

1. Элементарные частицы.

Фундаментальные частицы - частицы, которым отводится роль первичных кирпичей мироздания. (Часто такие частицы называют «элементарными», но сейчас почти доказано, что они состоят из кварков - частиц с дробным зарядом, поэтому называть их элементарными, вообще говоря, не верно). В основе классификации подобных частиц лежит представление о силе взаимодействия, т.е. о величине сил, которые действуют между частицами. Известны три типа взаимодействия с участием фундаментальных частиц: сильные (ядерные), электромагнитные и слабые. Сила взаимодействия характеризуется так называемыми константами, которые являются своего рода "зарядами" частиц по отношению к этим взаимодействиям. Сильным взаимодействиям отвечает константа 1; эти взаимодействия характеризуются малым радиусом действия (10^{-13} см) и протекают за очень короткие промежутки времени (10^{-23} сек). Электромагнитные взаимодействия слабее сильных в 100 раз, их радиус действия бесконечен, а протекают они за время превышающее 10^{-16} сек. Величина слабых взаимодействий меньше сильных в 10^{13} раз, эти взаимодействия характеризуются конечным радиусом действия и временем, превышающим 10^{-10} сек.

В соответствии с типом взаимодействий, присущим элементарным частицам, их делят на три класса: фотоны, лептоны и адроны. К первому классу принадлежит одна частица-**фотон**, т.е. квант электромагнитного излучения. Фотоны участвуют только в электромагнитных взаимодействиях. Вторым классом составляют **лептоны**, участвующие в слабых взаимодействиях. Лептоны разделяются на два семейства: *электронное*, в которое входят **электрон** (масса $5.49 \cdot 10^{-4}$ а.е.м. или 0.51 Мэв) и электронное **нейтрино**, и *мюонное*, в которое входят отрицательно заряженный **мюон** (масса 105,6 Мэв, время жизни $2.2 \cdot 10^{-6}$ сек) и мюонное нейтрино. Третьим классом составляют частицы, участвующие в сильных взаимодействиях – **адроны**, подразделяющиеся на два семейства: мезонное и барионное. (*Мезоны*: Каон, K^+ , масса 494 Мэв, время жизни $1.2 \cdot 10^{-8}$ сек; *Барионы*: Σ^+ -частица, масса 1189 Мэв, время жизни $8 \cdot 10^{-11}$ сек, Ω^- -частица, масса 1675, время жизни $7 \cdot 10^{-11}$ сек). Адроны участвуют в слабых, а при наличии электрического заряда и в электромагнитных взаимодействиях. *Барионы* подразделяются на две группы: нуклоны, к которым принадлежат **протон** и **нейтрон**, и *гипероны-барионы* с массами, превышающими массы нуклонов.

Удивительная особенность элементарных частиц состоит в том, что хотя ни одна частица не может считаться построенной из других частиц, все они способны к взаимным превращениям. Любая фундаментальная частица может рождаться и погибать в результате сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий с другими частицами. Кроме электрона, протона и частиц лишенных массы покоя (т.е. фотона и двух нейтрино), все прочие частицы нестабильны. Это означает, что, будучи представлены самим себе, почти все они претерпевают распад. При распаде какой-либо частицы она исчезает, а вместо нее появляются другие элементарные частицы. В соответствии со способом распада фундаментальные частицы делят на квазистационарные, т.е. относительно долгоживущие и короткоживущие, или резонансы.

Основными характеристиками элементарных частиц являются их масса покоя, заряд, механический момент (спин), внутренняя четность и др. Кроме того, частицам приписывается ряд специфических характеристик. Так, всем барионам приписывается барионный заряд, или барионное число, равный +1, а антибарионам -1. Лептонам, входящим в электронное семейство, приписывается специфический электронно-лептонный заряд, равный +1 для электрона и нейтрино и -1 для позитрона и антинейтрино. Наряду с законом сохранения электрического заряда в природе существуют и законы сохранения барионного и обоих лептонных зарядов.

Многообразие элементарных частиц подчиняется более или менее стройной системе классификации (**Рис.1**).

Рис.1 Общая схема классификации элементарных частиц

В **Табл. 2** представлены некоторые свойства элементарных частиц со временем жизни более 10^{-20} с. В таблице указаны только масса частицы (в электронных массах), электрический заряд (в единицах элементарного заряда) и момент импульса (так называемый спин) в единицах постоянной Планка $\hbar = h/2\pi$, а также среднее время жизни частицы.

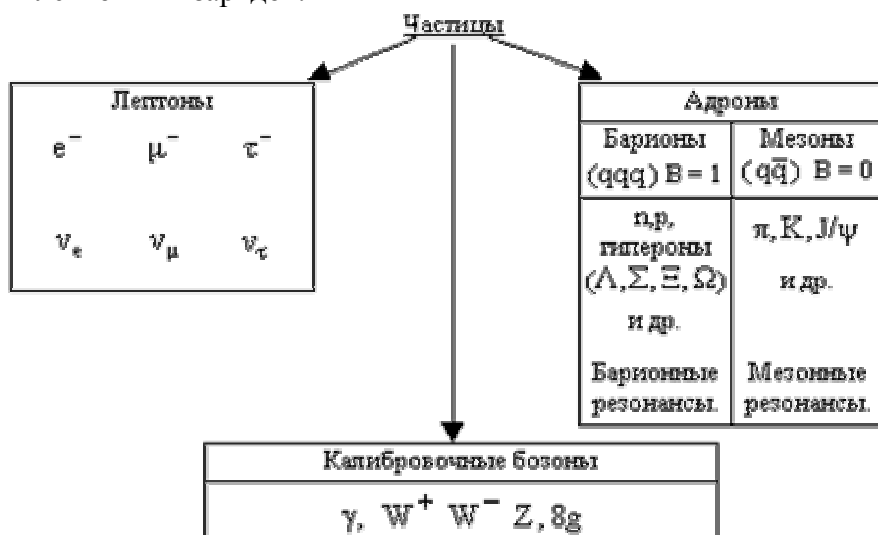


Табл.2. Свойства элементарных частиц

Группа	Название частицы	Символ		Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)	
		Частица	Античастица					
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	Стабилен	
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	Стабильно	
	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	Стабильно	
	Электрон	e^-	e^+	1	-1 1	1/2	Стабилен	
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8	-1 1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
Адроны	Мезоны	Пи-мезоны	π^0		264,1	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$
			π^+	π^-	273,1	1 -1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
		К-мезоны	K^+	K^-	966,4	1 -1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$
			K^0	\bar{K}^0	974,1	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$
		Эта-нуль-мезон	η^0		1074	0	0	$\approx 10^{-18}$
	Барионы	Протон	p	\bar{p}	1836,1	1 -1	1/2	Стабилен
		Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6	0	1/2	898
		Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1 -1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1 1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1 1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
		Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1 1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$

Каждая частица описывается набором физических величин - квантовых чисел - определяющих её свойства.

Наиболее часто употребляемые характеристики частиц:

Масса частицы, m . Массы частиц меняются в широких пределах от 0 (фотон) до 90 ГэВ (Z-бозон). Z-бозон - наиболее тяжелая из известных частиц. Однако могут существовать и более тяжелые частицы. Массы адронов зависят от типов входящих в их состав кварков, а также от их спиновых состояний.

Время жизни, τ . В зависимости от времени жизни частицы делятся на стабильные частицы, имеющие относительно большое время жизни, и нестабильные. К стабильным частицам относят частицы, распадающиеся по слабому или электромагнитному взаимодействию. Деление частиц на стабильные и нестабильные - условно. Поэтому к стабильным частицам принадлежат такие частицы как электрон, протон, для которых в настоящее время распады не обнаружены, так и π^0 -мезон, имеющий время жизни $\tau = 0,8 \cdot 10^{-16}$ с. К нестабильным частицам относят частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия. Их обычно называют резонансами. Характерное время жизни резонансов - $10^{-23} - 10^{-24}$ с.

Спин J . Величина спина измеряется в единицах \hbar и может принимать 0, полуцелые и целые значения. Например, спин π , K-мезонов равен 0. Спин электрона, мюона равен 1/2. Спин фотона равен 1. Существуют частицы и с большим значением спина. Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми-Дирака, с целым спином - Бозе-Эйнштейна.

Электрический заряд Q . Электрический заряд является целой кратной величиной от $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кулон (или $48 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЕ) - элементарный электрический заряд. Частицы могут иметь заряды 0, ± 1 , ± 2 .

Внутренняя четность P . Квантовое число P характеризует свойство симметрии волновой функции относительно пространственных отражений. Квантовое число P имеет значение +1, -1.

Наряду с общими для всех частиц характеристиками, используют также квантовые числа, которые описывают только отдельным группам частиц. Квантовые числа - барионное число B , странность s , очарование (charm) c , красота

(bottomness или beauty) b , верхний (topness) t , изотопический спин I приписывают только сильно взаимодействующим частицам - адронам.

Лептонные числа L_e, L_μ, L_τ . Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов. Лептоны e, μ и τ участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Лептоны ν_e, ν_μ и ν_τ участвуют только в слабых взаимодействиях. Лептонные числа имеют значения $L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1$. Например, $e^- \nu_e$ имеют $L_e = +1$; $e^+ \nu_e$ имеют $L_e = -1$. Все адроны имеют $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$.

Барионное число B . Барионное число имеет значение $B = 0, +1, -1$. Барионы, например, p, Λ, Σ , нуклонные резонансы имеют барионное число $B = +1$. Мезоны, мезонные резонансы $B = 0$, антибарионы $B = -1$.

Странность s . Квантовое число s может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ и определяется кварковым составом адронов. Например, гипероны Λ, Σ имеют $s = -1$; K^+, K^- -мезоны имеют $s = +1$.

Charm c . Квантовое число c может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. В настоящее время обнаружены частицы, имеющие $c = 0, +1$ и -1 . Например, барион Λ_c имеет $c = +1$.

Bottomness b . Квантовое число b может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. В настоящее время обнаружены частицы, имеющие $b = 0, +1, -1$. Например, B^+ -мезон имеет $b = +1$.

Topness t . Квантовое число t может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. В настоящее время обнаружено всего одно состояние с $t = +1$.

Изоспин I . Сильно взаимодействующие частицы можно разбить на группы частиц, обладающих схожими свойствами (одинаковое значение спина, чётности, барионного числа, странности и др. квантовых чисел, сохраняющихся в сильных взаимодействиях) - изотопические мультиплеты. Величина изоспина I определяет число частиц, входящих в один изотопический мультиплет. p и n составляют изотопический дуплет $I = 1/2$; $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$ входят в состав изотопического триплета $I = 1$, Λ - изотопический синглет $I = 0$, число частиц, входящих в один изотопический мультиплет $2I + 1$.

G-чётность - это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения \hat{C} и изменения знака третьей компоненты I_z изоспина. G-чётность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

Адроны (от греч. *hadros* - большой, сильный; термин введен Л.Б. Окунем (СССР) в 1967), элементарные частицы, которые участвуют в сильных взаимодействиях (подвержены сильному влиянию со стороны других таких же частиц). Число обнаруженных в природе адронов велико: несколько сотен. Адронами являются протоны, нейтроны, мезоны и др. Адроны делятся на два подкласса. Адроны, которые являются бозонами, носят название мезонов. Адроны, которые являются фермионами, носят название барионов. Кроме стандартных характеристик элементарных частиц, таких как масса, время жизни, электрический заряд, спин, описываются еще и специальным зарядом, странностью, а также изотопическим спином и проекцией изотопического спина на одну из осей. Адроны обладают сохраняющимися в процессах сильного взаимодействия квантовыми числами: странностью, очарованием, красотой и др. Близкие по массе адроны, имеющие одинаковые значения указанных квантовых чисел, а также барионного числа и спина могут быть объединены в изотопические мультиплеты, включающие в себя адроны с различными электрическими зарядами. Изотопические мультиплеты, отличающиеся только значением странности, могут быть, в свою очередь, объединены в более обширные группы частиц - супермультиплеты группы $SU(3)$. В свободном состоянии все адроны (за исключением, возможно, протона) нестабильны. Те из них, которые распадаются благодаря сильному взаимодействию, имеют характерное время жизни порядка $10^{-22}-10^{-23}$ с и называются резонансами (исключение - векторные мезоны со скрытым очарованием: $J/\Psi, \Psi$ или со скрытой красотой: $\gamma, \gamma', \gamma''$, время жизни которых порядка 10^{-20} с). Адроны, распадающиеся за счет слабого или электромагнитного взаимодействия, условно называются стабильными, поскольку их время жизни на много порядков больше характерного времени сильного взаимодействия. К "стабильным" (в этом смысле) адронам, кроме нуклонов, относятся гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$, барион Λ_c , мезоны π (пи-мезон или пион), K (ка-мезон или каон), η , очарованные мезоны D, F и др. Адроны представляют собой составные системы. Большинство барионов состоит из трех кварков, а мезоны - из кварка и антикварка (хотя возможны состояния, имеющие в своем составе дополнительные пары кварк-антикварк, например мезоны из 2 кварков и 2 антикварков). Значения странности, очарования и др. подобных квантовых чисел адронов определяются числом входящих в их состав странных (s), очарованных (c), красивых (b) и др. возможных типов (ароматов) кварков и соответствующих антикварков.

Мезоны - те адроны, которые являются бозонами. Мезоны - нестабильные элементарные частицы с нулевым или целым спином, принадлежащие к классу адронов и не имеющие барионного заряда. К мезонам относят пи-мезоны, K-мезоны, многие резонансы. Массы мезонов лежат между массами электрона и протона. Существуют электрически заряженные (+ и -) и нейтральные мезоны. По величине заряд мезона (как + так и -) равен элементарному электрическому заряду. Спин мезонов равен нулю, магнитный момент отсутствует. Кроме обычных характеристик элементарных частиц, таких как масса, время жизни, электрический заряд, спин, мезоны описываются еще и специальным зарядом - странностью, а также изотопическим спином и проекцией изотопического спина на одну из осей. Обнаружены мезоны с «очарованием» и с «красотой». Мезоны ответственны за перенос сильного взаимодействия. Согласно современным представлениям мезоны представляют собой различные комбинации пар кварков.

Барионы (от греч. *barus* - тяжелый), общее название тяжелых элементарных частиц, включая протоны и нейтроны (вместе называемые нуклонами) и ряд короткоживущих частиц, которые при распаде порождают протон. Барионами называются те из адронов, которые являются фермионами. Частицы с равным единице барионным числом. Все барионы являются адронами и имеют полуцелый спин, то есть подчиняются Ферми-Дирака. К барионам, в частности, относятся нуклоны (протон и нейтрон), гипероны, очарованные барионы, а также барионные

резонансы. Все барионы, кроме самого легкого - протона, нестабильны и в свободном состоянии распадаются в конечном итоге на протон. При этом барионные резонансы распадаются благодаря сильному взаимодействию за время 10^{-23} с; Барионы, распадающиеся за счет слабого взаимодействия, имеют времена жизни на много порядков больше, поэтому и классификации адронов их условно относят к "стабильным" частицам. Барионы состоят из трех кварков, определяющих их квантовые числа (странность, очарование, красоту и др.). Предполагается также возможность существования барионов с дополнительной парой кварк-антикварк, то есть барионов, состоящих из четырех кварков и одного антикварка, В случае таких пятикварковых состояний возможны барионные состояния с положительной странностью или с изотопическим спином $5/2$. Имеются теоретические и экспериментальные указания на возможность существования так называемых дибарионов, представляющих собой связанное состояние из 6 кварков. Барионы объединяются в изотопические мультиплеты и супермультиплеты группы SU(3). Наиболее известные из них: октет барионов со спином $1/2$ (p, n, Λ , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^-) и декуплет барионов со спином $3/2$ (Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- , Σ^{*+} , Σ^{*0} , Σ^{*-} , Ξ^{*0} , Ξ^{*-} , Ω).

Барионное число B - квантовая характеристика частиц, отражающая установленный на опыте закон сохранения числа барионов. Понятие "барионное число" введено в 1938 Э. Штюкельбергом для объяснения стабильности протона, поскольку законы сохранения энергии-импульса, момента количества движения и электрического заряда не могут "запретить" возможности распада протона на более легкие частицы ($p \rightarrow \pi^+ + \gamma$ или $p \rightarrow e^+ + \gamma$) или аннигиляции протонов в ядрах ($pp \rightarrow e^+ + e^-$, $pp \rightarrow \pi^+ + \pi^+$). Отсутствие в природе таких переходов можно объяснить наличием у протона особого "заряда" - барионного числа, закон сохранения которого "запрещает" распад протона на мезоны и лептоны, не имеющие барионных чисел. Подобно электрическому заряду, барионное число следует считать аддитивной величиной, причем барионное число частиц и античастиц должны быть равны по абсолютной величине и противоположны по знаку. **Закон сохранения числа барионов:** во всех процессах происходящих в природе разности общего числа барионов и антибарионов сохраняется. Барионное число $B=+1$ имеют такие частицы как нуклон (p,n), гипероны (Λ , Σ ...) резонансы (Λ ...). Соответствующие античастицы имеют барионное число $B=-1$. Мезоны и лептоны имеют барионное число $B=0$. Барионные числа наблюдающих частиц легко получить если приписать кваркам барионное число $B=+1/3$, а антикваркам $B=-1/3$. Тогда все частицы состоящие из трех кварков (барионы) будут иметь барионное число $B=+1$, частицы состоящие из трех антикварков (антибарионы) - $B=-1$, частицы состоящие из кварка и антикварка (мезоны) - $B=0$.

Закон сохранения барионного числа

разрешает	запрещает
$p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p}$ $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$	$p+p \rightarrow p+\pi^+$ $n \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

Фермионы - элементарные частицы с полуцелым спином (в атомной системе единиц). Термин происходит от фамилии итальянского физика Ферми, который разработал статистику для таких частиц (статистика Ферми-Дирака). В англоязычной литературе фермионы также обозначаются словом "matter" (материя, источник взаимодействия). Пример: электрон, протон, нейтрон (у всех спин равен 1/2).

Бозоны - элементарные частицы, имеющие целый спин (в атомной системе единиц). Термин происходит от фамилии индийского физика Бозе, который разработал статистику для таких частиц (статистика Бозе-Эйнштейна). В англоязычной литературе для обозначения бозонов используют термин field (поле), подразумевая под этим, что они переносят взаимодействие. Пример бозона - фотон (спин равен нулю).

Лептоны - (от греч.- легкий), элементарные частицы со спином 1/2, не участвующие в сильном взаимодействии. К лептонам относятся электрон, отрицательно заряженный мюон и тяжелый - лептон (с массой около двух протонных масс) электронное и мюонное нейтрино, нейтрино, связанное с тяжелым лептоном, и их античастицы.

Лептонный заряд - (лептонное число), внутренняя характеристика лептонов; $l = +1$ для лептонов и -1 для антилептонов. Различают: электронный лептонный заряд, которым обладают только электроны, позитроны, электронное нейтрино и антинейтрино и мюонный лептонный заряд, которым обладают только мюоны и мюонное нейтрино и антинейтрино. Алгебраическая сумма лептонного заряда каждого типа с очень высокой точностью сохраняется при всех взаимодействиях.

Кварки - гипотетические фундаментальные частицы, из которых состоят все адроны (барионы - из трех кварков, барионы - из кварка и антикварка). Кварки обладают спином $1/2$, электрическими зарядами $-2/3$ и $+1/3$ заряда протон, а также специфическим квантовым числом - «цветом». Экспериментально (косвенно) обнаружены 6 типов (ароматов) кварков: u, d, s, b, t. В свободном состоянии кварки не наблюдались. Термин введен в 1964 году независимо друг от друга М.Гелл-Манном и Д.Цвейгом.

2. Аннигиляция позитронов.

Позитрон - элементарная частица, античастица по отношению к электрону. Имеет массу и спин такие же, как у электрона, а заряд и магнитный момент, отличающийся только по знаку. Позитрон стабилен и не подвергается самопроизвольному распаду, однако он не может долго существовать из-за аннигиляции с электронами, имеющимися в любом веществе. Атомы гипотетических веществ, ядра которых образованы антипротонами и антинейтронами, должны иметь в своих оболочках позитроны. Строение позитронных

оболочек должно обуславливать химические свойства антивеществ так же, как электроны обуславливают химические свойства обычных веществ.

ПОЗИТРОН [лат. *positivus* положительный + (элек)трон], e^+ , - физически устойчивая элементарная частица, с массой, равной массе электрона, положительным зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона, и спином $1/2$; является античастицей по отношению к электрону и в связи с этим в средах с большим числом электронов существует очень короткое время вследствие аннигиляции. Позитроны образуются в процессах рождения пар $e^+ e^-$ гамма-квантами, при распаде мюонов и т.п.

История открытия позитрона. Радиоактивные минералы создают естественный фон излучения, поэтому по мере удаления от поверхности Земли поток радиации должен ослабевать. В 1912 г. австрийский физик Виктор Гесс провел измерения радиации, поднимаясь на воздушном шаре. Результаты оказались неожиданными: после отметки 600 м активность излучений начинала возрастать: в атмосферу проникала мощная радиация. Поначалу наблюдаемый эффект объясняли еще неизвестными атмосферными процессами или просто пылевыми облаками, занесенными с поверхности планеты. Но затем американский физик Роберт Милликен, Нобелевский лауреат по физике (1923 г.) экспериментально доказал, что "лучи Гесса" имеют неземное происхождение, и дал им название "космические". Их проникающая способность существенно больше, чем у радиоактивных излучения. Поэтому "космические лучи" - источники частиц, ускоренных самой природой. Они используются для получения самой разнообразной информации о строении материи. В процессе исследования космических лучей в их составе обнаруживались новые материальные структуры. И первой из них стал позитрон. В конце 20-х гг. Поль Дирак, получив релятивистское квантовомеханическое уравнение для электрона, которое предсказывало существование у электрона отрицательной энергии ($E < 0$). Дирак предположил, что состояния с $E < 0$ заняты, а свободные места - "дырки" - в этом заполненном фоне отвечают частицам с положительной энергией, но несущим заряд, противоположный заряду электрона, то есть положительный. Так Дирак предсказал частицу с массой электрона, но зарядом "+". Сначала положительную заряженную частицу отождествляли с протоном, но протон - слишком массивная частица, чтобы вписаться в релятивистскую квантовую теорию. "Антиэлектрон" Дирака недолго оставался гипотезой. В 1932 г. он был обнаружен американским физиком Карлом Андерсоном в составе космических лучей. Андерсон построил специальную камеру Вильсона, поместив ее в очень сильное магнитное поле. Такое устройство позволяло наблюдать и фотографировать треки заряженных частиц, по интенсивности трека судить о массе частицы, а по направлению отклонения трека в магнитном поле - о знаке заряда. На фотографии, сделанной 2 августа 1932 г.: ней впервые запечатлен "фотопортрет" позитрона - след, оставленный частицей, двигавшейся снизу вверх. По характеру отклонения в магнитном поле очевидно, что частица имеет положительный заряд и не может быть отождествлена с протоном. Андерсон предложил назвать положительный электрон позитроном. Одновременно с Андерсоном в Кавендишевской лаборатории проблемами космических лучей занимались Патрик Блэккетт и Джузеппе Оккиалини. Они применили усовершенствованную камеру Вильсона, связанную с двумя счетчиками Гейгера-Мюллера. Благодаря удачной конструкции прибора исследователи весной 1933 г. получили несколько десятков фотографий, 3/4 из которых фиксировали треки высокоэнергетических частиц. При этом почти половина следов принадлежала частицам, имеющим массу электрона и несущим положительный заряд. Так позитрон был открыт вторично. Блэккетт и Оккиалини опираясь на теоретические представления Дирака показали, что часть энергии космических лучей превращается в позитрон-электронные пары. Минимальная энергия, необходимая для подобных превращений, не очень велика. Порядок энергии оказывался таким, что рождение пар могло происходить и под действием гамма-излучения некоторых радиоактивных изотопов. В веществе позитрон имеет крайне малое время жизни, поскольку при встрече с электроном аннигилирует, а энергия $2mc^2$ передается фотонам. Напротив, фотоны, обладающие большой энергией, способны порождать электрон-позитронную пару. Таким образом, энергия в форме космических лучей или гамма-лучей при соответствующих условиях может превращаться в пары частиц и, напротив, эти пары могут рекомбинировать и превращаться в энергию (в процессе аннигиляции). Этот вывод имел принципиальное значение в связи с фундаментальным принципом эквивалентности энергии и массы. Карл Андерсон был удостоен половины Нобелевской премии по физике с краткой формулировкой "за открытие позитрона", а вторую половину вручили Виктору Гессу ("за открытие космических лучей") - человеку, который обнаружил первым эти лучи и тем самым дал ученым новый объект исследований, приведших ко множеству неожиданных открытий.

Позитронный или β^+ -распад связан с превращением протона в нейтрон и сопровождается уменьшением Z на единицу. Этот тип распада встречается у ядер, обладающих избытком протонов по сравнению со стабильным изобаром. Процесс β^+ -распада был обнаружен спустя несколько лет после того, как существование позитрона было постулировано Дираком из чисто теоретических соображений. Вслед за обнаружением позитрона - сначала в космических лучах, а затем при процессах β^+ -распада - вскоре последовало открытие процессов образования пар позитрон-электрон и их аннигиляция.

Образованием пар называется процесс превращения фотона в электрон и позитрон; энергия фотона должна быть не менее 1.02 Мэв ($2mc^2$). Можно показать, что в пустоте этот процесс не происходит, так как в этом случае не соблюдаются законы сохранения энергии и импульса. Однако образование пар может происходить в поле ядра, которое поглощает некоторую долю импульса и энергии. Сечение этого процесса возрастает с увеличением Z ядра и энергии фотона. Процесс аннигиляции является причиной чрезвычайно малой продолжительности жизни позитрона; как только в море электронов возникает дырка, она вновь быстро заполняется электроном. Энергия, связанная с аннигиляцией, обычно выделяется в виде двух γ -квантов, вылетающих, согласно закону сохранения импульса, в примерно противоположных направлениях. Значительно реже испускается один γ -квант; это возможно, если участвующий в процессе аннигиляции электрон сильно связан (например, находится на одной из внутренних орбит) и избыток импульса может передаться ядру. Двухфотонная аннигиляция происходит в основном при участии очень медленных позитронов, скорость которых в результате предшествующих процессов ионизации упала почти до нуля. Поэтому энергия каждого из испускаемых γ -квантов равна mc^2 (0.51 Мэв). Это характерное излучение называют аннигиляционным излучением.

Характеристики аннигиляционного излучения позитронов зависят от химического состава среды, в которой происходят акты аннигиляции. В частности, такие величины, как среднее время жизни позитрона, а также доля аннигиляций с излучением трех фотонов вместо двух, связаны друг с другом и могут в значительной мере изменяться.

Почти всегда аннигиляция происходит после того, как позитроны замедляются до тепловых энергий. Вероятность аннигиляции зависит от относительной ориентации спинов позитрона и электрона: аннигиляция в синглетном состоянии (спины антипараллельны) примерно в 1100 раз более вероятна, чем в триплетном (спины параллельны). Аннигиляция в синглетном состоянии дает два фотона, а в триплетном-три. Именно эта разница в числе фотонов и обуславливает большое различие вероятностей аннигиляции в синглетном и триплетном состояниях. Если взаимная ориентация спинов частиц при каждом соударении определяется законом случая, то триплетные состояния реализуются втрое чаще синглетных и отношение вероятности двухфотонных и трехфотонных аннигиляций составит $1100/3=370$. Время жизни позитронов относительно аннигиляции зависит от электронной плотности в тормозящем веществе; для большинства металлов оно равно примерно $1.5 \cdot 10^{-10}$ сек.

3. Позитроний.

Позитроний - легчайший водородоподобный атом, состоящий из одного позитрона и одного электрона. Обозначается символом Ps. Существует в двух формах- пара позитроний (синглетное состояние 1S_0) с антипараллельными спинами e^+ и e^- и ортопозитроний (триплетное состояние 3S_1) с параллельными спинами e^+ и e^- . Время жизни пара-позитрония в вакууме $1.25 \cdot 10^{-10}$ с (1,25 нс), он погибает в следствии аннигиляции позитрона с электроном с испусканием **двух** γ -квантов; орто-позитроний живет в вакууме $1.4 \cdot 10^{-7}$ сек (142 нс) и погибает с испусканием **трех** γ -квантов.

ПОЗИТРОНИЙ - связанная система из электрона (e^-) и позитрона (e^+), по структуре подобная атому водорода; нестабилен - через 10^{-7} или 10^{-10} с (соответственно при антипараллельных и параллельных спинах частиц) происходит аннигиляция $e^+ \cdot e^-$.

Физик Мартин Дейч нашел остаточные следы распада позитрония в 1951 году, когда он изучал податомные частицы. Он наблюдал долгопериодную компоненту аннигиляции позитронов (с помощью методики задержанных совпадений). Позитроний – водородоподобный атом (в нем роль положительного ядра играет атом) состоит из позитронов (антиэлектронов) и электронов. Существование позитрония было предсказано в 1941 году, то есть через девять лет после открытия позитрона и через 13 лет после первого предсказания П. Дирака о существовании антиматерии.

Образование атомов позитрония наиболее вероятно в конце замедления позитронов, когда их энергия (несколько электроновольт) уже недостаточна для ионизации и возбуждения молекул среды, но еще превышает разность между потенциалом ионизации этих молекул и энергией связи e^+ и e^- в Ps (6.8 эв). Атомы позитрония могут подобно водородным атомам вступать в различные химические реакции; таковы: присоединение по ненасыщенным водородным связям, замещение других атомов, окисление: $Ps + O_x = e^+ + Red$. Кроме того, они могут испытывать аннигиляцию, распадаясь на 2γ -кванта в момент соударения с какой-либо молекулой, и конверсию, в которой при столкновении со свободными атомами и радикалами орто-форма переходит в пара-форму. Все эти процессы наиболее характерны для орто-позитрония, как обладающего большим собственным временем жизни. Поэтому участие позитрония во всевозможных химических реакциях (химия позитрония) может изучаться по наблюдению гибели орто-позитрония с помощью различных радиотехнических схем, регистрирующих уменьшение времени жизни позитрония или вероятности его уничтожения с испусканием трех γ -квантов.

Таким образом, при столкновении замедленного позитрона с электроном (до того, как произойдет аннигиляция) возможно образование промежуточной связанной системы - атома позитрония (e^+e^-). Позитроний, Ps, - легкий изотоп атомарного водорода с вдвое меньшей приведенной массой, вдвое меньшим ионизационным потенциалом (0.8 эв) и удвоенным боровским радиусом. Если бы после своего образования атомы позитрония не вступали ни в какие взаимодействия, то их число в триплетном состоянии оставалось бы втрое больше, чем в синглетном и, таким образом, трехфотонные аннигиляции происходили бы втрое чаще двухфотонных. Поскольку собственное время жизни позитрония относительно аннигиляции в синглетном и триплетном состояниях $1.25 \cdot 10^{-10}$ сек и $1.4 \cdot 10^{-7}$ сек соответственно, то четверть всех актов аннигиляции происходила бы за время порядка 10^{-10} сек, а три четверти - за 10^{-7} сек; в случае, когда позитроний не образуется, долгоживущая компонента отсутствует и средняя продолжительность жизни составляет 10^{-10} сек. Не следует думать, что все позитроны аннигилируют в составе позитрония. В действительности образование позитрония возможно лишь в течение около 20% времени замедления; в остальное время позитроны аннигилируют в столкновениях как свободные частицы.

Итак, что позитрон и электрон образуют связанную систему (позитроний), похожую на атом водорода, в которой роль ядра (протона) играет позитрон. На самом деле сравнение позитрония с атомом водорода не совсем точно. В атоме водорода протон значительно тяжелее электрона (в 1836 раз), и поэтому с большой точностью можно считать, что движется только электрон, а протон стоит на месте. Про позитроний так говорить нельзя: массы позитрона и электрона одинаковы. Позитроний лучше представлять как систему двух

зарядов, которые обращаются вокруг общего центра масс, находясь на одинаковом расстоянии от него. Поэтому позитроний выглядит как вращающийся электрический диполь. Расстояние между электроном и позитроном может либо оставаться постоянным, либо изменяться. В первом случае орбиты частиц являются круговыми, во втором – эллиптическими. Хотя позитроний в целом – система нейтральная (его заряд равен нулю), это не означает, что он не окружен электрическим полем. Поля не было бы, если бы оба заряда располагались в одном месте. В позитронии же заряды находятся на расстоянии примерно $0,2 \cdot 10^{-8}$ см, а потому поле, создаваемое позитроном, не уничтожается полностью полем, которое создается электроном. В результате позитроний может притянуть к себе еще один заряд – электрон или позитрон, и образовать связанную систему, состоящую из трех частиц.

Систему, состоящую из двух электронов и одного позитрона, удалось создать в 1980 г. американцу Миллсу. Её назвали отрицательным ионом позитрония. Обозначают этот ион Ps^- . В опытах Миллса пучок позитронов проходил в вакууме через тонкую ($4 \cdot 10^{-7}$ см) пленку углерода; при этом позитроны захватывали электроны и образовывали Ps^- . На 104 позитрона, проходящих через пленку, возникало 3 Ps^- . Ps^- - система слабо связанная: когда позитроний присоединяет к себе электрон, выделяется энергия, равная 0,3266 эВ. Для сравнения скажем, что, для того, чтобы «разорвать» позитроний, надо затратить энергию 6,5 эВ. Ps^- распадается с излучением двух γ -квантов с временем жизни 0,5 нс. Должен существовать и положительный ион позитрония Ps^+ , аналог иона молекулы водорода, содержащего два протона и один электрон. Но он пока не получен.

В 1999 г. американские ученые Н.Чжанг и Д.Шредер методами математического моделирования доказали возможность существования молекулы, состоящей из атома кислорода и двух атомов позитрония (т.е. связанных электрона и позитрона). Такое соединение, получившее название "позитронная вода", представляет несомненный интерес с точки зрения изучения электромагнитного взаимодействия трех заряженных частиц. С помощью метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) были проанализированы различные конфигурации из атома кислорода, позитронов и электронов. Оказалось: энергия связи молекулы позитронной воды (Ps_2O) равна 1,27 эВ, что меньше энергии диссоциации системы $Ps-PsO$. Это означает возможность существования устойчивого соединения Ps_2O со средним временем жизни 220 пикосекунд. Позитронную воду, вероятно, можно было бы получить при облучении импульсным потоком позитронов тонкого слоя атомов кислорода, адсорбированного на металлической подложке. Однако современные источники позитронов пока не обладают достаточной интенсивностью.

4. Реакции позитрония.

Химическая информация о среде, в которой происходит аннигиляция, может быть получена путем анализа реакций с участием позитрония. Наблюдаемой в опытах величиной является скорость превращения долгоживущего триплетного позитрония в короткоживущий синглетный или же в свободные позитроны. Так, незначительная добавка NO или NO_2 (но не N_2O) к газу-замедлителю вызывает исчезновение долгоживущей компоненты. Электронный обмен между позитронием и молекулой с нечетным числом электронов может приводить к опрокидыванию спина; в то же время этот процесс затруднен при обмене электроном между позитронием и молекулой, имеющей четное число электронов, ибо при этом требуется образование триплетного состояния молекулы. Были измерены скорости реакции окисления триплетного позитрония в водных растворах под действием различных окислителей. Возникающие при этом свободные позитроны аннигилировали далее за время $5 \cdot 10^{-10}$ сек. Установлено, что продолжительность жизни триплетного позитрония понижалась от $1,8 \cdot 10^{-9}$ сек в чистой воде до $0,7 \cdot 10^{-9}$ сек в 0,125 М растворе $HgCl_2$. Скорость реакции окисления пропорциональна концентрации окислителя, при заданной же концентрации она возрастает с увеличением стандартного потенциала окислителя. Это справедливо и в случае обычных реакций передачи электрона.

5. Мюоний.

В качестве положительно заряженного ядра атома может использоваться не только протон или позитрон, но и любая другая положительно заряженная частица, например, мюон.

Мюон [сокр. мю-мезон] — физически неустойчивая элементарная частица с массой покоя, равной 207 электронных масс, зарядом, равным положительному или отрицательному электрическому заряду и спином 1/2; время жизни мюона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с; относится к классу лептонов. Отрицательно заряженный мюон является античастицей по отношению к положительно заряженному мюону, и наоборот.

Положительный мюон способен захватывать на свою орбиту обычный электрон, образуя мюоний, аналог атома водорода.

Мюоний - нестабильная связанная система из положительно заряженного мюона (μ^+) и электрона (e^-), по структуре аналогичная атому водорода. Время жизни мюония около 10^{-6} с. Атомная водородная система, состоящая из положительного мюона в качестве центрального ядра и электрона, является модельным легким аналогом атомарного водорода.

Преобладание электромагнитной природы взаимодействия мюонов с ядрами и электронами, а так же несохранение четности при рождении и распаде мюонов обуславливают перспективность их применения для химических исследований.

Как известно, мюоны не ступают в сильные взаимодействия с ядрами в отличие от пионов (π -мезонов), которые считаются квантами ядерного поля. В ядерных столкновениях при высоких энергиях образуются пионы, а не мюоны; мюоны возникают лишь как вторичные частицы при распаде заряженных пионов. Мюон в свою очередь нестабилен и распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино. В этих двух процессах распада наблюдается несохранение четности. Рассмотрим пучок мюонов, образующихся при распаде пионов - спины мюонов выстроены вдоль импульса, направление которого выберем за ось z . Если затем пучок мюонов останавливается в поглотителе и изменяется угловое распределение распадных электронов, то числа электронов, регистрируемых под углами θ и $\pi-\theta$ по отношению к оси z , будут различны. Деполяризация наблюдалась в опытах, в которых регистрируемая асимметрия в β -распаде мюонов уменьшалась примерно вдвое при использовании вместо графита фотоэмульсии (желатина и бромистое серебро) в качестве тормозящего материала, Зависимость деполяризации от химического окружения делает мюоны потенциально полезными для химических исследований.

Магнитное взаимодействие положительного мюона с электронами - преобладающий механизм деполяризации. Оно сопровождается кулоновским притяжением двух частиц, что приводит к образованию мюония (μ^+e^-) аналогично образованию позитрония. Наблюдалась на опыте существенная химическая специфичность деполяризации: она отсутствует в металлах, полупроводниках и в органических галоидопроизводных вроде $CHBr_3$ и CCl_4 , деполяризация достигает почти 100% в S, P, NaCl и AgBr и принимает промежуточные значения в углеводородах, H_2O , MgF_2 и тефлоне.

Поляризованные (ориентированные) ядра - атомные ядра, спины которых ориентированы не хаотично, а имеют преимущественную направленность в пространстве.

Атом мюония (Mu) по основным параметрам (размер, ионизационный потенциал и т.п.) близок к атому H, отличаясь от последнего массой ($m_{Mu} \sim m_H/9$) вполне аналогичен водороду и в твердом теле μ^+ -мезоны занимают такие же положения равновесия, какие заняли бы замедляющиеся в нем протоны. С помощью теории кинетического изотопного эффекта можно оценить разницу в скоростях химических реакций водорода и мюония. Установлено, что при нормальных условиях изотопный эффект незначителен. Есть одно обстоятельство, которое будучи малосущественным для реакций обычных атомов, даже таких легких, как водород, для реакций мюония может приобретать решающее значение - квантово-механический туннельный эффект. По сравнению с предсказаниями классической теории скорость химической реакции значительно возрастает. Для зависимости скорости химической реакции от температуры закон Аррениуса же не имеет места: уже при комнатной температуре мы находимся в квантовой области.

Одной из наиболее существенных характеристик мюония является величина поляризации мюона, находящегося в составе мюония. По изменению поляризации мюония можно судить о взаимодействиях мюония с веществом. Мюониевый метод изучения физико-химических процессов сочетает возможности методов ЯМР и ЭПР, дает уникальную информацию при исследованиях реакционных способностей химических соединений и других характеристик вещества.

Важнейшей предпосылкой для проведения исследований взаимодействия мюония со средой является выяснение условий его идентификации. Идея очевидна: поскольку мюоний подобен атомарному водороду, в том числе и по химическим свойствам, его обнаружение возможно в химически инертных средах, когда скорость химических реакций или других процессов, приводящих к деполяризации мюония, мала по сравнению с временем жизни мюона ($2,2 \cdot 10^{-6}$ с). Наибольший интерес вызывает, естественно, наличие мюония в конденсированной фазе вещества как по методическим причинам (существенное увеличение плотности остановок мюона в среде и, соответственно, статистической обеспеченности эксперимента), так и в связи с широким спектром исследуемых процессов.

6. Мезоатомы и мезомолекулы.

С химической точки зрения интерес представляют не только μ^+ -мезоны, но и μ^- -мезоны, поскольку последние могут замещать электроны в атомах и молекулах, образуя мезоатомы (иногда их называют мюонными атомами).

Мезоатом [см. мез(о)...] — атом, в котором один из электронов замещен отрицательно заряженным мюоном; в мезоатоме мюоны расположены в сотни раз ближе к ядру, чем электроны в обычном атоме. В более широком смысле, мезоатом – атомоподобная система, в которой силы электростатического притяжения связывают положительное ядро с одним (или несколькими) отрицательно заряженными мюонами (мюонный атом) или адронами (адронный атом). Мезоатом может содержать также электроны.

Адроны - элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии (барионы и мезоны, включая все резонансы).

Барионы - /от греч. - тяжелый/, "тяжелые" элементарные частицы с полуцелым спином и массой, не меньшей массы протона, участвуют во всех известных фундаментальных взаимодействиях; к барионам относятся нуклоны, гипероны и многие из резонансов.

Раздел химии, изучающий и использующий химические превращения мезоатомов, называется мезохимией.

Мюоны были впервые обнаружены в 1936 г. американскими физиками К.Андерсоном и С.Неддермейером. Отрицательный мюон удивительно похож на электрон: у них одинаковый электрический заряд, спин, оба аналогичным образом участвуют в слабых и электромагнитных взаимодействиях. Единственное видимое их отличие заключается в массе: мюон в 206,8 раза тяжелее электрона. Именно из-за большей величины массы мюон потерял стабильность. В отличие от электрона ему есть на что распасться. Он действительно распадается на электрон и пару нейтрино. За этот распад ответственны слабые взаимодействия. Согласно теории время жизни мюона обратно пропорционально пятой степени его массы и равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Основным источником мюонов в космических лучах и на ускорителях служат пи-мезоны, распадающиеся на мюон и нейтрино.

Зная о сходстве мюона с электроном, нетрудно представить себе экзотические атомы, в которых один из электронов заменен на отрицательный мюон. Такие атомы действительно наблюдались экспериментально. Простейший из них – мюонный водород, в котором μ^- вращается вокруг протона. По размерам такой атом в 207 раз меньше обычного атома водорода. Можно сделать еще один шаг и представить себе мезомолекулу – два ядра, соединенные между собой не электроном, как обычно, а мюоном. Например, ион молекулярного дейтерия *dde* представляет собой два дейтона и общий электрон. Дейтоны находятся в нем на расстоянии порядка двух боровских радиусов.

При взаимодействии отрицательного мю-мезона с веществом, из-за отрицательного заряда μ^- образование мюония невозможно. Тем не менее происходит образование другого интересного химического вещества- μ -мезоатома или μ -мезомолекулы, в которых μ^- оказывается захваченным на стабильную орбиту атома или молекулы. Непосредственным доказательством существования таких соединений служит характеристическое рентгеновское излучение, испускаемое μ^- -мезонами при каскадных атомных переходах в процессе захвата, вплоть до 1s-состояния.

Интересная химическая информация может быть получена не только из данных по деполяризации, но также и при изучении захвата μ^- на молекулярные, а затем и на атомные орбиты. Чем, например, определяются вероятности захвата μ^- различными атомами, входящими в состав тормозящей среды? Теоретическое рассмотрение предсказывает пропорциональность относительных вероятностей захвата произведению относительного числа соответствующих атомов на их атомный номер. Такой вывод был подтвержден в опытах со сплавами, но оказался неприменим к экспериментам с другими веществами.

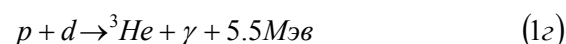
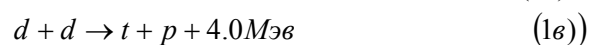
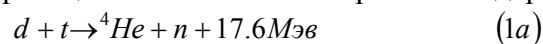
Существует периодичность в характеристиках захвата μ^- -мезонов окислами различных элементов. π^- -мезонов способны перезахватываться с водородных атомов на более тяжелые, в зависимости от того, исследуются ли смеси или химические соединения с участием водорода. Эти результаты представляются перспективными для изучения химических связей путем наблюдения захвата отрицательных мезонов.

Уже давно известно, что, в мезоатоме температура кристаллической решетки способна влиять на протекание внутриядерных реакций. Можно предположить, что будет и обратный эффект - энергия возбуждения ядра может передаваться кристаллической решетке (если последняя не разрушится при этом). Если удастся стабилизировать сам мезоатом то будет стабилизировано радиоактивное ядро (произойдет мезонное охлаждение ядра). Необходимую напряженность магнитного поля в окрестностях ядра можно достигнуть, подобрав кристаллическую структуру с соответствующим внутрикристаллическим магнитным полем. В этих условиях, обычные атомы самостоятельно будут переходить в состояние, подобное мезоатому без внешнего облучения мюонами.

7. Мюонный катализ ядерного синтеза

С образованием μ^- -мезоатомов и мезомолекул связаны надежды на катализ ядерных реакций μ^- -мезонами. В качестве примера остановимся на реакции термоядерного синтеза.

Рассмотрим следующие ядерные реакции синтеза гелия и трития из ядер – изотопов водорода:



Здесь выделение энергии в миллионы раз превышает таковое при обычном горении.

Для протекания реакций (1) сталкивающиеся ядра должны сблизиться до расстояния $R=4 \cdot 10^{-11}$ см (это значение – примерно удвоенный размер таких ядер и по порядку величины соответствует радиусу действия ядерных сил). Однако такому сближению препятствуют действующие между ядрами силы кулоновского (электростатического) отталкивания. Для того, чтобы ядра могли сблизиться до расстояния R и могла произойти реакция синтеза, энергия их относительного движения должна удовлетворять условию

$$\varepsilon \geq \varepsilon_{\text{пор}} = 0.4 \text{ Мэв} \quad (2)$$

Поэтому согласно классическим представлениям ядерные реакции синтеза из-за кулоновского отталкивания носят пороговый характер: для их протекания энергия ядер должна превышать значение $\varepsilon_{\text{пор}}$. При термоядерном синтезе в плазме необходимые значения энергии получаются за счет теплового движения ядер. Температура, при которой характерные значения энергии теплового движения совпадают с пороговым значением, $T_0 = 3 \cdot 10^9$ К. (Напомним, что 1 эв = 12000 К). За счет флуктуации энергии частиц при их тепловом движении, ядерный синтез возможен и при температурах ниже T_0 . Однако вклад этих процессов незначителен. Оценка (2) требуемых значений энергии представляется слишком завышенной. Известно, что термоядерный синтез в недрах Солнца протекает при температуре $T = 15 \cdot 10^6$ К. Причиной является туннелирование через кулоновский барьер, связанное с проявлением волновых свойств, присущих микрочастицам. Квантово-механические расчеты показывают, что при температурах плазмы $T < 10$ кэВ = 10^8 ядерный синтез в ней протекает исключительно благодаря туннелированию ядер через кулоновский барьер.

Мюон может выступить в качестве катализатора реакций ядерного синтеза. Свойства мюона аналогичны свойствам электрона. Однако он существенно (в 207 раз!) тяжелее электрона, и является нестабильной частицей со временем жизни $\tau_\mu = 2.2 \cdot 10^{-6}$ с. Совместно с ядрами изотопов водорода мюон может образовывать связанные системы, подобные соответствующим обычным атомным системам (таким, как атом водорода или молекулярный ион H_2^+ с возможной заменой ядер-протонов на d и t). Существенно, что размеры мюонных систем в 200 раз меньше размеров обычных атомов. Так, в молекулярном ионе H_2^+ расстояние между ядрами составляет 10^{-8} см, а расстояние между ядрами в положении равновесия в межмолекулярных ионах водорода (p μ , dd μ , dt μ и др.) составляет $5 \cdot 10^{-11}$ см.

Это легко показать. Начнем сначала с обычного водорода. Центробежная сила равна силе кулоновского притяжения, т.е. $mv^2 = e^2/R$ (m – масса электрона; v – его линейная скорость; e – заряд; R – радиус орбиты). Импульс электрона связан с длиной волны де Бройля L соотношением $L = h/m \cdot v$ (h – постоянная Планка). Согласно постулату Бора на орбите должно помещаться целое число электронных полувольт $2 \cdot \pi \cdot R = n \cdot L/2$. Для низшей орбиты ($n = 1$) отсюда следует, что скорость орбитального движения электрона равна: $v = \hbar' / mR$ ($\hbar' = h/(2 \cdot \pi)$). Подставляя это выражение в первое соотношение, получаем для радиуса Бора: $R = \hbar'^2 / m \cdot e^2$. Т.к. $\hbar = 10^{-27}$ эрг*с, а масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, то $R = 5,3 \cdot 10^{-9}$ см. Это – размер обычного атома водорода. Для атома мюонного водорода вместо массы электрона подставим массу мюона. Такой атом имеет в 207 раз меньшие размеры: $R_m = 2,5 \cdot 10^{-11}$ см.).

Мюон способен при комнатных температурах настолько сблизить ядра изотопов водорода, что произойдет их слияние, т.е. осуществится реакция термоядерного синтеза.

Напомним идею традиционного («горячего») термоядерного синтеза. Для осуществления ядерной реакции синтеза необходимо сблизить ядра на расстояние порядка 10^{-11} см, а для этого надо преодолеть колоссальные силы электростатического отталкивания. Какую энергию следует затратить на сближение двух частиц с электрическим зарядом протона? Простые оценки дают значения порядка 10 кэВ: затраченная энергия оказывается много меньше получаемой, т.е. процесс энергетически выгоден. Действительно, из закона Кулона следует, что энергия взаимодействия электрических зарядов e на расстоянии r равна $W \sim e^2/r$. Подставляя численные значения $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. CGSE, $r = 10^{-11}$ см, и по порядку величины получаем $W \sim 10^{-8}$ эрг = 10 кэВ). Если каким-то образом сообщить ядрам энергию порядка 10 кэВ, необходимую для преодоления кулоновского барьера отталкивания, то произойдет реакция синтеза. Выход ищут на пути повышения температуры. Если тепловая энергия kT первоначальных ядер будет порядка электростатической энергии, то высокие скорости ядер помогут им преодолеть кулоновский барьер отталкивания, и реакция синтеза станет возможной. Используя численное значение постоянной Больцмана $k = 1,4 \cdot 10^{-16}$ эрг/К, получаем оценку для температуры $T \gg 10^8$ К. Нагреть смесь легких ядер до температур порядка ста миллионов градусов – вот одна из главных проблем на пути осуществления управляемой термоядерной реакции синтеза. Очень сложная задача. Быть может, мюонный катализ ядерных реакций синтеза даст более простой способ получения энергии?

В мезомолекуле ddm дейтоны сблизятся до расстояний порядка $5 \cdot 10^{-11}$ см. Но именно при таких расстояниях уже идут ядерные реакции синтеза. Получается, что не надо нагревать смесь ядер до немислимых температур – достаточно образовать мезомолекулу, и два ядра «сами собой» сблизятся на нужные нам расстояния. В такой молекуле локально, в малом объеме возникнут условия, похожие на те, что создаются в центре термоядерного взрыва или существуют в недрах звезд. Тогда произойдет реакция слияния ядер, и этот микровзрыв выбросит на свободу мюон, который никак не будет затронут процессом синтеза, и сможет вновь участвовать в образовании следующей мезомолекулы. Мюон сам в реакции не участвует, хотя и способствует ее протеканию, – он служит катализатором. При этом нужные условия создаются только для тех ядер, которые участвуют в слиянии и до поры до времени не затрагивают прочих ядер.

В принципе, основная идея μ -катализа ядерных реакций выглядит просто. Находящийся в водородной среде, содержащей ядра - изотопы d и t, свободный мюон образует сначала мюонный атом (d μ , t μ), а затем и мезомолекулярный ион. В таком ионе благодаря его малым размерам достаточно быстро протекает соответствующая ядерная реакция синтеза (1). При этом происходит высвобождение мюона (если его не подхватит образующееся в реакции заряженное ядро) и цепочка описанных превращений повторяется до момента распада мюона.

Физический механизм протекания ядерных реакций в мезомолекулярных ионах связан с туннелированием ядер через разделяющий их кулоновский барьер. Энергия связи мезомолекулярного иона (в основном состоянии) составляет около 300 эВ и энергия мюона в ионе равна – 3.1 кэВ. Однако, когда ядра

при образовании водородоподобного мюонного атома сближаются до ядерных расстояний, мюон уже не различает их по отдельности, а «чувствует» лишь их суммарный заряд. При этом энергия мюона, как и в ионе гелия, составляет 11.3 кэВ. Кинетическая энергия ядер при их столкновении равна 8 кэВ, причем для различных ядер-изотопов. После протекания ядерной реакции мюон может быть подхвачен образующимся в реакции заряженным ядром – ядром гелия в реакциях (1а), (1б). Оказываясь при этом связанным в мезоатомный ион μHe , мюон уже перестает выступать в роли катализатора ядерного синтеза. Именно это обстоятельство существенно сказывается на эффективности μ -катализа, то есть на числе инициируемых мюоном ядерных реакций. Отравление катализатора существенно для реакций с образованием ^3He и неважно при ^4He . Малость вероятности прилипания мюона к α -частице в реакции (1а) делает ее наиболее перспективной, и последнее развитие μ -катализа связано с реакциями в смеси дейтерия и трития.

Один мюон может инициировать свыше 100 актов ядерной реакции $dt \rightarrow n^4\text{He}$ (1а). При этом общее высвобождение энергии составляет 2000 МэВ. Поскольку оно существенно превышает энергетические затраты на рождение (ускорение) одного мюона (100 МэВ), то на первый взгляд может показаться, что уже непосредственно одного мюонного катализа возможно решение проблем энергетики. Однако из-за сопутствующих затрат энергии такой способ ее получения оказывается нерентабельным (слишком низок КПД).

Низкое значение КПД «холодного синтеза» связано с тем, что мюон живет всего около двух микросекунд. За это время он должен успеть образовать мезоатом, затем мезомолекулу и, наконец, должна совершиться реакция синтеза. Если мюон распадется раньше, чем произойдут все эти события, то мезоатомы окажутся бесполезными. Успешные эксперименты, осуществленные еще в 1957 г., показали, что времени достаточно. Дело, однако, в том, что для производства мюонов надо затратить энергию. Нужно разогнать протоны в ускорителе, направить их на мишень. Там неизбежны большие потери, так как энергия будет уноситься осколками соударений. Среди осколков имеются пионы, которые, распадаясь, дадут желанные мюоны. При этом еще значительная часть энергии будет унесена нейтрино. Мюоны теряют энергию, замедляясь в смеси дейтерия и трития. Кроме того, имеет место отравление катализатора: иногда мюон не освобождается, а остается связанным в мезоатоме (захватывается на орбиту образовавшегося ядра гелия) и не может выступать в роли катализатора. Поэтому необходимо, чтобы число циклов было как можно больше. Напомним, что при слиянии ядер дейтерия и трития выделяется 17,6 МэВ энергии, поэтому при 100 реакциях, произведенных одним мюоном, можно получить 2-3 ГэВ. Это не окупает энергетические затраты (6 – 12 ГэВ). Чтобы мюонный катализ пошел в жизнь, нужно либо увеличить число реакций, в которых мезоатом участвует как катализатор (более 500), либо удешевить фабрику мезонов. Ожидается, что более эффективны не протонные, а дейтонные ускорители. При столкновении дейтонов с ядрами мишени π -мезоны, являющиеся источником отрицательно заряженных мюонов, рождаются более охотно. По-видимому, дейтоны должны быть ускорены до энергии порядка 1600 МэВ.

Историческая справка. Впервые на способность мезонов вызывать ядерные реакции указал английский ученый Ф. Франк в 1947 г. Мюон и π -мезон, наблюдавшиеся в космических лучах, принимали сначала за одну частицу. В 1947 г. в фотоэмульсиях были обнаружены необычные треки: из точки остановки первоначального мезона выходил другой трек, интерпретированный как рождение новой частицы в результате распада старой. Франку введение новой частицы для интерпретации необычных треков в фотоэмульсиях показалось слишком фундаментальным предположением, поэтому он искал другие интерпретации этим опытам. Один из вариантов, которые он рассмотрел, заключался в следующем. В точке остановки образовывается мезоатом. В силу своей нейтральности он может близко подойти к ядру дейтерия и образовать мезомолекулу, в которой произойдет указанная реакция синтеза протия с дейтерием. Освободившийся мюон унесет при этом почти всю выделившуюся энергию, что и объясняет появление нового трека. В 1948 г. А. Д. Сахаров, узнав о работе Франка, предложил пути практического применения использования мюонов. Андрей Дмитриевич уже тогда думал о мирном использовании ядерной энергии. Рассматривая вопрос о ядерных реакциях, вызываемых мюонами в жидком дейтерии или смеси дейтерия и трития, он обнаружил, что если образуются мезомолекулы $dd\mu$ и $d\mu$, то почти мгновенно легкие ядра вступят в реакцию синтеза. При этом мюон освободится, вновь образуя мезоатом и мезомолекулу и вызовет новую реакцию синтеза и т. д. Иными словами, мюон может стать катализатором ядерных реакций синтеза. А. Д. Сахаров показал, что скорость реакции синтеза после образования мезомолекулы очень велика. Столь же мгновенно происходит захват мюона в веществе, т. е. образование мезоатома. Поэтому скорость всего цикла в целом определяется в основном скоростью образования мезомолекул. Тогда эта работа была помещена в отчете Физического института АН СССР, но о ней практически никто не знал. В 1954 г. была опубликована работа Я. Б. Зельдовича, где он оценил вероятность образования мезомолекулы $\pi d\mu$ и нашел, что за время своей жизни π -мезон может образовать мезомолекулу лишь с вероятностью в несколько процентов. А в конце 1956 г. американский физик Л. Альварес (*Alvarez*) такое явление открыл. Произошло это случайно, он работал с водородной пузырьковой камерой, облучаемой пучком К-мезонов. Но туда влетали и мюоны, которые ему только мешали. Альварес заметил, что примерно 1/150 часть остающихся в камере мюонов дает следующую картину треков: из точки остановки мюона, или из точки некотором расстоянии от нее, начинается новый след мюона, длина которого (1,7 см) свидетельствует об энергии мюона 5,4 МэВ. Получалось, как будто мюон тормозился в камере, останавливался и затем вновь откуда-то раздобывал энергию 5,4 МэВ. Рассказывают, что правильное объяснение почти сразу же нашел Э.Теллер, – он предложил тот же механизм, на который когда-то указал Франк. Небольшое расстояние между точками остановки мюона и началом нового трека объясняется тем, что образовавшийся мезоатом нейтрален и не оставляет следов в камере. В 1968 г. Л. Альварес в своей Нобелевской лекции вспоминал об энтузиазме, охватившем всю группу исследователей при мысли, что им удалось навсегда решить все проблемы человечества с топливом. Дело в том, что их первоначальные оценки показывали, что до распада мюон успеет катализировать достаточно много реакций синтеза. Последующие расчеты и эксперименты показали, однако,

что мюон вызывает лишь несколько реакций синтеза, и первоначальный оптимизм несколько угас. Но перед этим, в период с 1957 по 1963 г., мюонным катализом занимались во всем мире. Эксперименты ставили в Англии, в США, в СССР. Результаты оказались неутешительными: скорости процессов не удовлетворяли условиям, при которых возможен эффективный мюонный катализ ядерных реакций. Так, в смеси водорода и дейтерия, где Альварес впервые наблюдал явление мюонного катализа, только один из десяти мюонов успевал осуществить один цикл реакций, и только однажды, при обогащении смеси дейтерия, удалось зафиксировать два последовательных цикла, вызванных одним мюоном. Столь же пессимистическими были прогнозы и относительно возможности протекания реакций в смесях других изотопов водорода. Вскоре увидели, что вероятность образования мезомолекул очень мала. Поскольку размер мезоатома $d\mu$ в 200 раз меньше размера атома водорода, он должен долго “гулять” по веществу, прежде чем натолкнется на протон. Но даже когда это произойдет, все пойдет не так просто. Надо еще кому-то отдать лишнюю энергию. Было выяснено, что наиболее вероятным механизмом образования мезомолекулы является передача ее энергии связи атомному электрону. Есть и еще одно препятствие. Существует определенная вероятность, что в результате ядерной реакции мюон не освободится, а останется на орбите образовавшегося ядра гелия. Следовательно, этот мюон теряется с точки зрения дальнейшего участия в процессе катализа. Дело в том, что мюонный ион гелия в отличие от мюонного водорода или дейтерия электрически заряжен, и это препятствует образованию из него мезомолекулы. Такое отравление катализатора (захват мюона гелием) существовало бы, даже если бы мюон был стабильным. Это явление наиболее сильно при использовании смеси водорода и дейтерия. Лучше обстоит дело с реакциями образования мезомолекулы $dd\mu$, так как в этом случае вероятность захвата на гелий-3 составляет около 12 – 13%. Но все равно здесь можно провести не более восьми реакций. С такой точки зрения наиболее выгодно образование мезомолекул в смеси дейтерия и трития. По оценкам, которые восходят еще к работе Я. Б. Зельдовича 1957 г., вероятность “прилипания” мюона к гелию в такой реакции равна примерно 0,01. Отсюда следует, что даже стабильный мюон смог бы провести не более 100 циклов катализа. Поэтому в 1958 г. были сделаны выводы, что катализ ядерных реакций мюонами не может быть использован для целей ядерной энергетики, но явление мюонного катализа представляет интерес для изучения ядерных реакций, проходящих в специфических условиях, а также для исследования некоторых процессов слабого взаимодействия. Тем не менее работы продолжались. Были измерены скорости образования мезомолекул в жидком дейтерии. Теоретики утверждали, что мезомолекула $dd\mu$ в жидком дейтерии должна образоваться за время порядка $2 \cdot 10^{-5}$ с, а эксперименты приводили к близкому значению $1,3 \cdot 10^{-5}$ с. Поскольку мюон живет в 10 раз меньшее время, так что никаких надежд на мюонный катализ действительно не оставалось.

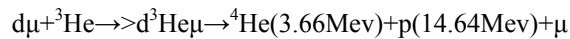
Некоторые успехи наметились в 1966 г., когда группа В. П. Желепова (Дубна) начала изучать процесс слабого взаимодействия отрицательных мюонов с протонами в результате которого образуется нейтрон и нейтрино. Ранее он изучался в жидком водороде, где реакция между протоном и мюоном может идти как из состояния мезоатома pm , так и из состояния мезомолекулы ppm , вероятность образования которой даже в несколько раз больше. Как следствие существенно осложнена интерпретация экспериментальных результатов. Поэтому Желепов проводил свои опыты с газообразным водородом при комнатной температуре. В этих условиях количество образующихся мезомолекул ppm мало. Его интересовали также скорости образования мезомолекул pdm и ppm , так как в водороде могли быть примеси дейтерия. В экспериментах было неожиданно обнаружено, что скорость образования мезомолекулы ddm намного выше: такая молекула образуется примерно за $1,3 \cdot 10^{-6}$ с. Поскольку температура была выше, чем в экспериментах на жидком водороде (240К вместо 20К), то данные можно было объяснить существованием резонансного механизма образования мезомолекул, сильно зависящего от температуры среды. Кроме того, в молекуле ddm должен существовать слабосвязанный уровень с энергией меньше 7 эВ. Ведь что происходит после образования мезоатома dm ? Будучи нейтральным и малым по размерам, он проникает внутрь обычной молекулы дейтерия D_2 . Приблизившись к одному из ядер молекулы D_2 , мезоатом образует с ней мезомолекулу ddm . На месте прежней молекулы D_2 возникает сложный комплекс, который можно обозначить как $[(ddm)(d)2e]$. Он состоит из ядра дейтона, мезомолекулы ddm , играющей роль второго ядра, и двух орбитальных электронов. Но при образовании мезомолекулы $dd\mu$ выделяется ее энергия связи, которая должна быть кому-то передана. В то время знали, что в мезомолекуле ddm есть четыре уровня энергии в интервале от 36 до 325 эВ. Столь большая энергия передается одному из орбитальных электронов, так что он вылетает наружу, и вместо сложного комплекса остается его ион $[(ddm)(d)e]^+$. Но это – нерезонансный механизм, не объясняющий температурной зависимости скорости образования ddm . Теперь предположим, что в мезомолекуле ddm имеется пятый уровень с энергией связи около 2 эВ. Что произойдет, когда ddm образуется именно в этом состоянии? Чтобы оторвать электрон, надо передать ему энергию порядка 15 эВ. Для диссоциации молекулы D_2 нужна энергия около 4,5 эВ. Так кому же будет передана энергия связи мезомолекулы ddm , равная 2 эВ? Остается еще одна возможность: передать эту энергию на возбуждение колебаний сложного комплекса. Разность энергий между последовательными колебательными состояниями этого комплекса составляет 0,3 эВ. Таким образом, 2 эВ почти достаточно для возбуждения седьмого колебательного уровня. Для проверки резонансного механизма образования молекул ddm необходимо было выполнить вычисления с огромной точностью. Расчеты Л. И. Пономарева дали 1,946 эВ. Уже это позволило надежно установить само существование слабосвязанного уровня мезомолекулы ddm . Таким образом, резонансный механизм действительно имеет место.

До сих пор говорилось об образовании мезомолекул в дейтерии. Но мы помним, что здесь сравнительно велика вероятность прилипания мюона к образовавшемуся ядру гелия, что ведет к “отравлению” катализатора. Поэтому мой следующий вопрос: Как идут аналогичные процессы в смеси дейтерия и трития, где вероятность прилипания на порядок меньше? В 1977 г. В. П. Желепов провел новые опыты в широком интервале температур и снял полную резонансную кривую зависимости скорости образования мезомолекул ddm от температуры. Затем принялись за систему dtm Группа Пономарева теоретически показала, что в мезомолекуле dtm тоже есть слабосвязанный уровень с энергией – 0,7 эВ, а это означало, что при столкновении мезоатомов tm с молекулами D_2 также должно происходить резонансное образование мезомолекулы, входящей в сложный комплекс $[(dtm)(d)2e]$. Из-за того, что в этом случае энергия связи мезомолекулы оказалась в 3 раза меньше, резонансный переход осуществляется не в седьмое, а лишь во второе возбужденное колебательное состояние комплекса. Это ведет к резкому возрастанию скорости образования мезомолекул dtm , которая, по расчетам, по крайней мере в 100 раз превышает скорость образования ddm . Получилось, что мезомолекула образуется примерно за 10^{-8} с, откуда следует, что за время жизни мюон успеет осуществить около 100 реакций синтеза. Когда экспериментаторы услышали от теоретиков о таких потрясающих цифрах, то стали быстро готовить опыты по изучению образования dtm . Установка заметно усложнилась. С тритием работать трудно: он радиоактивен, создает неприятные фоны и т. п. Пришлось создать новые электронные системы. В опытах, которые начались в 1979 г., и удалось измерить нижнюю границу скорости образования мезомолекул dtm . Оказалось, что они образуются за время, меньшее 10^{-8} с. Был определен еще один важный параметр: время “перескока” мюона с дейтона на тритий. Дело в том, что dt -синтез происходит при встрече мезоатома tm с дейтоном; при встрече же атома dm с тритием синтез не осуществляется. Если дейтерия в смеси больше, чем трития,

то атомы dm образуются чаще. Однако их энергия связи меньше, чем у атомов tm , так что энергетически выгоден “перескок” мюона с дейтона на тритий. При малой скорости процесс “перескока” затормозил бы весь цикл мюонного катализа. К счастью, это оказалось не так. Измеренное время “перескока” $0,3 \cdot 10^{-8}$ с невелико и также находится в хорошем согласии с теорией. Полученные результаты увеличили интерес к мюонному катализу. Примерно через три года были получены первые результаты. Группа В. Джеллепова в 1979 г. показала, что мезомолекула dtm может образоваться за время, составляющее 0,5% времени жизни мюона, и что при повышении температуры газовой смеси дейтерия и трития скорость образования будет повышаться. Однако при этом не было обнаружено никакой температурной зависимости в интервале 93 - 613К. Быстрое образование молекулы dtm согласовывалось с резонансной моделью, но куда подевалась температурная зависимость?

В 1982 г. в Лос-Аламосе начались работы группы С.Джоунса. Резервуары для смеси дейтерия и трития были способны выдержать давление до 3000 атм, температура смеси изменялась в широких пределах – от 13К до 800К. Для смеси, содержащей равные количества дейтерия и трития была обнаружена температурная зависимость и резонансная модель была окончательно подтверждена. Однако никакой зависимости от температуры не было, когда смесь содержала 10% трития и 90% дейтерия. Это находилось в согласии с результатами дубненских экспериментов, где трития было менее 8%. Понятно, почему так происходит. При небольшой концентрации трития мюон сначала скорее образует мезоатом с дейтоном и потом “перескочит” с него на ядро трития. Этот процесс совершается примерно за то время, что и образование мезомолекулы dtm , но почти не зависит от температуры. Температурная зависимость появляется при концентрациях трития более 30%. Джоунс измерил также вероятность прилипания мюона к гелию. Теоретики предсказывали, что полная вероятность исчезновения мюона равна 0,9%. Отсюда следовало, что мюон может осуществить не более 110 циклов реакций, даже если он будет стабильным. В эксперименте для времени образования мезомолекулы $dt\mu$ получили величину $0,6 \times 10^{-8}$ с. Если бы не было прилипания, то за время жизни мюон смог осуществить 350 реакций (а может, и больше), так как скорость реакции имеет тенденцию к росту с повышением давления. Неожиданно оказалось, что при увеличении плотности смеси дейтерия и трития вероятность прилипания уменьшается и достигает величины в 3 раза меньшей теоретического предсказания. Результаты показали, что мюон способен осуществить более 300 реакций синтеза. В 1982 г. наблюдали 20 реакций, в 1983 г. – 80, а в 1984 г. – уже 150 реакций. Каждый новый шаг приводил все к лучшему пониманию богатства, содержащегося в мюонной физике.

В начале восьмидесятых появились теоретические предсказания о возможности мюонного катализа d^3He синтеза через образование $d^3He\mu$ мезомолекулы:



Первая экспериментальная работа в этом направлении была выполнена в лаборатории Мюонного Катализа в Гатчине в 1992 г. Поиск синтеза был продолжен на мезонной фабрике Института Пауля Шеррера (Швейцария) в 1996 – 1997 гг. В настоящее время проводятся эксперименты с применением новых технологий, позволяющих обнаружить ${}^3He d$ -синтез.

В настоящее время мюонный катализ энергетически не выгоден, но существует интересная принципиальная возможность развития безопасной ядерной энергетики на основе мюонного катализа. Дело в том, что одним из продуктов ядерной реакции (1а) являются нейтроны с энергией 14 Мэв. Поток таких нейтронов при облучении им оболочки из урана-238 (уранового blankets), окружающей мюон-каталитический реактор, может служить как для получения энергии деления (Здесь прослеживается аналогия с идеей работы ядерного реактора в подкритическом режиме) $n + {}^{238}U \rightarrow \text{“осколки”} + 200 \text{ Мэв}$, так и для расширенного воспроизводства ядерного топлива – плутония на основе реакции $n + {}^{238}U \rightarrow {}^{239}Pu$ (так называемый ядерный бридинг). Энергетический выход при этом (на один мюон) более чем в 100 раз превышает энерговыделение в реакциях синтеза в мезомолекулярных ионах. На основе такого гибридного реактора уже возможно решение энергетических проблем.

Сейчас полагают, что мюонный катализ хорош не как производитель энергии, а как источник нейтронов. Поэтому мы предложили схему, в которой мезокаталитический реактор (МКР) окружается урановой оболочкой – blankets. Эта система, по существу, является наработчиком топлива для нескольких дешевых реакторов на тепловых нейтронах, которые и будут давать электроэнергию. Гибридная схема уже предлагалась для термоядерных реакторов, потому что такие реакторы сами по себе оказываются слишком дорогими. Когда стоимость дорогого устройства распределяется между дешевыми сателлитами, то схема становится коммерчески выгодной. Здесь гораздо эффективнее будет использоваться природное сырье, так что стоимость сырья в производстве энергии становится пренебрежимо малой величиной. Оценки показывают, что мюонный катализ может стать экономически выгодным, если при рабочих условиях (температурах порядка 200 – 300°C и давлении порядка 1000 атм) удастся добиться 150 циклов на один мюон, которые уже получены при гораздо более низких температурах и искусственно созданных благоприятных условиях. Некоторые теоретики увеличивают оптимизм, предсказывая возможность 400 циклов на мюон.

Хотя мезокаталитический реактор сам по себе не является надкритической системой и на нем принципиально не может быть ядерного взрыва, который хотя и маловероятен, но все-таки возможен в реакторах на тепловых нейтронах, проблема безопасности остается. Описанная blankets схема включает обычные реакторы, т.е. критические системы. При несоблюдении техники безопасности или неудачной конструкции могут произойти аварии, как и на любых реакторах деления. Сейчас идет создание внутренне безопасных ядерных реакторов. В принципе можно создать такие реакторы, которые при повышении мощности будут глушить сами себя. В таких реакторах не может произойти ядерного взрыва и самопроизвольного развития реакции. Возможно удастся производить расщепляющиеся материалы в гибридных термоядерных или мезокаталитических реакторах.

8. Применение в химии твердого тела.

Метод аннигиляции позитронов используется для изучения свойств дефектов в металлах, в которых позитроны оказываются захваченными в вакансиях и других дефектах там, где средняя плотность значительно ниже, чем в остальном материале. Обычно захват имеет место, когда относительная концентрация дефектов выше 10^{-7} . Аннигиляционные характеристики захваченных позитронов отличаются от таковых для позитронов в объеме. Например, время жизни захваченных позитронов больше. Так возможно получение информации о присутствующих дефектах.

Во многих молекулярных веществах некоторые внедренные позитроны образуют позитроний перед тем, как аннигилировать. Позитроний - связанная электрон-позитрон пара - может существовать в двух различных состояниях: короткоживущем (пара) и долгоживущем (орто). Во льду примерно 72% позитронов образует позитроний. Как и позитроны, позитроний может быть захвачен в дефектах типа вакансий и, следовательно, может быть полезным инструментом для изучения этого вида дефектов в молекулярных кристаллах.

8.1 Дефектоскопия облученного льда

Метод аннигиляции позитронов использовали для изучения эффектов, возникающих при облучении льда (поли и монокристаллические образцы) гамма-квантами при -196°C и в процессе последующего нагрева. Спектрометр времен жизни представлял собой систему быстро-медленных совпадений. Измерения доплеровского уширения проводили системой германий (литиевых) детекторов, включающей стабилизацию 511 кэВ аннигиляционного пика. Источником была поваренная соль, меченная ^{22}Na активностью 20 мккюри. Облучение вели на источнике ^{60}Co при мощности дозы 1.5 Мрад/час до доз 11 Мрад.

Основными эффектами облучения являются: 1. Появление при низких температурах в позитронных спектрах времен жизни компонент (1.2 и 2.3 нсек) приписываемых орто-позитронию, захваченному в созданных радиацией моно- и дивакансиях, соответственно. 2. Сильное уменьшение интенсивности короткоживущей компоненты в спектре, связанной с парапозитронием. 3. Увеличение ширины доплеровского спектра уширения. В чистом льду при низких температурах время жизни орто-позитрония составляет 0.65 нсек. Такие большие времена жизни означают, что некоторые атомы орто-позитрония становятся захваченными в областях с меньшей, чем средней электронной плотностью, например, в дефектах вакансионного типа. В чистом льду среднее время жизни орто-позитрония увеличивается с температурой до 1 нсек при температуре плавления. В термически созданных дефектах время жизни 1.2 нсек. Захват осуществляется в дефектах вакансионного типа при концентрациях 10 ппм. При 175°C вакансии становятся подвижными и при высоких температурах приводят к образованию пустот диаметром 15А. Энергия образования и миграции вакансий 0.28 и 0.34 эВ, соответственно. Два последних эффекта приписаны торможению и конверсии позитрония ОН-радикалами, созданными облучением. Нагрев выше -165°C приводит к исчезновению обоих эффектов.

8.2 Диагностика полимеров

Временное распределение аннигиляционного излучения позитронов было успешно использовано для дефектоскопии ряда полимеров, в т. ч. полимерных мембранных материалах, на воздухе и в атмосфере азота. Обычно используется долгоживущая компонента распределения, т. е. аннигиляция орто-позитрония. Обнаружено, что окислительная атмосфера (кислород) существенно влияет на аннигиляционные характеристики позитрония. Существующие представления о механизмах образования, локализации и аннигиляции позитрония в полимерах позволяют сделать заключение о неравномерности распределения свободных объемов разного размера в полимерной матрице. Из экспериментальных данных удается оценить концентрации и размеры элементарных свободных объемов, а также размеры микронеоднородностей, содержащих эти объемы