

Г. ФРАНК, Б. ЛЕМАЖИХИН ■ В. КАСАТОЧКИН

О МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО БЕЛКА В МЫШЦАХ

(Представлено академиком Л. А. Орбели 22 XI 1949)

Весьма важный для понимания молекулярного механизма мышечного сокращения вопрос о форме молекулярных цепей ориентированного белка в фибриллах живой мышцы до настоящего времени еще недостаточно выяснен. Решение этого вопроса непосредственной расшифровкой рентгеновской дифракционной картины, получаемой на живой мышце под большими углами рассеяния, является задачей чрезвычайно сложной, благодаря бедности этой картины и наложению картины рассеяния рентгеновых лучей большим количеством воды, содержащейся в мышце.

В нашей работе, имея целью проследить за изменениями молекулярной структуры ориентированного белка, мы предприняли подробное изучение изменений рентгеновской дифракционной картины в процессе обезвоживания мышцы.

На рентгеновских дифракционных картинах под большими углами рассеяния, полученных нами на портняжной мышце лягушки в различных стадиях процесса высушивания на воздухе, наблюдаются характерные эффекты, свидетельствующие о глубоких изменениях молекулярной структуры ориентированного белка в мышце.

Рентгенограмма живой мышцы характеризуется прежде всего рассеянием монохроматического излучения под относительно небольшими углами, изображающимся в виде узкой экваториальной полоски вблизи центрального пятна. Кроме яркого гало воды ($\sim 3,2 \text{ \AA}$), на фотопленке возникает также слабое гало среднего периода $\sim 4,6 \text{ \AA}$, обычно наблюдавшееся на дифракционных картинах белков.

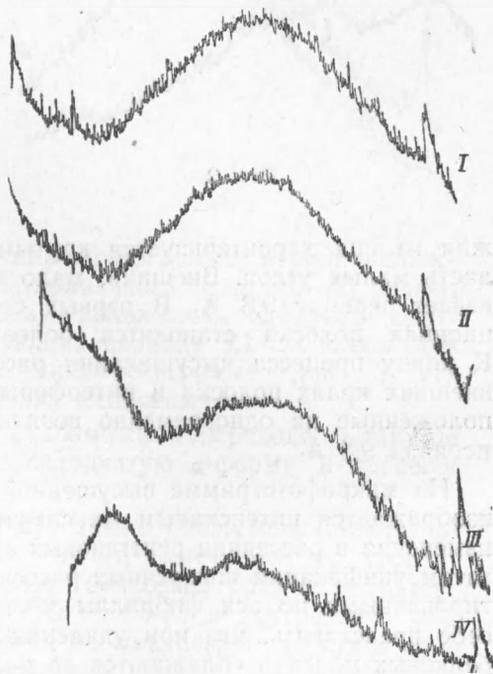


Рис. 1

Микрофотограммы, снятые по экватору (рис. 1, I) и меридиану (рис. 2, I'), иллюстрируют распределение интенсивности рассеяния K — излучения меди на живой мышце.

Наличие пространственно ориентированных молекулярных цепей белка в фибриллах живой мышцы сказывается на дифракционной картине в появлении экваториальной полосы рассеяния под относительно небольшими углами.

Дифракционная картина той же мышцы, доведенной до воздушно-сухого состояния, совершенно идентична α -форме ориентированного миозина (1) (рис. 1, IV и 2, IV'). Серия микрофотограмм, приведенных

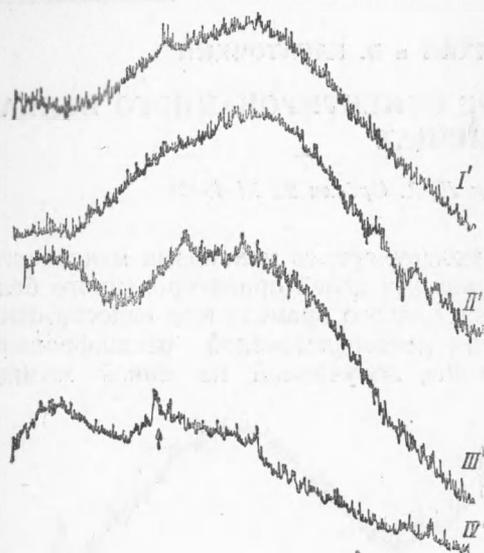


Рис. 2

на рис. 1, иллюстрирует распределение интенсивности по экватору на дифракционных картинах последовательных стадий высушивания одного и того же образца мышцы. На рис. 2 — то же самое для меридионального направления.

Экваториальное рассеяние для различных стадий характеризуется рядом интересных особенностей (рис. 1).

Как и следовало ожидать, в процессе удаления воды прогрессирует отчетливость дифракционной картины, характеризующей белковую компоненту мышцы.

Весьма характерные изменения наблюдаются в распределении интенсивности в пределах экваториальной интерференционной полосы, расположенной вблизи центрального пятна. Све-

жая мышца характеризуется крутым подъемом интенсивности в область малых углов. Внешний, мало интенсивный край этой полосы отвечает периоду 9,8 Å. В первых стадиях обезвоживания интерференционная полоска становится более равномерной по интенсивности. К концу процесса высушивания рассеянное излучение собирается на внешних краях полоски в интерференционные пятна, симметрично расположенные на одновременно возникающем внутреннем гало среднего периода 9,8 Å.

На микрофотограмме высушенной мышцы интерференционное пятно изображается интенсивным максимумом (рис. 1, IV). Наблюдающиеся изменения в рассеянии рентгеновых лучей по экватору являются результатом унификации поперечных рассеяний между параллельными, ориентированными по оси фибриллы молекулярными цепями белка. Можно себе представить, что при удалении воды параллельные главные цепи белковых молекул сближаются до расстояния 9,8 Å, определяемого, как известно, протяженностью боковых цепей. Этот процесс, по сути дела, аналогичен процессу агрегации молекулярных цепей миозина в α -форму, с образованием пучков складчатых (по Астбери) цепей с поперечным периодом 9,8 Å.

Вопрос о складчатой или вытянутой форме молекулярных цепей и возможных изменениях в процессе высушивания, конечно, не может быть решен только из наблюдений рассеяния по экватору. Необходимо тщательное изучение рассеяния по меридиану.

По своему характеру меридиональные интерференции в системах,

имеющих, подобно нашей, ориентированные молекулярные цепи, отличаются от экваториальных. Их возникновение возможно в результате интерференции рентгеновых лучей на системе параллельных линейных решеток достаточно большой длины и не связано с образованием областей трехмерной периодичности (кристаллов). Необходимым и достаточным условием для появления подобного рода интерференционных максимумов является наличие ориентированных молекулярных цепей по оси, перпендикулярной пучку рентгеновых лучей.

На рентгенограмме воздушно-сухой мышцы возникают отчетливые интерференционные пятна периода $5,1 \text{ \AA}$, симметрично расположенные на меридиане и отмечающиеся на соответствующей микрофотограмме в виде резкого пика (рис. 2, IV'). Как можно видеть на микрофотограмме (рис. 2, I'), на дифракционной картине, полученной от свежей мышцы, интерференционный максимум периода $5,1 \text{ \AA}$ отсутствует. Период идентичности $5,1 \text{ \AA}$ трактуется Астбери как расстояние вдоль изогнутой в складки полипептидной цепи, равное протяженности трех аминокислотных остатков. Возникновение меридиональной интерференции периода $5,1 \text{ \AA}$, в процессе обезвоживания мышцы, особенно наглядно при сопоставлении картин рассеяния в меридиональном и экваториальном направлениях с мышцы одной и той же стадии высушивания. Для свежей мышцы ход кривых рассеяния в обоих направлениях полностью совпадает в интересующей нас области углов. Для мышцы, выдержанной на воздухе в течение суток, микрофотограммы меридионального направления (рис. 3, II') и экваториального (рис. 3, II) имеют максимумы, не совпадающие по своему положению. Стрелкой снизу (рис. 3, II') отмечен пик, соответствующий периоду $5,1 \text{ \AA}$. Близкий к нему максимум на экваториальной микрофотограмме (рис. 3, II) периода $\sim 4,6 \text{ \AA}$ соответствует обычному белковому гало.

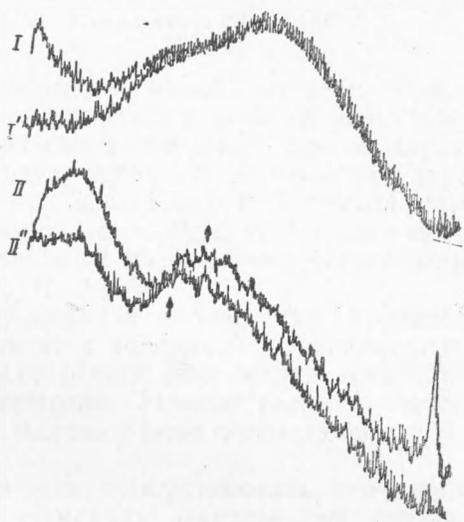


Рис. 3

Эти наблюдения свидетельствуют о возможном переходе вытянутой β -формы молекулярной цепи белка в складчатую α -форму в процессе обезвоживания мышцы.

В процессе обезвоживания происходит также сближение молекулярных цепей неориентированных белков мышцы, отмечаемое на дифракционных картинах возникновением двух белковых, размытых, интерференционных колец: внешнего (периода $\sim 4,5 \text{ \AA}$) и внутреннего (периода $\sim 9,8 \text{ \AA}$), которые регистрируются на микрофотограммах в виде интенсивных интерференционных максимумов.

Полученные нами результаты находятся, повидимому, в противоречии с опубликованными наблюдениями Астбери (1), обнаружившим достаточно резкие меридиональные интерференции периода $5,1 \text{ \AA}$ на живой мышце. Эти периоды были воспроизведены также нами, однако при больших дозах облучения рентгеновыми лучами в дифракционной камере. Не исключена возможность, что указанные интерференции появляются в результате локального изменения молекулярной структуры белка интенсивным облучением мышцы при получении снимка. В связи с этим, утверждение Астбери о том, что сокращение мышцы сопряжено только

с изменением внутренней энергии молекулярных цепей белка, без существенной роли энтропии в изменении свободной энергии, также не может считаться окончательно доказанным.

Лаборатория биофизики
Физиологического института
им. И. П. Павлова
Академии наук СССР

Поступило
26 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. T. Astbury, Proc. Roy. Soc., Ser. B, 134, 303 (1947).