

# Методика описания профилей линий молекулы CO с помощью многокомпонентной модели переноса излучения



Ладейщиков Д.А. (УрФУ)

При поддержке РФФИ №18-02-00917

**Абстракт:** В настоящей работе исследованы особенности анализа профилей линий молекулы CO в гигантских молекулярных облаках (ГМО). С помощью различных инструментов анализа разработана методика, позволяющая в рамках локального термодинамического равновесия использовать несколько линий излучения молекулы CO для построения и оптимизации модели и определения физических параметров ГМО. Методика включает в себя выделение сгустков с помощью алгоритма GAUSSCLUMP, а так же автоматизированное построение многослойной модели переноса излучения для сгустков с использованием методов оптимизации и Монте-Карло. Методика применена на практике для анализа крупномасштабного картографирования комплекса звёздообразования S231-S235 в четырёх различных линиях CO. Исходные коды доступны по адресу [https://github.com/DmityL/CO\\_model](https://github.com/DmityL/CO_model).

**Исходные данные:** Карты нескольких линий молекулы CO: 12CO(1-0), 13CO(1-0), 12CO(2-1), 13CO(2-1) и др. Для проверки алгоритма использовались данные наблюдений области S231-235, полученные на радиотелескопах SMT и FCRAO.

**Входные параметры:**  $\theta_i$  – размеры диаграммы направленности для каждой линии,  $\eta_{mbi}$  – эффективность главного луча диаграммы для каждой линии,  $N_{\sigma i}$  – уровень сигнала (в уровнях  $\sigma$ ), который учитывается при построении интегральных нулевых моментов карт линий CO.

## Алгоритм работы кода:

В первую очередь все исходные данные автоматически приводятся к единому размеру диаграммы направленности и единой сетке по положению и лучевой скорости.

Далее возможно два варианта работы алгоритма:

1) **Определение физических параметров газа без учёта кинематической информации.** В этом случае для каждого «пикселя» карты происходит оценка оптической толщины  $\tau$  (пиковой и интегральной) по отношению антенных температур (пиковой и интегральной) линий 12CO(1-0) и 13CO(2-1). Температура возбуждения ( $T_{ex}$ ) определяется по формуле для переноса излучения по линии 12CO(1-0). Далее значение лучевой концентрации и массы в каждом «пикселе» определяется по найденным значениям  $T_{ex}$  и  $\tau$ . Достоинство этого метода – относительная простота, недостаток – трудность согласованного анализа нескольких переходов линии CO.

2) **Выделение сгустков с помощью GAUSSCLUMP и оценка физических параметров сгустков с учётом кинематической информации и согласованного анализа всех линий CO.** Данный подход предполагает использование первого варианта работы алгоритма в качестве начального приближения и дальнейшего уточнения модели с помощью информации о форме профилей спектральных линий нескольких переходов и изотопов молекулы CO. Используется «многослойная» модель переноса излучения (см. Рисунок 2), где излучение в каждом направлении разделяется на конечное число «слоёв», каждый из которых имеет свой набор параметров: температура возбуждения  $T_{ex}$ , оптическая толщина в пике линии  $\tau_0$ , лучевая скорость пика  $v_0$ , ширина линии  $\sigma = \Theta FWHM/2.3548$ . Данный подход состоит из следующих шагов:

1. Выделение сгустков с помощью алгоритма GAUSSCLUMP в 3D (см. Рисунок 1) по наиболее оптически тонкой линии 13CO(1-0).
2. В направлении на центр каждого сгустка (по положению и лучевой скорости) выделяются профили всех линий CO и строится начальное «однослойное» приближение профиля линии, которое соответствует классическому способу определения физических параметров по линиям CO (из Варианта 1). В профиль линии добавляются так же излучение от тех сгустков, которые попали в диаграмму направленности (см. Рисунок 2). В приближении суммарного профиля данные сгустки учитываются, но их параметры остаются постоянными.
3. Начальное приближение оптимизируется при помощи анализа профилей линий всех доступных линий CO с помощью метода наибольшего правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation).
4. С помощью Марковской цепи Монте-Карло происходит дальнейшая оптимизация найденных параметров и строится диаграмма распределения ошибок определения параметров (см. Рисунок 3,4).
5. Далее найденные значения параметров модели переводятся в лучевую концентрацию CO и массу по формулам из работы Ладейщиков и др. (2016).

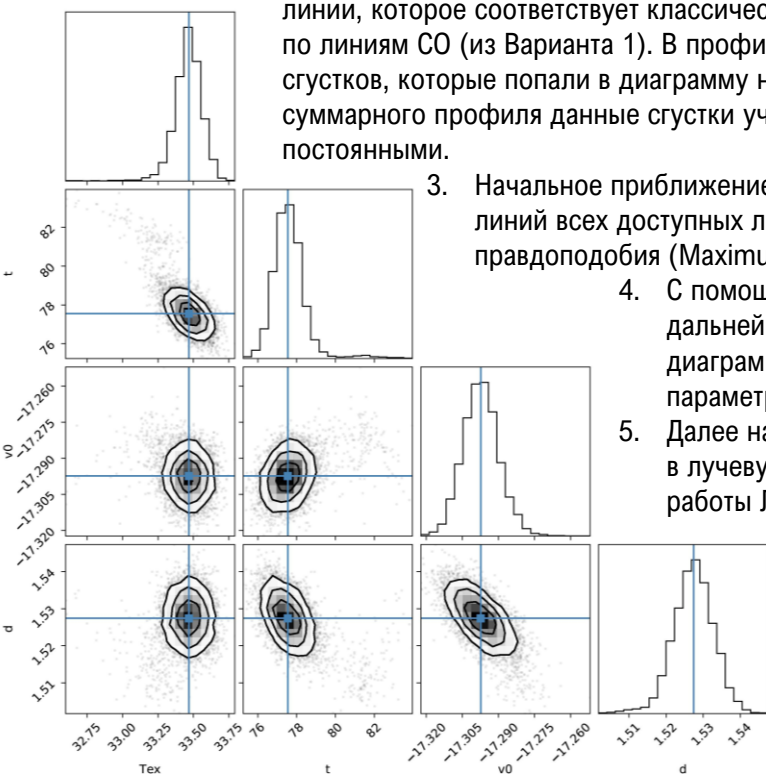


Рисунок 4. Слева – оценка ошибок определения параметров модели с помощью метода Монте-Карло для сгустка №003, справа – профиль линий CO по наилучшей модели, найденной методом Монте-Карло (отмечена синими линиями на рисунке слева). Компонента поглощения приближалась отдельно.

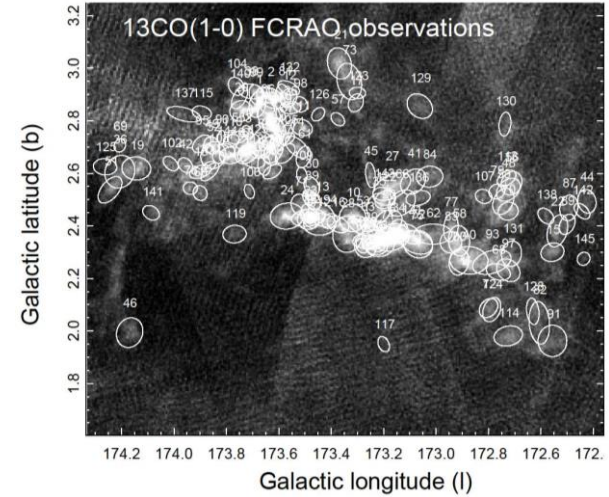


Рисунок 1. Исходная карта излучения линии 13CO(1-0) в области S231-235, эллипсами показаны границы выделенных GAUSSCLUMP сгустков.

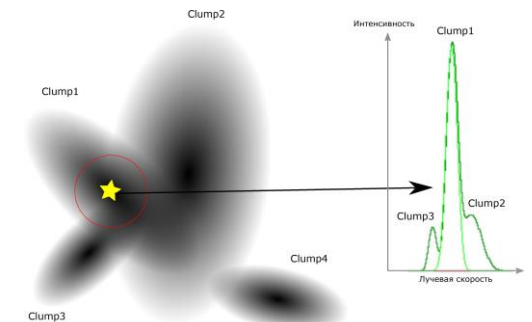


Рисунок 2. Формирование профиля линии CO по нескольким «сгусткам», пересекающим диаграмму направленности (красная окружность) в выбранном направлении (отмечено звездой).

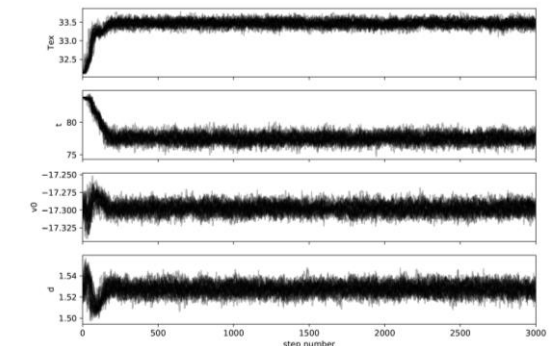


Рисунок 3. Уточнение параметров модели для сгустка №003 (J2000 11:34:52.4, +02:41:37.3) с помощью метода Монте-Карло.

