Филиал «Международная школа города Астана» автономной организации образования «Назарбаев Интеллектуальные школы»

**Секция:** Наука о Земле и космосе

**Тема:** Исследование структуры и параметров рассеянных звездных скоплений: сравнение наблюдательных данных с результатами численного моделирования

**Исполнитель:**

**Кистафина Томирис –** ученица 9 класса

**Научный консультант: Серік М.Қ**

Содержание

|  |  |
| --- | --- |
| Аннотация | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСA | 6 |
| 1.1 Общие сведения о звездных скоплениях | 6 |
| 1.2 Обзор современных результатов численного моделирования эволюции звездных скоплений  |  6 |
| 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВAНИЯ 2.1 Каталог Gaia Data Release 22.2 Перевод координат и скоростей звезд из экваториальной системы координат в прямоунольную галактическую2.3 Анализ звезд на членство в скоплении3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ | 99 91112 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 17 |
| Список использованной литературы | 18 |

**АННОТАЦИЯ**

Работа объемом в 17 страниц содержит 9 рисунков, список использованных источников состоит из 12 наименований.

**Цель исследования:** провести поиск приливных структур, обнаруженных по результатам численного моделирования, в реально наблюдаемых звездных кластерах.

**Гипотеза: используя данные** использование данных каталога GAIA DR2, в котором приведены астрометрические и фотометрические параметры для беспрецедентно большого числа звезд, измеренные с высокой точностью и гомогенностью, можно найти приливные структуры рассеянных звездных скоплений, которые ранее не удавалось обнаружить на фоне звезд плотного галактического поля

**Этапы исследования:**

1. сделан обзор современного состояния проблемы о формировании и эволюции звездных скоплений
2. проведена первичная обработка данных о положениях и собственных движениях звезд нескольких звездных скоплений,
3. построены диаграммы собственное движение в прямом восхождении – собственное движение в склонении, гистограммы распределения звезд по параллаксам и собственным движениям для нескольких звездных скоплений, по этим диаграммам проведен анализ звезд на членство в этих скоплениях,
4. построено пространственное распределение отобранных звезд в гелиоцентрической галактической декартовой системе координат

**Методика исследования:** анализ кинематических и фотометрических характеристик звезд, приведенных в каталоге GAIA DR2. Для проведения вычислений и построения графиков использовалась среда программирования «Python».

**Новизна исследования:** найдены звезды, которые, согласно проведенным в данной работе предварительным исследованиям, должны составлять приливные хвосты звездного скопления Melotte 22.

**Основные результаты работы:** на основе данных GAIA DR2 проведен анализ звезд на членство в скоплении Melotte 22 и найдены структуры, которые должны являться приливными хвостами.

**Применимость:** результаты работы углубляют наши представления о строении и эволюции звездных скоплений и могут быть использованы в дальнейших исследованиях структуры и эволюции звезд, звездных скоплений, а также химической и динамической эволюции галактик. Кроме того, практическая ценность результатов и содержания исследования определяется возможностью их использования в качестве наглядного материала на практических занятиях по астрофизике, а также при составлении базы данных приливных структур в звездных скоплениях.

**ANNOTATION**

The paper is 17 pages long and contains 9 figures, the list of references consists of 12 titles.

**The aim of the study:** to search for tidal structures detected by the results of numerical simulations in the actually observed stellar clusters.

**Hypothesi**s: using data from the GAIA DR2 catalog, which provides astrometric and photometric parameters for an unprecedentedly large number of stars measured with high accuracy and homogeneity, we can find the tidal structures of scattered stellar clusters, which previously could not be detected in the background of galactic field stars

**Research Stages:**

1) a review of the current state of the problem about the formation and evolution of star clusters was made

2) we carried out primary processing of data on the positions and proper motions of several star clusters,

3) diagrams of proper motions in ascending velocity - proper motions in declination, histograms of distribution of stars by parallax and proper motions for several star clusters were plotted, and using these diagrams the membership of stars in these clusters was analyzed,

4) we plotted the spatial distribution of the selected stars in the heliocentric Galactic Cartesian coordinate system

**Research methodology:** the analysis of kinematic and photometric characteristics of the stars from the GAIA DR2 catalog. The Python programming environment was used for the calculations and graphs construction.

**Novelty of the study:** we found the stars, which, according to the preliminary studies carried out in this work, should make up the tidal tails of the Melotte 22 cluster.

**Main results of the work:** based on GAIA DR2 data, we analyzed stars for their membership in the Melotte 22 cluster and found structures which should be tidal tails.

**Applicability:** the results of the work deepen our understanding of the structure and evolution of star clusters and can be used in further studies of the structure and evolution of stars, star clusters, and the chemical and dynamic evolution of galaxies. In addition, the practical value of the results and content of the study is determined by the possibility of their use as visual material in practical classes in astrophysics, as well as in compiling a database of tidal structures in stellar clusters.

**ВВЕДЕНИЕ**

Рассеянные звездные скопления (РЗС) – гравитационно-связанные звездные системы, в которые входит от нескольких сотен до нескольких тысяч звезд. Благодаря специфике своего расположения и состава рассеянные звездные скопления считаются ключевыми объектами и эффективным инструментом изучения структуры и истории Млечного пути, а также процессов образования и эволюции звезд.

В последние годы стало ясно, что наблюдательные данные и некоторые результаты моделирования относительно эволюции гравитационно-связанных звездных кластеров находятся в противоречии друг с другом. В частности, в данных наблюдений не удавалось обнаружить приливные структуры, которые, согласно численному моделированию, должны наблюдаться в скоплениях среднего возраста, эволюционирующих в приливном гравитационном поле Галактики. Трудности обнаружения этих структур связаны с небольшим количеством звезд в них, из-за чего они терялись на фоне звезд плотного галактического поля. С появлением же каталога GAIA DR2, в котором приведены астрометрические и фотометрические параметры для беспрецедентно большого числа звезд, измеренные с высокой степенью точности и гомогенности, поиск приливных хвостов стал возможным. К настоящему времени с использованием этих данных такие структуры действительно были обнаружены, но только в нескольких скоплениях, чего недостаточно для уверенного подтверждения результатов численного моделирования и для дальнейшего изучения динамической эволюции звездных скоплений.

В связи со сказанным, была поставлена следующая цель настоящей работы:

1. сделать обзор современного состояния вопроса о формировании и эволюции звездных скоплений,;
2. провести поиск приливных структур, обнаруженных по результатам численного моделирования, в реально наблюдаемых звездных кластерах.

Основной каталог данных Gaia DR2, на базе которого велись данные исследования, содержит пятипараметрические астрометрические решения (координаты, собственные движения и параллаксы) для 1 330 млн звезд, видимые звездные величины в фотометрической полосе Gaia G, а также в красной и голубой полосах GBP, GRP для 1 1 380 млн звезд. Массив астрометрических и, в ряде отношений, фотометрических данных Gaia является беспрецедентным по объему и по точности, что и позволило авторам данной работы достичь поставленной цели – у звездного скоплении Melotte 22 найдены структуры, которые, по всем признакам, должны являться его приливными хвостами.

**1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

**1.1 Общие сведения о звездных скоплениях**

Звёздное скопление — гравитационно связанная группа звёзд, имеющая общее происхождение (образованных из одного гигантского молекулярного облака и имеющих примерно одинаковый возраст) и движущаяся в гравитационном поле галактики как единое целое. Некоторые звёздные скопления кроме звёзд содержат также облака газа и/или пыли.

По своей морфологии звёздные скопления исторически делятся на два типа — шаровые и рассеянные. В июне 2011 года стало известно об открытии нового класса скоплений, который сочетает в себе признаки и шаровых, и рассеянных скоплений.

Шаровые скопления - массивные сферические или эллипсоидальные системы с числом звёзд , они относятся к старому населению Галактики. Возраст шаровых скоплений велик, 15 млрд. лет. Рассеянные скопления - типичные представители плоской составляющей диска. Обычно они содержат ~ 103-104 звёзд, т.е. много меньше, чем шаровые скопления, и моложе их. В нашей Галактике открыто более чем 1100 рассеянных скоплений, но предполагается, что их гораздо больше. Звёзды в таких скоплениях связаны друг с другом относительно слабыми гравитационными силами, поэтому по мере обращения вокруг галактического центра скопления могут быть разрушены из-за близкого прохождения возле других скоплений или облаков газа, в этом случае образующие их звёзды становятся частью обычного населения галактики; отдельные звёзды также могут быть выброшены в результате сложных гравитационных взаимодействий внутри скопления. Типичный возраст скоплений — несколько сотен миллионов лет. Рассеянные звёздные скопления обнаружены только в спиральных и неправильных галактиках, где происходят активные процессы звездообразования.

Молодые рассеянные скопления могут находиться внутри молекулярного облака, из которого они были образованы, и «подсвечивать» его, в результате чего возникает область ионизированного водорода. Со временем давление излучения от скопления развеивает облако. Как правило, только около 10 % массы газового облака успевает образовать звёзды, прежде чем остальной газ будет развеян давлением света.

Рассеянные звёздные скопления — ключевые объекты для изучения звёздной эволюции. Благодаря тому, что члены скопления имеют одинаковый возраст и химический состав, эффекты от других характеристик легче определять для скоплений, чем для отдельных звёзд.

**1.2 Обзор современных результатов численного моделирования эволюции звездных скоплений**

Скопления звезд образуются в плотных (> 5-10 × 103см-3) сгустках газа внутри гигантских молекулярных облаков (GMC). Глобальная эффективность звездообразования (SFEgl), т. е. массовая доля звездообразующей области, преобразованной в звезды, определяется как

|  |  |
| --- | --- |
| , (1.1) |  |
|   |
| где M⋆ - полная звездная масса, а Mgas – масса не переработанного газа. |  |

Эффективность звездообразования (SFE), измеренная по наблюдениям, варьируются от нескольких до 30 процентов для плотных сгустков в молекулярных облаках и от 0,1 процента до нескольких процентов для GMC-хозяев.

Есть несколько механизмов (звездный ветер, ионизирующее излучение, давление излучения, взрывы сверхновых II типа), которые могут прервать процесс звездообразования и выдавить не переработанный газ из скопления [1-4]. Наблюдаемые рассеянные скопления (open clusters) возрастом старше, чем 10 Mлет уже не имеют газа [5,6]. Продолжительность процесса звездообразования (SF) составляет порядка 1 Mгода, как можно заключить из наблюдений молодых звездных скоплений, показывающих, что возраст звезд в них лежит в диапазоне от 0,3 млн. до 5,0 млн. лет [7].

Таким образом, в процессе образования гравитационно-связанных звездных кластеров можно выделить три фазы: 1) звездообразование (SF), 2) вытеснение остаточного звездообразующего газа и 3) бурная релаксация, являющаяся динамическим ответом кластера на вытеснение газа (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема формирования звездного скопления

Динамика звезд в молодых кластерах в период их образования и после вытеснения газа пока еще не полностью понятна. Этот вопрос в последние годы был предметом интенсивного исследования с применением различных методов, начиная с метода прямого N-body моделирования. В частности, было выяснено, что эволюционируя в приливном поле галактики, рассеянные звездные скопления со временем начинают распадаться, образуя в некоторых местах, соответсвующих точкам Лагранжа примерно в направлении движения (на орбите) скопления, области чуть повышенной концентрации, называемые приливными хвостами. На рисунке 1.2 для примера показан вид звездного скопления с приливными хвостами согласно численному моделированию, проведенному исследователями нашей лаборатории вычислительной астрофизики КазНУ им. аль-Фараби совместно с учеными Института астрофизик Хайдельбергского университета. Возраст м скопления 220 Млет, количество звезд – 20690, галактическая долгота - 560.505, галактическая широта - +240.37, гелиоцентрическое расстояние - ≈130 пк [8].



Рисунок 1.2 – Пространственное распределение звезд скопления возрастом 220 Млет в проекции на плоскость *XY* по результатам численного моделирования

Однако в данных наблюдений приливные структуры обнаружить не удавалось. Трудности их обнаружения связаны с небольшим количеством звезд в них, из-за чего они терялись на фоне звезд плотного галактического поля. С появлением же каталога GAIA DR2, в котором приведены астрометрические и фотометрические параметры для беспрецедентно большого числа звезд, измеренные с высокой степенью точности и гомогенности, поиск приливных хвостов стал возможным. Этому и посвящена настоящая работа

**2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**2.1 Каталог Gaia Data Release 2**

Данные исследования велись на базе данных обнародованного в 2018 г. основного каталога данных Gaia DR2, который содержит пятипараметрические астрометрические решения (координаты, собственные движения и параллаксы) для 1 330 млн звезд, видимые звездные величины в фотометрической полосе Gaia G, а также в красной и голубой полосах GBP, GRP для 1 1 380 млн звезд [9]. Массив астрометрических и, в ряде отношений, фотометрических данных Gaia является беспрецедентным по объему, точности и гомогенности, что, в частности, позволяет вести намного более эффективный, чем ранее, поиск и исследование различных структур в Галактике.

Кроме того, Gaia предоставляет пользователю не только обработанные данные, но и большое число технических характеристик параметров их обработки, что позволяет исследователю при обращении к этим данным делать сознательный выбор в отношении требуемых параметров своей выборки

**2.2 Перевод координат и скоростей звезд из экваториальной системы координат в прямоунольную галактическую**

Переход от сферических координат к декартoвым осуществляется пo следующим фoрмулам:



(2.1)

В каталоге Gaia наряду с экваториальными координатами звезд можно получить и их галактические координаты. Для галактической системы координат основной плоскостью является плоскость симметрии нашей Галактики. Отметим, что Солнце не лежит в плоскости Галактики, его положение смещено приблизительно на 10 парсек в сторону северного галактического полюса. Северный полюс Галактики находится в созвездии Волосы Вероники и для него в настоящее время приняты следующие значения экваториальных координат AG = 1920.85948, DG = +270.12825 на равноденствие 2000.0.  Галактическая долгота l отсчитывается от направления на центр Галактики против часовой стрелки, если смотреть с ее северного полюса. Галактическая широта b отсчитывается от плоскости Галактики в направлении ее полюса, прочем широта считается положительной по направлению к северному полюсу Галактики, и отрицательной - к южному. Галактические координаты не меняются со временем, как меняются экваториальные координаты вследствие прецессии земной оси, так как с Землей они не связаны.

Для расчета галактических гелиоцентрических декартовых координат в формулы (2.1) вместо зенитного угла θ подставлялась величина $90^{0}-b$, вместо φ – галактическая долгота l, а расстояние до звезд скопления вычислялось нами как обратный параллакс (так как расстояние до исследованных скоплений невелико), значения которого тоже приводится в каталоге Gaia.

Формулы для пересчёта собственных движений из экваториальной системы координат в галактическую, необходимо осуществить поворот системы координат, связанной с объектом на угол, составляемый на небесной сфере большими кругами, проходящими через объект и полюс мира, объект и полюс Галактики [10]. В этом случае:

(2.2)

|  |
| --- |
| http://images.astronet.ru/pubd/2010/09/27/0001247260/form/form.1.2.gif |

Выражения для тригонометрических функций угла φ можно получить, рассматривая соответствующий полярный треугольник (см. рисунок):

|  |  |
| --- | --- |
| http://images.astronet.ru/pubd/2010/09/27/0001247260/form/form.1.3.gif

|  |
| --- |
| Небесная сфера |

 |

Рисунок 2,1 – Полярный треугольник для перехода от экваториальной к галактической системе координат

Затемполучаем вектор гелиоцентрической скорости в галактической сферической системе координат:



 (2.3)

здесь k = 4.741 км/с /(кпк·mas/год).

И, наконец, для расчета компонент скорости в галактической гелиоцентрической прямоугольной системе координат используем формулы

******

 (2.4)

**2.3 Анализ звезд на членство в скоплении**

Задача выделения звезд, принадлежащих к звездному скоплению, не является тривиальной, так как звезды скопления теряются на фоне плотного галактического звездного поля. Методы анализа звезд на членство в скоплении основываются на том, что звезды скопления, помимо близкого пространственного расположения, имеют близкий возраст и сходные собственные движения.

Таким образом, звезды одного скопления на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, а значит, и на диаграмме звездная величина – показатель цвета должны располагаться вблизи изохроны соответствующего возраста. Кроме того, на диаграмме собственное движение в прямом восхождении – собственное движение в склонении эти звезды должны располагаться близко друг к другу, образуя область повышенной по сравнению с полем концентрации.

**3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

На основе данных каталога Gaia Data Release 2 [11] было исследовано несколько звездных скоплений среднего возраста (не старше 1 Ггода), расположенных на небольшом удалении от нас (не дальше нескольких сот парсек), при этом данные о координатах и движении центров скоплений были взяты из каталога Харченко Н. [12]. Такой выбор возраста обусловлен результатами численного моделирования (скопление не должно быть слишком молодым, чтобы успеть начать разрушаться, но и не должно быть слишком старым, чтобы не разрушились и приливные хвосты). Не очень большая удаленность обеспечивает большую полноту и точность параметров выборки звезд. Приливные структуры были найдены у скопления Melotte 22, поэтому в данной главе приводятся результаты исследования этого объекта.

Из каталога Gaia Data Release 2 были отобраны данные о пространственном распределении, фотометрических и кинематических характеристиках звезд на участке небесной сферы вокруг скопления Melotte 22 и сделана их первичная обработка.

Для анализа этих звезд на членство в скоплении для них построено несколько диаграмм, которые приведены на рисунках 3.1-3.4. На рисунке 3.1 (а) представлена диаграмма собственного движения для всей выборки, на рисунке 3.1 (б) (средняя панель рисунка) по оси Х отложено собственное движение в прямом восхождении, а по оси У – расстояние, на рисунке 3.1 (в) (правая панель рисунка) по оси Х отложено собственное движение в склонении, по оси У – расстояние. На всех трех рисунках звезды видна область повышенной концентрации звезд, центр этой области приходится на точку со следующими координатами: $pm\_{ra}≅20 ms/year $, $pm\_{dec}≅-46 ms/year$, $r≅135 kpc$. Это и есть наше скопление Melotte 22, на рисунке 3.1 (а) оно выделено зеленым цветом. Также обращает на себя внимание пустоты на рисунках, соответствующие нулевым собственным движениям как в прямом восхождении, так и в склонении. Так как мы отбирали из каталога звезды с небольшим гелиоцентрическим расстоянием (параллакс > 2 mas), изменение их положения в пространстве относительно Солнца будет иметь отображение в изменении их сферических (угловых) координат, т.е. в близкой окрестности Солнца нет звезд с нулевым или почти нулевым собственным движением.



Рисунок 3.1 – Диаграммы собственное движение в прямом восхождении (pmRA, mas/год) – собственное движение в склонении (pmDec mas/год) (а), собственное движение в прямом восхождении - расстояние (в килопарсеках) (б), собственное движение в склонении - расстояние (в) для звезд на участке небесной сферы вокруг скопления Melotte 22 по данным каталога Gaia Data Release 2

На рисунках 3.2 и 3.3 представлены гистаграммы распределения звезд полной выборки по собственным движениям в прямом восхождении и в склонении, а на рисунке 3.4 – гистаграмма распределения этих звезд по параллаксам. На рисунках видны четкие пики около значений $pm\_{ra}≅20 ms/year $, $pm\_{dec}≅-46 ms/year$, $π≅7,4 ms$, звезды в пределах этих пиков должны быть звездами нашего скопления.

Для отобранных таким образом звезд, т.е. звезд, с высокой вероятностью принадлежащих скоплению было построено их пространственное распределение в гелиоцентрической галактической декартовой системе координат. Начало этой системы координат находится в центре Галактики, ось Х направлена от нас к центру Галактики, ось Z - к северному полюсу галактики, а ось Y – в направлении вращения Галактики. Результаты этого исследования представлены на рисунках 3.5-3.7.



Рисунок 3.2 – Гистаграмма распределения звезд полной выборки по их собственным движениям в прямом восхождении



Рисунок 3.3 – Гистаграмма распределения звезд полной выборки по их собственным движениям в склонении



Рисунок 3.4 – Гистаграмма распределения звезд полной выборки по их параллаксам



Рисунок 3.5 – Проекция пространственноого распределения звезд скопления Melotte 22 на плоскость *XZ* в гелиоцентрической галактической декартовой системе координат.



Рисунок 3.6 – Проекция пространственноого распределения звезд скопления Melotte 22 на плоскость *YZ* в гелиоцентрической галактической декартовой системе координат.



Рисунок 3.7 – Проекция пространственноого распределения звезд скопления Melotte 22 на плоскость *XY*  в гелиоцентрической галактической декартовой системе координат.

На этих рисунках четко видна центральная область повышенной концентрации (звезды скопления), при этом некторые звезды уже вышли из него на значительное (существенно большее размеров скопления) расстояние в направлении, близком к направлению движения скопления (вперед и назад по движению). При этом эти звезды образуют в некоторых областях пространства участки немного увеличенной концентрации. Как показало ранее проведенное численное моделирование динамики рассеянных звездных скоплений, эволюционируя в приливном поле галактики, скопления со временем начинают распадаться, образуя в некоторых местах, соответсвующих первой и второй точкам Лагранжа области чуть повышенной концентрации, называемые приливными хвостами (см. Рис. 1.2). Хотя эти точки лежат на прямой, соединяющей скопление с центром Галактики, за счет орбитального движения скопления и приливных сил, действующих на него со стороны гравитационного поля Галактики, один приливный хвост опережает скопление, а другой – отстает, так что они располагаются примерно в напраление движения скопления относительно локального стандарта покоя (точки в окрестности Солнца, скорость которой равна средней скорости звёзд, населяющих эту окрестность), но чуть смещаются по оси Х. Таким образом, можно сделать вывод, что на рисунках 3.6-3.7 видны приливные хвосты скопления Melotte 22.

**Заключение**

В заключение перечислим основные этапы проделанной работы, результаты и выводы.

1. Сделан обзор современного состояния вопроса о формировании и эволюции звездных скоплений, а также проблемы их поиска в наблюдательных данных и анализа звезд на членство в скоплениях.
2. Из каталога Gaia Data Release 2 отобраны данные о пространственном распределении, фотометрических и кинематических характеристиках звезд на участке небесной сферы вокруг скопления Melotte 22 и сделана их первичная обработка.
3. Для этих звезд построены диаграммы собственное движение в прямом восхождении – собственное движение в склонении, а также гистограммы распределения звезд по их собственным движениям и параллаксам, по этим диаграммам проведен анализ звезд на членство в скоплении Melotte 22.
4. Для звезд скопления Melotte 22, отобранных с помощью такого анализа их кинематических и пространственных характеристик, построено пространственное распределение в галактоцентрической декартовой системе координат.

Получено, что это скопление вытянуто примерно в направлении своего движения относительно локального стандарта покоя, т.е. показано, что значительное количество звезд начало выходить из скопления в этом направлении, образуя в некоторых областях за пределами скопления структуры с повышенной концентрацией. Таким образом, найдены структуры, которые могут быть приливными хвостами скопления. Для надежного подтверждения этого вывода необходимо дальнейшее исследование.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Krumholz, Mark R.; Matzner, Christopher D. The Dynamics of Radiation-pressure-dominated H II Regions // The Astrophysical Journal, 2009, Volume 703, Issue 2, pp. 1352-1362
2. Murray, Norman; Quataert, Eliot; Thompson, Todd A. The Disruption of Giant Molecular Clouds by Radiation Pressure & the Efficiency of Star Formation in Galaxies // The Astrophysical Journal, 2010, Volume 709, Issue 1, pp. 191-209
3. Sami Dib, Julia Gutkin, Wolfgang Brandner, Shantanu Basu. Feedback-regulated star formation – II. Dual constraints on the SFE and the age spread of stars in massive clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013*, Volume 436, Issue 4, Pages 3727–3740
4. Philip F. Hopkins, Desika Narayanan, Norman Murray and Eliot Quataert. Dense molecular gas: a sensitive probe of stellar feedback models // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*,* Volume 433, 2013, Pages 69-77 MNRAS 433, 69–77
5. Leisawitz, David; Bash, Frank N.;A, Thaddeus, Patrick CO survey of regions around 34 open clusters // Astrophysical Journal Supplement Series (ISSN 0067-0049), 1989, vol. 70, p. 731-812

## Lada, Charles J.; Lada, Elizabeth A. Embedded Clusters in Molecular Clouds // Annual Review of Astronomy &Astrophysics, 2003, vol. 41, pp.57-115

1. Reggiani, M.; et.al. Quantitative evidence of an intrinsic luminosity spread in the Orion nebula cluster // Astronomy & Astrophysics, 2011, Volume 534, id.A83, 12 pp.
2. Shukirgaliyev, Bekdaulet, Geneviève Parmentier, Andreas Just, and Peter Berczik (2018a). “The Long-term Evolution of Star Clusters Formed with a Centrally Peaked Star Formation Efficiency Profile.” In: ApJ 863, 171, p. 171. doi: 10.3847/1538-4357/aad3bf.
3. <https://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/345>
4. Локтин А.В., Марсаков В.А. Звездная астрономия в лекциях. Южный федеральный университет, 2010.
5. <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/345&-to=2>
6. <https://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?J/A+A/543/A156>