$). Зависимость удельного производства энтропии звезд с единицы массы от светимости качественно подобна аналогичной зависимости полного производства энтропии.

3. Удельное производство энтропии с единицы объема у звезд главной последовательности находится в узком диапазоне от 0.5 до 2.2 солнечных величин вне зависимости от значения светимости и температуры и оказывается больше соответствующей величины для субгигантов, гигантов и супергигантов.

Личный вклад автора. Постановка задачи и определение направлений исследований, а также выработка алгоритма расчета производства энтропии звезд выполнены совместно с научным руководителем и консультантом. Создание программного модуля для автоматической обработки экспериментальных данных, а также сама обработка выполнены лично соискателем. Анализ результатов эксперимента и подготовка материалов для публикации проведены совместно с научным консультантом.

Достоверность и апробация работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается их внутренней согласованностью, опорой на фундаментальные теплофизические закономерности, использованием ранее апробированных полуэмпирических калибровочных зависимостей, а также подтверждена публикациями и обсуждениями на конференциях.

Результаты исследования были представлены и обсуждены на IV научно-практической конференции студентов и молодых учёных кафедры технической физики (г. Екатеринбург, 2011); Международном молодежном научном форуме «ЛЮМОНОСОВ-2012» (г. Москва, 2012); научной конференции «Физика космоса», (г. Екатеринбург, 2012, 2013, 2014 гг.); 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (г. Киев, 2012); The Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XXII (USA, 2012); European Week of Astronomy and Space Science (EWASS) 2013 (Finland, 2013); Odessa International Astronomical

Gamow's Conference-School "Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology" (г. Одесса, 2013); Международной молодежной научной конференции, посвященной 65-летию основания физико-технологического института (г. Екатеринбург, 2014); II Международной молодежной научной конференции: Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2015 (г. Екатеринбург, 2015); Двадцать первой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (г. Екатеринбург, 2015); The 13th Joint European Thermodynamics Conference (France, 2015); Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (Czech Republic, 2015).

Публикации. Результаты исследования изложены в 21 публикациях, в числе которых 3 статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 статья, опубликованная в сборнике научных трудов, 14 тезисов докладов на международных и российских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем работы – 127 страниц, в том числе 46 рисунков, 5 таблиц, список литературы содержит 134 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность темы, цель диссертационной работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор литературных данных, посвященных астрофотометрическим наблюдениям за звездами и представлениям о происходящих в них неравновесных процессах.

В главе в частности сделаны следующие выводы:

1. Звезды – это сложные физические системы, находящиеся в неравновесном состоянии, которое поддерживается благодаря термоядерным реакциям в их недрах. Поэтому звезда представляет особенный интерес с точки зрения неравновесной термодинамики. Её производство энтропии является важным интегральным параметром, комплексно характеризующим происходящие в звезде процессы.

2. Для звезд и звездных скоплений существует большой объем надежных экспериментальных данных и калибровочных формул, позволяющих рассчитывать основные теплофизические величины (прежде всего эффективную температуру T_{eff} и светимость L), что предоставляет практически неисчерпаемый статистический материал, на котором можно проверять различные гипотезы относительно поведения производства энтропии.

3. Существующие теплофизические модели звезд основаны, в основном, на применении методов локальной неравновесной термодинамики. Результатом таких моделей являются поля температур, давлений и концентраций для вещества и излучения звезды. Эти поля невозможно непосредственно измерить, что сильно сдерживает развитие представлений о происходящих в звездах неравновесных процессах. Более грубые, но, в тоже время, надежные подходы основанные на нелокальной (прерывной) неравновесной термодинамике не получили широкого распространения.

Во второй главе методами прерывной неравновесной термодинамики получено выражение для производства энтропии звезды, пригодное для расчета на основе доступной фотометрической информации.

Для расчета производства энтропии звезды за основу в работе принята общепринятая модель Солнца, в которой выделяются три основных зоны: центральная (ядро звезды, в которой протекают ядерные реакции), средняя (в ней происходит перенос энергии, генерируемой в центральной зоне) и фотосфера (зона, в которой происходит излучение энергии звезды в космос). Для этих зон записаны уравнения баланса вещества, энергии и энтропии.

В соответствии с моделью разбиения звезды на три зоны и предполагая, что спектр излучения звезды в первом приближении подобен спектру излучения абсолютно черного тела, общее производство энтропии Σ в звезде получено в диссертации в виде:

$$\Sigma = \Sigma_c + \Sigma_T + \Sigma_f, \quad (1)$$

$$\Sigma_c = \frac{L}{T_c} + \frac{ds_c}{dt}, \quad (2)$$

$$\Sigma_T = L \left(\frac{1}{T_{eff}} - \frac{1}{T_c} \right), \quad (3)$$

$$\Sigma_f = \frac{1}{3} \frac{L}{T_{eff}}. \quad (4)$$

Здесь Σ_c , Σ_T и Σ_f – производство энтропии в центральной и средней зоне, а также фотосфере звезды, соответственно, ds_c – изменение энтропии в центральной зоне, T_c – температура в центральной зоне, T_{eff} – эффективная температура (температура в фотосфере), t – время.

Обратимся к (2) и оценим в ней отдельные слагаемые. Первое слагаемое пропорционально $\epsilon_0 \nu / T_c$, (здесь ϵ_0 - энергия приходящая на один акт реакции, ν – число термоядерных реакций в секунду), а второе пропорционально $\nu \Delta s$ (Δs – изменение энтропии на один акт реакции). Так как известно, что $\epsilon_0 \sim 10^{-12}$ Дж, $T_c \sim 10^7$ К, а $\Delta s \sim 10^{-21}$ Дж/К, то вторым слагаемым в (2) можно пренебречь. Следовательно, изменением энтропии при термоядерной реакции можно пренебречь и рассматривать процесс излучения звезды неравновесно-стационарным. В результате поток энтропии, покидающий звезду, будет в точности равен производству энтропии внутри нее.

Анализ формул (1-4) показывает, что 75% производства энтропии звезды сосредоточено в средней зоне звезды (в зоне лучистого и конвективного переноса). В фотосфере сосредоточены оставшиеся 25%. Тем самым скорректировано допущенное ранее недоразумение [Kennedy, 1997], что основное производство энтропии звезды вырабатывается в фотосфере.

В третьей главе рассматривается разработанная автором процедура автоматизации расчета температуры, светимости и производства энтропии звезд на основе существующих каталогов первичных астрофотометрических BV-данных.

Были использованы фотометрические данные по рассеянным и шаровым звездным скоплениям из баз Webda и ESPG, соответственно. Для последующего расчета использовались следующие данные звезд: видимая звездная величина V , показателя цвета $(B-V)$, показатель металличности $[Fe/H]$, избыток цвета $E(B-V)$ и модуль расстояния $(m-M)_V$. Последние два коэффициента позволяют учесть ослабление излучения благодаря рассеянию и поглощению межзвездной средой. С их помощью можно найти поправленный показатель цвета $(B-V)_0$ и абсолютную звездную величину M_V .

В расчетах использовались самые последние полуэмпирические калибровки по расчету эффективной температуры T_{eff} на основе значений $(B-V)_0$ [Casagrande, 2010; Ramirez и Melendez 2005; Torres 2010]. Эти калибровочные зависимости были получены в оригинальных работах с помощью аппроксимации полиномом вида $T_{eff} = F((B-V)_0, [Fe/H])$ значений эффективных температур, найденных методами угловых диаметров либо инфракрасных потоков.

Для расчета светимости L применялась формула Погсона

$$L = L_{\odot} \cdot 10^{-0.4 \cdot (M_{bol} - M_{bol \odot})}, \quad (5)$$

где L_{\odot} , $M_{bol \odot}$ - светимость и абсолютная болометрическая звездная величина для Солнца.

Из (1)-(4) следует, что полное производство энтропии звезды:

$$\Sigma = \frac{4}{3} \frac{L}{T_{eff}}. \quad (6)$$

Используя формулу Стефана-Больцмана, можно определить удельное (на единицу объема) производство энтропии Σ_V , как:

$$\Sigma_V = \chi \cdot T_{eff}^5 / \sqrt{L}, \quad (7)$$

где $\chi = 2 \cdot \sigma^{3/2} \cdot \pi^{1/2}$, σ - постоянная Стефана-Больцмана.

В то время как Σ интегрально характеризует звезду как целое, Σ_V усредненная локальная характеристика. Для определения масс звезд в общем случае используются теоретические модели звезд. В диссертационной работе масса необходимых звезд определялась при помощи сравнения диаграмм Герцшпрунга-Рассела (ГР) в координатах $(B-V)_0 - M_V$ с теоретическими изохронами, рассчитанными по модели

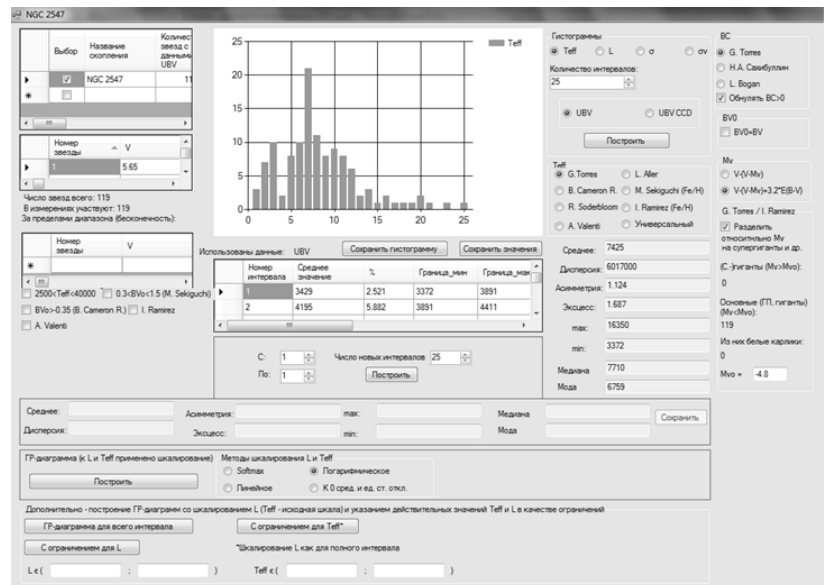


Рисунок 1 – окно программа StarClusters

Bertelly (2009). Эта процедура в диссертационной работе была автоматизирована. Таким образом, расчет удельного производства энтропии с единицы массы Σ_M , в отличие от расчета Σ и Σ_V оказывается основанным не только на опытных данных.

По причине большого объема информации, содержащейся в базах данных звездных скоплений, расчет теплофизических параметров и их статистический анализ занял бы слишком много времени. Поэтому весь алгоритм обработки и анализа фотометрической информации звезд из баз данных звездных скоплений и расчет их теплофизических характеристик был автоматизирован. Для работы с базами данных рассеянных и шаровых скоплений были написаны и запатентованы 3 программы для ЭВМ (в качестве примера см. Рисунок 1).

Погрешность рассчитываемых в работе величин была проанализирована. Определено влияние на конечные теплофизические величины таких факторов, как погрешность исходных фотометрических данных, использование каталогов фотометрии различных авторов и точность полуэмпирических калибровок. Было установлено, что основной вклад в ошибку определения конечных теплофизических величин звезд вносит погрешность фотометрии. Для типичных ошибок для B и V фотометрии в 0.02 звездных величины и для болометрической поправки BC в 0.1 звездных величин относительная ошибка теплофизических величин от точности фотометрических данных существенно зависит от температуры и светимости звезд (Рисунок 2). Так, для звезд с температурой от 4000 К до 6000 К ошибка для T_{eff} , L , Σ и Σ_V не превышает, соответственно, 2%, 4%, 6% и 11%; для звезд с температурой в диапазоне от 6000 К до 8500 К - не превышает, соответственно, 4%, 5%, 8% и 18%. Для звезд с температурой в диапазоне от 8500 К до 10000 К ошибка оказывается не выше, соответственно, 9%, 5%, 13% и 43%, а для звезд с температурой более 12000 К величина ошибки превышает 12%, 7%, 18% и 59%, соответственно. Для звезд, температура которых ниже 3400 К величина ошибки также оказывается достаточно большой – более 5%, 17%, 22% и 32% для T_{eff} , L , Σ и Σ_V , соответственно. Таким образом, наименьшая ошибка определения Σ и Σ_V для звезд, температура которых близка к солнечной.

В четвертой главе для основных типов звезд (ГП, субгиганты, гиганты и супергиганты) рассчитано производство энтропии, приведены зависимости от температуры и светимости производства энтропии звезд и проведено обсуждение.

При отборе данных из баз данных использовались следующие основные критерии: 1) наличие всей необходимой фотометрической информации для расчета Σ , Σ_M и Σ_V ; 2) наличие информации о вероятности принадлежности звезды

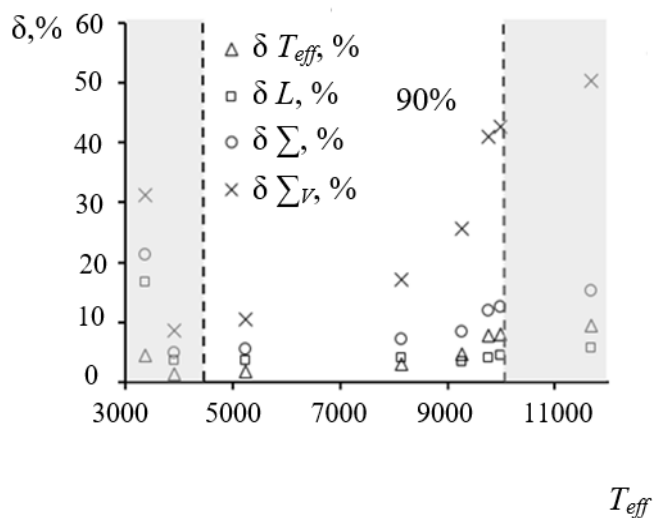


Рисунок 2 – зависимость относительной ошибки теплофизических величин δ от температуры T_{eff} (выбрана предельно возможная ошибка фотометрии). Область, выделенная белым соответствует 90% всех исследованных звезд

скоплению (выбирались звезды с вероятностью более 0.5); 3) ГР диаграммы скоплений должны хорошо аппроксимироваться их теоретическими изохронами; 4) среднеквадратическая ошибка определения фотометрических величин в диапазонах В и V должна быть не более 0.02 звездных величины.

Общее число рассчитанных звезд составило: 10017 для звезд ГП, 1018 субгигантов, 816 гигантов и 36 супергигантов. Исследовались звезды из 13 рассеянных и 2 шаровых скоплений, возраст которых (в логарифмической форме $\log_{10}(t, \text{лет})$) составил: 7.10 (NGC 884), 7.28 (NGC 869), 7.83 (IC 4725), 8.08 (NGC 2516), 8.42 (NGC 1039), 8.45 (NGC 3532), 8.54 (NGC 2099), 8.70 (NGC 2281), 8.896 (Hyades), 8.9 (NGC 2632), 9.05 (NGC 2506), 9.41 (NGC 2682), 9.80 (NGC 188), 10.098 (NGC 6121) и 10.103 (NGC 6656). Приводимые результаты для удобства анализа нормировались на солнечные величины: $T_{eff\odot} = (57 \pm 2) \cdot 10^2 K$, $L_{\odot} = (3.8 \pm 0.6) \cdot 10^{26} \text{Вт}$, $\Sigma_{\odot} = (9 \pm 1) \cdot 10^{22} \text{Вт} \cdot K^{-1}$, $\Sigma_{M\odot} = (4.4 \pm 0.7) \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot K^{-1} \cdot \kappa z^{-1}$, $\Sigma_{V\odot} = (6 \pm 2) \cdot 10^{-5} \text{Вт} \cdot K^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$.

В работе были впервые представлены ГР диаграммы в теплофизических координатах $L - T_{eff}$, для каждого из 15 исследуемых скоплений. Результат объединения ГР диаграмм в теплофизических координатах для всех 15 скоплений представлен на Рисунке 3.

На Рисунке 4 представлены гистограммы Σ (а) и Σ_V (б) для звезд ГП. В результате анализа данных распределений было выявлено, что интервал распределения 95% значений Σ_V примерно в 200 раз меньше чем у Σ и лежит в диапазоне от 0.5 до 2.2 $\Sigma_{V\odot}$.

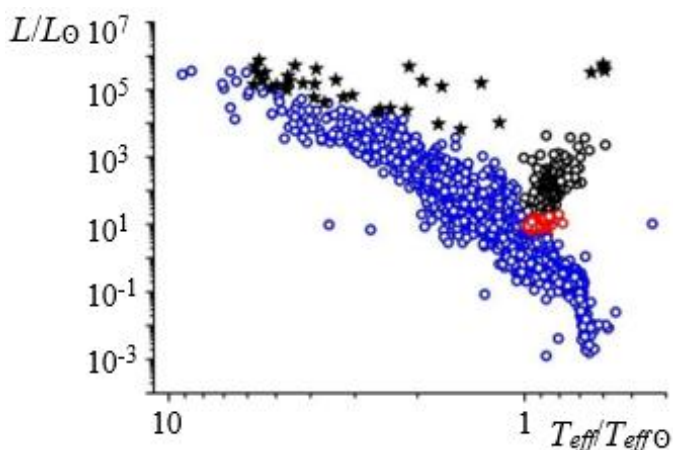


Рисунок 3 – Объединенная ГР диаграмма 15 скоплений. Синим обозначены звезды ГП, красным – субгиганты, черным – гиганты, черным (звездочки) – супергиганты

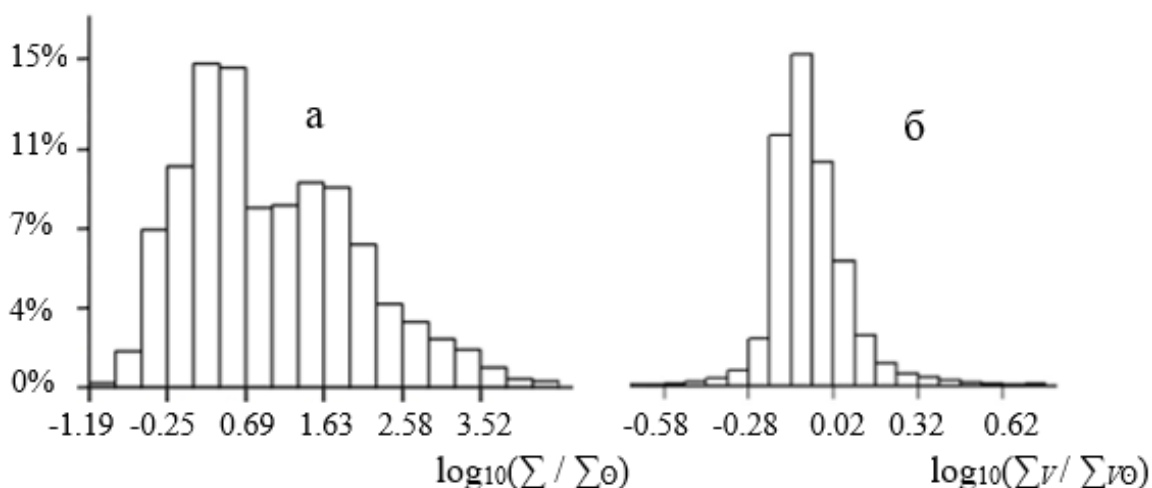


Рисунок 4 - Гистограмма распределения Σ (а) и Σ_V (б) для звезд ГП

Распределение Σ и Σ_V для всех звезд-гигантов (гигантов, субгигантов и супрегигантов) представлено на Рисунке 5. Примечательно, что при последовательном переходе от субгигантов к гигантам и от гигантов к супрегигантам – Σ увеличивается и каждый класс располагается в своих характерных интервалах. Это связано с монотонной зависимостью Σ от светимости звезды. Интервалы распределения для одноименных классов звезд по Σ_V оказались уже, чем для Σ , причем Σ_V возрастает при переходе от гигантов к субгигантам (занимая непересекающиеся интервалы), а распределение значений для супрегигантов охватывает области распределения всех остальных типов звезд.

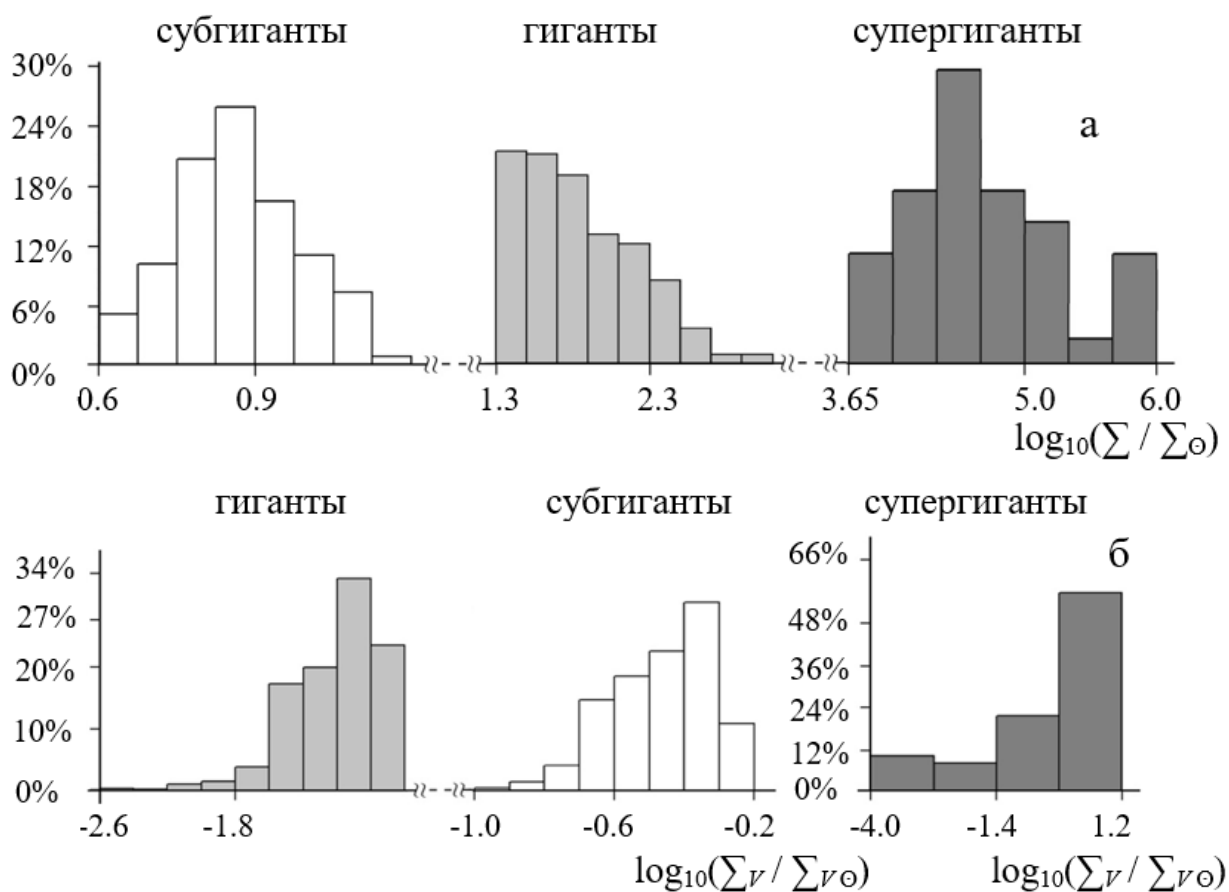


Рисунок 5 - Гистограмма распределения Σ (а) и Σ_V (б) для звезд субгигантов, гигантов и супрегигантов

На Рисунке 6 представлена зависимость Σ (а) и Σ_V (б) от L . Обнаружено, что зависимость Σ от L возрастающая и степенная для звезд всех классов. Так для звезд ГП она имеет вид $\Sigma \propto L^{0.88 \pm 0.00}$ ($R^2 = 0.997$), для субгигантов $\Sigma \propto L^{1.10 \pm 0.00}$ ($R^2 = 0.987$), для гигантов $\Sigma \propto L^{1.03 \pm 0.00}$ ($R^2 = 0.998$) и для супрегигантов $\Sigma \propto L^{0.95 \pm 0.09}$ ($R^2 = 0.732$). Σ_V для звезд ГП при изменении L на порядки лежит в диапазоне близких к солнечным величинам и практически не изменяется. Обнаружено, что Σ_V уменьшается с увеличением L для субгигантов и гигантов, зависимость близка к степенной; для супрегигантов зависимость Σ_V от L возрастающая.

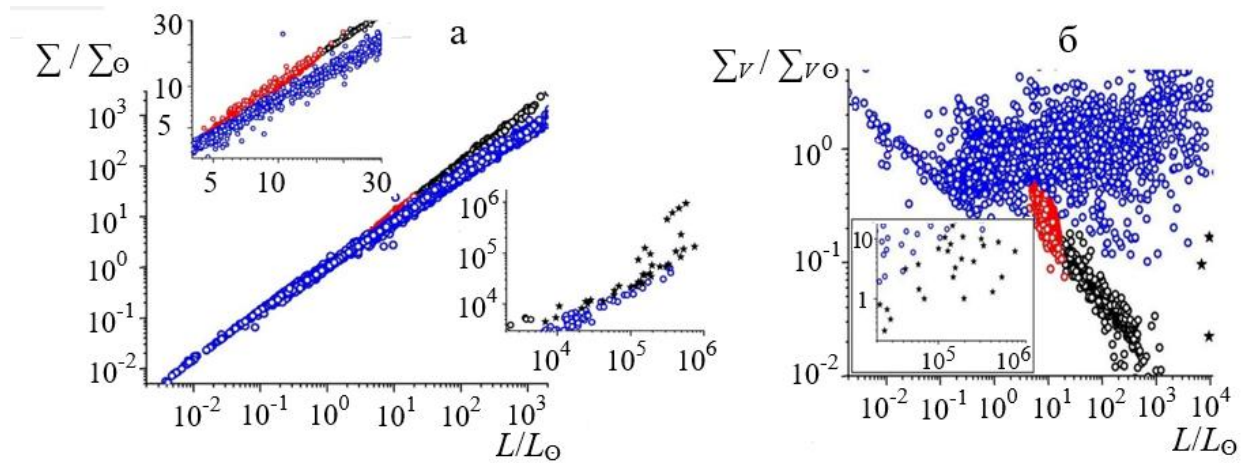


Рисунок 6 - Зависимость Σ (а) и Σ_V (б) от светимости L . Синим обозначены звезды ГП, красным – субгиганты, черным – гиганты, черным (звездочки) – супергиганты

На Рисунке 7 показано как меняется Σ (а) и Σ_V (б) в зависимости от T_{eff} звезд. Σ с возрастанием T_{eff} увеличивается у звезд ГП и супергигантов, а у звезд субгигантов и гигантов уменьшается. Зависимость Σ_V от T_{eff} для звезд ГП практически не меняется и близка к солнечной величине, а для субгигантов, супергигантов и гигантов Σ_V возрастает с увеличением температуры. Стоит отметить, что Σ_V больше для звезд главной последовательности, чем для остальных классов звезд.

В работе также рассчитывалось удельное производство энтропии с единицы массы, которое по поведению оказалось подобно поведению полного производства энтропии от светимости и температуры.

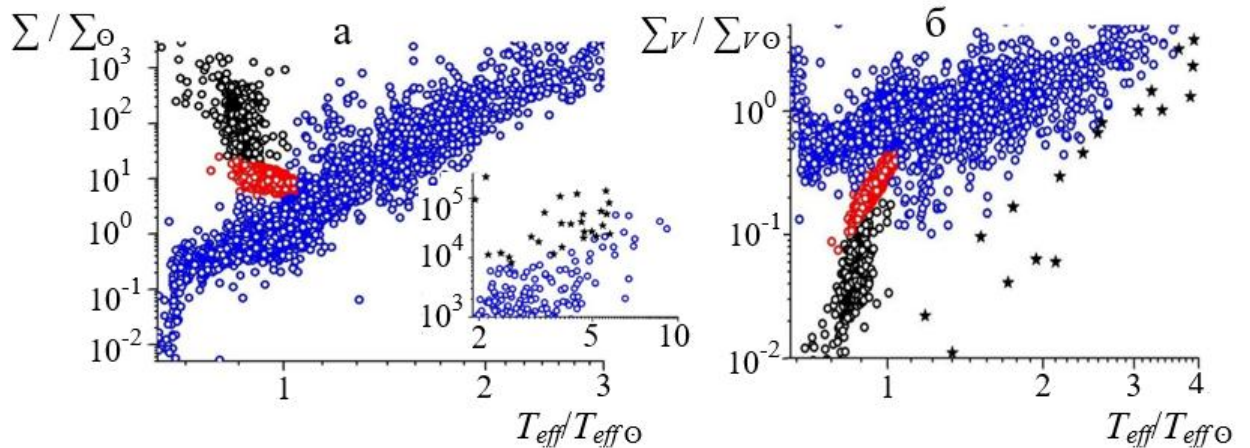


Рисунок 7 - Зависимость Σ (а) и Σ_V (б) от T_{eff} . Синим обозначены звезды ГП, красным – субгиганты, черным – гиганты, черным (звездочки) – супергиганты

Полученный результат относительно неизменности Σ_V у звезд ГП является достаточно неожиданным. Действительно, если бы основным вкладом в производство энтропии были термоядерные реакции, то в силу подобия исходных и конечных продуктов преобразования водорода в гелий для всех звезд ГП различной массы (светимости) такое поведение можно было бы предположить. Однако как показано во второй главе, в силу существенно большей температуры T_c (по сравнению с T_{eff}) в зоне подобной реакции этот вклад в общее производство энтропии звезды оказывается пренебрежимо малым и основной вклад в Σ_V вносят

процессы переноса тепла в средней и внешней зонах, температура, потоки тепла и размеры которых существенно различны для звезд ГП (так, объем исследуемых звезд изменяется в 2 тысячи раз, температура в 5 раз, а светимости в миллион раз).

Из полученных данных следует, что звезды при своем образования (по современным представлениям очень сложного и до конце не изученного процесса), достигают состояния на ГП с одним и тем же удельным производством энтропии, близким к солнечному. Эти звезды находятся в этом состоянии большую часть своей жизни (для звезд близких по массе к Солнцу порядка 10 млрд. лет, а с массой $10M_{\odot}$ около 50 млн. лет), занимая на ГП достаточно протяженную область. Естественно рассматривать данное состояние как некоторое устойчивое (аттрактор), в которое система (вещество из некоторой области галактики) переходит и в котором звезды относительно длительное время сосуществуют друг с другом. Таким образом, на основании полученных данных имеется возможность связать устойчивое сосуществование звезд в сформированном и еще достаточно молодом скоплении с равенством удельного (на объем) производства энтропии у отдельных звезд скопления.

Стоит отметить, что необходимость равенства Σ_V для сосуществования неравновесных подсистем, находящихся в приблизительно подобных внешних условиях, была предположена ранее как следствие принципа максимума производства энтропии и подтверждена при рассмотрении процессов неравновесной кристаллизации и гидродинамической неустойчивости [Martyushev & Seleznev, 2006; Martyushev, 2013]. В этих же работах указывалось, что максимальность удельного производства энтропии обеспечивает устойчивость неравновесного состояния подсистемы, а наличие у ряда подсистем меньшего значения Σ_V приводит к их метастабильности, неустойчивости и, как следствие, значительно меньшему времени существования таких подсистем по сравнению с подсистемой с максимальным производством энтропии. Рассмотрим полученные данные с этой точки зрения. Скопление в наблюдаемый момент времени (в работе исследовались скопления в возрасте от 12.6 млн. до 12.67 млрд. лет) содержит звезды ряда подсистем, среди которых исследованы звезды, относящиеся к главной последовательности, а также субгиганты, гиганты и супергиганты. Три последних типа звезд (подсистем) имеют, согласно проведенным в работе расчетам, меньшее удельное производство энтропии и, следовательно, должны быть менее устойчивыми, наблюдаться меньшее время, преобразовываться в другие объекты. Как хорошо известно из астрофизики, эти классы действительно имеют существенно меньшее время жизни по сравнению с менее массивными звездами ГП и относительно быстро преобразуются в белые карлики, нейтронные звезды и т.д.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. На основе рассмотрения звезды как тела, находящегося в неравновесном стационарном состоянии, и допущения, что фотосфера звезды – абсолютно черное тело, предложена формула для расчета производства энтропии

звезд. Для практического применения этой формулы разработан и программно реализован алгоритм по расчету производства энтропии по существующим фотометрическим BV-данным.

2. При помощи современных калибровок (Casagrande et al, 2010; Ramirez&Melendez, 2005; Torres 2010) связывающих BV-фотометрию с эффективной температурой проведен расчет ГР диаграмм в переменных светимость – эффективная температура для 13 рассеянных (NGC 884, NGC 869, IC 4725, NGC 2516, NGC 1039, NGC 3532, NGC 2099, NGC 2281, Hyades, NGC 2632, NGC 2506, NGC 2682, NGC 188) и 2 шаровых скоплений (NGC 6121, NGC 6656) возраста от 12.6 миллионов до 12.67 миллиардов лет.

3. Найдены производства энтропии (полное Σ , удельное с единицы массы Σ_M и удельное с единицы объема Σ_V) для звезд главной последовательности (ГП), субгигантов, гигантов и супергигантов. Построены гистограммы распределений и зависимости Σ , Σ_M и Σ_V от светимости и эффективной температуры для различных типов звезд.

4. Обнаружено, что полное производство энтропии как функция светимости увеличивается степенным образом для всех исследованных типов звезд и каждый тип звезд занимает свой интервал значений производства энтропии, который не пересекается с соседними. Выявлено, что поведение удельного производства энтропии звезд с единицы массы подобно поведению полного производства энтропии.

5. Обнаружено, что удельное с единицы объема производство энтропии Σ_V у звезд ГП находится в узком диапазоне значений вблизи солнечной величины $(6 \pm 2) \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$ и превышает Σ_V для субгигантов, гигантов и супергигантов. Предложено рассматривать удельное производство энтропии в качестве интегрального теплофизического параметра, характеризующего наиболее устойчивое состояние (аттрактор) при образовании и эволюции звезд.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК

1. **Zubarev S.** Homogenized Hertzsprung-Russell diagram for the open cluster NGC 188 / V. Malyuto, **S. Zubarev**, T. Shvelidze // **Astronomische Nachrichten.** – 2014. – Vol. 335. – №.8. – P. 850–864 (1,0 п.л./0,4 п.л.).
2. **Zubarev S.N.** Entropy Production of Main-Sequence Stars / L.M. Martyshev, **S.N. Zubarev** // **Entropy.** – 2015. – Vol. 2. – №.17. – P. 658–668 (0,8 п.л./0,4 п.л.).
3. **Zubarev S.N.** Entropy Production of Stars / L.M. Martyshev, **S.N. Zubarev** // **Entropy.** – 2015. – Vol. 6. – №.17. – P. 3645–3655 (0,8 п.л./0,4 п.л.).

Свидетельства о регистрации

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ **2013613025** (RU). Программный комплекс Star Clusters (SC) для расчета

- теплофизических параметров звезд рассеянных и шаровых звездных скоплений / **С.Н. Зубарев**, Л.М. Мартюшев – Зарег. 2013.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ **2015615862** (RU). Star Clusters Modeling (SCM) - программный комплекс для моделирования фотометрических данных звездного скопления / **С.Н. Зубарев**– Зарег. 2015.
 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ **2013616042** (RU). «IsoMass» (программный комплекс для определения массы, силы тяжести и теплофизических параметров звезд звездного скопления на основе метода изохрон) / **С.Н. Зубарев** – Зарег. 2015.

Работы в других научных изданиях

1. **Зубарев С.Н.** Программный комплекс по расчету эффективной температуры и производства энтропии у звезд / **С.Н. Зубарев** // **Сб. трудов IV научно-практической конференции студентов и молодых учёных кафедры технической физики 2011 г. – Екатеринбург, 2012. - С. 21-26 (0,3 п.л./0,3 п.л.).**
2. **Зубарев С.Н.** Расчет производства энтропии для ряда рассеянных звездных скоплений с возрастом от 0,005 до 1,699 млрд лет / Л.М. Мартюшев, Е.В. Шаяпин, **С.Н. Зубарев** // **труды научной конференции «Физика космоса», 2012 г. – Екатеринбург, 2012. – С. 265 (0,06 п.л./0,02 п.л.).**
3. **Зубарев С.Н.** Программный комплекс для расчета теплофизических параметров звезд рассеянных и шаровых скоплений / **С.Н. Зубарев** // **Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2012» — М.: Физический факультет МГУ, 2012. – С. 11-13 (0,1 п.л./0,1 п.л.).**
4. **Zubarev S.N.** Statistical analysis of the thermophysical quantities of star clusters / **S.N. Zubarev**, L.M. Martynushev, E.V. Shayapin // **Abstracts of 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics Kyev: Taras Shevchenko National University of Kyev, 2012. – P. 42 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**
5. **Zubarev S.N.** Comparison of modern methods for calculation of effective temperature and bolometric corrections for stars [Электронный ресурс] / **S.N. Zubarev**, L.M. Martynushev // **The Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XXII November 4-8, 2012, University of Illinois, USA, P37** // Режим доступа: <http://www.ncsa.illinois.edu/Conferences/ADASS2012/program/posters.html#Zubarev> свободный. – Яз. англ. **(0,02п.л./0,01 п.л.).**
6. **Зубарев С.Н.** Сравнение методов расчета для звезд эффективной температуры и болометрической поправки / **С.Н. Зубарев**, Л.М. Мартюшев // **труды научной конференции «Физика космоса», 2013 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 158 (0,06 п.л./0,03 п.л.).**
7. **Zubarev S.N.** The effective temperature and entropy production as a function of star age / **S.N. Zubarev**, L.M. Martynushev // **European Week of Astronomy and Space Science (EWASS) 2013, University of Turky, Finland, id: 246 (0,03п.л./0,015 п.л.).**

