

ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОТНОГО ЯДРА L1287 С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ И k -БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ

И. Н. Охандеров, П. М. Землянуха

Институт прикладной физики РАН

Работа посвящена исследованию кинематики плотного ядра молекулярного облака L1287. По данным наблюдений молекулярных линии были получены оценки профилей физических параметров и рассчитаны оптимальные значения модели плотного ядра. Для нахождения глобального минимума многомерной функции ошибки используется оригинальный алгоритм, для семплирования параметров — пространство сниженной размерности, что позволяет ускорить алгоритм и анализировать более сложные модели. В данной работе рассматривается модель с 13 свободными параметрами, которая вписывает 10 карт. Благодаря расширению числа анализируемых молекулярных линий уточнены оценки физических параметров объекта исследования.

ESTIMATION OF THE PHYSICAL PARAMETERS OF THE DENSE CORE L1287 USING THE METHOD OF PRINCIPAL COMPONENTS AND k -NEAREST NEIGHBORS

I. N. Okhanderov, P. M. Zemlyanukha

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences

The work is devoted to the study of the kinematics of the dense core of the molecular cloud L1287. Based on the observations of molecular lines, estimates of the profiles of physical parameters were obtained and the optimal values of the dense core model were calculated. An original algorithm is used to find the global minimum of the multivariate error function. To sample the parameters, a space of reduced dimension is used, which allows to speed up the algorithm and analyze more complex models. In this paper, we used a model with 13 free parameters that fits 10 cards. The increase of the amount of analyzed molecular lines made it possible to refine the estimates of the physical parameters.

Введение

Исследования кинематики плотных ядер молекулярных облаков необходимы для понимания начальных условий формирования звезд, что является необходимым при изучении областей образования массивных звезд и звездных скоплений. Кинематику ядер изучают в основном по данным наблюдений в молекулярных линиях [1]. В данной работе было проведено вписывание модельных спектральных карт в наблюдаемые молекулярные линии ядра L1287 для оценки физических параметров газа ядра, таких как систематическая скорость сжатия, турбулентная скорость и др. Для этого был использован модифицированный нами алгоритм, основанный на методе главных компонент [2]. Отличие данного алгоритма в том, что используется пространство сниженной размерности для семплирования функции невязки. Рассматриваются не вероятные оптимальные значения, а ансамбль возможных, что позволяет оценивать доверительные области параметров.

Описание метода и результаты

В работе представлены данные наблюдения молекулярных линий: $\text{HCO}^+(1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$, $\text{HCN}(1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CN}(1-0)$, $\text{CS}(2-1)$, $\text{C}^{34}\text{S}(2-1)$ в плотном ядре L1287, полученных с помощью радиотелескопов OSO-20m (Швеция) [1] и IRAM-30m (Испания) (данные любезно предоставлены И. И. Зинченко). Наблюдения проводились в диапазоне частот $\sim 86-98$ ГГц. Ядро погружено в облако, которое находится на расстоянии ~ 930 пк [3]. Облако имеет форму волокна длиной ~ 10 пк. В ядре находится источник IRAS 0338+6312 [3].

Для оценки физических параметров ядра L1287 было использовано 1D моделирование переноса излучения в микротурбулентном приближении. Для этого использован алгоритм, предложенный в работе [2], который был расширен и дополнен для использования большего набора линий и разных обсерваторий совместно. Алгоритм включает в себя процедуру семплирования параметров модели, снижения размерности модели и выделения области модельных параметров вблизи минимума и нахождения вероятных значений параметров с помощью метода k -ближайших соседей (k -BC) [4]. Для каждого значения были определены границы доверительных областей. Оптимальные параметры определялись из минимума суммарной функции ошибок для карт в нескольких линиях по формуле

$$\chi^2 = \frac{1}{N_p - n} \sum_{k=1}^{n_{\text{lines}}} \sum_{j=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{(I_{ijk}^{\text{obs}} - I_{ijk}^{\text{mod}})^2}{\sigma_{jk}^2}, \quad (1)$$

где $N_p = \sum_{k=1}^{n_{\text{lines}}} N_k \times m_k$; N_k — количество пространственных точек на карте в k -й линии; m_k — количество каналов в спектре k -й линии; n_{lines} — количество линий; σ_{jk} — среднеквадратичное отклонение наблюдаемого спектра в k -линии в точке j . Доверительные области определялись с помощью метода сечения функции ошибки гиперплоскости.

В отличие от предыдущей версии алгоритма [2] в этом случае используются данные наблюдений в шести линиях: $\text{HCO}^+(1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$, $\text{HCN}(1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CN}(1-0)$, $\text{CS}(2-1)$, $\text{C}^{34}\text{S}(2-1)$ с двух радиотелескопов (OSO-20m и IRAM-30m). Полученные оценки физических параметров и их доверительные области согласуются с полученными ранее результатами [2]. Однако включение линий CS в общий набор данных уменьшило доверительный диапазон ряда параметров, то есть уточнило оценки. Возможной причиной является то, что возбужденные линии CS генерируются в областях, которые оказывают малое влияние на профили линий HCO^+ и HCN . Полученные результаты приведены в таблице.

На рисунке представлены наблюдаемые спектры молекул $\text{HCO}^+(1-0)$ (слева) и $\text{HCN}(1-0)$ (справа) и профили модельных линий для оптимальных значений параметров.

Для уменьшения погрешностей рассчитанных параметров необходимы дальнейшие наблюдения в молекулярных линиях, имеющих различную оптическую толщину. Поэтому следующим этапом работы планируется включение в анализ данных наблюдений молекулярных линий более высоких переходов на длине волны 1.3 мм, полученных нами в 2021 г., а также использование более сложных моделей для учета отличий от сферической симметрии и вращения.

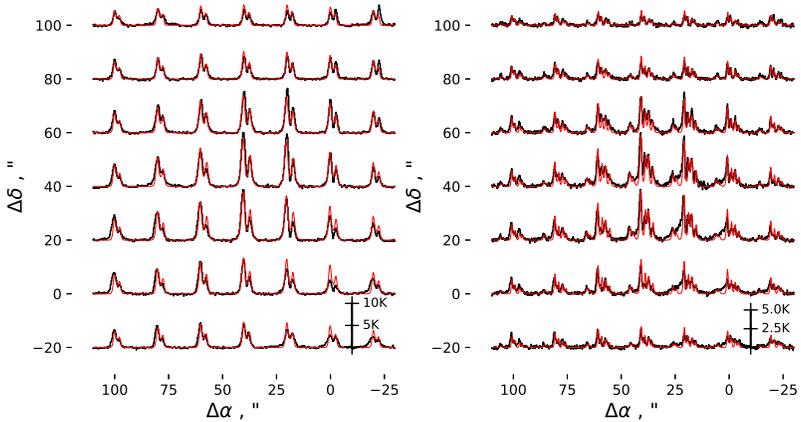
Работа выполнена в рамках государственного задания 0035-2014-0030 (тема 16.30 «Спектральные радиоастрономические исследования на миллиметровых и субмиллиметровых волнах»). Автор выражает благодарность И. И. Зинченко и Л. Е. Пирогову за помощь в проделанной работе.

Библиографические ссылки

- [1] Пирогов Л. Е., Шульга В. М., Зинченко И. И. и др. Многочастотные исследования массивных ядер со сложной пространственно-кинематической структурой // Астрон. журн. — 2016. — Т. 93, № 10. — С. 871.

Полученные значения физических параметров ядра L1287

Параметр	Значение	[2]
$n_0(\text{см}^{-3}), 10^7$	$2.8^{+1.1}_{-0.9}$	$2.6^{+1.7}_{-1.3}$
α_n	$1.71^{+0.06}_{-0.09}$	$1.7^{+0.1}_{-0.3}$
$V_{turb}(\text{км/с})$	$5.9^{+0.05}_{-0.1}$	$5.6^{+0.7}_{-1.4}$
α_{turb}	$0.41^{+0.11}_{-0.1}$	$0.44^{+0.05}_{-0.13}$
$V_{sys}(\text{км/с})$	$-0.66^{+0.04}_{-0.03}$	$-0.66^{+0.21}_{-0.24}$
α_{sys}	$0.08^{+0.05}_{-0.02}$	$0.1^{+0.08}_{-0.13}$
$R_{max}(\text{пк})$	$0.91^{+0.05}_{-0.06}$	$0.8^{+0.2}_{-0.25}$
$X(\text{HCO}^+), 10^{-10}$	$7.7^{+1.2}_{-1.4}$	$10^{+0.5}_{-0.4}$
$X(\text{H}^{13}\text{CO}^+), 10^{-11}$	$1.95^{+0.36}_{-0.4}$	$3.7^{+9.4}_{-2.0}$
$X(\text{HCN}), 10^{-9}$	$1.8^{+0.6}_{-0.4}$	$2.5^{+1.4}_{-1.1}$
$X(\text{H}^{13}\text{CN}), 10^{-11}$	$3.9^{+0.8}_{-0.94}$	$8.5^{+5.3}_{-4.8}$
$X(\text{C}^{32}\text{S}), 10^{-10}$	$8.5^{+1.4}_{-1.8}$	—
$X(\text{C}^{34}\text{S}), 10^{-11}$	$5.8^{+0.96}_{-1.12}$	—



Результаты вписывания модельных спектров $\text{HCO}^+(1-0)$ и $\text{HCN}(1-0)$ (красные кривые) в наблюдаемые (гистограммы) в центральной части ядра L1287. По осям: прямое восхождение и склонение. Справа, снизу каждого рисунка, приведена яркостная температура (T_b)

- [2] Pirogov L. E., Zemlyanukha P. M. Principal Component Analysis for Estimating Parameters of the L1287 Dense Core by Fitting Model Spectral Maps into Observed Ones // Astronomy Reports. — 2021. — Vol. 65, № 2. — P. 82–94. 2101.08219.
- [3] Yang J., Umemoto T., Iwata T., Fukui Y. A Millimeter-Wave Line Study of L1287: A Case of Induced Star Formation by Stellar Wind Compression? // Astrophys. J. — 1991. — Vol. 373. — P. 137.
- [4] Altman N. S. An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression // The American Statistician. — 1992. — Vol. 46, № 3. — P. 175–185. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00031305.1992.10475879>.