

Научно – исследовательская работа  
Астрономия

Исследование цефеид  
как объектов для определения расстояния в космосе

Выполнил  
Пермяков Михаил Евгеньевич,  
МБОУ Гимназия №1,  
4-2 класс, г. Челябинск

Папулова Наталика Владимировна,  
научный руководитель,  
педагог дополнительного образования  
МАУ ДО «ДПШ»,  
г. Челябинск

## «Исследование цефеид как объектов для определения расстояния в космосе»

**Пермяков Михаил Евгеньевич**

г. Челябинск, МАУДО «ДПШ» им. Н.К. Крупской, 4 класс

### Содержание

	Введение	3
1	История обнаружения цефеид	4
2	Маяки Вселенной	6
2.1	Соотношение период - светимость	7
2.2	Постоянная Хаббла	8
2.3	Распределение цефеид в галактике	8
3	Классификация цефеид	9
4	Природа переменности цефеид	9
5	Как становятся цефеидами	11
6	Создание макета	12
	Вывод	13
	Список источников информации	14
	Приложение А	

## Введение

Изучая переменные звезды, я узнал, что некоторые звезды меняют свой видимый блеск вследствие периодических затмений одной звезды другой, а истинная светимость звезд при этом не меняется, например, система Алголь. Но есть такие переменные звезды, которые физически меняют свою светимость. Параллельно с изменением блеска меняются их цвет и температура, а иногда и размеры. Среди звезд переменного блеска наибольший интерес представляют цефеиды.

Цефеиды — огромные переменные звезды с мерно вздымающейся и опускающейся под действием внутренних сил поверхностью. Они меняют яркость строго периодически из-за изменения температуры и радиуса звезды.

Важность изучения цефеид в том, что, ориентируясь по их переменному блеску, астрономы выясняют расстояния до небесных объектов. Цефеиды являются своего рода маяками Вселенной .

Целью моей работы стало теоретическое исследование физических свойств цефеид в связи с использованием их для определения расстояний в космосе.

Для этого поставлены следующие задачи:

- изучить источники информации по теме;
- определить причины изменений блеска и зависимости период-светимость;
- создание макета, помогающего понять физическую сущность переменности цефеид.

Актуальность темы в изучении закономерностей развития переменных звезд, которое дает представление о масштабах Вселенной, о возрасте Вселенной и ее будущего.

Объект исследования – цефеиды.

Предмет исследования – причины переменности звезды.

Гипотеза: цефеиды играют ключевую роль в познании расстояний до объектов глубокого космоса, размеров Вселенной и являются мощным инструментом её исследования.

В работе были использованы следующие методы исследования: анализ теоретических источников информации, сравнение, наблюдение, моделирование.

## **1 История обнаружения цефеид**

На рубеже XVI и XVII вв. астрономы обнаружили первую переменную звезду – Миру Кита.

В 1669 г. Дж. Монтанари обнаружил переменность Алголя. Прошло еще около столетия, и в Англии два любителя астрономии Э.Пиготт и Дж.Гудрайк впервые организовали систематические наблюдения переменных звезд. Первой открытой звездой этого вида стала  $\eta$  (эта) Орла, переменность которой в 1784 обнаружил английский астроном Эдуард Пиготт. Джон Гудрайк открыл изменчивость  $\delta$  Цефея несколько месяцев спустя. Но позднее эталоном подобных пульсирующих звезд стала именно  $\delta$  Цефея, по имени которой их и называли «цефеидами» (Рисунок А.1).

В 1786г. Пиготт опубликовал первый список переменных звезд. В этом списке 12 объектов, все они действительно переменные звезды (две сверхновые, одна новая, 4 звезды типа Миры Кита, две цефеиды, две затменных звезды, а также пекулярный (странный) новоподобный объект Р Суг).

Наблюдения переменных звезд поначалу велись визуальным методом, поэтому число открытых объектов росло медленно: в последующие 100 лет их было найдено немногим более сотни, включая десяток цефеид. Выдающуюся роль в развитии науки о переменных звездах сыграл член-корреспондент Российской академии наук Ф.Аргеландер, директор Боннской обсерватории. В ходе этой работы удалось открыть несколько переменных звезд. Главная заслуга ученого состоит в том, что Аргеландер призвал к наблюдениям любителей астрономии - сотрудничество любителей и профессионалов в области исследований переменных звезд с тех пор постоянно крепнет и, вероятно, сейчас является единственным примером действительно полезного для науки «любительства». Так, полный каталог переменных звезд, составленный в 1875г. Э.Шенфельдом, учеником Аргеландера, содержал 143 звезды.

Лишь после начала массовых фотографических наблюдений звездного неба рост количества выявленных переменных звезд становится стремительным. Инициатором таких наблюдений стал директор Гарвардской обсерватории (США) Э.Пикеринг. Он организовал фотографический патруль всего неба. Он разработал систему классификации переменных звезд, уже имеющие многие черты сходства с современной. К завершению научной деятельности Пикеринга счет переменным звездам шел уже на тысячи. Но фотографические методы давали большие ошибки и не позволяли надежно определить расстояния до цефеид и выяснить их физические свойства.

Ситуация качественно изменилась с появлением фотоэлектрических фотометров, в которых регистрация светового излучения основана на фотоэффекте (преобразование световой энергии излучения в электрическую). Точность измерений блеска повысилась во много раз, а главное - стало возможным проводить точные наблюдения звезд в различных участках спектра, что позволило определять температуру каждой звезды, расстояние и т.п.

Массовые измерения блеска цефеид стали проводиться с начала 1950-х годов, и в течение двух десятилетий интенсивность наблюдений оставалась высокой в обсерваториях многих стран, за исключением нашей. Именно в это время С.А.Жевакиным были заложены физические основы теории цефеид, объяснены причины пульсаций этих звезд [11]. И когда в семидесятых годах число проводимых наблюдений цефеид повсеместно стало быстро уменьшаться из-за переключения ученых на более “модные” направления, эстафету исследований подхватили в нашей стране. С начала восьмидесятых цефеиды стали активно и регулярно наблюдаться только у нас: в течение последующих двадцати пяти лет было получено свыше 75 тыс. наблюдений, что составляет сейчас около 60% всего мирового наблюдательного материала цефеид в этой стандартной системе.

В настоящее время в Общем каталоге переменных звезд зарегистрировано около 700 цефеид Галактики, периоды пульсаций которых заключены в пределах от одного до 68 дней[3].

## 2 Маяки Вселенной

Одной из главных задач астрономов является определение расстояния до космического объекта. Наблюдая в телескоп за космическим объектом, мы не можем сказать, далеко он или близко, большой или маленький. Возможно, объект закрыт от нас пылевыми облаками и его свет еле доходит до нас, или, наоборот, мы видим его сквозь чистое пространство и можем достоверно определить его характеристики. Как вообще астрономы определяют расстояния до планет, звезд нашей Галактики и звезд соседних галактик?

Для измерения расстояния до Луны или до любой планеты Солнечной системы можно воспользоваться методом триангуляции, т.е. совершать наблюдения с разных ракурсов (Рисунок А.2). Например, наблюдая за Луной можно измерить угол наблюдения в начале ночи и в конце. Благодаря вращению Земли мы смещаемся в пространстве на известное расстояние - базис. Затем по известным двум углам и одной стороне (базису) можно построить треугольник. В полученном треугольнике находим значение третьего угла – параллакс и определяем расстояние до Луны. Это надежный и простой способ, которым пользуются с древних времен до настоящего времени. С середины прошлого столетия астрономы начали использовать радиолокацию, что позволило получить более точные расстояния до объектов Солнечной системы. Данный метод работает в пределах Солнечной системы, так как дальше сигнал теряет свою мощность и, отражаясь от далеких объектов, не доходит до нас обратно.

Когда речь заходит о расстоянии до ближайших звезд, тут уже размеры Земли становятся малы. Нужен базис больше. В этом случае используют орбиту вокруг Солнца. Измерения углов производят с интервалом в полгода. Но из-за влияния атмосферы определить расстояние до многих ближайших звезд было не возможно. С появлением на орбите вокруг Солнца специального телескопа стало возможным измерять точно расстояние до всех Звезд нашей Галактики!

Как же нам измерить расстояние до звезд соседних галактик и самых далеких звезд нашей Вселенной? Для этого нужно использовать стандартные «свечи» – цефеиды.

## 2.1 Соотношение период-светимость

В 1908 году американский астроном из Гарварда Г. Ливитт заметила странное соотношение, наблюдая цефеиды в Малом Магеллановом Облаке (ММО). Для 16 из них ей удалось определить периоды. На рисунке А.3, заимствованном из исторической работы Г. Ливитт, показано, как связана с периодом видимая звездная величина цефеид ММО в максимуме и в минимуме. Эта закономерность получила название зависимости “период-светимость” [6].

В те годы уже знали, что звезды в ММО находятся практически на одинаковом расстоянии от нас. А это значит, что соотношение между периодом и видимым блеском отражает связь между периодом и истинной светимостью звезды (ее абсолютной звездной величиной). Определив мощность излучения близких цефеид другими способами (измерив тригонометрический параллакс, установив так называемый статистический параллакс или воспользовавшись данными о цефеидах в звездных скоплениях с известными расстояниями) и сравнивая истинную светимость и видимую яркость звезды, с помощью зависимости “период-светимость” можно найти расстояния до далеких цефеид.

Таким образом, чтобы узнать расстояние до цефеиды достаточно определить период ее пульсации и видимую звездную величину. Получаем метод измерения расстояния до других галактик.

Благодаря этой зависимости цефеиды стали играть важнейшую роль в астрономии: по сравнению с другими объектами расстояния до далеких цефеид можно определить легче и точнее. Это имеет огромное значение для всех определений шкалы расстояний во Вселенной.

Проблемы метода Г. Ливитт

- неравномерное взаимоотношение период – светимость в разных полосах частот электромагнитного спектра;
- влияние металличности;
- непредсказуемое поглощение света межзвездной пылью.

Все эти факторы могут оказать серьезное влияние на шкалу расстояний, если опираться только на 1 -2 звезды.

К счастью, цефеид в Галактике очень много, и это позволяет проводить калибровку одних звезд другими, все время проверяя и уточняя расчеты [9].

## 2.2 Постоянная Хаббла

Так, открытие цефеид в галактиках М 31, М 33 и NGC 6822 позволило американскому астроному Э.Хаббл в 1927-1928 гг. оценить расстояние до них и окончательно доказать, что они лежат за пределами нашей Галактики и представляют собой самостоятельные крупные звездные системы. Можно сказать, что именно цефеиды “переместили” наше Солнце из центра единственной (как казалось прежде) звездной системы Млечного Пути на окраину одной из бесчисленного множества таких систем. Сейчас это является ключом для решения вопроса о возрасте Вселенной, ее прошлом и будущем.

С апреля 1990 г. на орбите работает космический телескоп имени Хаббла, программой наивысшего приоритета которого объявлена программа поиска цефеид в скоплении галактик в Деве для уточнения расстояния до этого скопления. Эти расстояния используются затем для определения постоянной Хаббла.

Постоянная Хаббла – это число (коэффициент), которое связывает расстояние до внегалактического объекта со скоростью его удаления. Наиболее надёжная оценка постоянной Хаббла на 2013 год составляет  $67,80 \pm 0,77$  (км/с)/Мпк. В 2016 году эта оценка была уточнена до  $66,93 \pm 0,62$  (км/с)/Мпк. Таким образом, в современную эпоху две галактики, находящиеся на расстоянии в 1 Мпк, в среднем разлетаются от нас со скоростью около 67 км/с. В расширяющейся Вселенной постоянная Хаббла изменяется со временем, но термин «постоянная» говорит о том, что в каждый данный момент времени во всех точках Вселенной постоянная Хаббла одинакова[14].

## 2.3 Распределение цефеид в Галактике

Имеющиеся данные позволяют вычислить надежные расстояния для почти 600 цефеид. На рисунке А.4 показано их распределение в плоскости Галактики. Солнце расположено в центре рисунка, положение центра Галактики (внизу в центре) отмечено крестом. Цефеиды изображены кружками, диаметры которых

пропорциональны периодам в масштабе, показанном внизу слева. Эти цефеиды принадлежат плоской составляющей Галактики, поэтому их пространственное распределение отражает реальную структуру галактического диска.

### 3 Классификация цефеид

Различают два типа цефеид:

– классические цефеиды, принадлежащие к молодой плоской составляющей звёздного населения I Галактики. Это желтые яркие гиганты или сверхгиганты (F6-K2), чей радиус меняется в миллионы км во время пульсации.

– цефеиды типа W Девы, относящиеся к старой сферической составляющей населения II.

Классические цефеиды встречаются, как правило, в рассеянных звёздных скоплениях, а цефеиды типа W Девы — в шаровых скоплениях, их светимость примерно в 4 раза (на 1,5m) ниже, чем у классических цефеид.

Классические цефеиды являются проэволюционировавшими звёздами спектрального класса В с массами 3—12 солнечных. Периоды классических цефеид зависят не только от их масс, но и от возраста — по мере эволюции цефеиды её период уменьшается: для возраста  $\sim 10^7$  лет период составляет около 50 суток, а для возраста  $\sim 10^8$  лет — порядка суток.

Есть также аномальные цефеиды. Их периодичность составляет 2 дня (как RR Лиры), но они светятся намного ярче. Превосходят цефеиды II по массе, но возраст остается неизвестным.

### 4 Природа переменности цефеид

Во время пульсаций изменяются размеры (до 10%), показатели цвета, и температура (в максимуме блеска цефеиды голубее и горячее). В максимуме все цефеиды имеют спектральный класс F5, а спектральные классы в минимуме бывают разными, от класса G до сравнительно высокотемпературных подклассов спектрального класса K: чем длиннее период, тем более холодной звезде соответствует спектр (Рисунок А.5).

Как живут обычные стабильные звезды? Причина, по которой звезда не сжимается под действием своего собственного тяготения, состоит в том, что ее недра состоят исключительно из горячих сильно сжатых газов. Газы при высоких температурах оказывают огромное давление к периферии звезды, уравнивая тем самым гравитацию. Колебания цефеид - это результат происходящего внутри звезды состязания между газовым давлением, с одной стороны, и тяготением, с другой [3].

Причиной пульсации цефеид является разница свойств частично ионизированного и дважды ионизированного гелия. Дело в том, что гелий присутствует в атмосфере цефеиды (внешний слой). Именно частично ионизированный гелий не дает излучению выйти наружу, и как бы запирает его в этом слое – «клапан закрыт» (Рисунок А.7). Когда количество «непрозрачного» гелия преобладает, это приводит к дополнительному прогреву слоя и его ионизации.

У нейтрального гелия 2 протона, 2 нейтрона и 2 электрона. Если из нейтрального гелия выбить один из электронов, то получится ионизированный гелий с общим положительным зарядом. Но среда настолько горячая, что ионизированный гелий теряет второй электрон и превращается в дважды ионизированный. А такой гелий является прозрачным для излучения.

Когда во внешней оболочке цефеиды преобладает дважды ионизированный гелий, излучение прорывается наружу и поток тепла раздувает оболочку звезды – «клапан открыт». Наступает самая яркая часть цикла.

Чем дальше от центра, тем звезда становится холоднее, и удаленные наружные слои начинают охлаждаться. С охлаждением атомы дважды ионизированного гелия начинают захватывать электроны из плазмы, переходя в нейтральное состояние. Баланс излучение - гравитация нарушился. Цефеида начинает сжиматься, наружные слои опускаются обратно ближе к ядру. А когда масса гелия приближается к ядру, начинается обратный процесс – при сжатии происходит разогрев, повышается доля дважды ионизированного гелия, который снова начинает выпускать энергию и расширяться (Рисунок А.6)[10].

## 5 Как становятся цефеидами

Цефеиды начинают свою жизнь как горячие звёзды спектрального класса В. Цефеидами становятся звезды с массой от 2 до 15  $M_{\odot}$  на стадии термоядерного горения гелия, наступающей после истощения водорода в центральной части звезды. Продолжительность стадии цефеиды находится в интервале от  $10^6$  до  $10^7$  лет.

Будет или не будет звезда пульсировать определяется глубиной “залегания” слоя гелия:

– Если звезда холодная (мала температура фотосферы), слой гелия в глубине, и клапанный механизм не может “раскачать” массивную протяжённую оболочку. Колебания быстро затухают;

– Если звезда горячая, над слоем гелия тонкая оболочка, и её колебания очень слабы.

Значит, есть узкий интервал температур звёзд, у которых возникают радиальные пульсации (“полоса неустойчивости” отмечена на рисунке А.5).

Внутреннее строение большинства пульсирующих цефеид таково, что они обладают значительной концентрацией массы к центру: плотность вещества в центре на несколько порядков превышает среднюю плотность звезды [8].

Изучение цефеид важно для понимания эволюции звезд.

Последние исследования, основанные на данных от космического телескопа [14], показывают, что цефеиды могут терять массу, а значит, изменяется зависимость период-светимость. Следовательно, может потребоваться пересчет известных расстояний. При изучении изменчивости периодов очень важно охватить наблюдениями как можно больший интервал времени. При этом не только собираются все опубликованные ранее данные, но и изучаются старые фотопластинки, имеющиеся в архивах многих астрономических обсерваторий. С помощью старых данных, охватывающие столетний (а иногда и более продолжительный) временной интервал, выявляются эволюционные изменения периодов для большинства цефеид [13].

## 6 Создание макета

При создании макета цефеиды мы определили основные признаки, которые отличают их от других звезд, а именно:

- звезда меняет цвет от класса F (максимум блеска) до класса G и K (минимум блеска);
- масса от 2 до 15 массы Солнца;
- плотность вещества в центре на несколько порядков превышает среднюю плотность звезды;
- цефеида находится на стадии термоядерного горения гелия, наступающей после истощения водорода в центральной части звезды;
- ионизированный гелий содержится во внешних слоях атмосферы.

Для сборки модели мы использовали следующие материалы: светодиоды, акрил прозрачный и матовый, небольшой лист фанеры, проводники электрического тока, ограничители тока, выключатели, крепеж (болты, гайки, клей), краска.

На рисунке А.8 изображено устройство и состав макета. Звезда изготовлена из прозрачного акрила с разделением на зоны: ядро, плазма и слой гелия. Каждая зона подсвечивается отдельными светодиодами. Учитывая спектральный класс цефеиды, и происходящие термоядерные процессы мы использовали разные по цвету светодиоды. Конструкция звезды крепится на вертикальной стенке из фанерного листа.

Когда цефеида находится в сжатом состоянии, ядро светится ярким желтым цветом – оно самое горячее, плазма светится желто-оранжевым цветом, а слой ионизированного (непрозрачного) гелия подсвечиваем красным цветом.

Когда в атмосфере преобладает дважды ионизированный гелий, на макете слой гелия светится оранжевым цветом и в этот момент зажигается дополнительный слой, имитируя расширение звезды.

Управление светодиодами осуществляется кнопками, расположенными в основании макета.

Наш макет дает наглядное представление о структуре цефеиды и демонстрирует механизм пульсации звезды. Макет может использоваться как дидактическое пособие.

### **Вывод**

В результате нашей работы мы выполнили поставленные задачи, и подтвердили гипотезу.

Можно с уверенностью сказать, что цефеиды играют ключевую роль в познании расстояний до объектов глубокого космоса и размеров Вселенной. Благодаря открытию Г. Ливитт цефеиды стали маяками Вселенной. Это помогло астрономам уточнить шкалу расстояний, определить возраст Вселенной. Теперь мы знаем, что наша Вселенная расширяется по определенному закону – Хаббла.

Нужно учитывать, что точность определения расстояний до цефеид зависит как от точности установления зависимости период-светимость, так и от степени изученности самих цефеид. Поэтому необходимо проведение большого числа наблюдений.

Мы создали макет цефеиды в разрезе, что, как мы надеемся, поможет в доступной форме понять природу целого класса звезд – цефеид.

## Список источников информации

### Книги

1. М. Аксенова, А. Голсовская, Энциклопедия для детей. Астрономия [Текст] – М.: Мир энциклопедий Аванта+ Астрель, 2011. – 528с.
  2. Советский энциклопедический словарь [Текст] /Гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Сов. Энциклопедия, 1985. – 1600 с.
  3. В.Г. Сурдин. Звезды. [Текст] ; М.: Физматлит, 2008. - 428 с.
- Холопов П. Н. О классификации переменных звезд[Текст] // Переменные звезды. — 1981. — Т. 21. — С. 465—484.
4. Переменные звёзды / Ефремов Ю. Н. // Физика космоса: Маленькая энциклопедия / [Текст] – Редкол.: Р. А. Сюняев (Гл. ред.) и др. — 2-е изд. — М. – 783 с.
  5. Бердников Л.Н. // Письма в Астрон. журнал. 1987. Т.13. С.110-117.
  6. А. Аллер. АТОМЫ, ЗВЕЗДЫ И ТУМАННОСТИ. 1976
  7. Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Сачков М.Е. и др. // Письма в Астрон. журнал. 1998. Т.24. №12. С.939— 942.
  8. Самусь Н.Н. «О новейшей истории каталогов переменных звезд». // Историко-астрономические исследования. Т. 34, с. 69–96, 2009.
  9. Кокс Дж.П. // Теория звездных пульсаций. М., 1983.
  10. Жевакин С.А. // Астрон. журн. 1954. Т.31. С.141-153.

### Электронные ресурсы

11. Астрогалактика. [электронный ресурс]: <http://www.astrogalaxy.ru>
12. Википедия – свободная энциклопедия. [электронный ресурс]: <http://www.ru.wikipedia.org>
13. Онлайн Энциклопедия. [электронный ресурс]: <http://encyclopaedia.big.ru>
14. В.Г. Сурдин Звёздная величина (рус.). Глоссарий. [электронный ресурс]: [Astronet.ru](http://Astronet.ru).

15. В.Г. Сурдин Разведка далеких планет. [электронный ресурс]: <http://fanread.ru/book/9735587/page5>.

16. Переменные звёзды — классификация, инструкции, статьи, новости. [электронный ресурс]: [www.variablestars.ru](http://www.variablestars.ru)

## Приложение А

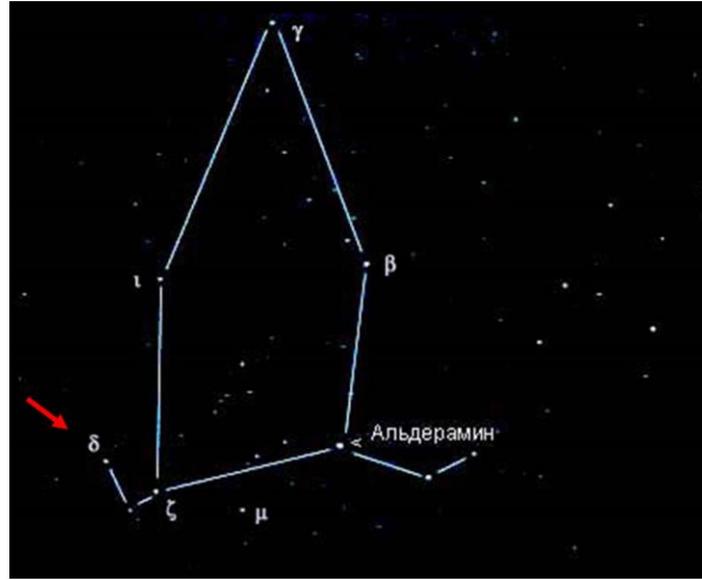
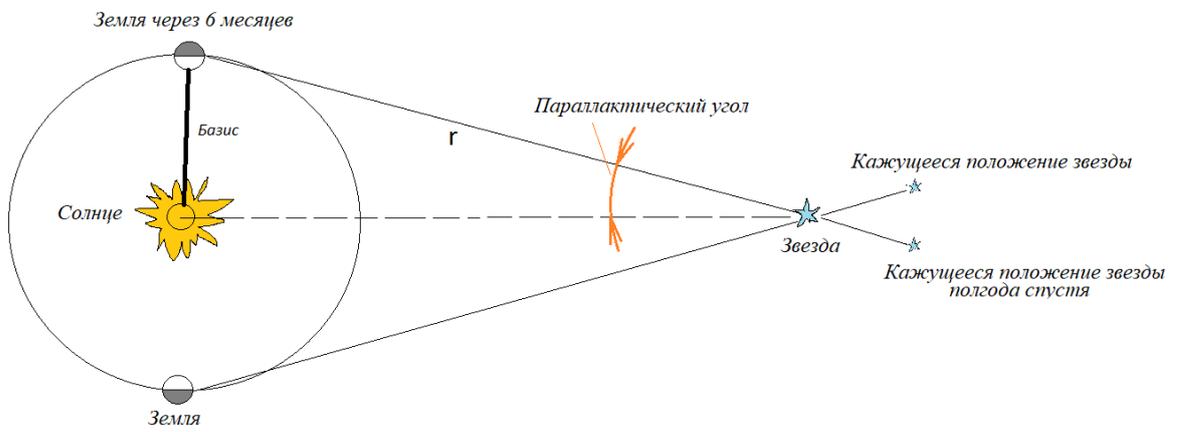
Рисунок А.1 Звезда  $\delta$  Цефея.

Рисунок А.2 Определение расстояния до объекта - тригонометрический параллакс.

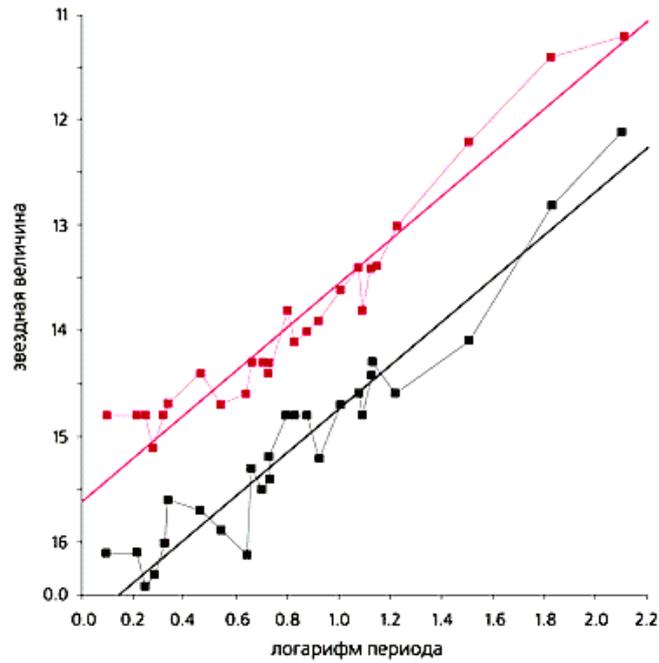


Рисунок А.3 Зависимость между звездной величиной в максимуме (показана цветом) и минимуме и логарифмом периода (в сутках) для цефеид Малого Магелланова Облака из работы Г.Ливитт 1912 г.

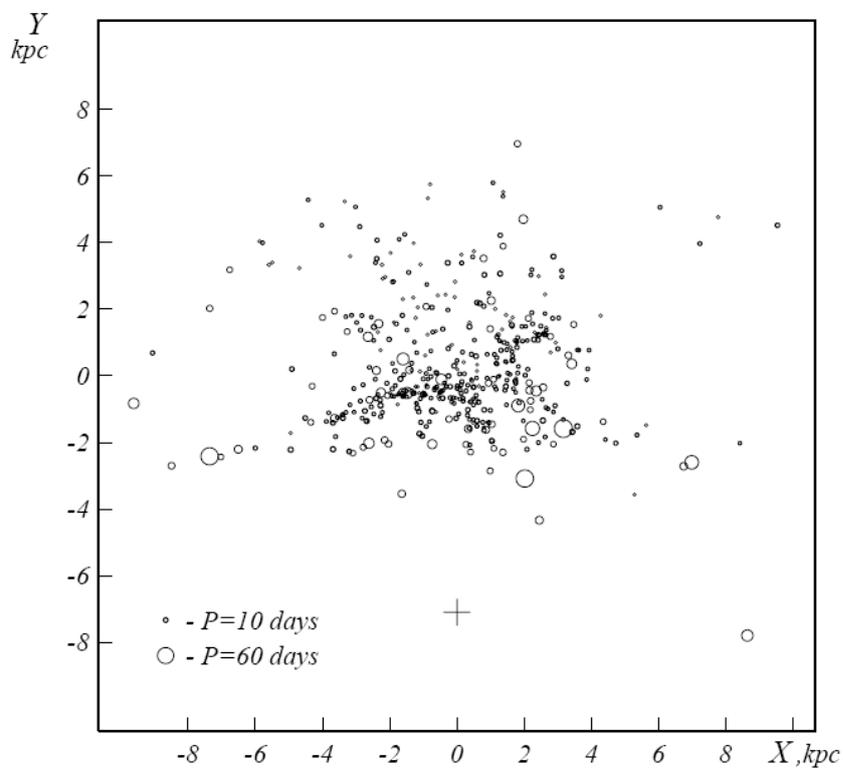


Рисунок А.4 Распределение цефеид в Галактике. Размер кружка пропорционален периоду в масштабе, показанном внизу слева. X и Y выражены в килопарсеках. Положение центра Галактики отмечено крестом.

## Полоса нестабильности на диаграмме Герцшпрунга-Рассела

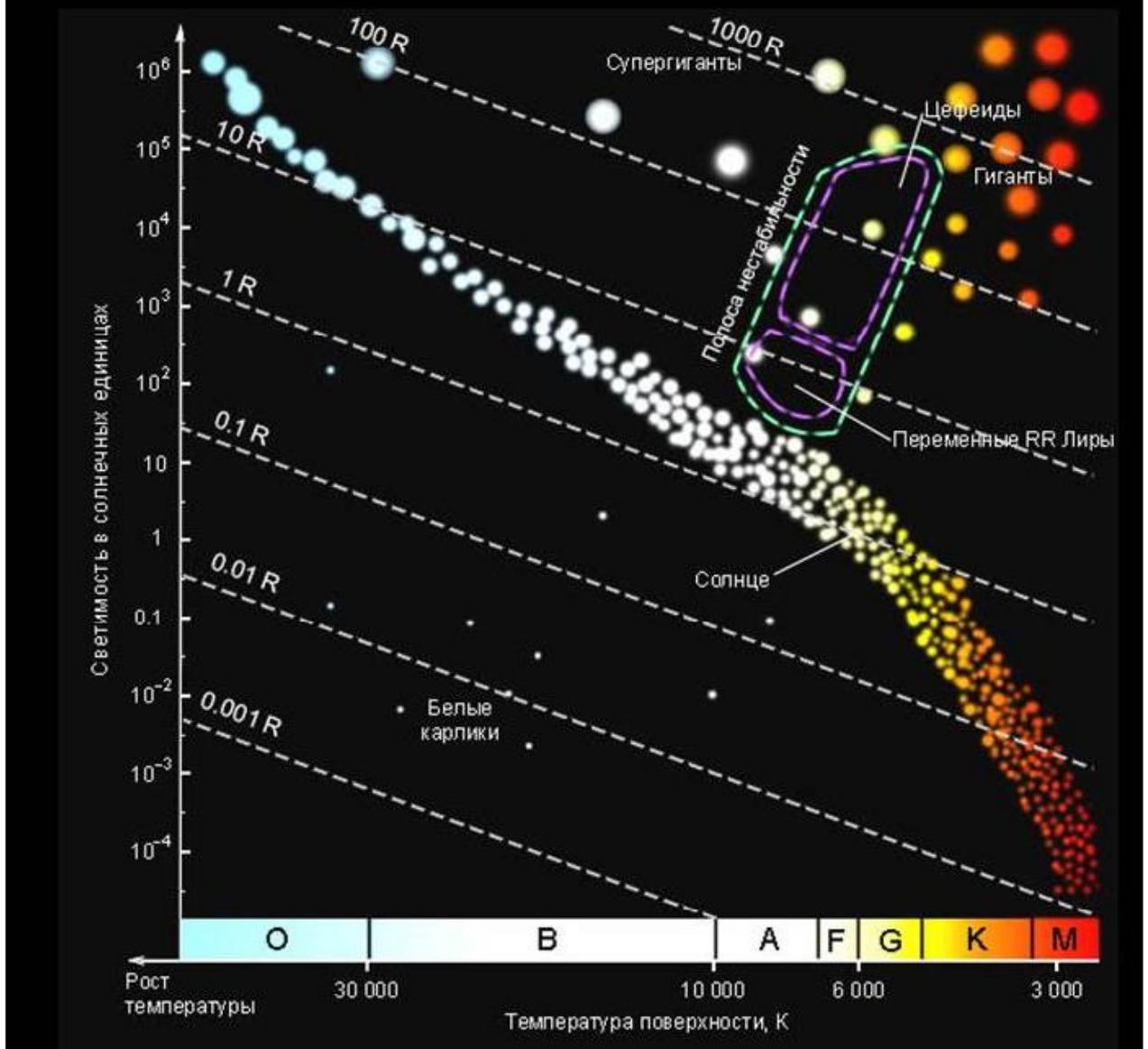


Рисунок А.5 Диаграмма Герцшпрунга - Рассела

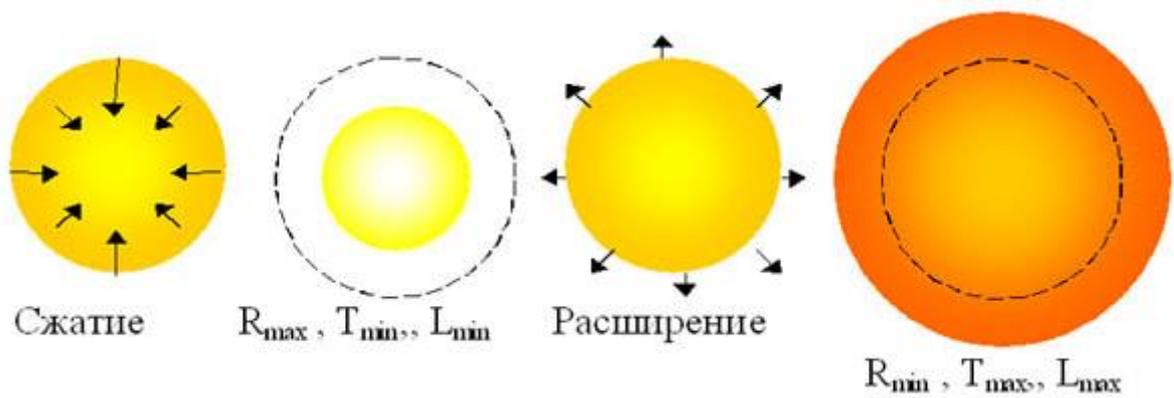


Рисунок А.6 Процесс пульсации.

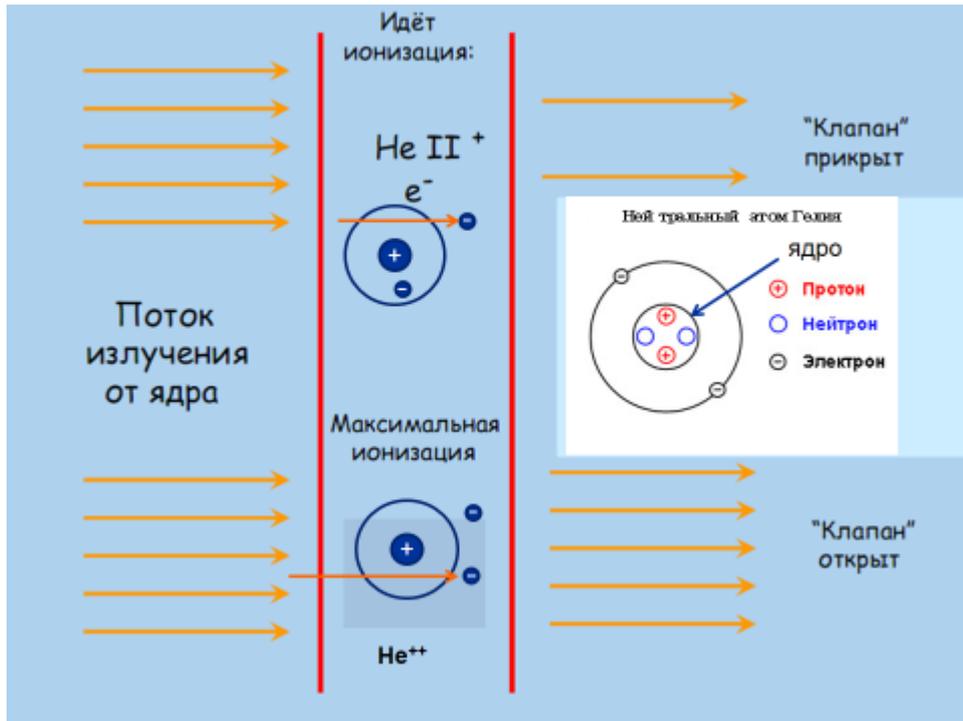


Рисунок А.7 Процесс ионизации атмосферы цефеиды.

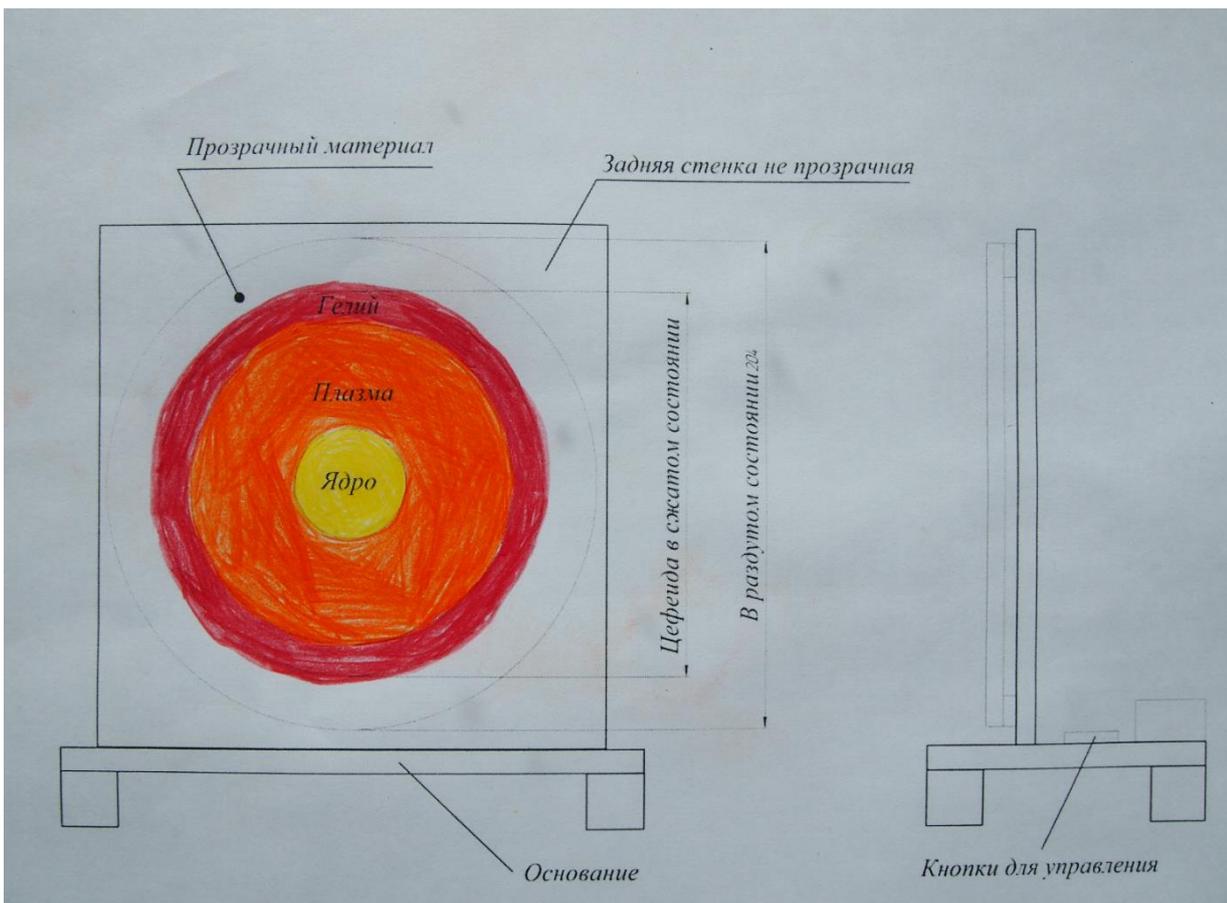


Рисунок А.8 Макет цефеиды.