

собой разумеется, здесь может идти речь только о спектроскопическом методе исследования изотопов в звёздных атмосферах. Как известно, различные изотопы одного и того же элемента химически совершенно идентичны, и поэтому спектры их также совершенно одинаковы. Однако по той причине, что массы ядер изотопов одного и того же элемента отличаются на один, два или более нейтронов, спектры различных изотопов данного элемента будут смещены друг относительно друга на очень небольшую величину, причём, чем легче элемент, тем больше будет это изотопическое смещение. Максимальный эффект будет, очевидно, для водорода, где для H_2 он достигает значительной величины — $1,2 \text{ \AA}$. При настоящих инструментальных условиях до сих пор не удалось обнаружить изотопы по атомным спектрам звёзд. Такие попытки, впрочем, и не предпринимались, что не может быть оправдано. Может быть, уже сейчас можно было бы наблюдать атомный спектр тяжёлого водорода — дейтерия, — если бы относительная концентрация его не была слишком малой. В будущем, может быть, удастся обнаружить атомные спектры изотопов наиболее лёгких элементов.

Однако изотопы гораздо легче обнаружить по молекулярным, чем по атомным спектрам. Вместе с тем очевидно, что чем меньше различие между массами компонентов молекулы и чем меньше их масса, тем вибрационная часть изотопического смещения будет больше. Это видно из того, что эффект изотопии определяется отношением редуцированных масс обычной и тяжёлой молекул или атома:

$$\Delta\nu = (p-1)(\omega'_e u' - \omega''_e u'') - (p^2-1)(x'_e \omega'_e u'^2 - x''_e \omega''_e u''^2) + \dots,$$

где

$$u = v + \frac{1}{2}, \quad p = \sqrt{\frac{MM'}{M+M'}} : \sqrt{\frac{MM'_1}{M+M'_1}}.$$

20 лет назад впервые Сэнфорд и Менцел¹ высказали предположение, что две довольно значительные полосы в спектрах так называемых углеродных звёзд класса N и R можно отождествить с полосами тяжёлой молекулы углерода, только что открытыми в лаборатории Кингом и Бирдже². Это было первое указание на наличие изотопов в звёздах. Однако в спектрах холодных звёзд, богатых многочисленными молекулярными полосами, идентификация, основанная на двух полосах, всегда ненадежна, так как это может быть результатом случайного совпадения.

Действительно, этот результат был в общем забыт на десятилетие до 1939—1940 гг., когда на Симеизской обсерватории стали заниматься этой проблемой. Хотя наши инструментальные средства были скромны, но уже в 1940 г. мы могли довольно уверенно

обнаружить в спектрах углеродных звёзд не две полосы тяжёлой молекулы углерода, а 12 полос³, добавив к двум известным полосам десять ранее неизвестных полос тяжёлых молекул $C^{13}C^{12}$ и $C^{13}C^{13}$. Результат должен был казаться убедительным, потому что идентификация базировалась не только на удовлетворительном согласии в длинах волн между наблюдением и вычислением. Мы могли обнаружить новые полосы для различных последовательностей по разные стороны от нулевой последовательности и получить изотопическое смещение разных знаков по обе стороны от нулевой последовательности. Таким образом, значительное число новых полос, согласно с теорией в отношении абсолютного значения и знака изотопического смещения, а также удовлетворительное согласие в отношении ожидаемого хода интенсивностей полос обычной и тяжёлой молекул дали как будто уже вполне убедительное доказательство в пользу наличия изотопа C^{13} в атмосферах углеродных звёзд.

Другим результатом, на котором мы настаивали в первой работе, было утверждение того, что концентрация C^{13} по отношению к C^{12} варьирует в больших пределах от 0,05 до 0,50, в максимуме превышая в отдельных звёздах почти в 40 раз значение, вытекающее из лабораторных определений эффективных сечений захвата протонов ядрами C^{12} и C^{13} , а также значение концентрации C^{13} , наблюдаемое на Земле³. В первой работе мы исследовали последовательности +1, —1, —2. Чтобы судить, насколько наш наблюдательный материал можно считать надёжным, мы для иллюстрации приводим здесь на рис. 1 и 2 фотографии небольших областей спектра, охватывающих последовательности —1 и —2. Стрелками отмечены положения обычных и тяжёлых молекул $C^{12}C^{13}$, $C^{12}C^{13}$ и $C^{13}C^{13}$.

После появления этой работы стали появляться работы по изотопам в звёздных атмосферах в Америке, Канаде и Франции⁴. В свою очередь мы также продолжали работу и в течение ряда последних лет могли значительно расширить полученные нами результаты. Мы могли найти доказательства в пользу наличия не только тяжёлых молекул углерода $C^{13}C^{12}$ и $C^{13}C^{13}$, но также тяжёлых молекул циана $C^{13}N^{14}$ для фиолетовой системы $^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$, а также найти раньше других очень значительное число новых полос тяжёлой молекулы циана для красной системы $^2\Pi \rightarrow ^2\Sigma$ ⁵. Для этих систем число найденных нами новых полос уже исчислялось десятками. Для иллюстрации мы даём рис. 3, на котором представлены полученные в Симеизе фотография и микрофотограмма для полос $C^{13}N^{14}$ и $C^{12}N^{14}$ (3,0 и 4,1) в красно-инфракрасной области спектра. Двойственность полос выражена здесь вполне отчётливо, и не приходится сомневаться в том, что наряду с полосами обычной молекулы циана $C^{12}N^{14}$ мы имеем здесь полосы тяжёлой молекулы циана $C^{13}N^{14}$ ⁶.

На основании многочисленного наблюдательного материала можно было прийти к уверенному заключению, что изотоп C^{13} не только присутствует в атмосферах углеродных звёзд, но что он присутствует иногда в совершенно неожиданно большой кон-

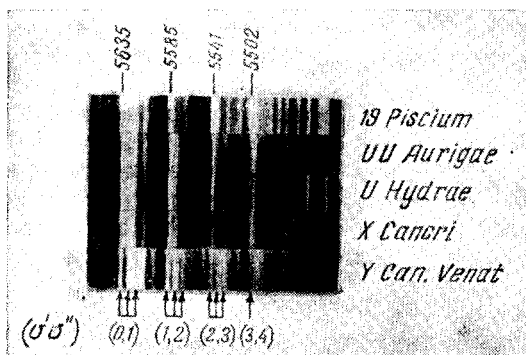


Рис. 1. Спектры звёзд класса N в области свановых полос (последовательность — 1). Стрелки указывают положение полос $C^{12}C^{13}$, $C^{13}C^{12}$ и $C^{13}C^{13}$. C^{13} в особенности обилен в Y. Can. Ven.

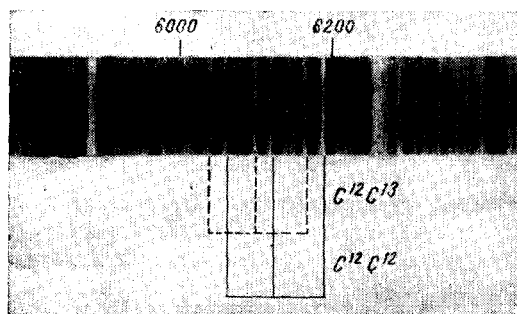


Рис. 2. Спектр R J Draconis в области свановых полос (последовательность — 2).

центрации. В итоге работ, проведённых в нескольких больших обсерваториях в последние 6—7 лет, был подтверждён неожиданный, казавшийся невероятным, результат об очень большой относительной концентрации тяжёлого изотопа C^{13} . Вначале это казалось невероятным, и это обстоятельство послужило причиной такого интереса к изотопам.

Но этот результат не сразу был принят. В одном физическом журнале было высказано сомнение о его реальности. Однако, после того как и Мак-Келлар и Герцберг, базируясь на различном

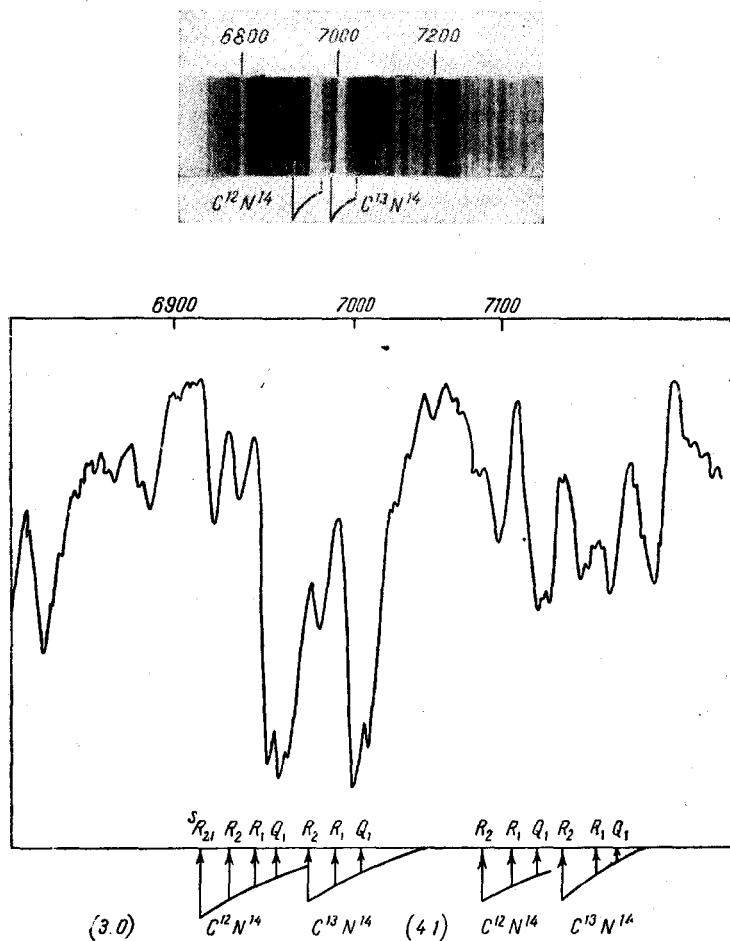


Рис. 3. Спектр и микрофотограмма J Canum Venaticorum в области полос циана.

материале, также нашли в некоторых углеродных звёздах очень высокую концентрацию C^{13} , все сомнения должны были отпасть. В конце концов сделалась общепризнанной та точка зрения, что в некоторых углеродных звёздах концентрация достигает по крайней мере 0,35.

Этот результат должен был смутить физиков, которые нашли из измерений эффективных сечений ядер изотопов углерода значение $C^{13}:C^{12}$, по крайней мере в 20 раз меньшее. Этот результат противоречит также тому, что наблюдается на Земле (отношение концентраций C^{13} и C^{12} близко к 1:90). Этот результат находился в противоречии и с отношением $C^{13}:C^{12}$, принятым для недр звёзд Бете в его термо-нуклеарной гипотезе об источниках энергии звёзд и Солнца. Таким образом, в этой проблеме столь фундаментального значения выявились весьма серьёзные противоречия.

Поэтому не удивительно, что в связи с этим противоречием, а также для проверки гипотезы Бете, совсем недавно, уже в 1950 г., в лаборатории радиации Калифорнийского института технологии была проведена Холлом и Фаулером экспериментальная работа по определению эффективного сечения радиоактивного захвата протонов ядрами углерода при энергии около 100 *кэв* — в условиях, уже более приближающихся к тем, которые имеют место внутри звёзд. В результате эти авторы совершенно неожиданно получили во много раз большее значение для эффективного сечения ядер C^{12} , чем это было найдено прежде¹. Переходя от этих новых значений эффективного сечения захвата к интересующему нас отношению $C^{13}:C^{12}$, мы получим значение, близкое к 0,15 или даже 0,20. Такая относительная концентрация C^{13} примерно в 10—15 раз больше того, что наблюдается на Земле и что было принято Бете для звёздных недр, и лишь в 2—3 раза меньше того, что мы нашли в максимуме в атмосферах углеродных звёзд. Это радикально меняет положение, если только в указанном эксперименте нет какой-либо ошибки.

Таким образом, теперь уже не результат для углеродных звёзд представляется непонятным с физической точки зрения, а скорее делается непонятной очень маленькая относительная концентрация тяжёлого изотопа C^{13} на Земле. Вместе с тем необходимо подвергнуть ревизии часть гипотезы Бете, касающуюся прежней оценки отношения $C^{13}:C^{12}$ в недрах звёзд и Солнца.

В свете полученных выше результатов особенно изолированным выступает факт очень малой относительной концентрации C^{13} на Земле. Когда в первой работе мы нашли очень большую концентрацию C^{13} в атмосферах углеродных звёзд, мы, подчеркнув крайнее расхождение с концентрацией C^{13} на Земле, пытались грубо оценить хотя бы верхний предел концентрации C^{13} в солнечной атмосфере. Это было нами сделано в нашей работе³, где мы использовали для этой цели роуландовские Таблицы длин волн. Анализ длин волн слабых линий в области расположения полосы (0,0) молекул углерода, а также молекулы циана с полной очевидностью убедил, что изотопические компоненты ротационной структуры в спектре Солнца не обнаруживаются. Отсюда был

сделан надёжный вывод, что концентрация молекулы C^{13} во всяком случае много меньше 0,1. В феврале 1950 г., через 8 лет, подобная работа была повторена на Маунт-Вильсон, и три автора — Гринстейн, Ричардсон и Шварцшильд — пришли к тому же самому выводу, что в солнечном спектре практически не обнаруживаются линии полос тяжёлой молекулы $C^{13}N^{14}$ ⁸. Эти авторы также пытаются оценить верхний предел отношения $C^{13}:C^{12}$ и находят, что он менее 1:36.

Таким образом, мы должны придти к заключению, что в солнечной атмосфере концентрация C^{13} очень мала и, может быть, приближается к земному значению (около 1:90).

С другой стороны, концентрация C^{13} получается очень большой в атмосферах так называемых углеродных звёзд, а также должна быть большой в недрах звёзд, если исходить из новых лабораторных определений эффективных сечений захвата протонов ядрами углерода. Таким образом, проблема как будто вступила в новую фазу. Теперь уже неуглеродные звёзды стоят совсем особняком, так как значение $C^{13}:C^{12}$ может быть, уже не так сильно отличается от того, что дают лабораторные данные в отношении ядерной реакции C^{13} (p , γ). Чтобы сохранить гипотезу Бете об источнике энергии для Солнца, остаётся альтернатива: наблюдаемая относительная концентрация тяжёлого изотопа C^{13} в солнечной атмосфере (порядка 1—2%) очень сильно отличается от относительной концентрации тяжёлого изотопа C^{13} (порядка 20%) в недрах Солнца. Значение этого результата для космогонии и для проблемы внутреннего строения звёзд не может быть недооценено.

Эта работа может служить иллюстрацией полезной и эффективной кооперации даже между наблюдательной астрофизикой и экспериментальной ядерной физикой. На приведённом примере мы видели, как результаты, полученные в астрофизике, заставили физиков пересмотреть полученные ранее результаты и получить новые, весьма отличные от прежних. Принимая во внимание чрезвычайно большие следствия принципиального характера от принятия того или иного результата в этой области, мы вправе ожидать, что будут повторены экспериментальные определения эффективных сечений захвата протонов ядрами углерода. Можно также надеяться, что в связи с большим астрофизическим интересом циклической схемы Бете физики, быть может, попытаются экспериментально проверить не только её первое звено.

Вместе с тем астрофизики должны всё большее внимание уделять проблеме изотопов в астрофизике. Как мы видели, спектроскопия изотопов в астрофизике может иметь довольно надёжную базу. Определение концентрации изотопов в атмосферах звёзд и другие исследования, связанные с изотопами, представляют собой, очевидно, интересное, по существу новое, поле исследования некоторых астрофизических проблем большого принципиального значения.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Sanford, Menzel, Publ. Astron. Soc. Pacific. **41**, 271 (1929); **42**, 34 (1930).
 2. Birge, King, Astroph. J. **72**, 19 (1930).
 3. Г. Шайн, Вестник АН СССР № 10, 52 (1940); Бюлл. Абастум. обсерват. № 6, 1 (1942).
 4. Mc Kellar, Publ. Astron. Soc. Pacific **59**, 186 (1947); **61**, 34 (1949); **61**, 199 (1949); **62**, 110 (1950).
 5. Г. А. Шайн, В. Ф. Газе, Извест. Крымск. астрофиз. обсерв. **2**, 131 (1948).
 6. Г. А. Шайн, В. Ф. Газе, Извест. Крымск. астрофиз. обсерв. **5**, 24 (1950).
 7. Hall, Fowler, Phys. Rev. **77**, 197 (1950).
 8. Grunstein, Richardson, Schwarzschild, Publ. Astron. Soc. Pacific **62**, 15 (1950).
-