



Екзотични ядрени системи

Чавдар Стоянов, Динко Динев

Създаването на пълна картина на природата на ядрената материя изисква все по-задълбоченото изучаване на всички области от картата на нуклеоностабилните ядра (вж. протон-неутронната диаграма). Това е диаграма с координати: брой на протоните(Z) и брой на неутроните(N) в ядрото.

В протон-неутронната диаграма диагонално е разположена т. нар. „долина на стабилността“, в която се разполагат стабилните ядра (черните квадратчета). За ядрата от долината на стабилността е в сила следното съотношение между броя на неутроните и броя на протоните:

$$\frac{N}{Z} = 0,98 + 0,015A^{2/3}$$

където $A = N + Z$ е масовото число.

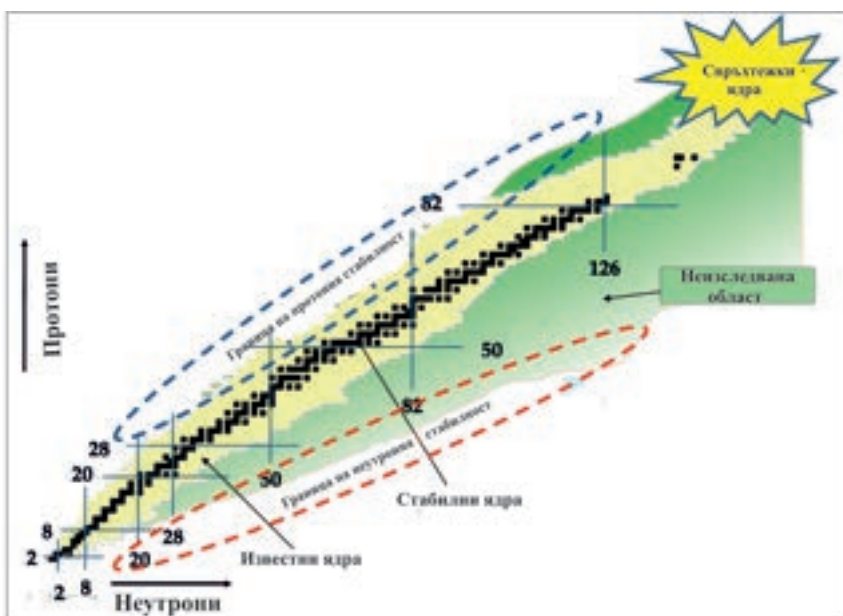
„Долината на стабилността“ е обградена от областта, заета от нестабилните ядра. Границата на съществуване на ядра-

Преди малко повече от 100 години е открито атомното ядро. Откривателите по това време не са предполагали, че са открили основният градивен камък на видимата, заобикаляща ни материя. 99% от тази материя е концентрирана в атомни ядра. Днес са известни 270 стабилни ядра. Други 2000 са изкуствено получени. Теоретично е предсказано съществуването на около 7000 ядра.

та се определя от т. нар. „линии на протонна и неутронна стабилност“. Целта е да се изучат всички възможни комбинации от протони и неутрони, които могат да формират ядро. В крайна сметка трябва да се достигне до едно

пълно теоретично описание на многочастичния ядрен проблем.

Ядрата, отдалечени от долината на стабилност, се наричат „екзотични ядра“. Това са ядра, намиращи се в екстремални условия. Те имат аномален брой протони или неутрони. Някои от тях се въртят изключително бързо, други се намират във високо възбудено състояние. Необичайните свойства на тези ядра се дължат на промяна на динамиката в ядрената система и това води до наблюдаваните особени свойства. Някои от екзотичните ядра са силно деформирани и имат необикновена форма. При други нуклоните се подреждат по особен начин.



Фиг.1 Протон-неутронна диаграма

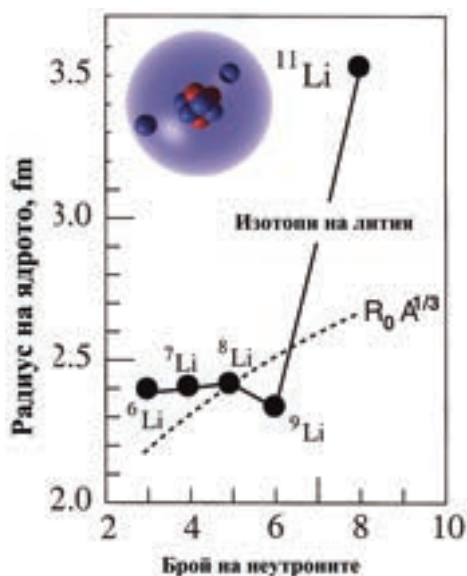
При екзотичните ядра съотношението между силите на кулоново отблъскване между протоните и ядрените сили е много различно от съотношението, характерно за стабилните ядра. Това води до появата на нови, необичайни свойства. Екзотичните ядра са силно нестабилни, т.е. те са радиоактивни с малък период на полуразпад.

Едно типично екзотично ядро е ^{11}Li , което се състои от три протона и осем неутрона, т.е. има излишък на неутрони. На схемата са показани изотопите на лития ($Z=3$). Стабилните изотопи са два: ^6Li (7.5%) и ^7Li (92.5%). Изотопите ^8Li , ^9Li , ^{11}Li са β -радиоактивни. Ядрото ^{11}Li има период на полуразпад $T_{1/2} = 8.75 \text{ ms}$. То е подробно изследвано в CERN с помощта на установката ISOLDE. Относително голямото време на живот на това ядро се дължи на факта, че е четно-нечетно ядро, т.е. то се състои от четен брой (8) неутрони и нечетен брой протони (3). В ядрото ^{11}Li два от неутроните са отдалечени на голямо разстояние от сърцевина, която по същество представлява ядрото ^9Li . Енергията на свързване на тези два неутрона е само 300 keV. Тези неутрони

образуват т. нар. неутронен ореол (хало). Радиусът на ^{11}Li е почти равен на радиуса на ^{208}Pb , докато в същото време ^{11}Li е 20 пъти по-леко ядро.

Изучаването на свойствата на екзотичните ядра е тясно свързано и с проблема за нуклеосинтеза в ранната Вселена и с този за произхода на елементите. Ядрените реакции с участието на екзотични ядра играят важна роля в еволюцията на звездите. За астрофизичните модели е много важно познаването на точните стойности на сеченията на взаимодействие, разположението на енергетичните нива и схемите на разпад на екзотичните ядра.

Очевидната трудност е, че екзотичните ядра са нестабилни и за да може да се проведе реален експеримент, трябва да се създаде достатъчно голямо количество от подобни екзотични ядра, след което да се отделят онези от тях, които са интересни за дадения експеримент и така селектираните ядра да се ускорят (или пък забавят) до необходимата за изследването енергия. Екзотичните ядра трябва да се фокусират в сноп с малка ъглова разходимост и да при-



Фиг. 2

тежават висока степен на монохроматичност. Нещата се усложняват от факта, че колкото по-екзотично е едно ядро, толкова то е по-краткоживущо и толкова по-малка е вероятността за неговото раждане и на неговото взаимодействие с други ядра.

Тъй като вероятността за раждане на екзотичните ядра е много малка, за тяхното създаване трябва да се използват първични снопове от протони, деутрони или йони с възможно най-висок интензитет.

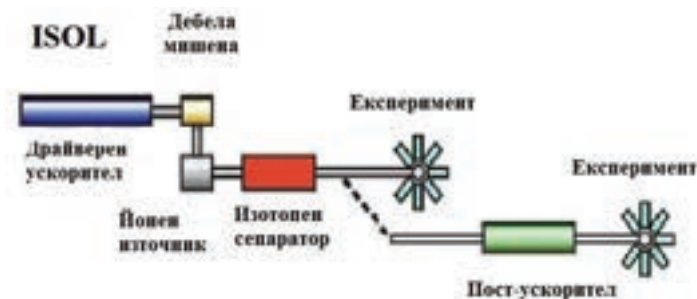
Разработени са **два метода за създаването на снопове от екзотични ядра** - ISOL и In Flight.

ISOL, абривирума от Isotope-Separation-On-Line, е метод за създаването на снопове от ускорени екзотични ядра, при който сноп от ускорени протони или деутрони бомбардира дебела мишена. Дебелата мишена поглъща цялата енергия на бомбардиращите частици. Веществото на мишената може да бъде в твърдо, течно или газообразно състояние. В метода ISOL се залага на обстоятелството, че съвременните ускорители са в състояние да създават снопове от ускорени протони и деутрони с висок интензитет.

В резултат на ядрени реакции в мишената се създава набор от вторични ядра. Сред тях екзотичните ядра, които представляват интерес, са много малък процент. Образуваните в мишената екзотични ядра се извличат от нея с помощта на различни физични и химични методи. Изотопите, които ще се използват в експеримента, се отделят с помощта на магнитен мас-сепаратор. С помощта на магнитно поле той отклонява изотопите като големината на отклонението зависи от масата на изотопа.

Методът ISOL е сравнително сложен. В него се използва високотемпературна физика и химичен анализ. Методът е бавен, т.е. с него не могат да се създават снопове от краткоживущи ядра (с времена на живот по-малки от няколко секунди).

В метода за създаване на снопове от радиоактивни йони, известен като „In-Flight“ се използва фрагментирането на интензи-



Фиг. 3 Схема на Isotope-Separation-On-Line метод

вен сноп от ускорени тежки йони при взаимодействието му с тънка мишена от леки елементи.

Фрагментирането на бомбардиращите тежки йони става един от важните канали на протичащите в мишената ядрени реакции при енергии от 50 MeV/A до няколко GeV/A и за широк спектър от стойности на A , Z и на отношението N/Z . Фрагментите се движат преимуществено по посоката на движение на първичния сноп. Следва разделянето и сортирането на фрагментите по маса от т. нар. сепаратор на фрагментите.

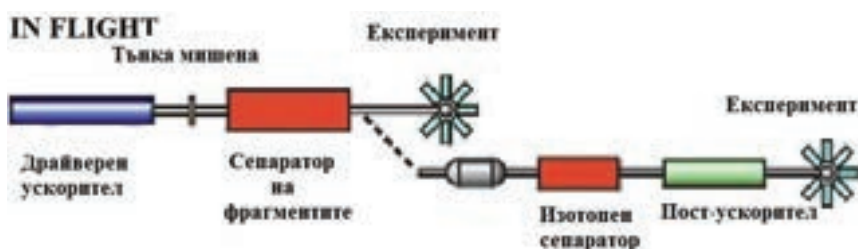
Недостатък на „In-Flight“ метода е в това, че интензитетът на първичния сноп от тежки йони е много по-малък от този на протонните и деутронните снопове, т.е. при „In-Flight“ добивът на екзотични ядра е много по-нисък, отколкото при метода ISOL. Негово предимство е опростената конструкция на мишената, малкото време на разделяне на изотопите, които са от порядъка на μs и в относителната му простота и надеждност. Методът „In-Flight“ е оптимален за получаването на вторични снопове от краткоживущи изотопи (време на живот до 100 ns).

Физика на екзотичните ядра. От 50-те години на миналия век широко се използва слоестият модел на ядрото. Моделът въвежда т.н. „магически“ числа за определен брой на неутроните или протоните. Слоестият модел се оказва изключително ефективен за описание на стабилните ядра



Чл.-кор Чавдар Стоянов е завършил СУ „Св. Кл. Охридски“. Защитава дисертация в областта на физико-математическите науки в ОИЯИ-Дубна. От 1968 г. работи, първоначално във Физическия институт на БАН, а след разделянето му в Институт за ядрени изследвания (ИЯИЯЕ) на БАН. От 1970 г. до 1981 г. е работил в ОИЯИ-Дубна. От 1987 г. е старши научен сътрудник I ст. (професор). Ръководител е на лаборатория „Ядрена спектроскопия и ядрени реакции“ в ИЯИЯЕ. През 2004 е избран за чл.-кор. на БАН. Научните му интереси са в областите на теоретичната ядрена физика – ядрени модели, ядрена структура. Занимавал се е и с Археометрия – приложение на ядрените методи в археологията.

и значителна част от радиоактивните такива. Между протоните и неутроните действат ядрени сили, които са много силни, но действието им е на много малки



Фиг. 4 Схема на метода „In-Flight“

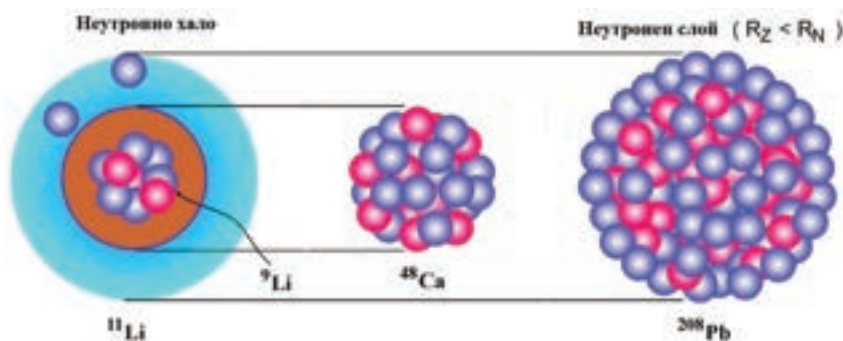
разстояния. Между заредените протони действат силно отблъскващи кулоновски сили. Успехът на слоестия модел се дължи на баланса в ядрата между ядрените и кулоновски сили. Добавянето или изваждането на нуклони променя съществуващия баланс и това води до образуване на екзотически ядра. Този ефект е най-силен при леките ядра, тъй като промяната на конфигурацията само с един нуклон променя съществено структурата на ядрото. Докато в средните и тежки ядра отношението $(N-Z)/A$ е в границите 0.1 – 0.2, то в леките ядра, например ${}^{11}\text{Li}$ това отношение е 0.45. Това води до значително изменение на разпределението на плътностите на неутроните и протоните. Силно се намалява енергията на свързване на нуклоните в най-високите орбити. Ядрото има компактна централна част (сърцевина) и нуклон или нуклони, силно отдалечени от нея. Пример за това е показан на Фиг. 2. Рязко се променя радиусът на ядрото. Това е илюстрирано на Фиг. 5.

Радиусът на ${}^{11}\text{Li}$ се е увеличил и е станал равен на този на значително по-тежкото ядро ${}^{208}\text{Pb}$. Два от неутроните са силно отдалечени от сърцевината. Това явление носи името „ореол“ (хало). Много от екзотическите леки ядра имат ореоли. Протонни ореоли има по-малко (фиг. 6). Причина за това са кулоновските сили, които засилват отблъскването между протона и сърцевината. Пример за протонен ореол е ядрото ${}^{19}\text{Na} \rightarrow 3$ протона + двойно магическото ядро ${}^{16}\text{O}$. Експерименти по еластично разсейване

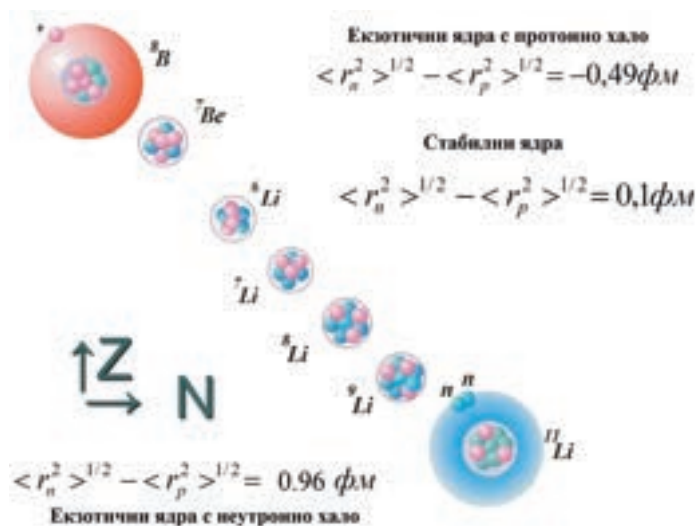


Динко Динев е доцент в Института за ядрени изследвания и ядрена енергетика на Българската академия на науките. Работи в областта на експерименталната ядрена физика – ускорители на частици. Специализирал е продължително време в Института за физика на високите енергии (ИФВЭ) в гр. Протвино, Русия, в Обединения институт за ядрени изследвания (ОИЯИ) в гр. Дубна, Русия и в Изследователския център (FZ) в гр. Юлих, Германия. Автор е на над 100 научни публикации и 4 книги.

на ускорени снопове от ${}^8\text{B}$ ядра показват, че ядрото ${}^8\text{B}$ също притежава протонен ореол (хало). Броят на протоните в това ядро е по-малък от броя на неутроните, но средният радиус на неутронната система в това ядро $\langle r_n^2 \rangle^{1/2}$ е значително по-малък от този на протонната система $\langle r_p^2 \rangle^{1/2}$. В ядрото



Фиг. 5



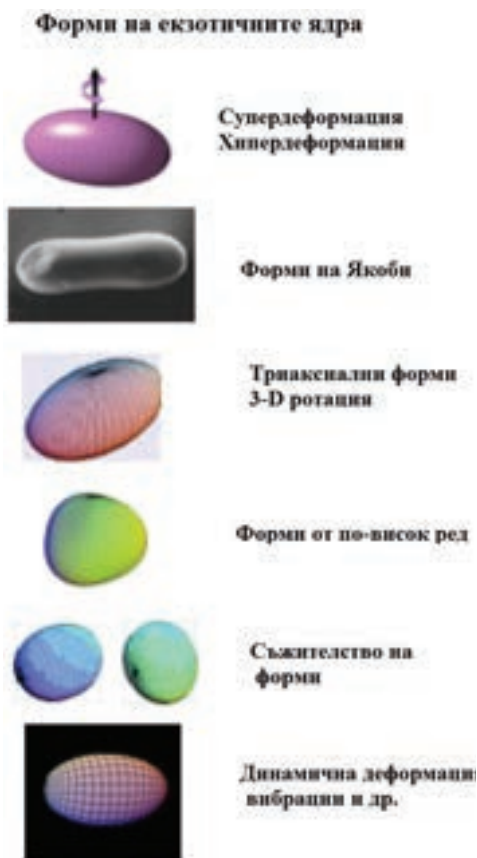
Фиг. 6

^{11}Li съотношението е обратно. Ферми (фм) е мярка за дължина, използвана в ядрената физика. ($1 \text{ фм} = 1.10^{-15} \text{ м}$).

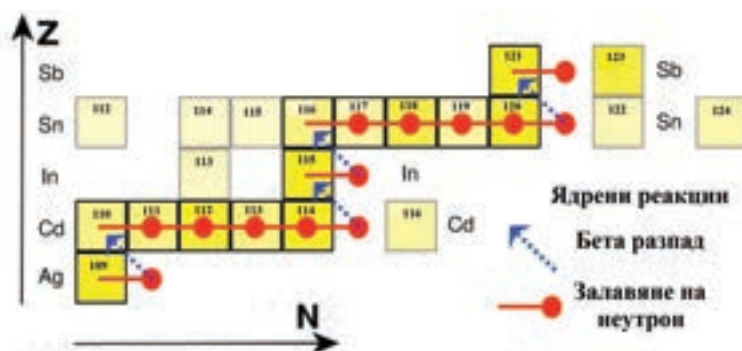
Интересни са някои свойства на ядрата с ореоли. В стабилните ядра се наблюдават възбудени състояния с висока енергия. Тези състояния са от колективен тип. В процеса на възбуждане участват всички нуклони от ядрото. Такива са например диполните резонанси, при които протонната и неутронната системи се движат една срещу друга, т.е. наблюдава се вибрация в противофаза. Подобно явление е наблюдавано в ^{11}Li . В това ядро е наблюдаван нов тип колективно състояние, при което сърцевината вибрира относително ореола.

В тежките ядра се наблюдават други ефекти. В стабилните тежки ядра добавянето на нуклони води до деформация на новополученото ядро. Тази деформация е относително малка и ядрото придобива сплесната форма (подобна на диск) или елипсовидна форма, подобна на бейзболна топка. Тежките екзотични ядра също са деформирани. Деформацията при тях е доста сложна и има различни форми. Част от видовете деформация на тежките екзотични ядра е показана на Фиг. 7.

Екзотичните ядра участват в астрофизически процеси свързани с образуване на нови елементи - ядрен синтез. Добре изучени са процесите, свързани със залавяне на неутрони. При залавянето на неутрони съществени са сечението за залавяне на неутрон и вероятността за бета разпад. Бавното залавяне на неутрони се нарича s-процес. Този процес се осъществява за ядра, близки до линията на стабилност. При него се образуват протонно богати ядра. Бързото залавяне на неутрони се нарича r-процес.



Фиг. 7



Фиг. 8

При този процес сечението за залавяне на неутрон превъзхожда вероятността за бета разпад.

Процесът се осъществява на границата на стабилност на линията на ядрата с неутронен излишък.

Образуването на нови елементи е показано на Фиг. 8. Началното ядро е ^{110}Cd . Ядрото е стабилен изотоп. ^{110}Cd залавя неутрон и преминава в ^{111}Cd . Процедурата се повтаря и след няколко последователни залавяния на неутрон, веригата се затваря и се образуват всички изотопи на Cd от 110 до 114. Следващият изотоп е ^{115}Cd . Това ядро е късоживущо и има период на полуразпад на основно състояние 53 часа. То е β емитер и след β разпад се получава ядрото ^{115}In . ^{115}In е дългоживущо и залавя неутрон, но новообразуваният изотоп не е стабилен, тъй като периодът на полуразпад на ^{116}In е само 14 секунди. Следва отново β разпад и системата преминава в ^{116}Sn , който е стабилен. Такава е схемата за нуклеосинтез на тежки ядра.

Заклучение

Материята е съставена от атомни ядра. Те имат различни свойства. Има стабилни ядра, дългоживущи радиоактивни ядра и екзотически ядра. Различните свойства на ядрата определят характера на процесите,

на които сме свидетели. Стабилните ядра са основа на материята, която ни заобикаля. Радиоактивните ядра са свързани с процеси, които могат да са полезни, но могат да са злоеци. Достатъчно е да си припомним делението на урана. Екзотичните ядра са относително новооткрит клон на ядрената материя. Тяхното голямо разнообразие все още не е изучено добре. Свойствата им понякога изглеждат странни, но процесите изцяло се определят от ядрените сили и кулоновските ефекти. Интересен феномен е тяхното участие в ядрения синтез.

Единна теория на ядрените процеси все още не е създадена. За описание на ядрените ефекти се използват различни ядрени модели. Всеки модел улавя някои основни свойства на ядрото, но не може да се използва за всички видове ядра. Основната трудност е, че имаме работа с многочастичен проблем. През последните години има съществен прогрес в описание на ядрените свойства с използване на вероятностни подходи. Например, слоестият модел се съчетава с вероятностни процедури. Използват се компютърни симулации, където различни ядрени модели се включват с определена вероятност. Всичко това дава оптимизъм, че ще навлезем по-дълбоко в познанието на ядрените свойства. ■

Открит е неочакван преносител на патогенен човешки паразит

Един от опасните паразити на човека в много страни от Югоизточна Азия и южните тихоокеански острови, вкл. Австралия, е кръглият червей Ангиостронгилус кантонензис (*Angiostrongylus cantonensis*). Възрастните половозрели нематоди нор-



мално паразитират в плъхове, но ларвите на паразита се развиват в различни междинни гостоприемници, главно водни и сухоземни охлюви. При консумация на заразени охлюви, а понякога и чрез водата, в която е имало заразени охлюви, навлезлите в човека паразитни ларви попадат по кръвен път в мозъка и причиняват заболяването Еозинофилен менингит, което често има фатален край. Паразитът е открит сравнително късно – през 1935 г. от китайския учен Хсин Тао Чен (Dr Hsin-Taο Chen) в Китай (о-в Тайван), но в следващите години заболяването, причинявано от него е регистрирано вече в множество тихоокеански острови и азиатски страни, а през последните години и в Куба, Египет, САЩ (Флорида, 2013 г. и Ню Йорк, 2018 г.).

През 2018 г., на страниците на известното американско списание „American Journal of Tropical Medicine and Hygiene“ е публикувана изненадваща публикация от д-р Х. Вонг и колеги (Dr H. Wang et al.), в която се твърди, че към потенциалните междинни гостоприемници и преносители на Еозинофилния менингит на човека, трябва да се включат и някои представители на сухоземните многоножки от рода Сколопендра (*Scolopendra*). Твърдението им се основава на следния случай. В края на 2012 г. в болницата в Гуангжу (Китай) постъпва 78 годишна жена, при която след изследвания се установява развитие на менингит, но без наличие на бактерии и вируси, причиняващи подобно заболяване, а с наличие на висок процент еозинофилни клет-

ки, което подсказва наличие на паразитна инфекция. Последвали по-подробни изследвания, които доказали наличието в кръвта и мозъка на жената на хелминтна инвазия от паразитния нематод Ангиостронгилус кантонензис. При изследване на сина ѝ също

била установена паразитна инвазия от същия нематод. В изследването на случая са включени и други специалисти и се установява, че двамата не са използвали за храна охлюви, както се предполагало, а са консумирали сурово брашно (пудра), направена от стрити многоножки от едрият отровен вид *Scolopendra subspinipes*. Сколопендрите се използват от китайската традиционна медицина, продават се свободно в супермаркетите и учените допуснали, че вероятно в използваното брашно е имало и живи ларви на паразитния нематод.

Неврологът от болницата в Гуангжу д-р Лингли Лу (Dr Lingli Lu) изследвал 20 закупени от същия магазин сколопендри и в 7 от тях наистина открил живи ларви на паразитния нематод. Изненадващ бил и доста високия брой паразитни ларви.

Откриването на нова възможност за заразяване на човека с Еозинофилен менингит чрез консумация на сколопендри за сега има само местно значение, защото освен в Китай, сколопендри не се използват другаде от човека за храна и в народната медицина. Но разширяването на възможния кръг на междинните гостоприемници и преносители на паразита, и особено проникването през последните години на Еозинофилния енцефалит в много нови субтропични и умерени страни по света, е от важно значение за тропическата медицина и общата паразитология.

По ScienceNews