

С. А. КАПЛАН и В. И. ПРОНИК

К ВОПРОСУ О ТУРБУЛЕНТНОМ ХАРАКТЕРЕ ДВИЖЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ГАЗОВЫХ ОБЛАКОВ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 6 II 1953)

Неоднократно высказывавшаяся гипотеза о турбулентном характере движения межзвездного газа ⁽¹⁾ нуждается в наблюдательном подтверждении. Кроме того, из данных наблюдений должны быть определены основные количественные характеристики этой турбулентности. Наиболее уверенные результаты в этом направлении могут быть получены из исследований лучевых скоростей межзвездных газовых облаков путем определения хорошо известных в теории изотропной и локальной турбулентности тензоров корреляции скоростей ^(2, 3). Хотя турбулентность межзвездного газа с одной стороны, не является строго изотропной, а с другой стороны, происходит в сжимаемом газе весьма неравномерной плотности и температуры, все-таки следует думать, что для не слишком больших расстояний между облаками (заметно меньших наибольшего масштаба турбулентности) теоретические соотношения, полученные для изотропной турбулентности в несжимаемой жидкости, будут применены по крайней мере в первом приближении.

При современном состоянии наблюдательных данных о скоростях межзвездных газовых облаков определение компонент тензоров корреляций скоростей можно провести следующими тремя методами: А — статистическое сопоставление относительной лучевой скорости двух облаков, находящихся на одном луче зрения, с их взаимным расстоянием; В — статистическое сопоставление лучевой скорости облака с его расстоянием от центра некоторой подсистемы межзвездных газовых облаков; С — статистическое сопоставление относительной лучевой скорости двух облаков с их угловым расстоянием на небесной сфере.

Обработывая наблюдаемые двухкомпонентные межзвездные линии поглощения Н и К при помощи первого метода, можно определить радиальные компоненты тензоров корреляций четных рангов (B_{rr} , B_{rrrr} и т. п.). Обработывая однокомпонентные линии поглощения в отдельных межзвездных облаках вторым методом, можно определить также и радиальные компоненты тензоров корреляций нечетных рангов (B_{rrr} и т. п.). Наконец, при помощи третьего метода можно определить тангенциальные компоненты тензоров корреляций скоростей (B_{tt} и т. п.) также по однокомпонентным линиям поглощения. Для более уверенных выводов необходимо использовать наблюдательный материал, полученный с наибольшей дисперсией.

Исследование лучевых скоростей межзвездных газовых облаков методами А и В было выполнено в работах ⁽⁴⁾ и ⁽⁵⁾, соответственно. Наблюдательным материалом служил каталог лучевых скоростей меж-

звездных газовых облаков, полученный Адамсом (6). Отсылая за подробностями к вышеупомянутым работам, отметим здесь, что в обоих случаях было получено достаточно уверенное подтверждение гипотезы о турбулентном характере движения межзвездного газа. Однако количественные характеристики этой турбуленции были определены неуверенно: в случае метода А вследствие того, что Адамс мог разрешить компоненты линий поглощений, принадлежащие отдельным облакам, только тогда, когда их относительная скорость превышала 7—9 км/сек, т. е. в статистику вошли лишь большие относительные скорости: в случае метода В вследствие более ограниченного смысла определяемой этим методом корреляции.

Наиболее уверенные результаты, как в смысле подтверждения гипотезы турбулентного движения, так и в смысле определения количественных характеристик этой турбуленции, были получены методом С при обработке того же каталога Адамса (6). В настоящей заметке приводятся краткие результаты этого исследования.

Наша задача заключается в определении из данных наблюдений корреляции вида (2, 3)

$$\overline{(\Delta v_t)^2} = B_{tt} = \frac{4}{3} B_{rr} \approx \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{2} (er)^{3/2} = 2(er)^{3/2}, \quad (1)$$

где r — расстояние между облаками; Δv_t — компонента их относительной скорости, перпендикулярная соединяющей эти облака линии;

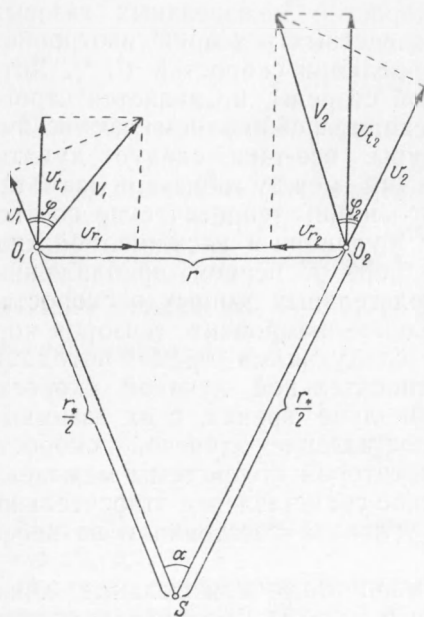


Рис. 1

где v_1 и v_2 — соответствующие скорости; V_1 и V_2 — проекции действительных скоростей облаков на плоскость O_1SO_2 . Остальные обозначения понятны без объяснений.

Усредняя по всем возможным значениям углов ϕ_1 и ϕ_2 (учитывая изотропность), получаем соотношения:

$$\begin{aligned} B_{tt} &= \overline{(\Delta v_t)^2} = \overline{(v_1 - v_2)^2} + 2\overline{v_1 v_2} \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \\ B_{rr} &= \overline{(\Delta v_r)^2} = \overline{(v_1 - v_2)^2} + 2\overline{v_1 v_2} \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Принимая во внимание, что $B_{tt} = \frac{4}{3} B_{rr}$, окончательно находим:

$$B_{tt} = \frac{\overline{(v_1 - v_2)^2}}{7 \cos \alpha + 1} \cdot \frac{8 \cos \alpha}{1} \quad (3)$$

Величины $\overline{(v_1 - v_2)^2}$ нетрудно получить по данным наблюдений. Лучевые скорости облаков из каталога Адамса были объединены в группы по соответствующим звездным расстояниям (взятым из каталога Паренаго) с интервалами через 50 парсек. В каждой из этих групп величины $v_1 - v_2$, в свою очередь, были объединены в подгруппы по углу α с интервалами через 10° . И, наконец, в каждой из этих подгрупп вычислялись $\overline{(v_1 - v_2)^2}$. Результаты приведены на рис. 2, где цифра около каждой точки означает число пар облаков, вошедших в данную подгруппу.

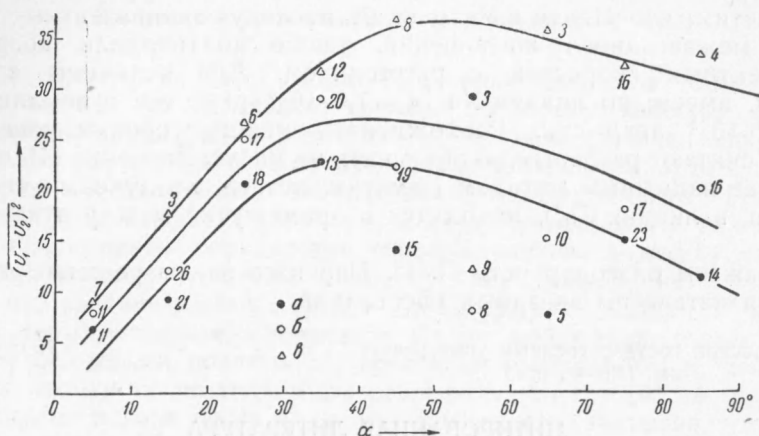


Рис. 2. $a-101 \leq r_* \leq 150$ пс; $b-151 \leq r_* \leq 200$ пс;
 $v-201 \leq r_* \leq 250$ пс

Из этого рисунка сразу видно, что искомая корреляция очень хорошо выражена, и притом одинаковым образом в каждой группе по r_* имеет место монотонный рост $\overline{(v_1 - v_2)^2}$ вплоть до $\alpha \approx 40^\circ$. При больших α имеет место спад величины $\overline{(v_1 - v_2)^2}$ с увеличением α .

Представляя определенную по (3) и рис. 2 величину B_{tt} в виде уравнения: $B_{tt} \sim r^k = (r_* \sin \frac{\alpha}{2})^k$ при $\alpha \leq 40^\circ$, можно методом наименьших квадратов определить показатель k . Результаты приведены в табл. 1.

r_* в пс	101—150	151—200	201—250	По всем интервалам r_*
k	0,82	0,81	0,63	0,71
ϵ в $\frac{\text{эрг}}{\text{г. сек}}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, показатель степени корреляции k оказался очень близким к теоретическому $\frac{2}{3}$. Поэтому, представляя данные рис. 2 и (3) в виде уравнения (1) с теоретическим показателем степени, можно довольно точно определить величину v . Результаты приведены в табл. 1.

Четко выраженный ход корреляции скоростей, близкое совпадение наблюдаемого показателя степени в этой корреляции с теоретическим, хорошее внутреннее согласие результатов, полученных в разных интер-

валах по r_* , — все это является достаточно надежным доказательством того, что движение межзвездных газовых облаков подчиняется, по крайней мере в первом приближении, закономерностям изотропной и локальной турбулентности. Значение основной характеристики турбулентного движения — величины диссипирующей энергии — равно:

$$\epsilon \approx 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{эрг.}}{\text{г} \cdot \text{сек.}} \quad (4)$$

Наконец, спадание $(v_1 - v_2)^2$ при $\alpha > 40^\circ$, т. е. при $r \gtrsim 50 - 100$ парсек, повидимому, означает, что на этих расстояниях турбулентцию уже нельзя считать локально-изотропной. Вероятно, расстояние в 100 парсек близко к наибольшему масштабу турбулентности. Исследование характера корреляции при больших α позволит определить и закономерности крупномасштабных движений межзвездной турбулентности.

Отметим, что Иентч и Унзольд (7), исследуя эквивалентные ширины линий межзвездного поглощения, также подтвердили возрастание турбулентных скоростей с расстоянием. Для величины ϵ по их данным, имеем: по линиям Na $\epsilon \approx 1,8 \cdot 10^{-4}$ эрг/г·сек и по линиям Ca⁺ $\epsilon \approx 1,4 \cdot 10^{-3}$ эрг/г·сек. Расхождение между обоими значениями авторы считают реальным, но объяснить не могут. Значение (4), полученное более надежным методом (заметим, кстати, по лучевым скоростям облаков в линиях Ca⁺), находится в промежутке между этими значениями.

Выражаем благодарность П. П. Паренаго за разрешение воспользоваться каталогом звездных расстояний.

Львовский государственный университет
им. Ив. Франко

Поступило
13 I 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Сборник Problems of Cosmical Aerodynamics, 1951. ² А. Н. Колмогоров, ДАН, **30**, 299 (1941); **31**, 538 (1941); **32**, 19 (1941). ³ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Механика сплошных сред, 1944. ⁴ С. А. Каплан, Циркуляр Львовской астрономической обсерватории, № 23, 1952. ⁵ С. А. Каплан, В. И. Проник, там же, № 24, 1952. ⁶ W. S. Adams, Ap. J., **109**, 335 (1949). ⁷ C. Jentsch, A. Unsöld, Z. Phys., **125**, 370 (1948).