

УДК 539.1.07

ЧЕРЕНКОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАСТВОРОВ ТЯЖЕЛЫХ СОЛЕЙ

Г. И. Мерзон, А. С. Русецкий

Анализируются возможности использования водных растворов некоторых солей в качестве радиаторов в черенковских спектрометрах полного поглощения. В эксперименте с ячейкой черенковского спектрометра на основе раствора CsCl получено энергетическое разрешение $\delta_E = 46\%$ при энергии электронов $E = 500$ МэВ.

В последние годы проводятся интенсивные поиски новых материалов для радиаторов черенковских спектрометров полного поглощения (ЧСПП). Наряду с наиболее часто используемым свинцовым стеклом, в качестве радиатора ЧСПП применяют также монокристаллы, содержащие тяжелые элементы, например, кристаллы $TlCl$, $PbCl_2$, $TlCl + TlBr$ (КРС-6) и др. [1]. Однако при всех достоинствах монокристаллических радиаторов (высокие плотность и коэффициент преломления света, малая радиационная длина), их стоимость довольно высока, что значительно удорожает создание ЧСПП большого размера. Кроме того одним из важных требований, предъявляемых к радиаторам для ЧСПП, является их радиационная стойкость, так как в условиях современных экспериментов спектрометры подвергаются сильному облучению, приводящему со временем к изменению оптических свойств радиатора.

Один из способов создания дешевых радиационно стойких радиаторов для ЧСПП состоит в использовании растворов солей, содержащих тяжелые элементы. В качестве таких радиаторов исследовались растворы солей таллия [2, 3] и йодистого цинка [4]. Было показано, что хорошо очищенные растворы этих солей имеют большую прозрачность, чем свинцовое стекло [2, 3], а их радиационная длина составляет 2 – 6 см, что делает их конкурентоспособными при выборе радиаторов для ЧСПП. Энергетическое

разрешение спектрометра с радиатором на основе водного раствора $Tl(HCO_2)$ оказалось равным 24% для электронов с энергией 500 МэВ [3]. При этом радиационная стойкость раствора $Tl(HCO_2)$ на 2 порядка выше, чем у свинцового стекла [5], однако высокая токсичность и светочувствительность солей таллия серьезно ограничивает их применение.

Мы провели поиск нетоксичных солей, водные растворы которых имеют небольшую радиационную длину и поэтому являются потенциальными кандидатами для применения в качестве радиаторов ЧСПП. Поиск производился по данным, приведенным в [6], где указаны растворимости солей в воде при различных температурах.

Радиационная длина t ($г/см^2$) определяется через суммарное радиационное сечение σ_m молекул, содержащихся в 1 $см^3$ вещества [7]:

$$t^{-1} = (\rho x_0)^{-1} = (N_A/A)\sigma_m, \quad (1)$$

где $N_A = 6,025 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, A – молекулярный вес, ρ ($г/см^3$) – плотность, x_0 ($см$) – радиационная длина вещества, а

$$\sigma_m = z(z + \xi) \cdot 5,8 \cdot 10^{-28} \cdot (4\ln(183z^{-1/3}) + 2/9),$$

где $\xi \simeq 1$.

Радиационное сечение сложного вещества ($\xi = 1$) определяется формулой [7]:

$$\sigma_m = 5,8 \cdot 10^{-28} \sum_{i=1}^p k_i z_i (z_i + 1) (4\ln(183z_i^{-1/3}) + 2/9), \quad (2)$$

где p – число элементов в молекуле; k_i – число атомов, а z_i – атомный номер i -го элемента.

Радиационная длина смеси веществ, содержащей s компонентов, равна [8]

$$t^{-1} = \sum_{j=1}^s w_j/t_j = (\sum_{j=1}^s m_j/t_j) / \sum_{j=1}^s m_j, \quad (3)$$

где t_j ($г/см^2$) – радиационная длина для j -ой компоненты смеси, а w_j – весовой множитель (относительная масса компонента)

$$w_j = m_j / \sum_{j=1}^s m_j \quad (\text{так что} \quad \sum_{j=1}^s w_j = 1). \quad (4)$$

Подставляя (1) в (3), получим:

$$x_0^{-1} = (1/\rho) \left(\sum_{j=1}^s m_j / (\rho_j x_{0j}) \right) / \sum_{j=1}^s m_j. \quad (5)$$

Поскольку, как показали измерения, объем смеси (с точностью лучше 1%) равен сумме объемов компонент $V = \sum_{j=1}^s V_j$, то ее плотность

$$\rho = \sum_{j=1}^s m_j / V = \sum_{j=1}^s m_j / \sum_{j=1}^s V_j = \sum_{j=1}^s m_j / \sum_{j=1}^s (m_j / \rho_j). \quad (6)$$

Таким образом, подставляя (6) в (5), получим:

$$x_0^{-1} = \sum_{j=1}^s (m_j / \rho_j x_{0j}) / \sum_{j=1}^s (m_j / \rho_j). \quad (7)$$

Водный раствор соли можно рассматривать как двухкомпонентную ($s = 2$) однородную смесь воды и соли. Поскольку справочные данные [6] соответствуют раствору m_c граммов соли плотностью ρ_c с радиационной длиной x_{0c} в 100 г воды, то, воспользовавшись (7), получим

$$x_0^{-1} = (100/x_{0H_2O} + (m_c/\rho_c)/x_{0c}) / (100 + m_c/\rho_c), \quad (8)$$

где значения x_{0H_2O} и x_{0c} определяются согласно (1) и (2).

Из всего многообразия солей выбирались вещества, удовлетворяющие следующим признакам: 1) хорошая растворимость в воде; 2) большой эффективный атомный номер; 3) высокая прозрачность раствора; 4) небольшая радиационная длина ($x_0 < 10$ см); 5) нетоксичность. Данные для растворов некоторых солей приведены в таблице 1.

По всем этим признакам для дальнейших исследований был отобран хлористый цезий ($CsCl$). Его насыщенный раствор при $20^\circ C$ имеет радиационную длину $x_0 = 6,3$ см, плотность $\rho = 1,95$ г/см³, показатель преломления $n = 1,49$, а также хорошую прозрачность для черенковского излучения. Зависимости радиационной длины x_0 и плотности ρ_0 раствора $CsCl$ от его растворимости в воде приведены на рис. 1.

Раствор хлористого цезия прост в приготовлении: $CsCl$ растворяется в дистиллированной воде, затем раствор фильтруется и отстаивается при комнатной температуре. При долгом хранении раствор не мутнеет, не дает осадка и полностью сохраняет свою прозрачность, что является важным преимуществом перед растворами йодистого цинка [4] и солей таллия [3].

Т а б л и ц а 1

Характеристики некоторых растворов, пригодных для радиаторов черенковского излучения

Формула в-ва	Плотность чистого в-ва, $г/см^3$	Мол. вес A , $г/моль$	Раствори- мость ($г$ в $100 гH_2O$)	Цвет р-ра	Плотность р-ра, $г/см^3$	Рад. длина р-ра	
						$t, г/см^2$	$x_0, см$
$CsCl$	3,97	168,36	185,7 ($20^{\circ}C$)	бесцв.	1,95	12,3	6,3
			270,5 ($100^{\circ}C$)		2,2	11,3	5,15
$ZnCl_2$	2,91	136,29	432 ($25^{\circ}C$)	бесцв.	2,15	17,5	8,0
			615 ($100^{\circ}C$)		2,3	16,5	7,2
$CdCl_2 \times$ $\times 2,5H_2O$	3,327	228,36	168 ($20^{\circ}C$)	бесцв.	1,79	17,5	9,8
			180 ($100^{\circ}C$)		1,82	13,3	7,3
$ZnBr_2$	4,2	225,19	447 ($20^{\circ}C$)	бесцв.	2,65	13,2	5,0
			675 ($100^{\circ}C$)		2,97	12,8	4,3
ZnI_2	4,74	319,18	432 ($18^{\circ}C$)	бесцв. свето- чувст.	2,80	10,6	3,8
			511 ($100^{\circ}C$)		2,94	10,3	3,5

Для проверки свойств радиатора черенковского спектрометра на основе раствора $CsCl$ был создан макет спектрометрической ячейки, который представляет собой стеклянную трубу с внутренним диаметром 8,5 см, заполненную жидким радиатором. Ячейка просматривается с заднего торца одним ФЭУ-110.

Использованный нами в качестве радиатора раствор $CsCl$ имел плотность $\rho = 1,858 г/см^3$, радиационную длину $x_0 = 7,2 см$, показатель преломления $n = 1,48$. Длина поглощения света на длине волны 654 нм оказалась равной $\Lambda = (1,7 + 0,2) м$.

Были проведены измерения на пучке электронов синхротрона С-60 ФИАН в диапазоне энергий 200 – 500 МэВ с ячейками длиной $5,5x_0$ и $8x_0$. Для увеличения световыхода использовалось отражающее покрытие из алюминизированного лавсана.

Энергетическое разрешение для электронов с энергией 500 МэВ составило (рис. 2) $\delta_E = 56\%$ для ячейки длиной $5,5x_0$ и $\delta_E = 57\%$ для ячейки длиной $8x_0$. Для проверки влияния отражения света стенками на энергетическое разрешение были проведены измерения с ячейкой без отражающего покрытия. Энергетическое разрешение в этом случае улучшилось и оказалось равным $\delta_E = 46\%$ для электронов с энергией 500 МэВ. Такой результат говорит о том, что использование отражателей в такой ячейке нецелесообразно, так как при некотором увеличении световыхода оно приводит к росту

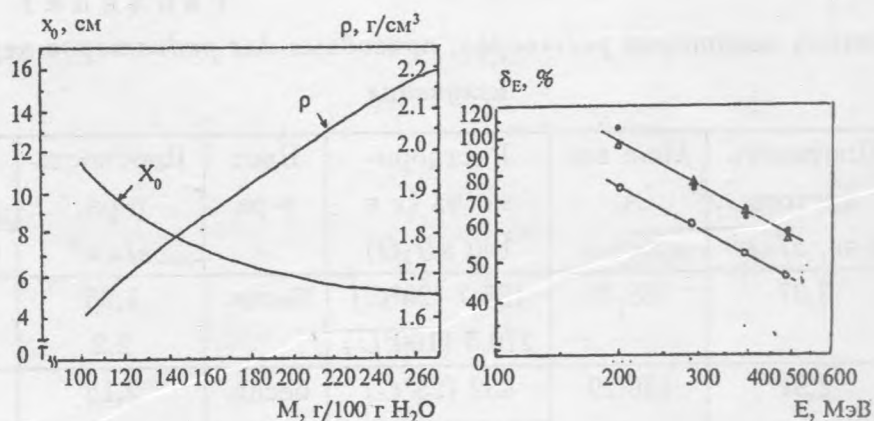


Рис. 1. Зависимость радиационной длины x_0 и плотности ρ раствора от концентрации M $CsCl$ в воде.

Рис. 2. Энергетическое разрешение δ_E черенковского спектрометра с радиатором на основе раствора $CsCl$ ($\rho = 1,858$ г/см³) в зависимости от энергии электронов E (l — длина радиатора). Δ — $l = 5,5x_0$ (с отражателем); \bullet — $l = 8x_0$ (с отражателем); \circ — $l = 8x_0$ (без отражателя).

многократных отражений, ухудшающих энергетическое разрешение. Зависимость энергетического разрешения от энергии электронов E во всех случаях, описанных выше, подчиняется закону $\delta_E \sim E^{-1/2}$.

Эффективность спектрометра при регистрации электронов с энергией 500 МэВ равнялась 95 — 97%. Во всех измерениях наблюдалась линейная зависимость амплитуды сигнала на выходе спектрометра от энергии электронов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белоусов А. С., Ваздик Я. А., Малиновский Е. И. и др., Препринт ФИАН N 100, М., 1973.
- [2] Варфоломеев А. А., Глебов В. И., Денисов Э. И., Хлебников А. С., ПТЭ N 2, 57 (1975).

- [3] Kusumegi A., Kondo K., Watase Y. et al., Nucl. Instr. and Meth., **185**, 83 (1981).
- [4] Kusumegi A., Kondo K., Nucl. Instr. and Meth., **177**, 605 (1980).
- [5] Fabijan C. W., Calorimetry in High Energy Physics, CERN-EP/85-54, 1985.
- [6] Handbook of Chemistry and Physics, 37-th Edition, 1955-56, **1**, 466.
- [7] Бете Г., Ашкпи Ю., Экспериментальная ядерная физика, ред. Сегре Э., **1**, с. 141, М., Иностранная литература, 1955.
- [8] Хаякава С., Физика космических лучей, ч. 1, с. 149, М., Мир, 1973.

Поступила в редакцию 12 января 1995 г.