Уточнение скоростей термоядерных реакций

Белов А.А., 1Калиткин Н.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
1Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

***Введение.*** Для расчета задач управляемого термоядерного синтеза требуется знать зависимости скоростей термоядерных реакций  от температуры. Эти скорости получают из экспериментально измеренных зависимостей сечений реакций  от энергии. Существует много экспериментальных работ [1], но точность большинства из них невелика. Это видно из большого расхождения различных работ.

При традиционной обработке сечений [2] выбирают априорную зависимость  с некоторым числом свободных параметров. Значения параметров подбирают методом наименьших квадратов. Надежность этого способа зависит от того, удачно ли выбрана формула . Практически удовлетворительную точность удается получить при кэВ, а при кэВ результаты неудовлетворительные. Поэтому нужно провести новую обработку экспериментов, используя возможности современных математических методов.

***База сечений.*** Рассмотрены 4 важнейших реакции: , , , . Для них в [1] приведено ~2000 экспериментальных точек из ~90 работ. Данные разных авторов расходятся до 6 раз! Поэтому был проведен тщательный анализ этих работ, и каждой экспериментальной точке была приписана определенная точность. Для лучших работ точность доходила до 1%, а для худших составляла сотни процентов. Для удобства обработки все сечения были поделены на множитель Гамова, учитывающий проницаемость кулоновского барьера. Полученное отношение называют S-фактором.

***Регуляризованный двойной период.*** Метод двойного периода [3] позволяет аппроксимировать непериодическую функцию  рядом Фурье, обеспечивая хорошую точность на всем отрезке аппроксимации. Этот метод не использует априорной формулы . Он позволяет не только передать функцию в пределах экспериментального отрезка, но даже несколько экстраполировать за его пределы. Добавление к этому методу регуляризации по А.Н. Тихонову позволяет обрабатывать кривые с большими погрешностями. При этом отсутствуют нефизичные осцилляции расчетной кривой.

***Обработка сечений реакций.*** Описанным способом были построены сечения указанных выше реакций. Они имеют точность ~2% в экспериментальном диапазоне энергий 2 кэВ – 14 МэВ. Благодаря свойству S-фактора они экстраполируются как константы вплоть до .

***Скорости реакций.*** Домножая найденный S-фактор на множитель Гамова и свертывая его с максвелловским распределением скоростей, найдем скорости реакций  численным интегрированием. Они непосредственно получаются в таблиц чисел. Для удобства использования в прикладных расчетах эти таблицы были аппроксимированы методом двойного периода с 12 коэффициентами Фурье. Это обеспечивает точность порядка 3% в диапазоне 10 эВ – 2 МэВ. Полученные формулы уточняют старые данные [2] на 10 – 20% при низких температурах и кардинально улучшают их при высоких температурах.

Литература

1. NEA Data Bank – Nuclear Data Services. http://www.oecd-nea.org/janisweb/search/exfor
2. Козлов Б.H. // Атомная энергия. **12**:3 (1962). 238-240.
3. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. // ДАН. **374**:4 (2000). 464-468.
4. Белов А.А., Калиткин Н.Н. // ДАН. **470**:3 (2016), 266-270.