# МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. Ломоносова Физический Факультет

Хан Дон Ен

# ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ МОЛИБДЕНА

Специальность 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц

ДИССЕРТАЦИЯ На соискание ученой степени Кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, Профессор Б.С. Ишханов

# Цель работы

- Измерение выходов фотоядерных реакций на стабильных изотопах Мо
- Исследование характеристик фотоядерных реакций в зависимости от массового числа А изотопа Мо

#### Метод регистрации наведенной активности

- Образец естес. смеси изотопов Мо был облучен тормозным излучением с Е<sub>max</sub> 67.7МэВ, 29.1МэВ и 19.5МэВ в течение 1 -4.5 часов.
- Выходы ф.я реакций были определены, анализируя пики үлиний в спектрах остаточной активности облученного образца Мо.

#### Теоретические расчеты TALYS и КМФР

- Проанализированы результаты теор. расчетов сечений ф.я реакций на изотопах <sup>90-104</sup>Мо с помощью программы **TALYS** и комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФР).
- Полученных результаты расчетов сравнивались с результатами выполненных экспериментов.

# Оглавление

Введение

Глава 1. Основные характеристики изотопов Мо

Глава 2. Сечения фотоядерных реакций на изотопах Мо

Глава 3. Методика выходов фотоядерных реакций

- 3.1. Методика проведения эксперимента
- 3.2. Обработка экспериментальных данных

### Глава 4. Результаты и обсуждение

- 4.1. Экспериментальные результаты
- 4.2. Теоретические расчеты сечений фотоядерных реакций
- 4.3. Обсуждение результатов

### Глава 5.

5.1. Образование <sup>92-100</sup>Мо в природных условиях

5.2. Образование и применение <sup>99m</sup>Tc

#### Заключение

# Введение



- I (E<sub>γ</sub> < B<sub>n,p</sub>): поглотив фотон возбуж. ядро распадается с испусканием одного или нескольких фотонов на более низко расположенные состояния. (ЯРФ)
- II (В<sub>п,р или связ систем малого нуклонов</sub> < Е<sub>γ</sub>): преимущественно происходят реакции с вылетом нуклонов. Для тяж. ядер становится возможной реакция фотоделения. Происходят коллективные ядерные возбуждения (гигантские резонансы)
- III (ГДР < Е<sub>γ</sub> < мезонный порог): λ<sub>γ</sub> (поглощаемого ядром фотона) < R<sub>ядро</sub>, фотоны преимущественно взаимодействуют внутри ядра с системами из малого числа нуклонов и происходит выбивание этих систем или нескольких нуклонов.
- IV (Е<sub>ү</sub> > мезонный порог): поглощаемые ядром фотоны возбуждают отдельные нуклоны. Фотоны начинают взаимодействовать с отдельными нуклонами ядра

# Основные характеристики изотопов Мо



Величины определены на основе базы данных <u>http://www.nndc.bnl.gov</u>, базы данных ЦДФЭ НИИЯФ МГУ  Последовательность одночастичных состояний в сферически симметричном потенциале с учетом спинорбитального взаимодействия.



• Параметры деформации ч-ч изотопов 92,94,96,98,100 Мо

Α	β	γ
92	0.11	34°
94	0.15	31°
96	0.17	29°
98	0.18	25°
100	0.23	22°

 β – Параметр квадрупольной деформации , полученный методом измерения приведенной вероятности (данные извлечены из работы [1])

 $\beta = (4\pi/3ZR_0^2)[B(E2)\uparrow/e^2]^{1/2}$ 

- γ параметр, характеризующий отклонения формы ядра от аксиальной симметричной формы (данные извлечены из работы [2])
- Четно-четные изотопы <sup>92,94,96,98,100</sup>Мо мало деформированы.
- За счет увеличения массового числа А атомное ядро имеет более деформированную форму.
- В области изотопов Мо с массовым числом А=90-100 форма атомного ядра близка к форме трехосного эллипсоида.

1. Raman S., Nestor Jr. C. W.m Tikkanen P. Nucl. Phys. A., Vol. 227, no.3, P. 427-449(1974) 2. Andrejtscheff, W. and Petkov, P., Phys. Rev. C., Vol. 48, P. 2531—2533(1993)

# • Низколежащие возбужденные состояния изотопов 90-100 Мо





- N=50 в изотопе <sup>92</sup>Мо является магическим числом, что отчетливо проявляется в увеличении энергии уровней J<sup>P</sup>=2<sub>1</sub><sup>+</sup>, 4<sub>1</sub><sup>+</sup> по сравнению соседними ядрами.
- Изотопы <sup>88,90,94,96,98</sup> Мо имеют примерно эквидистантное расстояние между низшими возбужденными состояниями, что свидетельствует о квадрупольных колебаниях вблизи равновесной сферической формы ядра.
- В тяжелых изотопах <sup>104-110</sup> Мо расположение низших возбужденных состояний гораздо лучше описывает зависимость Е ~ J(J+1), что характерно для вращательных состояний и свидетельствует о статической деформации этих ядер



#### • Сечения реакции (ү,n), полученные в работах [3-6].

 Параметры сечений фотоядерных реакций на изотопах Мо, полученных в работах [3, 4]



массового числа А в работах [4,5] и результаты расчета на основе дипольного правила сумм 60·NZ/A

Толожение максимума сечения реакции (γ, sn) от массового числа А в работах [4,5] и результаты расчета уравнением 78·А<sup>-1/3</sup>

#### Анализы данных

• На всех измеренных изотопах ярко проявляется гигантский дипольный резонанс, который в целом описываются соотношениями:

 $E_m = 78A^{-1/3}$ ,  $\sigma_{int} = \frac{60NZ}{A}$ ,  $\sigma(E) = \sigma_m \frac{(E\Gamma)^2}{(E^2 - E_m^2)^2 + E^2\Gamma^2}$ 

- Основными каналами распада ГДР являются каналы распада с испусканием нейтронов.
- Результаты экспериментально полученных авторами выходят за пределы статистических погрешностей приведенных авторами.
- Причины систематических различий фотоядерных реакций в методах прямой регистрации нейтронов в реакциях (ү,n), (ү,2n), (ү,3n) имеются систематические ошибки, обусловленные методом детектирования нейтронов.

#### Вывод по сечениям

- Для дальнейшего уточнения механизма фотоядерных реакций на изотопах Мо необходимы новые типы экспериментов, более надежные измерения различных каналов распада ГДР.
- Такие возможности открываются в активационных экспериментах, в которых непосредственно измеряются различные продукты распада фотоядерных реакций.

### Методика измерения выходов фотоядерных реакций

• Методика проведения эксперимента



#### — Разрезной микротрон RTM-70





- 1 электронная пушка, 2 группирователь,
- 3 α-магнит, 4 фокусирующие линзы,
- 5, 6 180° поворотные магниты,
- 7 ускоряющая структура
- 8 устройство сдвига фазы пучка на 1-ой орбите, 9 квадрупольная линза,

10 - система коррекции положения пучка на общей орбите, 11 --- датчики тока пучка,

12 - вертикальные и горизонтальные

корректоры, 13 - квадрупольные триплеты,

- 14 магниты системы вывода пучка,
- 15 цилиндр Фарадея

Энергия на выходе ускорителя	14.9-67.7 МэВ
Прирост энергии за оборот	4.79 МэВ
Импульсный ток выведенного пучка	до 40 мА
Длительность импульса	2 20 мксек
Рабочая частота	2856 МГц
Максимальная мощность клистрона	6 МВт
Индукция поля в поворотных магнитах	0.956 Тл
Размеры разрезного микротрона	0.8x2.0x1.6m3

- Обработка экспериментальных данных
  - Измерение остаточной активности при реакции <sup>92</sup>Мо(γ,2n)<sup>90</sup>Мо





#### – Идентификация спектров

Зарегистрированные спектры ү-квантов остаточной активности в течение 6 часов после облучения



- Источники пиков идентифицированы по базе данных[8] и определению периода полураспада Т<sub>1/2</sub>.
- Т<sub>1/2</sub> были определены и с помощью автоматической системы набора и анализа спектров и вручную.



#### Определение выходов фотоядерных реакций









Количество ядер 1 в t<sub>1</sub>  $N_{10} = \frac{S}{k(e^{-\lambda(t_2 - t_1)} - e^{-\lambda(t_3 - t_1)})}$ 

Выход реакции

$$Y(E_m) = \frac{N_{10}\lambda}{1 - e^{-\lambda t_1}}$$



# Результаты

### • Экспериментальные результаты

– Идентифицированные пики в спектре ү-активности

#### с Е<sub>тах</sub> = 67.7МэВ (обнаружено ≈ 100 пиков)

$E_{\gamma}(\kappa э B)$	Источник ү-квантов	Реакция	$T_{1/2}({}_{\rm MИH})$
122.7	<sup>90</sup> Mo	$^{92}Mo(\gamma, 2n)$	342
132.8	<sup>90</sup> Nb	${}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n),  {}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n){}^{90}\mathrm{Mo} \xrightarrow{\varepsilon}$	876
140.8	<sup>90</sup> Nb	$^{92}Mo(\gamma, 2n), ^{92}Mo(\gamma, 2n)^{90}Mo \xrightarrow{\varepsilon}$	876
140.8	<sup>99</sup> Mo	$^{100}\mathrm{Mo}(\gamma,n)$	3960

1984.54	- IND	$^{\circ\circ}$ MO( $\gamma, 2n$ ), $^{\circ\circ}$ MO( $\gamma, 2n$ ) $^{\circ\circ}$ MO $\rightarrow$	870
2128.46	<sup>89</sup> Nb	$^{92}Mo(\gamma, 2np), ^{92}Mo(\gamma, 3n)^{89}Mo \xrightarrow{\varepsilon}, ^{89m}Nb \xrightarrow{IT}$	114
2186.242	<sup>90</sup> Nb	${}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n),  {}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n)^{90}\mathrm{Mo} \xrightarrow{\varepsilon}$	876
2222.34	<sup>90</sup> Nb	${}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n),  {}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n)^{90}\mathrm{Mo} \xrightarrow{\varepsilon}$	876
2318.968	<sup>90</sup> Nb	${}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n),  {}^{92}\mathrm{Mo}(\gamma,2n){}^{90}\mathrm{Mo} \xrightarrow{\varepsilon}$	876
2960.1	<sup>89</sup> Nb	$^{92}Mo(\gamma, 2np), ^{92}Mo(\gamma, 3n)^{89}Mo \xrightarrow{\varepsilon}, ^{89m}Nb \xrightarrow{IT}$	114

#### — Определение выхода реакции с образованием <sup>96</sup>Nb

### в реакциях <sup>97</sup>Мо(ү,р) и <sup>96</sup>Мо(ү,np)

Энергия ү-	Интенсивность	Выход(погрешность)				
кванта (кэВ)	(%)	19.5МэВ	29.1МэВ	67.7МэВ		
219.2	3	0.6(0.05)	4.4(0.2)	9.9(0.5)		
241.4	3.9	0.8(0.05)	4.2(0.2)	14.1(0.7)		
350.1	1.1		4.3(0.3)	9.9(0.6)		
352.6	0.8		10.2(1.0)	14.4(1.1)		
460.8	26.6	0.6(0.03)	4.0(0.2)	9.0(0.4)		
480.7	5.9	0.6(0.06)	4.0(0.2)	9.6(0.5)		
568.8	58	0.6(0.03)	3.9(0.2)	8.6(0.4)		
591.2	0.9		2.9(0.4)	7.3(0.9)		
719.9	6.9	0.7(0.06)	4.4(0.2)	10.6(0.5)		
810.8	11.1	0.5(0.03)	3.3(0.2)	7.2(0.3)		
812.6	3		5.1(0.3)	11.7(0.7)		
849.9	20.5	0.6(0.03)	4.1(0.2)	9.5(0.4)		
1091.3	48.5	0.6(0.60)	4.1(0.2)	9.2(0.4)		
1200.2	29	0.6(0.03)	4.0(0.2)	9.0(0.4)		
1497.8	3.3	0.6(0.03)	4.0(0.2)	8.6(0.5)		
Среднее		0.6(0.03)	4.0(0.2)	9.1(0.4)		

# Экспериментально измеренные выходы фотоядерных реакций на изотопах Мо

Dearring	Конечное ядро	Выход(погрешность)				
Реакция	(J <sup>P</sup> )	19.5МэВ	29.1 МэВ	67.7МэВ		
<sup>100</sup> Mo(γ,n)	<sup>99</sup> Mo(1/2+)	100(4.6)	100(4.6)	100(4.5)		
<sup>100</sup> Mo(γ,np)	<sup>98</sup> mNb(2+)			0.4(0.01)		
<sup>98</sup> Mo(γ,p)	<sup>97</sup> Nb(9/2+)	0.3(0.02)	2.9(0.1)	5.4(0.2)		
<sup>97</sup> Mo(γ,p) <sup>98</sup> Mo(γ,np)	<sup>96</sup> Nb(6+)	0.6(0.03)	4.0(0.2)	9.1(0.4)		
<sup>96</sup> Mo(γ,p) <sup>97</sup> Mo(γ,np)	<sup>95</sup> Nb(9/2+)	0.2(0.02)	1.9(0.1)	4.4(0.2)		
<sup>96</sup> Mo(γ,p) <sup>97</sup> Mo(γ,np)	<sup>95m</sup> Nb(1/2-)	0.6(0.03)	3.0(0.2)	4.7(0.3)		
<sup>94</sup> Mo(γ,n) <sup>95</sup> Mo(γ,2n)	<sup>93m</sup> Mo(21/2+)			0.05(0.003)		
<sup>94</sup> Mo(γ,np)	<sup>92m</sup> Nb(2+)	0.02(0.001)	0.4(0.02)	3.6(0.2)		
<sup>92</sup> Mo(γ,n)	<sup>91</sup> Mo(9/2+)	24.2(2.0)	24.4(3.4)	<109.0(8.9)		
<sup>92</sup> Mo(γ,n )	<sup>91m</sup> Mo(1/2-)	3.1(0.2)	23.9(2.8)			
<sup>92</sup> Mo(γ,p)	<sup>91m</sup> Nb(1/2-)	36.0(1.8)	45.7(5.3)	<63.2(3.1)		
<sup>92</sup> Mo(γ,2n)	<sup>90</sup> Mo(0+)		0.5(0.04)	5.8(0.4)		
<sup>92</sup> Mo(γ,np)	<sup>90</sup> Nb(8-)		0.9(0.06)	7.9(0.6)		
<sup>92</sup> Mo(γ,2np)	<sup>89</sup> Nb(9/2+)			1.4(0.1)		
<sup>92</sup> Mo(γ,2np)	<sup>89m</sup> Nb(1/2+)			0.6(0.04)		

#### • Теоретические расчеты сечений фотоядерный реакций

Рассчитанные по программе TALYS сечения реакций
 (ү,n)\*=(ү,n)+(ү,np) и (ү,2n)\*=(ү,2n)+(ү,2np) на изотопах Мо



Рассчитанные на основе КМФР сечения реакций (ү,n)\*=(ү,n)+(ү,np) и (ү,2n)\*=(ү,2n)+(ү,2np) на изотопах Мо



 Параметры фотоядерных реакций (ү,sn)=(ү,n)+(ү,2n)+(ү,np) и (ү,sp)=(ү,p)+(ү,2p)+(ү,np) в изотопах <sup>90-104</sup>Мо, полученные на основе TALYS и КМФР



Относительные выходы фотоядерных реакций и суммарные выходы всех реакций (γ,abs) на изотопах <sup>89-104</sup>Мо, рассчитанные по программе TALYS и КМФР с тормозными спектрами фотонов с Е<sub>max</sub> 19.5МэВ, 29.1МэВ и 67.7МэВ. \*Выход реакции <sup>100</sup>Мо(γ,n) принят равным 100



#### Выходы фотоядерных реакций на изотопах Мо

- Суммарный выход фотоядерных реакции на изотопах <sup>93-104</sup>Мо увеличивается с ростом массового числа А.
- При этом по мере увеличения массового числа А сечение реакции (γ,2n) растет, что приводит к уменьшение канала распада ГДР с испусканием одного нейтрона.
- Выход реакции (γ, p) уменьшается с ростом массового числа. Пороги фотопротонной реакции растут от 6.14 для <sup>89</sup>Мо до 19.6 МэВ для <sup>103</sup>Мо, что приводит к уменьшению проницаемости потенциального барьера для протонов при переходе от легких изотопов молибдена к более тяжелым.
- При уменьшении массового числа до значения А = 92 наблюдается резкое падение выхода реакции (ү,n), что сопровождается отчетливым ростом выхода реакции (ү,p).
- У всех остальных более тяжелых изотопов молибдена с числом нуклонов 93–103 нейтроны начинают заполнять одночастичные уровни следующей оболочки 1g<sub>7/2</sub>2d3s1h<sub>11/2</sub>, отделенной от оболочки 1f2p1g<sub>9/2</sub> энергетической щелью 3–4 МэВ.

### • Выходы фотоядерных реакций (67.7МэВ)

Реакция	Конечное ядро(Ј <sup>р</sup> )	)   Т <sub>1/2</sub> (тип распада)   Ү <sub>ех</sub> (ошибн		Y <sub>TALYS</sub>	Υ <sub>κΜΦΡ</sub>	
<sup>100</sup> Mo(γ,n)	<sup>99</sup> Mo(1/2+)	66ч(β-)	100(4.5)	100	100	
<sup>100</sup> Mo(γ,np)	<sup>98</sup> Nb(7+)	2.86c(β-)		0.2	1	
<sup>100</sup> Mo(γ,np)	<sup>98m</sup> Nb(2+)	51.3м(β-)	0.4(0.02)	0.1	1	
<sup>98</sup> Μο(γ,p)	<sup>97</sup> Nb(9/2+)	72.1м(β-)	5.4(0.2)	0.2	0.5	
<sup>98</sup> Μο(γ,p)	<sup>97m</sup> Nb(1/2 <sup>-</sup> )	58.7c(IT)		0.2	8.5	
<sup>97</sup> Mo(γ,p), <sup>98</sup> Mo(γ,np)	<sup>96</sup> Nb(6+)	23.3ч(β -)	9.1(0.4)	0.7, 0.5	8.9 1.3	
<sup>96</sup> Mo(γ,p), <sup>97</sup> Mo(γ,np)	<sup>96m</sup> Nb(9/2+)	35д(IT + β-)	4.4(0.2)	0.6, 0.7	450(124(100) - 20(1000))	
<sup>96</sup> Mo(γ,p). <sup>97</sup> Mo(γ, np)	<sup>95</sup> Nb(1/2⁻)	3.6д(β-)	4.7(0.3)	0.3, 0.1	15.0 (12.1(y,p) 2,9(y,np)}	
<sup>94</sup> Mo(γ,p) <sup>95</sup> , Mo(γ, 2n)	<sup>93</sup> Mo(5/2+)	4.00Е+3л(ε)		145.6, 38.3	120.0.(114.40.m), 22.00.2m))	
<sup>94</sup> Mo(γ,p) <sup>95</sup> Mo(γ, 2n)	<sup>93m</sup> Mo(21/2+)	6.85ч(IT+ε)	0.05(0.003)	0.7, 0.2	138.U (114.4(y,n) 23.6(y,2n))	
<sup>94</sup> Mo(γ,np)	<sup>92</sup> Nb(7+)	3.47Е+7л(ε)		0.3	2.5	
<sup>94</sup> Mo(γ,np)	<sup>92m</sup> Nb(2+)	10.1д(ε)	3.6(0.2)	1.7	2.5	
<sup>92</sup> Mo(γ,n)	<sup>91Mo</sup> (9/2+)	15.4Μ(ε)	<109.0(8.9)	24.9	70.1	
<sup>92</sup> Mo(γ,n)	<sup>91m</sup> Mo(1/2-)	64.6c(1T+ε)		47.7	72.1	
<sup>92</sup> Mo(γ,p)	<sup>91</sup> Nb(9/2+)	6.8Е+2л(ε)		9.6	68.2	
<sup>92</sup> Mo(γ,p)	<sup>91m</sup> Nb(1/2-)	60.9д(IT+ɛ)	<63.2(3.1)	70.3	08.2	
<sup>92</sup> Mo(γ,2n)	<sup>90</sup> Mo(0+)	5.7ч(ε)	5.8(0.4)	4.3	2.5	
<sup>92</sup> Mo(γ,np)	<sup>92</sup> Mo(γ,np) <sup>90</sup> Nb(8-)		7.9(0.6)	2.2	4.5	
<sup>92</sup> Mo(γ,np)	<sup>90m</sup> Nb(4-)	18.8c(IT)		3.3	4.5	
<sup>92</sup> Mo(γ,2np)	<sup>89</sup> Nb(9/2+)	2.03ч(ε)	1.4(0.1)	1.2	0.9	
<sup>92</sup> Mo(γ,2np)	<sup>89m</sup> Nb(1/2+)	66.0m(ɛ)	0.6(0.04)	0.4	0.8	

— Изоспиновые возбуждения и распады T> и T< состояний ГДР ядра (N,Z)



• Изоспиновое расщепления состояний **Т**, и **T**<sub><</sub>:  $\Delta E = \frac{60}{4} (T_0 + 1) M \Im B$ • Вероятность возбуженй **T**<sub>></sub> и **T**<sub><</sub>:  $\frac{S^2(T_>)}{S^2(T_<)} = \frac{1}{T_0} \cdot \frac{1 - 1.5T_0 A^{-2/3}}{1 + 1.5A^{-2/3}}$ 

В э.м и сильных взаимодействиях соблюдаются правила отбора по изоспину, и имеет место запрет распада состояния T<sub>></sub> ядра (A,Z) по нейтронному каналу на низколежащие состояния ядра (A-1, Z) с изоспином T<sub>0</sub> - 1/2, что приводит к усилению каналов распада с испусканием протонов.

# Образование изотопов <sup>92-100</sup>Мо в природных условиях

<b>Tc92</b> 4.25m	<b>Tc93</b> 2.75h	<b>Tc94</b> 293m	<b>Tc95</b> 20.0h	<b>Tc96</b> 4.28d	<b>Tc97</b> 4.21·10 <sup>6</sup> a	<b>Tc98</b> 4.2·10 <sup>6</sup> a	<b>Tc99</b> 2.1·10 <sup>5</sup> a	<b>Tc100</b> →15.46s	<b>Tc101</b> 14.02m	<b>Tc102</b> 5.28s
<b>Mo91</b> 15.49m	<b>Mo92</b> 14.84%	<b>Mo93</b> 4·10 <sup>3</sup> a	<b>Mo94</b> 9.25%	<b>Mo95</b> 15.92%	<b>Mo96</b> 16.68%	<b>Mo97</b> 9.55%	<b>Mo98</b>	Mo99	Mo100 9.63% 7.3·10 <sup>18</sup> a	<b>Mo101</b> 14.61m
<b>Nb90</b> 14.60h	<b>Nb91</b> 680a	<b>Nb92</b> 3.5·10 <sup>7</sup> a	Nb93 100%	<b>▶ Nb94</b> 2·10 <sup>4</sup> a	<b>Nb95</b> 34.97d	<b>Nb96</b> 23.35h	<b>Nb97</b> 72.1m	<b>Nb98</b> 2.9s	<b>Nb99</b> 15s	<b>Nb100</b> 1.5s
<b>Zr89</b> 78.41h	<b>Zr90</b> 51.45%	<b>Zr91</b> 11.22%	<b>Zr92</b> 17.15	<b>Zr93</b> 1.53·10 <sup>6</sup> a	<b>Zr94</b> 17.38	<b>→Zr95</b> 64.0d	Zr96 2.8% 2.0·10 <sup>19</sup> a	<b>Zr97</b> 16.7h	<b>Zr98</b> 30.7s	<b>Zr98</b> 2.1s



29



Сечения (ү, n), (ү, 2n), (ү, 3n) реакций, соответственных на изотопах <sup>93</sup>Мо, <sup>94</sup>Мо, <sup>95</sup>Мо и <sup>95</sup>Мо, <sup>96</sup>Мо, <sup>97</sup>Мо, рассчитанные на основе КМФР

# Образование и применение <sup>99m</sup>Tc



Схема образования <sup>99m</sup>Tc в фотоядерной реакций <sup>100</sup>Mo(γ, n)<sup>99</sup>Mo

- <sup>99m</sup>Tc является наиболее используемым радиопрепаратом в ядерной медицинской диагностике.
- Ежегодно в мире выполняется около 30млн процедур, в которых используется радиофармпрепарат <sup>99m</sup>Tc.
- При β<sup>-</sup>-распаде <sup>99</sup>Мо 82.2% распадов сразу идут на изомерное состояние <sup>99m</sup>Tc, практически все остальные переходы идут через него.
- Изомерное состояние <sup>99m</sup>Tc имеет период полураспада T<sub>1/2</sub> = 64.4сек и в 99% случае распадается на основное состояние <sup>99</sup>Tc с испусканием γ-квантов с энергией E<sub>v</sub> =142.2кэB.
- Основное состояние <sup>99</sup>Тс имеет период полураспада Т<sub>1/2</sub> = 2.1·10<sup>5</sup> лет и распадается на стабильный изотоп <sup>99</sup>Ru.
- В отдельно выполненном эксперименте выло измерено образование изотопа <sup>99m</sup>Tc при тормозном спектре с максимальной энергии 55МэВ и токе 1мкА.
- В течение 1часа наработки изотопа <sup>99m</sup>Тс для мишени толщиной 0.3мм и площадью 650мм<sup>2</sup> составило 20кБк.

# Основные результаты

- С помощью γ-активационной методики впервые измерены выходы фотоядерных реакций на стабильных изотопах <sup>92</sup>Mo, <sup>94</sup>Mo, <sup>95</sup>Mo, <sup>96</sup>Mo, <sup>97</sup>Mo, <sup>98</sup>Mo и <sup>100</sup>Mo под действием тормозного излучения при трех верхних границах тормозного спектра γ-квантов - 67.7МэВ, 29.1МэВ и 19.5МэВ.
- На изотопе <sup>92</sup>Мо и на более легких изотопах резко снижается выход фотонейтронных реакций и соответственно увеличивается выход фотопротонных реакций. Этот эффект интерпретируется на основе оболочечной структуры изотопов молибдена.
- Для всех изотопов показано хорошее согласие полученных данных с расчетами КМФР, в программе TALYS для фотопротонных реакций наблюдается заметное расхождения с экспериментальными данными, что обусловлено правилами отбора по изоспину.
- Впервые определена зависимость выходов различных фотоядерных реакций на изотопах Мо от массового числа А.
- Впервые проведено сравнение экспериментальных выходов с результатами расчетов, полученными по программе TALYS и КМФР.
- Рассмотрены возможные приложения фотоядерных данных для нуклеосинтеза и образования радиопрепарата <sup>99m</sup>Tc

# Апробация работы

- Фоторасщепление изотопов молибдена / Б. Ишханов, И. Капитонов, А. Кузнецов ... Д.Е. Хан // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2014. № 1. С. 35–43.
- Фотоядерные реакции на изотопах молибдена / Б. Ишханов, И. Капитонов, А. Кузнецов ... Д.Е. Хан // Ядерная физика. 2014. Т. 77, № 11. С. 1427–1435.
- Ядерная спектроскопия изотопов молибдена / Б. Ишханов, И. Капитонов, А. Кузнецов ... Д.Е. Хан // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2016. № 1 С. 3-34.
- Фоторасщепление изотопов молибдена / Б. Ишханов, А. Кузнецов, Д. Е. Хан // Труды XIV
  Межвузовской научной школы молодых специалистов Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. 26-27ноября 2013 г
- Фотоядерные реакции на изотопах молибдена / Б. Ишханов, А. Кузнецов, В. Орлин, Д. Е. Хан // Труды XV межвузовской научной школы молодых специалистов. Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии медицине, 25-26 ноября 2014.
- Спектроскопия изотопов молибдена / Б. Ишханов, А. Кузнецов, Д. Е. Хан // Труды XVI Межвузовской научной школы молодых специалистов. Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии медицине, 24-25 ноября 2015
- Photonuclear Reaction on molybdenum isotopes / Б. Ишханов, А. Кузнецов, Д.Е. Хан // XIV Международный Семинар по электромагнитным взаимодействиям ядер EMIN-2015, 2015.
- Photonuclear reaction on molybdenum isotopes / Б. Ишханов, А. Кузнецов, Д.Е. Хан // Korean Physical Society 2015 fall meeting, 2015.
- Giant dipole resonance on molybdenum isotopes / Б. Ишханов, А. Кузнецов, Д.Е. Хан // Korean Physical Society 2016 spring meeting, 2016.

# Спасибо за внимание!