

Параметризация звезд и межзвездного пространства на основе решения обратной задачи классификации над данными наблюдений

Черкашин Дмитрий

Научный руководитель – Скворцов Н.А.

Содержание

Введение

Постановка

Обратные задачи в астрофизике

Интеграция каталогов звездного неба

Алгоритм обратного спектрального анализа

Методы минимизации функции нескольких переменных

Введение

Основная проблема астрофизики - изучение физических свойств, принадлежащих поверхностным слоям звезд (температура, гравитация, металличность,...)

Звезды имеют достаточно четкую классификацию с известными параметрами → зная класс звезды можно определить ее физические свойства

Межзвездное поглощение

Звезды наблюдаются сквозь межзвездную пыль → излучение тускнеет и краснеет → проблемы с классификацией

Межзвездное поглощение - суммарный эффект рассеивания и истинного поглощения электромагнитного излучения пылью и газом. Зная коэффициент м.п. можно правильно определить изначальное излучение

Способы параметризации

1. Использование большого телескопа в течение продолжительного времени
2. Построение эволюционных треков
3. Построение карты межзвездного поглощения на основе корреляции между плотностью пылевого столба и распределением нейтрального водорода
4. Решение обратной задачи спектрального анализа

Постановка

Цель: разработка подходов и средств распределенного анализа данных для параметризации звезд на основе решения обратной задачи классификации над над многоцветными фотометрическими обзорами звездного неба.

Задачи

- Разработка концептуального представления данных о фотометрических спектрах звёзд и отображение в него схем оригинальных каталогов для трансформации данных множественных наблюдений звёзд в общее представление.
- Разработка подхода к организации доступа и разрешению сущностей (перекрёстному отождествлению) среди множественных наблюдений звёзд в неоднородных данных обзоров неба.
- Модификация алгоритма параметризации звезд на основе методов решения обратных задач
- Разработка параллельной распределённой реализации предложенных подходов

Обратные задачи в астрофизике

Прямая задача: нахождение следствия некоторого процесса по известной исследователю причине

Обратная задача: один и тот же эффект может быть порожден разными причинами (пример - кипение воды)

Корректность обратной задачи

Задача корректно, если

- ее решение существует
- решение единственно
- решение непрерывно зависит от входных данных (условие устойчивости решения)

Математическая формулировка

$$u(x) = A(x, z(s))$$

A – оператор, устанавливающий причинно-следственную связь между $z(s)$ и $u(x)$.

Либо уравнение Фредгольма 1-го рода

$$u(x) = \int_b^a K(x, s)z(s)ds$$

где $K(x, s)$ – ядро (непрерывное или квадратично суммируемое по переменным x, s), которое описывает конкретную модель исследуемого процесса.

Метод решения некорректно поставленных задач, предложенный А.Н. Тихоновым

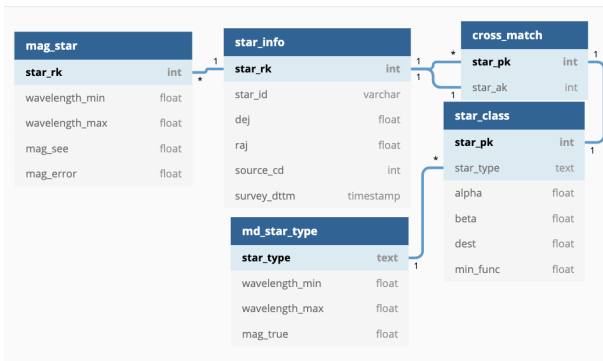
Некорректные задачи нужно доопределить. Для этого необходима дополнительная (априорная) информация об искомом решении $z(s)$, вытекающая из обширного опыта всесторонних исследований данного процесса.

Такой информацией могут служить сведения о гладкости искомого решения $z(s)$, его монотонности, выпуклости, неотрицательности, принадлежности к конечно-параметрическому семейству и т. п.

Интеграция каталогов звездного неба

DENIS - 135.677 звезд

ALLWISE - 1.169.013 звезд



Кросс-отождествление каталогов обзоров звездного неба

Методы кросс-отождествления

- Структурный
- Координатный
- Координатное сопоставление с фильтрацией объектов

Реализация

Пакет AstroML для Spark

112.531 успешных сопоставлений

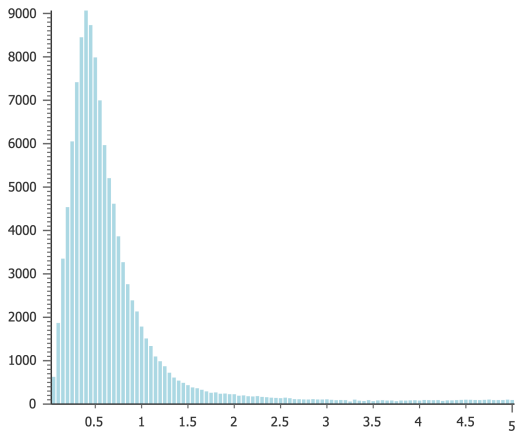


Рис.: Гистограмма расстояния между координатами в ALLWISE и DENIS

Алгоритм обратного спектрального анализа

Для нахождения спектрального типа SpT , расстояния до звезды d и межзвездное поглощение A_V , необходимо минимизировать функционал

$$D^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_{obs,i} - m_{calc,i}}{\Delta m_{obs,i}} \right)^2$$

где суммирование происходит по всем известным диапазонам ($N = 10$), и $m_{calc,i} = M_i(SpT) + 5 \log d - 5 + A_i(A_V)$

Алгоритм обратного спектрального анализа

$A_i(A_V) = k_i * A_V$ - закон межзвездного поглощения для i -той фотометрической полосы. k_i - коэффициент затухания блеска для i -той фотометрической полосы.

Длина волны	I	J	K	W1	W2	W3	W4
Коэффициент	1.71	0.72	0.30	0.18	0.16	0.14	0.11

Таблица: Коэффициенты затухания блеска

Алгоритм обратного спектрального анализа

$M_i(SpT)$ - абсолютный блеск в i -той фотометрической полосе.
Необходимы абсолютные величины звезд разных спектральных типов в соответствующих фотометрических системах.

SpT	MB	MR	MI	MJ	MK	MW1	MW2	MW3	MW4
B8	0.32	0.39	0.04	0.34	0.62	0.01	0.10	0.11	1.00
A0	1.58	0.47	0.72	1.04	1.28	0.54	0.58	0.56	0.30
..

Таблица: Абсолютные значения видимой звездной величины при различных спектральных типах звезд

Алгоритм обратного спектрального анализа

A_V - коэффициент преломления для звезды, находящейся на расстоянии d , вычисляется по формуле:

$$A_V(d, b) = \frac{a_O \beta}{\sin |b|} \left(1 - e^{\frac{-d \sin |b|}{\beta}} \right)$$

a_O - коэффициент поглощения (параметр), β - коэффициент вертикального поглощения преломляющегося света, b - долгота

метод градиентного спуска

$$x_j^{i+1} = x_j^i - h * \frac{df}{dx_j^i} = x_j^i - h * \frac{df/dx_j^i}{|\nabla f(x^i)|}, j = 1, \dots, n$$

2 этапа:

- Оценка градиента $F(x)$ путем вычисления частных производных от $F(x)$ по каждой переменной x_j
- Рабочий шаг по всем переменным одновременно

Для оценки частных производных используются разностные методы:

- Алгоритм с центральной пробой:

$$\frac{df}{dx_i} \approx \frac{f(x_1, \dots, x_i + g_i, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{g_i}$$

- Алгоритм с парными пробами:

$$\frac{df}{dx_i} \approx \frac{f(x_1, \dots, x_i + g_i, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i - g_i, \dots, x_n)}{2g_i}$$

метод скорейшего спуска

В текущей точке вычисляется $\nabla f(x)$, и затем в направлении градиента ищется $\min f(x)$.

Вдали от оптимума эффективность метода повышается.

Реализация

Алгоритм реализован на Spark. Для каждой звезды перебирая спектральный тип ищем минимум функционала по расстоянию и коэффициентам поглощения, затем отбираем минимальный, репартиционируем, сохраняем полученный тип

В результате получаем связку «координаты – класс звезды – расстояние до звезды – коэффициент поглощения – коэффициент вертикального поглощения преломляющегося света»

RAJ2000	DEJ2000	SpT	b	a_0	beta
130.895126	1.711113	B8	30	0.01	30
134.26753	-1.468054	B8	30	0.01	270
134.26753	-1.468054	B8	60	0.09	30
134.26753	-1.468054	B8	30	0.03	90

Таблица: Абсолютные значения видимой звездной величины при различных спектральных типах звезд

Дальнейшая работа

- Добавить новые источники (Gaia DR2, IPHAS DR2, LAMOST и др.)
- Реализовать модификацию перекрестного отождествления фильтрацию звезд во время с учетом фильтрации объектов
- Доработать алгоритм обратного спектрального анализа таким образом, что бы при минимизации функциоанала учитывались значения полученного коэффициента поглощения и расстояния для соседних звезд, воспользоваться другими подходами к оптимизации процедуры и точности определения параметров.
- Оптимизация решения задачи