

# Определение параметров межзвездного поглощения света по данным каталога Hipparcos

9 марта 2015 г.

## 1 Абстракт

Основная задача исследования – автоматический поиск пылевых облаков в окрестности Солнца на основе массовых каталогов звезд. Первый этап этой задачи – построение двумерной панорамы распределения пылевых облаков на небесной сфере на основе данных каталога Hipparcos. Метод исследования основан на сравнении эталонного показателя цвета звезды данного спектрального класса с наблюдаемым показателем цвета. Так как полная двумерная спектральная классификация известна не для всех звезд каталога Hipparcos, то пришлось решать вспомогательную задачу: используя параллаксы звезд каталога Hipparcos дополнить информацию о звездах классом светимости на основе данных о видимой звездной величине и параллаксе звезды. В результате работы была построена карта распределения пылевой материи, вызывающей покраснения света звезд, по небесной сфере. Для построения трехмерного распределения пылевых облаков необходим более точный и массовый каталог параллаксов звезд, которым может стать каталог миссии GAIA, завершение которой планируется в ближайшие годы.

## 2 Введение

Общая задача поиска межзвездного поглощения, то есть пыли, естественно трехмерная. Но, к сожалению, точности современных каталогов, как мы увидим, не позволяют качественно искать пыль в пространстве. Решение этой задачи будет возможно только после получения результатов миссии GAIA, чьей основной задачей является определение структуры Млечного Пути в окрестности Солнца. Мы представим решение частной задачи — задачи построения панорамы распределения пыли. Мы количественно поймем, в каких направлениях на небе пыли больше, а в каких меньше. Это позволит в будущем учитывать межзвездное поглощение при определении характеристик звезды таких как, к примеру, показатель цвета.

## 3 Исходные данные

Для того, чтобы определять параметры межзвездного поглощения, нам потребуется иметь следующие данные о звездах,

- положение
- параллакс
- фотометрия
- спектральный класс и класс светимости

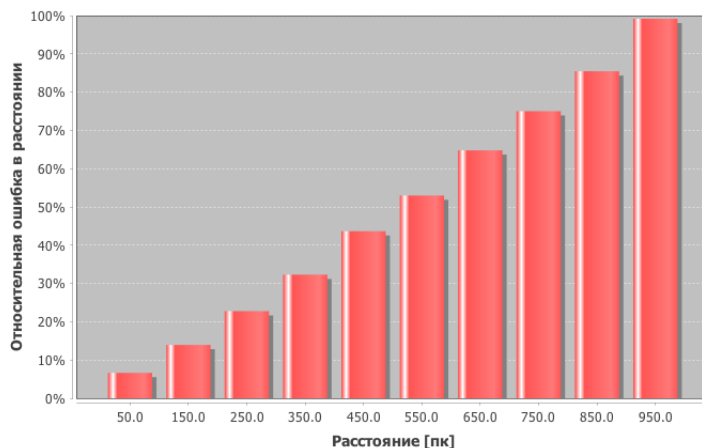
Мы будем использовать каталог Hipparcos [1], ввиду присутствия в нем всех необходимых данных.

### 3.1 Сведения о каталоге

Каталог Hipparcos содержит данные о 117955 звездах. У некоторых звезд отсутствуют необходимые нам данные, поэтому в данной статье мы будем работать с меньшим числом звезд.

#### 3.1.1 Параллакс

Звезды в каталоге Hipparcos имеют низкую точность параллакса. Это можно видеть из следующей гистограммы. На ней отложены средние значения относительной ошибки в расстоянии для звезд на разных расстояниях.



Мы видим, к примеру, что на расстоянии в 500 пк ошибка в параллаксе достигает 50%.

#### 3.1.2 Положение

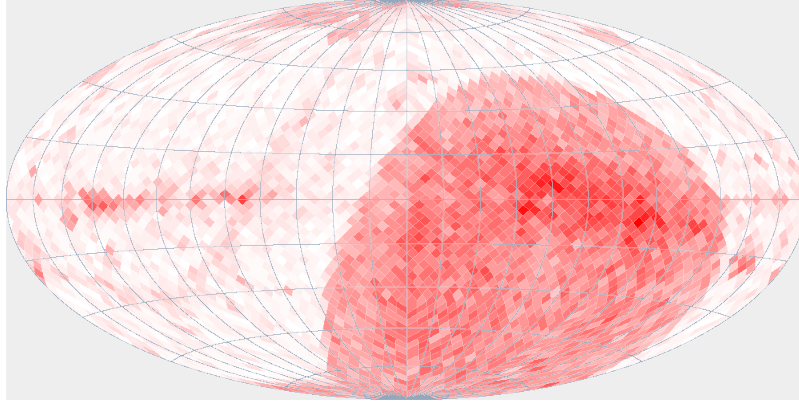
Ошибки в положении звезд на небе на порядок меньше ошибок в параллаксе, поэтому их можно не учитывать, если нас интересует пространственное распределение звезд.

#### 3.1.3 Фотометрия

В каталоге Hipparcos 2007 [1] приведены данные фотометрии звезд. Показатель цвета  $B - V$  присутствует у всех звезд.

### 3.2 Спектральная классификация

Спектральная классификация в каталоге Hipparcos получена из результата миссии Tycho — каталога Tycho 2 Spectral Types [2]. Спектральный тип присутствует у 94% звезд (110707/117955), но, класс светимости есть только у половины звезд (47%, 55051/117955), т.к. миссия Tycho работала, в основном, с южной половиной неба:



На этом рисунке изображена проекция неба в галактической системе координат (в центре центр галактики), разбитая на «пиксели» алгоритмом HEALPix [7]. Далее мы подробнее его разберем. Чем больше звезд в пикселе имеют класс светимости, тем он краснее. Видим отсутствие класса светимости у звезд северного экваториального полушария и присутствие у южного.

## 4 Покраснение

### 4.1 Определение

Межзвездное поглощение может быть описано избытком цвета. Избыток цвета мы будем называть «покраснением». *Покраснение* звезды есть

$$E = E_{B-V} = (B - V)_{obs} - (B - V)_{int}$$

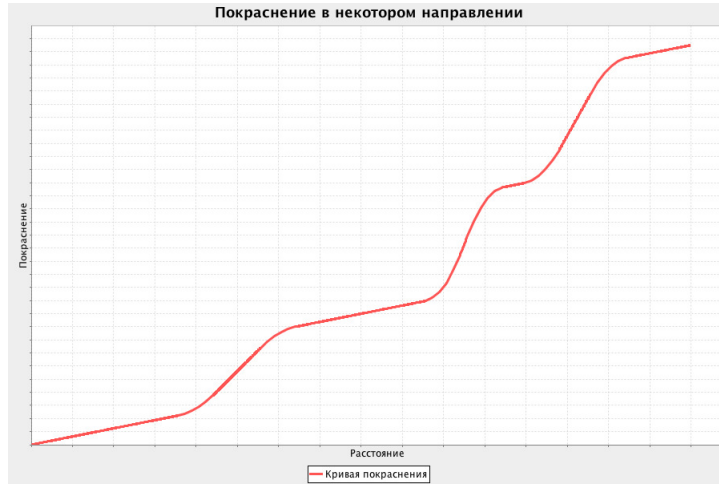
Где  $(B - V)_{obs}$  — ее видимый нами показатель цвета, а  $(B - V)_{int}$  — реальный показатель цвета звезды.  $(B - V)_{obs}$  мы можем получить на основе данных фотометрии звезды. Их мы получим из каталога.  $(B - V)_{int}$  можно оценить статистически. Это проделано во многих работах, к примеру, в [4]. В результате, мы воспользуемся полученной в [4] двумерной таблицей «спектральный класс, класс светимости — показатель цвета». То есть для получения  $(B - V)_{int}$  звезды нам потребуются ее спектральный класс и класс светимости. Их мы можем посмотреть в каталоге. Приведем пример расчета покраснения на звезде HIP 44800,

- У нее в каталоге  $(B - V)_{obs} = 0.535^m$
- Класс F7V, поэтому (по [4])  $(B - V)_{int} = 0.493^m$
- Покраснение  $0.535^m - 0.493^m = 0.042^m$

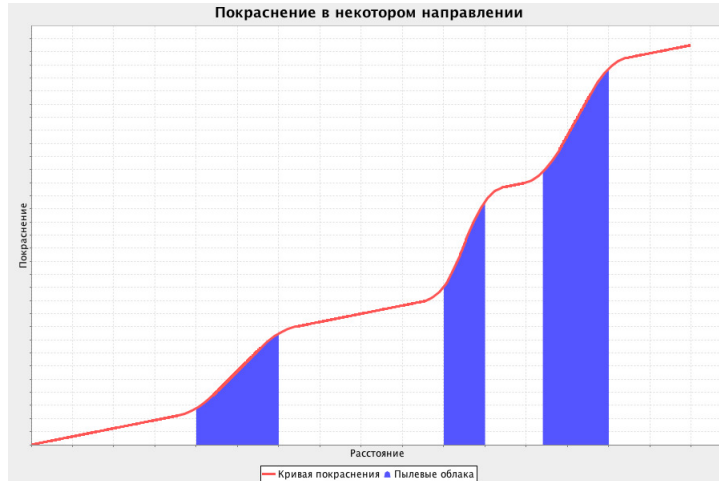
Покраснение — это количественное измерение межзвездного поглощения, поэтому мы можем сказать, что «между нами и звездой HIP 44800 пыли на 0.042 зв. вел».

### 4.2 Идеальная кривая покраснения

Предположим, что на некотором луче зрения бесконечно много звезд и они расположены на нем всюду плотно. Пусть для каждой звезды мы можем идеально измерить ее покраснение. Тогда, ход покраснения на этом луче зрения должен быть таким,



Где по оси  $x$  отложено расстояние по лучу зрения, а по  $y$  — покраснение у соответствующих звезд. Покраснение должно всегда монотонно расти, т.к. везде есть пыль. Очевидно, что там, где покраснение растет быстрее — пыли больше, там где медленнее — меньше. Поэтому, можно было бы сказать, что облака на этом луче зрения находятся там, где покраснение растет «очень быстро» (синие области),



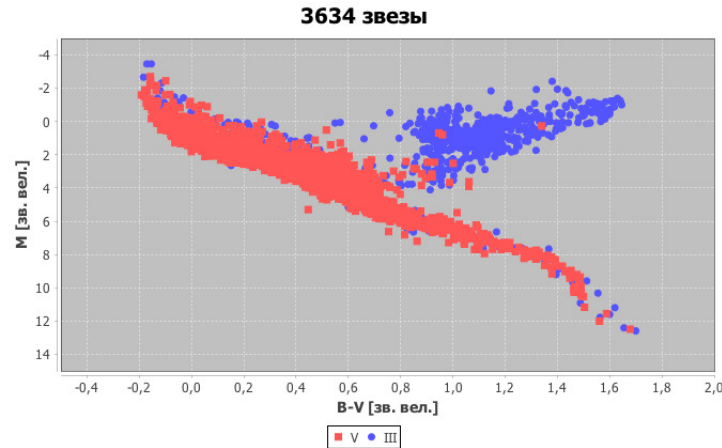
Тем самым, построение кривых покраснения в разных направлениях на небе может позволить находить области повышенного межзвездного поглощения, то есть находить пылевые облака.

## 5 Способ получения классов светимости

Как мы увидели в обзоре данных каталога Hipparcos, практически у всех звезд северного экваториального полушария отсутствует класс светимости. Для нас его наличие чрезвычайно важно, ввиду того, что мы на основе класса светимости и спектрального класса считаем истинное значение  $B - V$  для звезд  $((B - V)_{int})$ . Тем самым, отсутствие класса светимости у половины звезд делает невозможным проведение наших расчетов для всего северного полушария.

Исправим это. Рассчитаем неизвестные классы светимости. Сделаем это с помощью методов машинного обучения. Натренируем классификатор, который будет выдавать класс светимости для звезды по двум факторам — показателю цвета и абсолютной звездной величине. Этих факторов будет достаточно, т.к. классы светимости теоретически разделены на диаграмме Гершпрунга-Рассела. Тренировать классификатор мы будем с помощью метода опорных векторов [6].

Доля звезд, которые не относятся ни к III, ни к V классам светимости очень мала (3.6%, 3354 из 93230). Эти звезды никак на классификацию не влияют. Поэтому, в качестве обучающего множества возьмем звезды только III и V классов с низкими ошибками в расстоянии (не более 3.7%) и в показателе цвета (не более 0.01). Таких звезд 3634. Диаграмма Гершпрунга-Рассела с нанесенным на нее обучающим множеством:



Факторами для обучения у нас будут показатель цвета и абсолютная звездная величина.

Для оценки качества классификатора проведем 10-fold кросс-валидацию. Ниже приведены ее результаты,

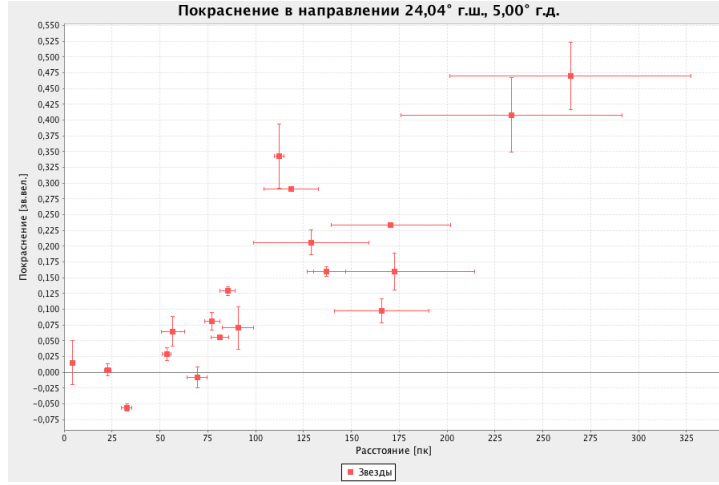
| Классифицированы как → | III | V    | Класс | Точность | Полнота | F1-мера |
|------------------------|-----|------|-------|----------|---------|---------|
| III                    | 656 | 400  | III   | 98%      | 62%     | 76%     |
| V                      | 14  | 2564 | V     | 87%      | 99%     | 93%     |

Классификатор, естественно, получился неплохим даже несмотря на то, что многие звезды III класса из обучающего множества ошибочно находятся на главной последовательности (отсюда, низкая полнота у III класса). К подобным каталожным ошибкам мы вернемся в следующей статье.

Результат работы классификатора — наличие класса светимости у всех рассматриваемых звезд.

## 6 Результаты

Построение кривых покраснения в разных направлениях позволит нам понять пространственное распределение межзвездного поглощения (пыли). Звезд в каталоге не бесконечное число, поэтому реальные кривые покраснения будут не непрерывными кривыми, а будут наборами точек, описывающими ход покраснения. Аналогично, вместо звезд на луче зрения мы должны использовать звезды в малых конусах. Поэтому, ход покраснения у нас будет выглядеть, к примеру, так,



Следующий метод позволит построить «кривые» покраснения во всех направлениях на небесной сфере. Он состоит из трех этапов,

## 6.1 Картирование небесной сферы

Для картирования небесной сферы мы воспользуемся стандартным алгоритмом Healpix [7], с помощью которого мы разобьем сферу на достаточно маленькие равновеликие части. Назовем их  $\{P_i\}_{i=1}^{2n^2}$  (у нас  $n = 18$ ). Обозначим конусы, высекаемые соответствующими частями через  $\{C_i\}_{i=1}^{2n^2}$ . Такое разбиение позволит нам,

1. Рассмотреть ход покраснения в каждом конусе как одномерную функцию  $E(r)$ . Это корректно, ввиду того, что конусы достаточно узкие;
2. Сделать наши результаты «независимыми», т.к. конусы не налагаются;
3. Поместить в каждый конус примерно одинаковое число звезд, чтобы избежать недостатка звезд в некоторых конусах.

## 6.2 Тренд

Тем самым, мы ищем  $E_i(r)$ , соответствующую каждому  $C_i$ . Ввиду того, что практически все  $E_i(r)$  очень сильно зашумлены разного рода ошибками, не удастся проследить истинный ход этих функций. Но тренд вида  $kr$  все же можно вычислить ( $E_i(r) \approx k_i r$ ). Он находится с помощью метода наименьших квадратов.

## 6.3 Критерии выбора звезд

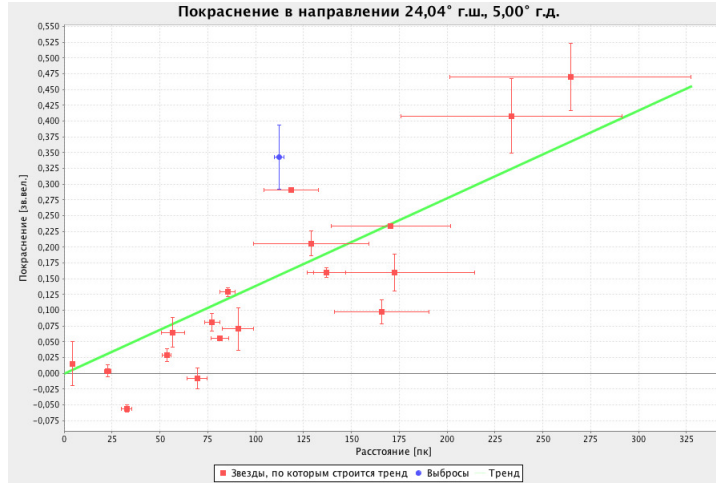
### 6.3.1 По параллаксу

В каталоге Hipparcos, далекие звезды имеют очень большие ошибки в параллаксе. На расстояниях, скажем, в 400 пк эти ошибки могут достигать 100%. Такие ошибки могут очень сильно испортить наши результаты. Тем самым, мы не будем рассматривать звезды, у которых относительная ошибка параллакса не превосходит 25%. Меньшее значение порога оставит нам очень малое число звезд, которых не хватит для того, чтобы вычисленные тренды были достоверными.

### 6.3.2 По тренду

Покраснения некоторых звезд очень сильно портят тренды. Иногда они даже бывают отрицательными, что вообще противоречит здравому смыслу. Но об этом мы поговорим позже.

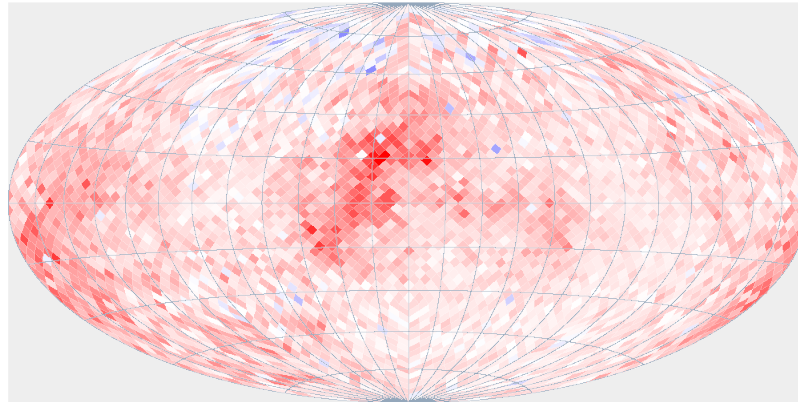
Как известно, метод наименьших квадратов не устойчив к выбросам, т.е. совсем неверные покраснение/параллакс могут очень сильно испортить тренд. Для более устойчивого построения тренда, мы сделаем следующее. После построения тренда по всем звездам в конусе, мы выбрасываем те, у которых отклонение от тренда самое большое. Затем, мы строим тренд заново, но уже только по оставшимся звездам. После выброса 10% самых плохих звезд тренд, к примеру, может быть таким



В данном случае, мы выбросили одну звезду (синюю). 10% звезд — это обычно 0, 1 или 2 звезды в каждом конусе. Опять же, нельзя выкидывать слишком много звезд из-за опасности «подгонки» модели.

## 6.4 Распределение коэффициента $k$

Тем самым, ход покраснения в конусе  $C_i$  мы описываем одним числом  $k_i$  — скоростью роста покраснения в этом конусе. Она, как мы ранее выясняли, коррелирует с наличием пыли. Поэтому, составив карту распределения коэффициента  $k$ , мы составим панораму пыли в окрестности Солнца.

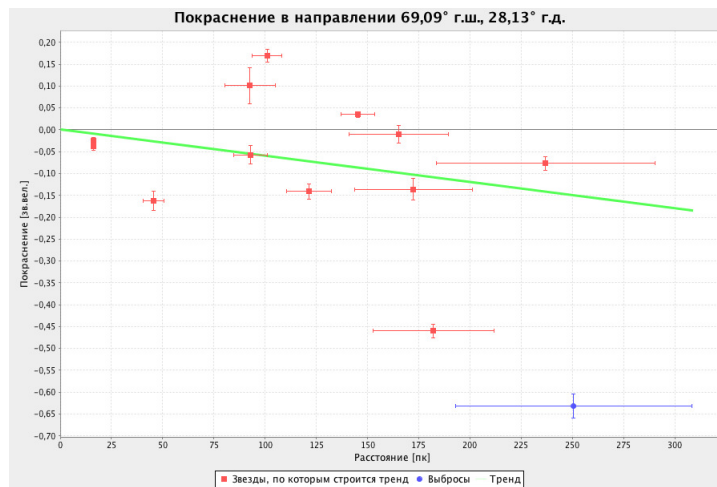


Это небо в галактической системе координат с центром в центре галактики. Сфера разбита на  $12 \cdot 18^2 = 3888$  кусочков алгоритмом NeaIrix. В каждом кусочке построен тренд покраснения  $kr$ . На этом рисунке изображено распределение значения коэффициента  $k$  по кусочкам. Синий цвет означает отрицательное

значение  $k$ , красный - положительное. Чем насыщеннее цвет, тем больше значение коэффициента по модулю.

## 7 Отрицательное покраснение

На некоторых площадках коэффициент  $k$  отрицательный. В теории, такого не должно быть, т.к. межзвездное поглощение не может делать звезды более голубыми. Пример хода покраснения на одной из площадок,



Мы видим, что это вызвано тем, что некоторые звезды имеют сильно отрицательное покраснение. То есть  $E_{B-V} + 3\sigma_{E_{B-V}} < 0$ , где  $\sigma$  — это ошибка. Такого не должно быть, т.к. звезда не может сильно голубеть на расстоянии. Давайте рассмотрим какую-нибудь звезду, имеющую такое anomальное отрицательное покраснение. К примеру, HIP 66713. Ее параметры:

- Параллакс  $7.99 \pm 0.77$
- Показатель цвета  $0.386 \pm 0.014$
- Спектральный тип G0V
- Видимая звездная величина 8.37

Мы видим, что у нее нет anomальных параметров. Так же, ее параметры имеют небольшие ошибки. Согласно таблице в [4], спектральному типу G0V соответствует показатель цвета 0.580. Тем самым, покраснение  $E = (B - V)_{obs} - (B - V)_{int} = (0.386 \pm 0.014) - 0.580 = -0,194 \pm 0.014$ . Мы видим anomальное покраснение у не anomальной звезды. И таких звезд (имеющих  $E_{B-V} + 3\sigma_{E_{B-V}} < 0$ ) 11993 из 94670 (12.6%), то есть достаточно много. Основные возможные причины таких отклонений — неверные таблицы «спектральный тип — покраснение», ошибки в спектральной классификации (см. обучающее множество в «Способах получения классов светимости»). Этой проблеме будет посвящена следующая статья.

## 8 Заключение

Этот раздел еще не создан



## Список литературы

- [1] van Leeuwen, F. *Validation of the new Hipparcos reduction* 2007: Astronomy and Astrophysics
- [2] Wright et al. *Tycho-2 Spectral Type Catalog* 2003: The Astronomical Journal
- [3] Страйджест – книжка
- [4] А.А.Сминов, А.С.Цветков, А.В.Попов *Неточности в спектральной классификации звезд каталога Tycho-2 Spectral Type* 2006.
- [5] Гончаров
- [6] V.N.Vapnik *The Nature of Statistical Learning Theory* 1995.
- [7] Gorski et al. *HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere* 2005.