

---

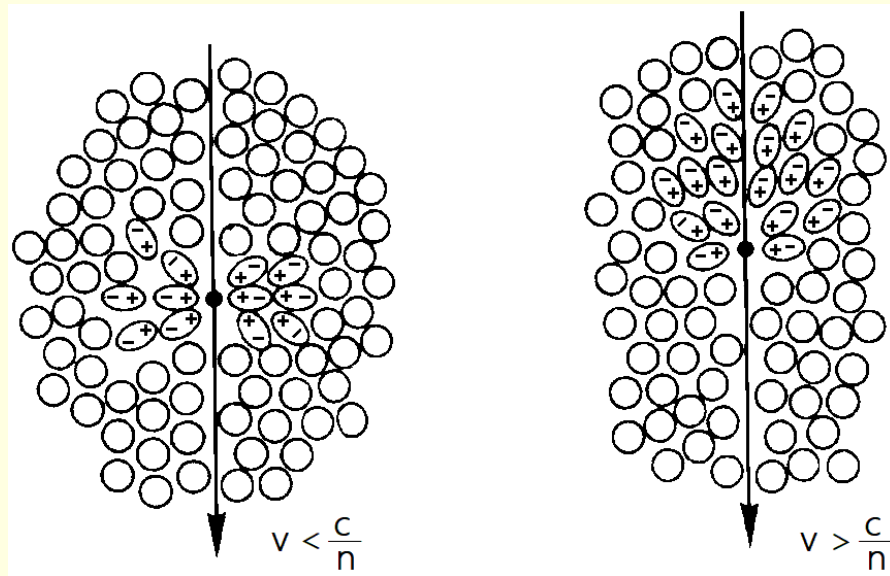
# ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВА

В.А. Басков, В.В. Полянский

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Отдел ядерных исследований ТОП, Троицк*

# Суть эффекта ЧИ

ЧИ определяется когерентным излучением диполей, возникающих в результате поляризации атомов или молекул среды под влиянием движущейся в ней заряженной частицы. Под действием электрического поля пролетающей заряженной частицы электронное облако атома смещается относительно ядра. Атом поляризуется. При удалении частицы из данной области атом возвращается в нормальное состояние. Переход атома в нормальное состояние и сопровождается излучением.



Эффект Вавилова - Черенкова.

# Мотивация исследований

---

*ЧИ* является результатом снятия поляризации атома. Количество электронов на электронных оболочках атома зависит от положения атома в периодической системе, то

Можно предположить, что интенсивность и характер излучения, определяемый спектром излучения, должны быть связаны со степенью поляризации электронного облака атома внешней или внутренней оболочек атома. В этом случае **характер *ЧИ*** для каждого вещества должен быть **оригинальный и соответствовать только данному веществу**.

По характеру *ЧИ*, определяемого зарядовым числом ***Z*** можно будет определять тип вещества или состав смеси веществ.

# Формула влияния среды на ЧИ

Влияние среды, определяющие свойства ЧИ, входит в показатель преломления  $n(\omega)$  для излучающей частоты волны  $\omega$ . Полные потери энергии частицы на черенковское излучение на единицу пути определяются выражением

$$\frac{dW}{dx} = \frac{e^2}{c^2} \int_{(nv/c > 1)} \left[ 1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right] \omega d\omega,$$

где  $c$  – скорость света;  $e$  – заряд;  $n(\omega)$  – показатель преломления на частоте излучающей волны  $\omega$ ;  $v$  – фазовая скорость волны в среде ( $v > c/n(\omega)$ ). В формулу потерь напрямую  $Z$  не входит.

Для получения ответа на вопрос о зависимости черенковского излучения от зарядового числа  $Z$  была выполнена данная работа.

# Экспериментальная установка

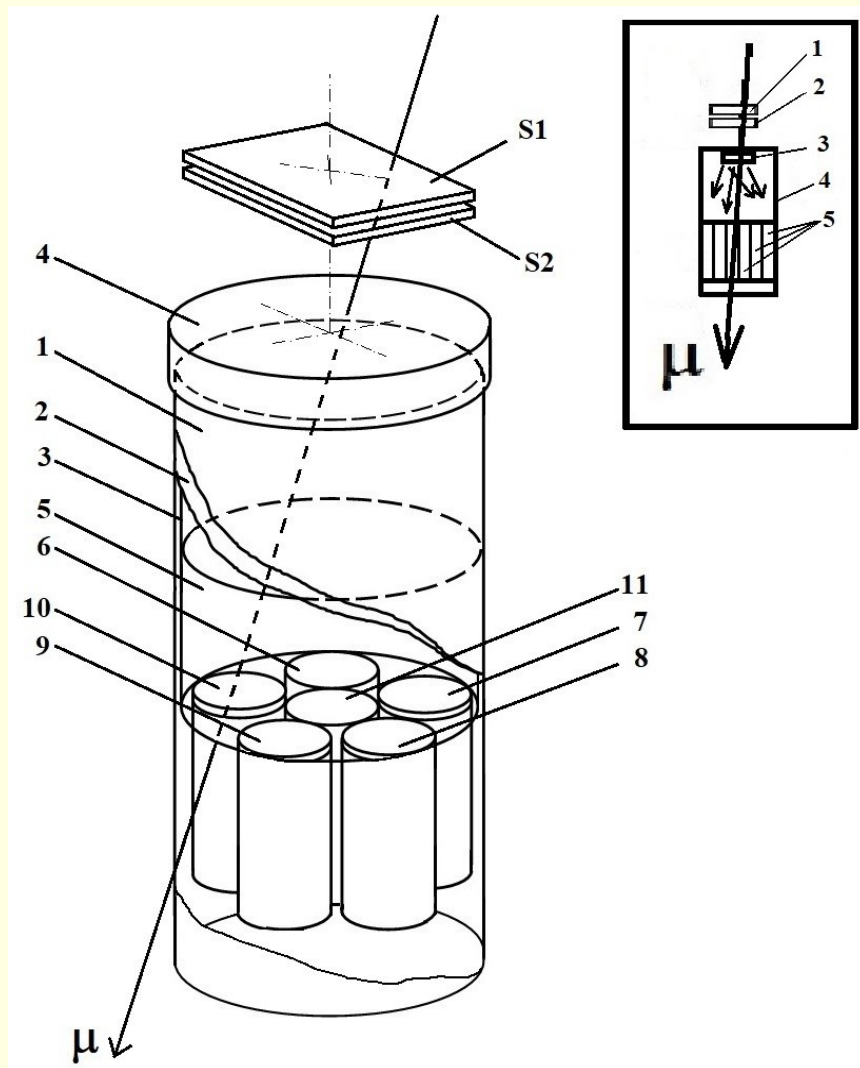


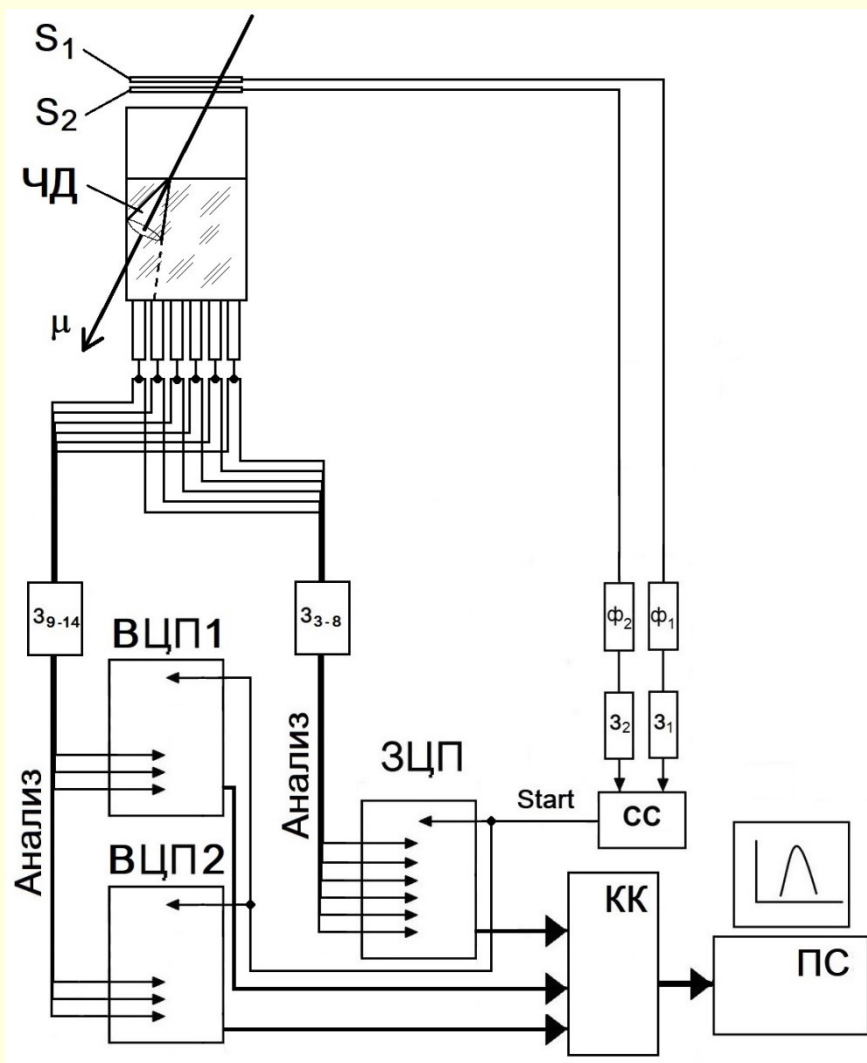
Схема экспериментальной установки:

- $S_1$  и  $S_2$  – триггерные сцинтилляционные счетчики;
- 1 – светонепроницаемый корпус детектора;
- 2 – черная бумага;
- 3 – прозрачная ёмкость;
- 4 – светонепроницаемая крышка, закрывающая корпус;
- 5 – жидкий радиатор;
- 6 –  $C_1$  – ФЭУ-85 (светофильтр отсутствует);
- 7 –  $C_2$  – ФЭУ-85 (светофильтр красный, 600 нм);
- 8 –  $C_3$  – ФЭУ-85 (светофильтр желтый, 550 нм);
- 9 –  $C_3$  – ФЭУ-85 (светофильтр зеленый, 510 нм);
- 10 –  $C_4$  – ФЭУ-85 (светофильтр синий, 440 нм);
- 11 –  $C_6$  – ФЭУ-85 (светофильтр отсутствует).

# Экспериментальная установка



# Блок-схема экспериментальной установки



Блок-схема экспериментальной установки:

$S_1$  и  $S_2$  – триггерные сцинтилляционные счетчики;  
 $ЧД$  – черенковский детектор;  
 $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – формирователи со следящим порогом (ФСР);  
 $Z_1 - Z_{14}$  – блоки задержек;  $СС$  – схема совпадений;  
 $ЗЦП$  – 8-входовой зарядо-чувствительный цифровой преобразователь;  
 $ВЦП1$  и  $ВЦП2$  – время-цифровые преобразователи;  
 $Start$  – триггерный сигнал;  
 $Анализ$  – амплитудные сигналы с каналов  $ЧД$ ;  
 $КК$  – крейт-контроллер системы САМАС;  
 $ПС$  – персональный компьютер.

# Калибровка черенковского детектора

В работе применялись радиаторы, данные об использовании которых в исследованиях *ЧИ* в литературе не отмечены, исключая спиртовой и водный радиаторы. В первую очередь неизвестно число черенковских фотонов на единицу пути, высвечиваемые космическими мюонами и позитронами пучка ускорителя. Поэтому была выполнена **специальная калибровка**.

Целью калибровки ЧД являлось **сопоставление энергии**, оставленной заряженными частицами при прохождении через сцинтиллятор, или светоотдачи сцинтиллятора **величине амплитуды сигнала** каждого из 6 ФЭУ ЧД, зарегистрировавшего это сцинтилляционное излучение.

Калибровка необходима для сравнения светоотдачи *ЧИ* различных жидкостных радиаторов (радиаторов с разными значениями  $Z$ ) друг с другом, соотнося их к величине светоотдачи от калибровочного сцинтиллятора. В этом случае единицей измерения является единица измерения энергии [МэВ].

Калибровка выполнялась на космических мюонах. Толщина сцинтиллятора 1 см, при прохождении через него мюона, которая является минимально ионизирующей частицей, выделяется в среднем  $\langle E \rangle = k \cdot l = 2$  [МэВ/см] · 1 [см] = 2 [МэВ], где  $k = \Delta E / \Delta x$  ( $\Delta E / \Delta x$  – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в детекторе;  $l$  – толщина сцинтилляционного детектора).

## Тип сцинтиллятора - NE110 (Дубна)

Размер -  $5 \times 5 \times 1$  см<sup>3</sup>;

Время набора - ~24 часа;

Число триггеров ( $T = S_1 \times S_2$ ) -  $\sim 10^5$  совпадений;

Число триггеров при обработке ( $T = (S_1 \times S_2) \times C_1$ ) -  $\sim 10^4$  совпадений.

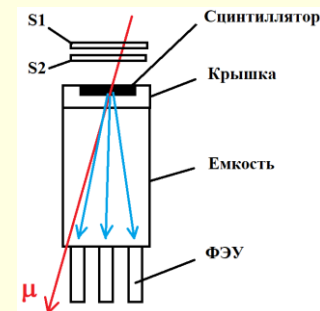


Схема калибровки ЧД



# Замечание

Сигнал  $ЧИ$ , регистрируемый ФЭУ, является суммарной энергией некоторого числа черенковских фотонов, выветившихся в радиаторе при прохождении через него заряженной частицы.

Если  $i$  релятивистская частица регистрируется черенковским детектором, то независимо от химического состава вещества радиатора, выражение для зарегистрированной энергии можно определить как

$$E_i = \varepsilon_i \cdot n_i,$$

$E_i$  – энергия, зарегистрированная детектором,  $\varepsilon_i$  является энергией единичного фотона;

$n_i$  определяет число фотонов в данном взаимодействии заряженной частицы с радиатором.

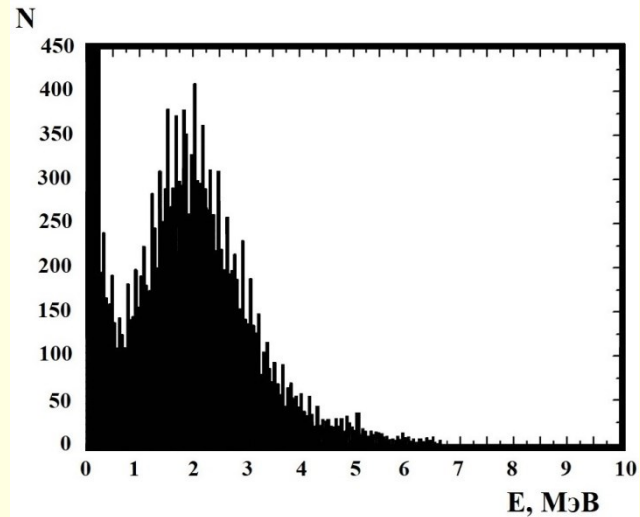
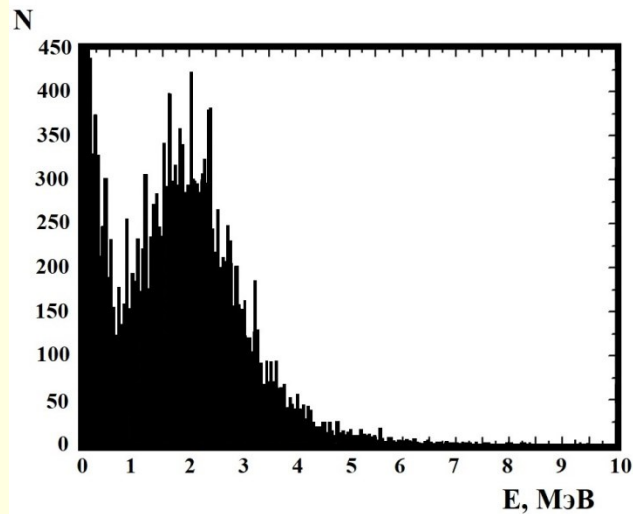
Поэтому, формально от единицы измерения энергии  $E_i$   $ЧИ$  в [МэВ] можно перейти к единице измерения в числе черенковских фотонов  $n_i$  в единице измерения [отн. ед.], поскольку  $E_i \sim n_i$ . Численно значение 1 МэВ = 1 отн. ед.

## Замечание:

При исследовании световыхода  $ЧИ$  в качестве *опорных* радиаторов выбраны жидкости, которые не люминесцируют, для того, чтобы исключить передачу энергии от радиатора к находящемуся в них веществу.

В качестве *опорных* радиаторов использовались азотная, серная, соляная, уксусная кислоты разной степени концентрации, дистиллированная вода и этиловый спирт.

# Результаты калибровки ЧД



Калибровочные спектры космических мюонов, полученные с помощью ФЭУ  $C_1$  (а), расположенного на кольце, и с ФЭУ  $C_6$  (б), расположенного по центру регистрационной сборки (светофильтры отсутствуют).

# Процедура измерений

Для определения характеристик *ЧИ* жидкостных радиаторов использовался *разностный метод*.

Измерения проходили в два этапа.

## Первый этап.

1. Из ёмкости убирался калибровочный сцинтиллятор и на фотокатоды ФЭУ с номерами от 2 до 5 (с  $C_2$  по  $C_5$ ) помещались светофильтры.
2. В прозрачную ёмкость заливался жидкий радиатор (например, спирт), который назывался *опорным*.
3. Определяется вес или объём *опорного* радиатора и высота столба жидкости радиатора относительно дна ёмкости (перед исследованиями заранее определялся вес ёмкости).
4. Проводился набор экспериментальной статистики с использованием космических мюонов.

Спектр *ЧИ*, полученный для каждого из ФЭУ на *первом этапе* измерений, назывался  $C_{m \text{ опорный}}$ , где  $m$  – номер ФЭУ.

## Второй этап:

1. В *опорный* радиатор добавлялось исследуемое вещество известного количества (в граммах, миллилитрах, гранулах и т. д.), например, в спирт добавлялась спиртовая настойка йода.
2. Проводился набор экспериментальной статистики с использованием космических мюонов.

Спектр *ЧИ* с добавкой вещества, полученный для каждого из ФЭУ на втором этапе измерений назывался  $C_{m \text{ опорный+вещество}}$ , где  $m$  – номер ФЭУ.

# Процедура измерений

## Третий этап:

Спектр *ЧИ* исследуемого вещества для каждого ФЭУ определяется как разность спектров, полученных во втором и первом этапах измерений. Формально эта разность определялась как

$$C_{m \text{ вещество}} = C_{m \text{ опорный+вещество}} - C_{m \text{ опорный}} \quad (C_{m \text{ в}} = C_{m \text{ о+в}} - C_{m \text{ о}}).$$

## Замечания:

1. При вычитании спектров происходит переход от числа событий к относительным единицам, при которых общее число событий в каждом из спектров нормируется на полное число событий в соответствующем спектре и в этом случае число событий равно 1, а число событий в каналах уменьшаемого, вычитаемого и результирующего спектров будет меньше 1.

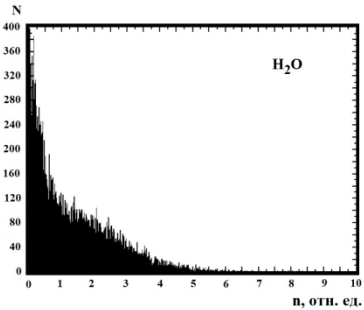
Это положение необходимо подчеркнуть, поскольку оно даёт возможность сравнивать выход *ЧИ* для разных веществ.

2. Разностный метод исключает из конечного результата влияние емкости, различных примесей в *опорном* радиаторе и другие факторы, связанные с системой “емкость – *опорный радиатор*”.

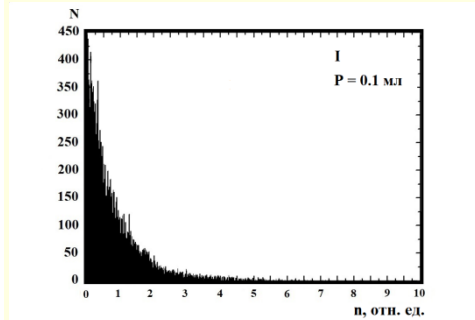
3. Становится не важным в каких единицах представлено количество вещества, добавленного в *опорный* радиатор – в весовых (г), объёмных (мл), количествах гранул или иных других.

# Результаты

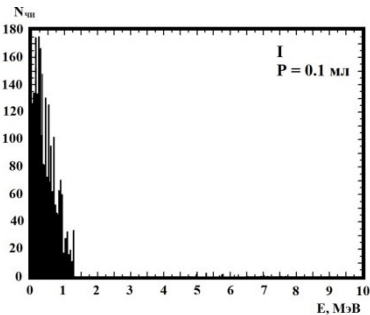
В работе представлены результаты исследований спектров, полученных с ФЭУ С<sub>1</sub>, который находился на кольце без светофильтра перед фотокатодом.



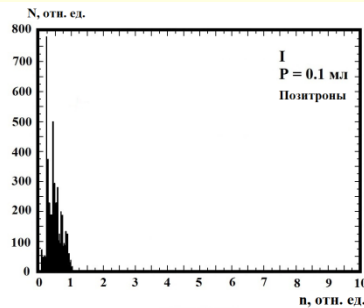
а.



б.



в.



г.

Спектры черенковского излучения космических мюонов (а, б, в) и позитронов с энергией 194 МэВ (г): спектр *опорного* радиатора (спирт, 96%) (а); спектр *опорного* радиатора + вещество (5% спиртовая настойка йода объёмом P = 0.1 мл) (б); разность спектров ((спирт + настойка йода) - (спирт) = (йод)) (в, г).

# Относительный световыход ЧИ исследуемого вещества Y

Относительный световыход ЧИ исследуемого вещества  $Y_{\text{ЧИ}} = Y$  в данной работе был определен как сумма произведений числа событий в  $i$ -м канале спектра (рис. 5в и 5г) умноженного на число черенковских фотонов в этом канале:

$$Y = \sum_{i=1}^k (N_{(o+b)i} / N_{o+b} - N_{oi} / N_o) \cdot n_i, \quad (1)$$

$N_{(o+b)i}$  и  $N_{oi}$  - число событий в  $i$ -х каналах спектров “опорный радиатор + вещество” и “опорный радиатор”, соответственно;

$N_{o+b}$  и  $N_o$  – полное число событий спектрах “опорный радиатор + вещество” и “опорный радиатор”, соответственно;  
 $n_i$  – число черенковских фотонов в  $i$ -м канале спектра;

$k = 10$  отн. ед. - максимальный канал шкалы абсцисс, которая определяет число черенковских фотонов или энергосодержание ЧИ в радиаторе ( $k = 10$  МэВ), в калибровочных спектрах и спектрах световыхода ЧИ.

При обработке экспериментальных результатов минимальная ширина канала или бина в спектрах составляла 0.05 отн. ед. или 0.05 МэВ в энергетической шкале.

# Ошибки измерений

Величина относительной ошибки  $Y$  ( $\delta_Y$ ):

$$\delta_Y^2 = \delta_{en}^2 + \delta_{st}^2$$

$\delta_{en}$  - ошибка энергетической калибровкой;

$\delta_{st}$  - статистическая ошибка, связанная с величиной набора экспериментальной статистики.

$\delta_{en}$  составляет от 30 до 40% и определяется большим разбросом энерговыделения мюонов в сцинтилляторе.

Разброс энерговыделения, в свою очередь, обусловлен большим разбросом углов входа мюонов в сцинтиллятор и неэффективностью светособирания сцинтилляционного света ФЭУ.

$\delta_{st}$  составляет от 60 до 100% и определяется величиной набора статистики.

Величина рабочей статистики на космических мюонах, составляла для каждой величины концентрации  $\sim 10^4$  событий/сутки.

Величина рабочей статистики при использовании пучка позитронов с энергией 194 МэВ достигала  $\sim 10^5$  на точку концентрации.

Для получения аналогичных величин  $\delta_Y$ , при использовании космических мюонов, время набора одной точки должно составлять не менее 7 суток, что значительно увеличивало бы общее время измерений. Было решено пожертвовать ухудшением точности измерения  $Y$  ради сокращения общего времени выполнения работы.

## ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВОХОДА ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА

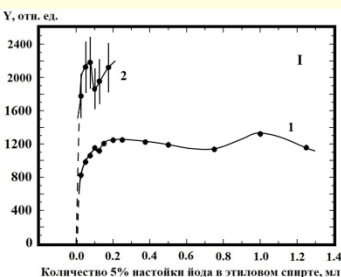
В работе обнаружено, что для всех исследуемых веществ независимо от сложности химической формулы (Be, Cl, Cu, Zn, Cd, Pb,  $C_{12}H_{22}O_{11}$  (сахар), NaCl (поваренная соль),  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  (медный купорос), KCNS (калий роданистый),  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  (никель двухлористый)) **характер изменения величины световыхода *ЧИ* от концентрации практически одинаков.**

На рисунке представлены зависимости световыходов черенковского излучения для нескольких простых и сложных веществ (а - йода (I), б - роданистого калия (KCNS), в - едкого натра (NaOH) и едкого кали (KOH), г - сахара ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), д - поваренной соли (NaCl), е - цинка (Zn)).

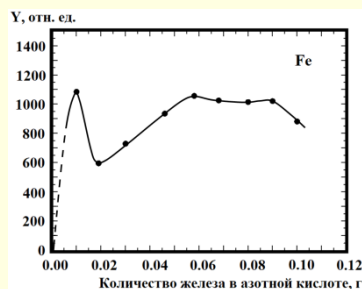
На всех рисунках видно, что при увеличении концентрации вещества имеет место рост световыхода *ЧИ*, достижение максимальной величины и далее уменьшение величины световыхода. Однако, для всех исследуемых веществ при дальнейшем увеличении концентрации наблюдается новый рост световыхода *ЧИ*.



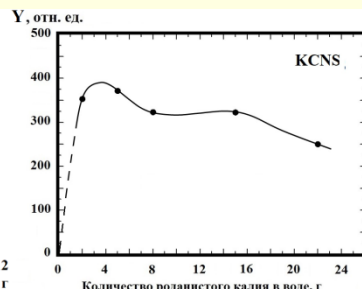
# ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВОЫХОДА ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА



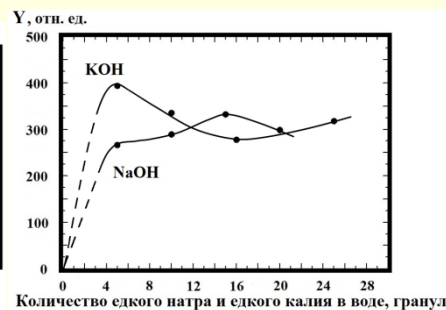
а.



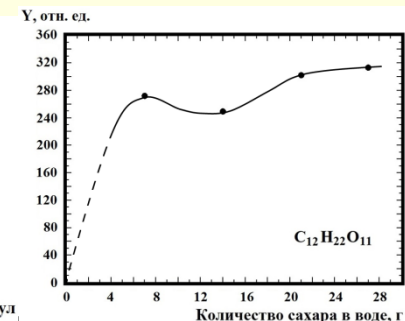
б.



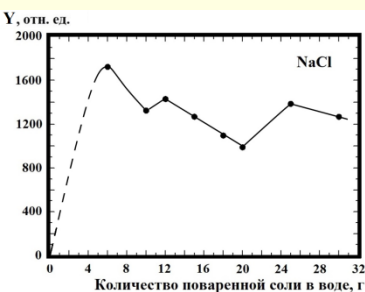
в.



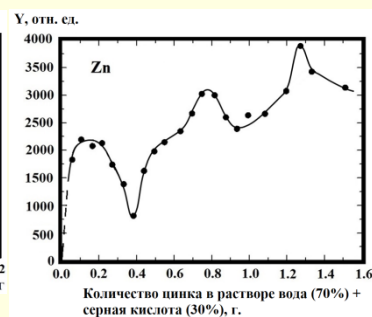
г.



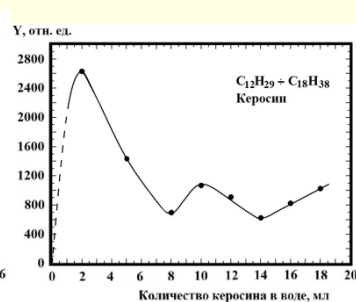
д.



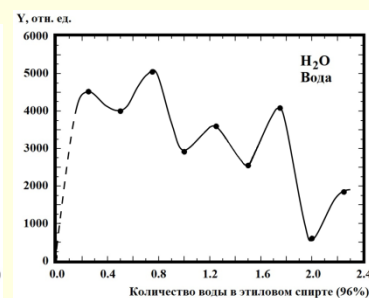
е.



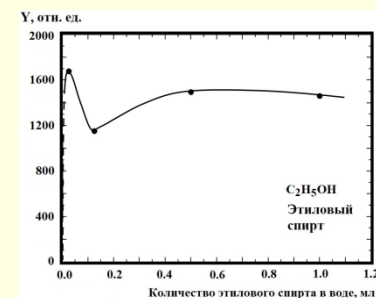
ж.



з.



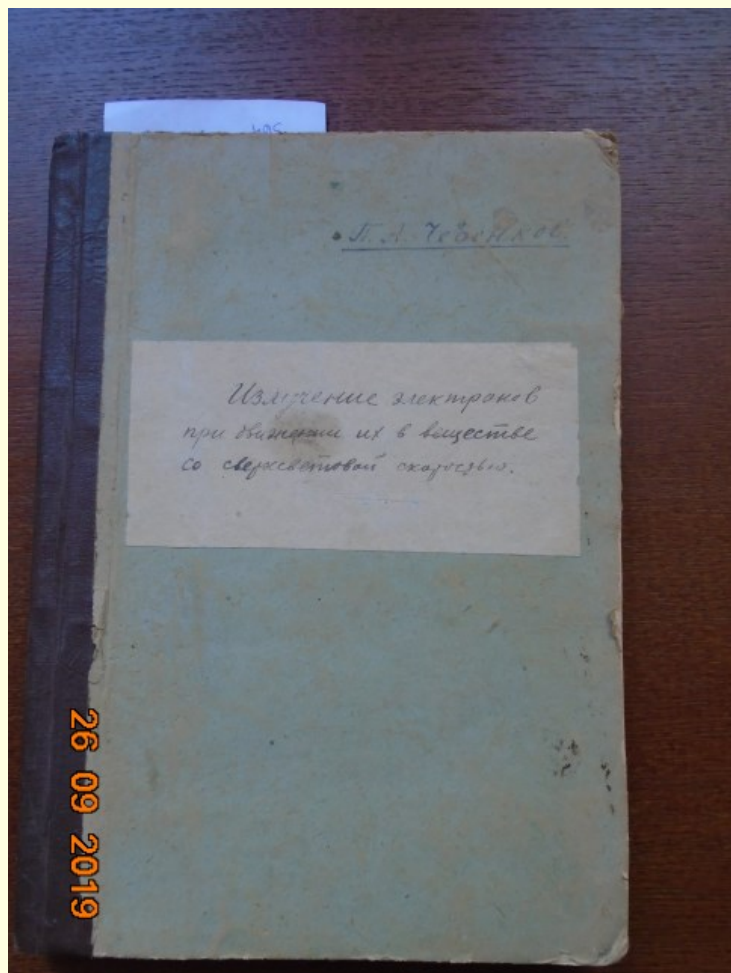
и.



к.

Зависимость световыхода черенковского излучения от концентрации вещества в *опорном* радиаторе: а – йод (I) в этиловом спирте (96%), б – железо в азотной кислоте, в – роданистый калий (KCNS) в воде, г – едкий натр (NaOH) и едкий калий (KOH) в воде, д - сахар ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) в воде, е – поваренная соль (NaCl) в воде, ж – цинк (Zn) в растворе воды (70%) и серной кислоты (30%), з – керосин ( $C_{12}H_{29}-C_{18}H_{38}$ ) в воде, и – вода ( $H_2O$ ) в спирте, к – этиловый спирт ( $C_2H_5OH$ ) в воде.

# Литература



Титульный лист докторской диссертации П.А. Черенкова (02.1940 г.).

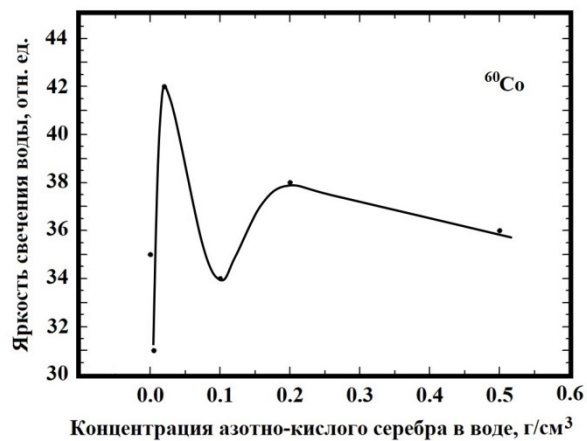
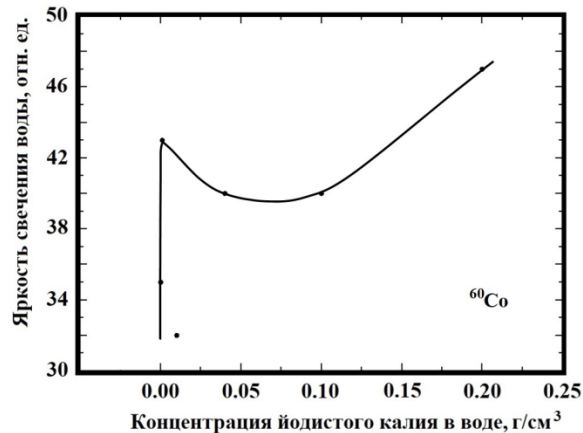
Попытки тушить свечение, вызываемое  $\gamma$ -лучами, производились в отношении воды (растворением в ней  $K_2CO_3$  или  $AgNO_3$  в различных концентрациях), парафинового масла (добавлением нитробензола, а также нагреванием) глицерина и серной кислоты (нагреванием) и некоторых других жидкостей. Измерения яркости выполнялись по порогу зрения. Полученные цифровые результаты для двух из жидкостей даны в таблицах 2 и 3. Яркость в этих таблицах всюду в относительных единицах.

Таблица 2  
Влияние примесей тушителей флуоресценции на яркость свечения воды (возбуждение  $\gamma$ -лучами)

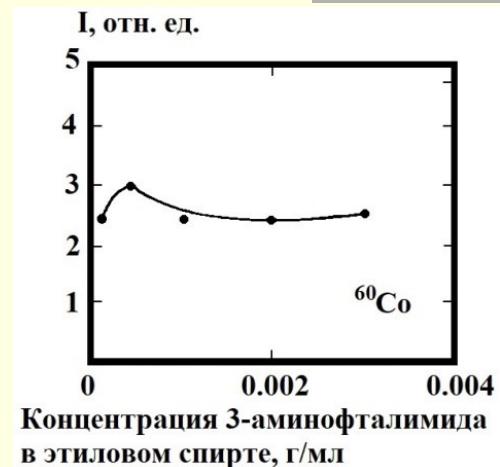
Тушение иодистым калием	Концентр. (в $\frac{2}{\text{см}^2}$ )	0	0,001	0,01	0,04	0,10	0,20	Среднее 39,5
	Наблюдаемая яркость	35	43	32	40	40	47	
Тушение азотно-кислым серебром	Концентр. (в $\frac{2}{\text{см}^2}$ )	0	0,005	0,02	0,10	0,20	0,50	Среднее 36,0
	Наблюдаемая яркость	35	31	42	34	38	36	

Докторская диссертация П.А. Черенкова, стр. 17

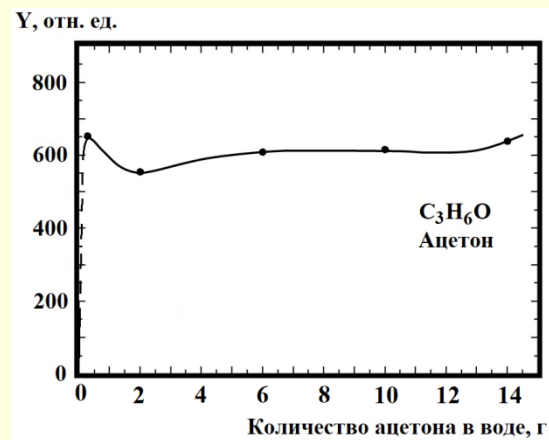
# Литература



Докторская диссертация  
П.А. Черенкова (02.1940 г.), стр. 17.

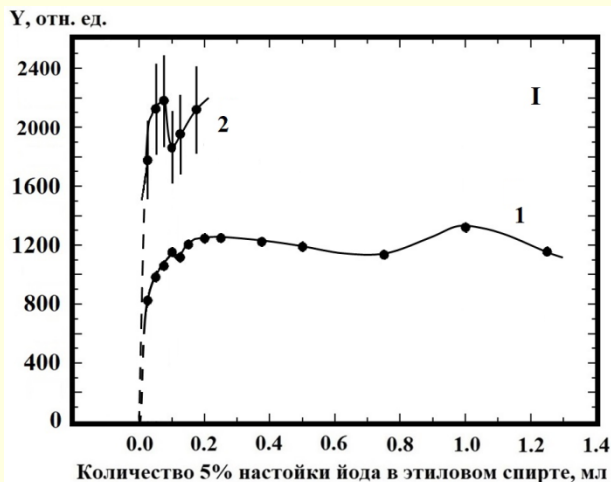


З.А. Чижикова // Оптика и спектроскопия.  
1959. Т.7(2). С.223-230.



Данная работа

# Режекция заряженных частиц



Световыход черенковского излучения от концентрации йода (I) в опорном радиаторе на основе этилового спирта при прохождении через радиатор космических мюонов (1) и позитронов с энергией 194 МэВ (2) и

Из рисунка видно, что световыход *ЧИ* вплоть до концентрации настойки йода в спирте 0.175 мл в случае облучения радиатора позитронами в  $\sim 2$  раза выше, чем в случае облучения космическими мюонами. Это означает, что у позитронов и космических мюонов разные скорости. Действительно, гамма-факторы ( $\gamma = E/mc^2$ , где  $E$  и  $m$  — энергия и масса заряженной частицы,  $c$  — скорость света) позитронов с энергиями 194 МэВ и космических мюонов с энергиями  $\sim 4$  ГэВ [10] составляют соответственно  $\gamma_{e^+} = 194/0.511 \approx 380$  и  $\gamma_{\mu} = 4000/106 \approx 38$  или  $\gamma_{e^+} > \gamma_{\mu}$ , то есть  $(1/\sqrt{1-\beta_{e^+}^2}) > (1/\sqrt{1-\beta_{\mu}^2})$  или  $\beta_{e^+} > \beta_{\mu}$  ( $\beta = v/c$ , где  $v$  — скорость частицы, пересекающую радиатор с показателем преломления  $n$ ;  $c$  — скорость света). Отсюда, число черенковских фотонов, испущенных на единицу длины с длинами волн в интервале от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  или конкретно в диапазоне от  $\lambda_1 = 400$  нм до  $\lambda_2 = 700$  нм, согласно выражению  $dN/dx = 490 \cdot \sin^2(\arccos(1/n\beta))$  [4],  $(dN/dx)_{e^+} > (dN/dx)_{\mu}$ .

Возможно использование разностного метода в режекции заряженных частиц по разности световыхода *ЧИ* практически при любых концентрациях вещества в опорном радиаторе. Тем не менее, нужно провести дополнительные экспериментальные исследования.

# ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВА (предположение)

---

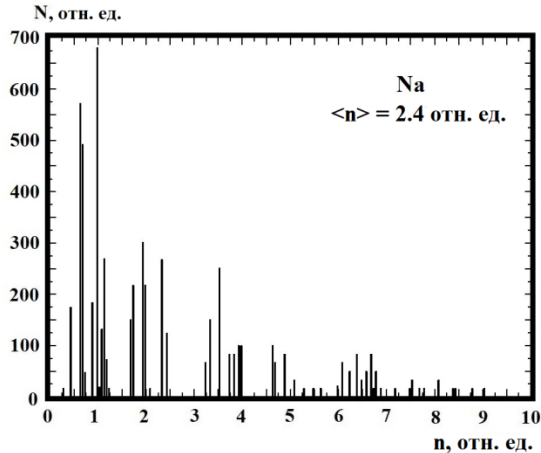
Можно предположить важное свойство *ЧИ* присущее всем радиаторам, независимо от состояния – газообразного, жидкого или твердого.

Исходя из механизма формирования *ЧИ*, снятие поляризации каждым диполем происходит “независимо” или с учетом связи атомов в молекулах, возможно, “квазинезависимо” друг от друга.

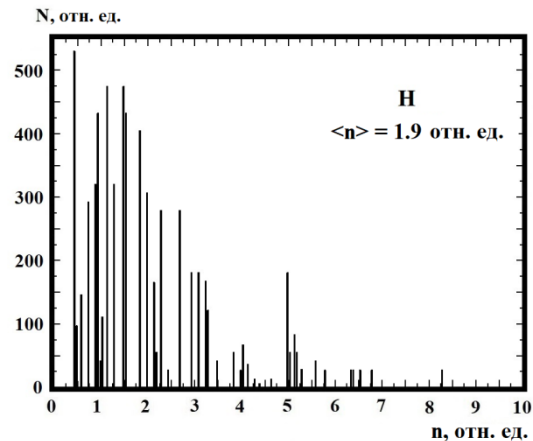
Это означает, что *ЧИ* состоит из “смеси” черенковских излучений диполей отдельных веществ, входящих в состав радиатора.

Таким образом, из общего спектра *ЧИ* сложного радиатора можно вычитать спектры *ЧИ* отдельных веществ или выделять спектры *ЧИ* заранее заданных веществ.

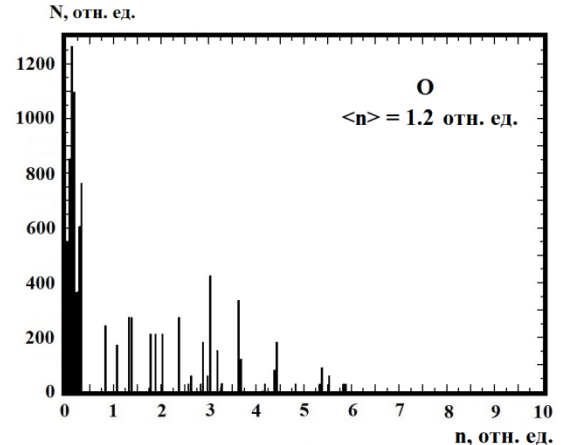
# ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВА (предположение)



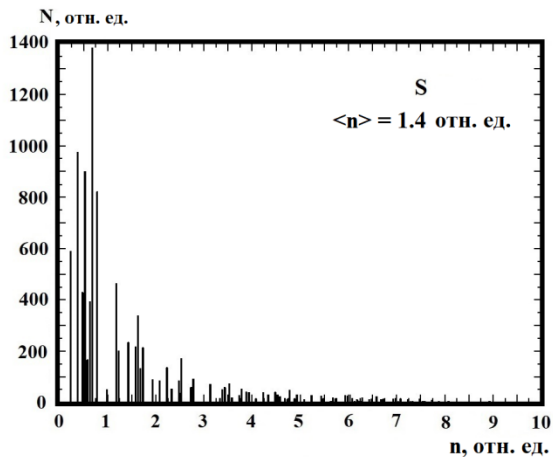
а.



б.



в.



г.

Формально вычитания спектров можно записать как:

а.  $\text{NaCl} - \text{Cl} = \text{Na}$ ;

б.  $\text{NaOH} - \text{Na} = \text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O} - \text{OH} = \text{H}$ ;

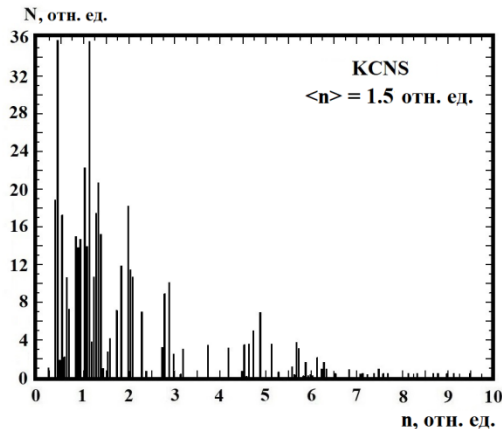
в.  $\text{OH} - \text{H} = \text{O}$ . Далее можно получить спектры  $\text{H} + \text{H} = \text{H}_2$  или  $\text{O} + \text{O} = \text{O}_2$  и другие.

На рис. г представлен спектр *ЧИ* серы (S,  $Z=16$ ), полученный последовательным вычитанием из спектра *ЧИ* концентрированной серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  двух спектров H и четырех спектров O, полученных ранее в экспериментальных исследованиях.

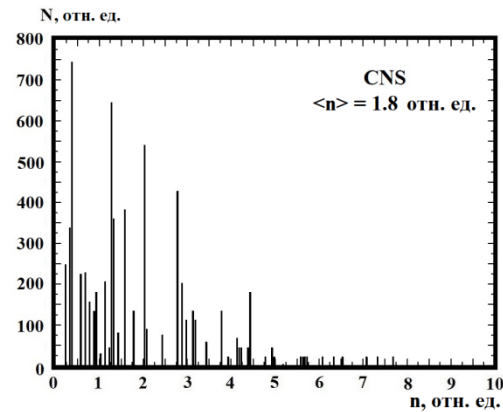
# ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВА (предположение)

Если **ЧИ** формируется диполями веществ независимо друг от друга, то можно “формировать” **ЧИ** соединения, входящих в молекулу вещества радиатора, но которые в естественном виде могут не существовать, а только в составе молекул.

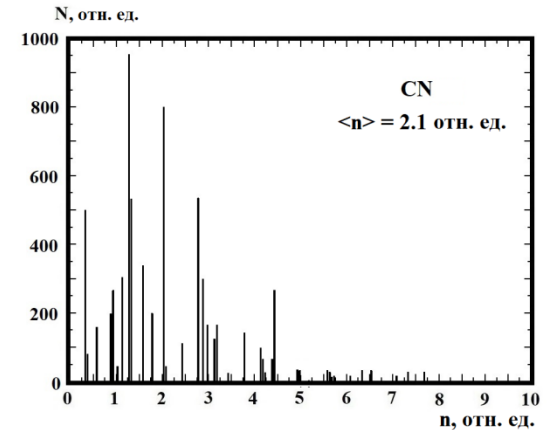
**Пример:** из спектра **ЧИ** роданистого калия (KCNS) вычитанием спектров были получены спектры **ЧИ** соединения роданида  $CNS = KCNS - K$  и комплексной частицы циано  $CN = CNS - S$  (рис. 9).



а.



б.



в.

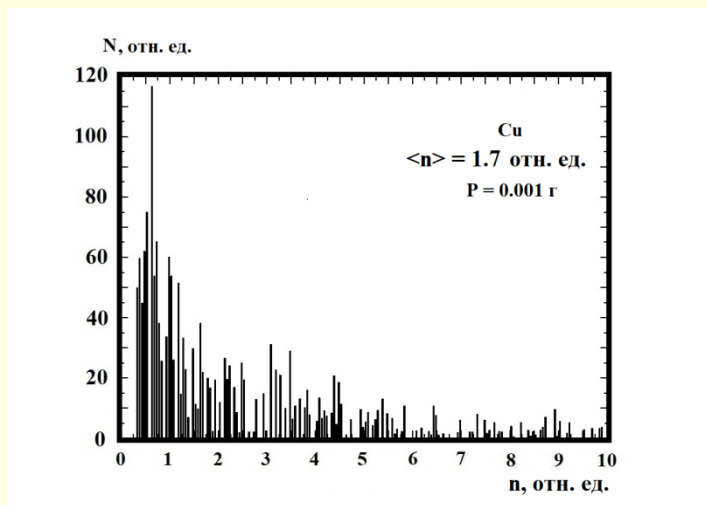
Спектры **ЧИ** соединения, полученные методом последовательного вычитания спектров: а – калий роданистый (KCNS). б - роданид ( $CNS = KCNS - K$ ), с - комплексная частица циано ( $CN = CNS - S$ ).

# Ответ на мотивацию работы

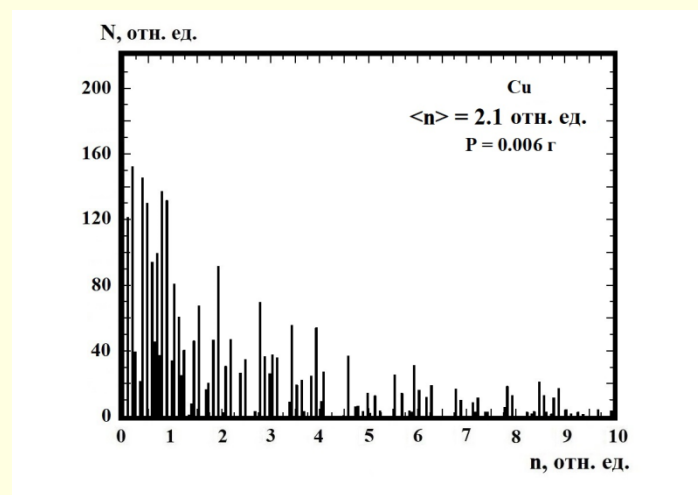
Примером определения состава вещества (**мотивация работы**) независимо от типа опорного радиатора может служить определение меди (Cu, Z=29) при использовании в качестве **опорного радиатора** серной ( $H_2SO_4$ ) (добавлено  $P = 0.001$  г меди) и соляной кислот ( $HNO_3$ ) (добавлено  $P = 0.006$  г меди).

Последовательно определялась медь в соединениях  $CuSO_4$  и  $Cu(NO_3)_2$ .

Спектры меди, полученные из двух разных соединений, показаны на рис. 9. Видно, что спектры качественно одинаковы.



а.

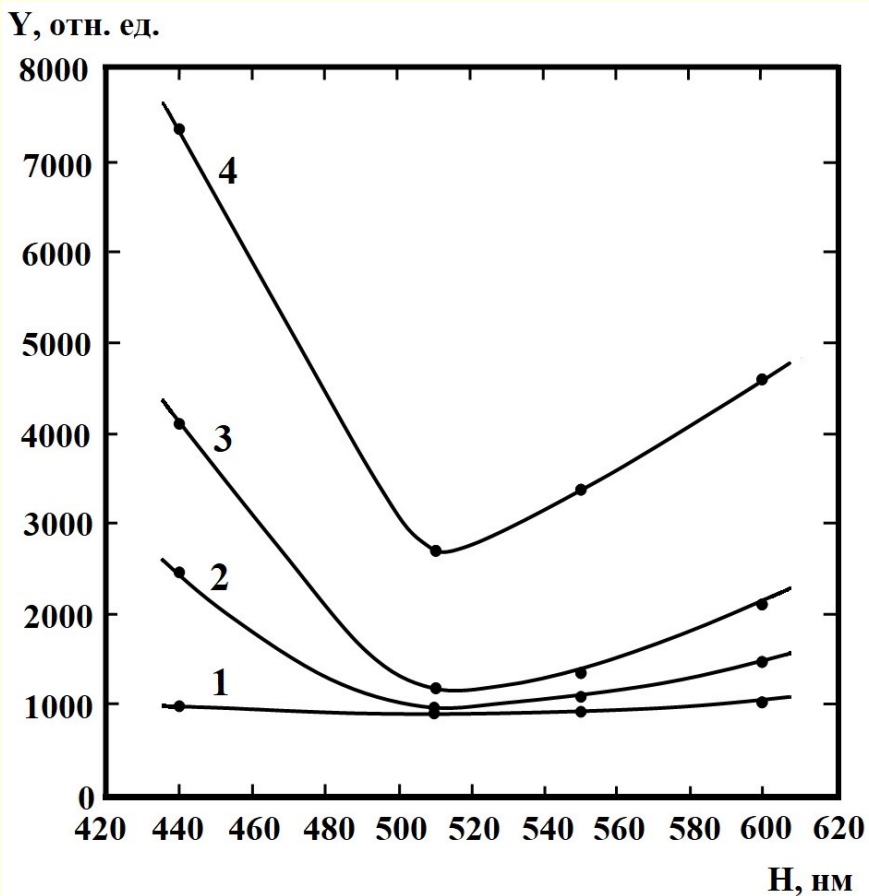


б.

Спектры *ЧИ* меди, полученные из опорных радиаторов серной кислоты ( $H_2SO_4$ ) (добавлено  $P = 0.001$  г меди) (а) и соляной кислоты ( $HNO_3$ ) (добавлено  $P = 0.006$  г меди) (б).



# ЗАВИСИМОСТЬ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СПЕКТРА ПРОПУСКАНИЯ СВЕТОФИЛЬТРА И КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА



При небольшой концентрации (0.025 мл) световыход *ЧИ* слабо зависит от длины волны, но по мере увеличения концентрации до максимально исследованной (1.250 мл) световыход увеличивается в областях спектра близко к ультрафиолетовой (~440 нм, синий светофильтр) и близко к инфракрасной (~600 нм, красный светофильтр). Минимум световыхода *ЧИ* при всех исследованных концентрациях находится в области ~510 нм (зеленый светофильтр).

Как и в случае известных радиаторов (вода, плексиглас, фреон и т. д.), наибольший световыход *ЧИ* приходится на ультрафиолетовую часть спектра.

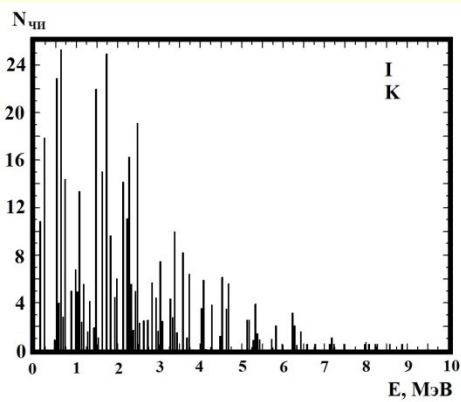
Можно предположить, что подъем световыхода *ЧИ* в инфракрасной области связан с естественным цветом йода, длина волны которого близка длине волны пропускания светофильтра.

Зависимость световыхода *ЧИ* от длины волны спектра пропускания светофильтра, находящегося на фотокатоде ФЭУ ( $C_2 - C_5$ ), и концентрации 5% настойки йода в спирте: 1 – 0.025 мл; 2 – 0.100 мл; 3 – 0.500 мл; 4 – 1.250 мл).

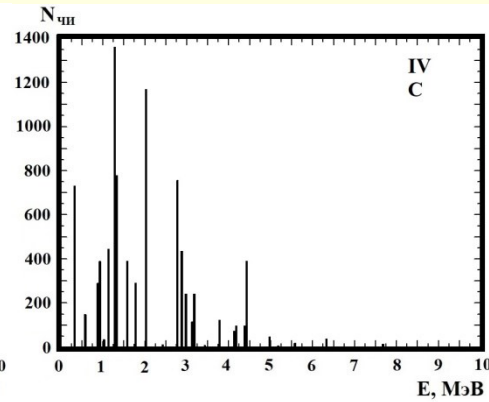
# ХАРАКТЕР СПЕКТРОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НОМЕРА ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ

В экспериментальных исследованиях *ЧИ* была обнаружена закономерность в изменении характера спектра *ЧИ* в зависимости от номера группы элементов, в которой находится исследуемое вещество.

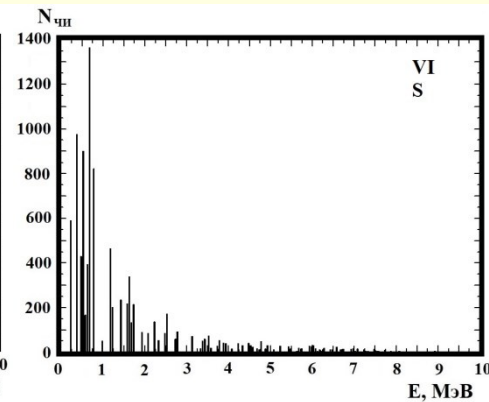
Обнаружено, что с увеличением номера группы или увеличение числа электронов на внешней оболочке атома вещества, величина световыхода *ЧИ* уменьшается.



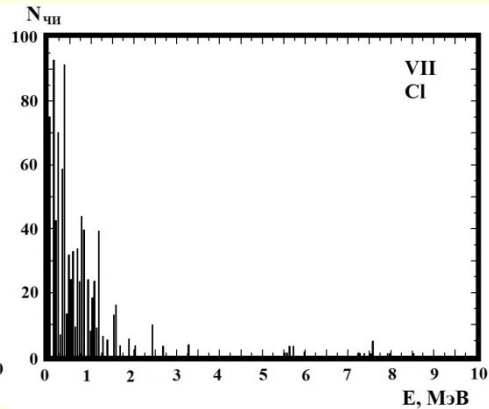
а.



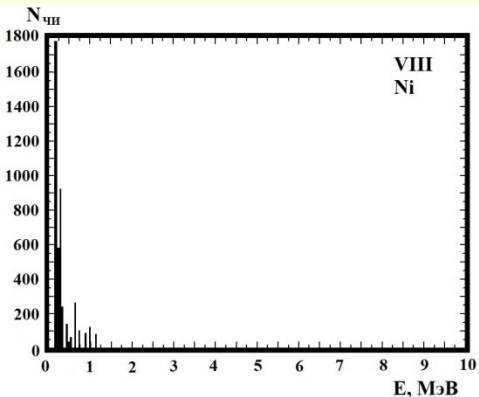
б.



в.



г.



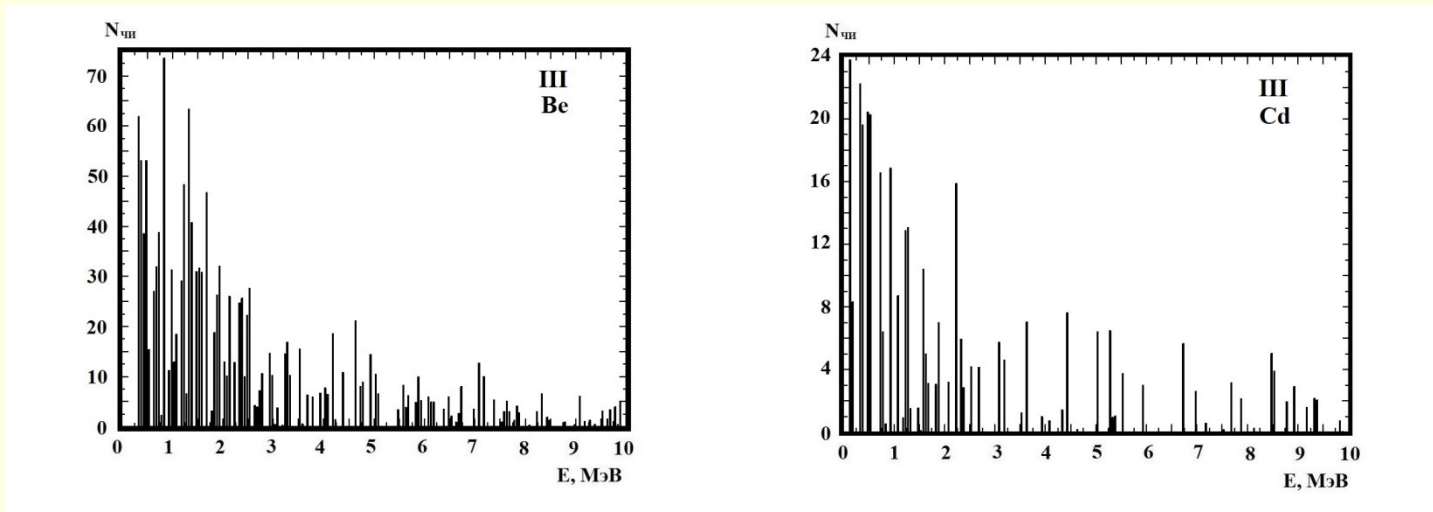
д.

Спектры *ЧИ* для веществ из групп I (а), IV (б), VI (в), VII (г), VIII (д).

# ХАРАКТЕР СПЕКТРОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НОМЕРА ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ

Обнаружено также, что для веществ одной группы, но разных периодов Периодической системы, характер спектров *ЧИ* сравнительно одинаков, однако численное значение световыхода *ЧИ* уменьшается с увеличением номера периода. На рисунке представлены спектры световыхода *ЧИ* для веществ из I группы для бериллия Be (2 период II ряда) (а) и кадмия Cd (5 период VII ряда) (б), соответственно.

Несмотря на сравнительно одинаковый характер спектров *ЧИ* веществ разных периодов Периодической системы наблюдается уменьшение численных значений величины световыхода *ЧИ* при увеличении номера периода ( $Y_{\text{Be}} = 1680$  отн. ед.·МэВ и  $Y_{\text{Cd}} = 445$  отн. ед.·МэВ).



а.

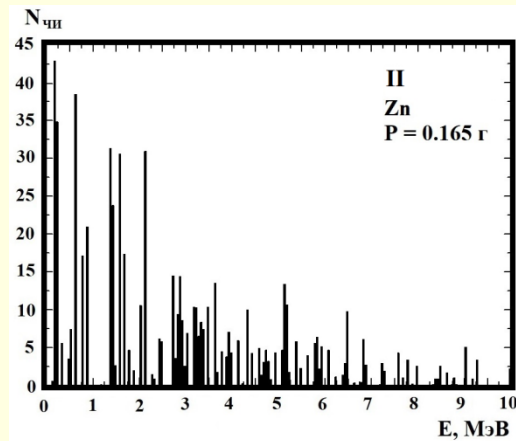
б.

Спектры *ЧИ* бериллия Be (а) и кадмия Cd (б).

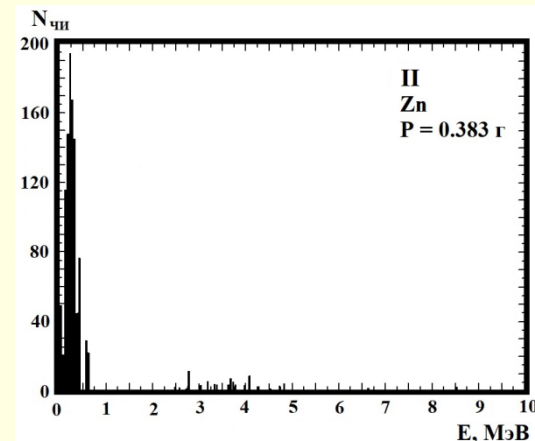
# ХАРАКТЕР СПЕКТРОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НОМЕРА ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ

Обнаружено, что в зависимости от концентрации вещества в *опорном* радиаторе у некоторых веществ существенно меняется не только световойход *ЧИ*, но и характер спектра. На рисунке представлены спектры *ЧИ* цинка (Zn) (световойход *ЧИ* показан на рис. 6е) при концентрации Zn в *опорном* радиаторе, состоящем из воды (70%) и серной кислоты (30%).

При концентрации цинка  $P = 0.165$  г (а) характер спектра совпадает с характером спектров I и III групп Периодической системы (“легкие” вещества), характер спектра при концентрации цинка  $P = 0.383$  г (б) совпадает с характером спектров VII и VIII групп (“тяжелые” вещества). Соответственно и световойход *ЧИ* уменьшается с изменением характера спектра ( $Y_{0.165 \text{ г}} = 2080$  отн. ед.·МэВ,  $Y_{0.383 \text{ г}} = 811$  отн. ед.·МэВ).



а.



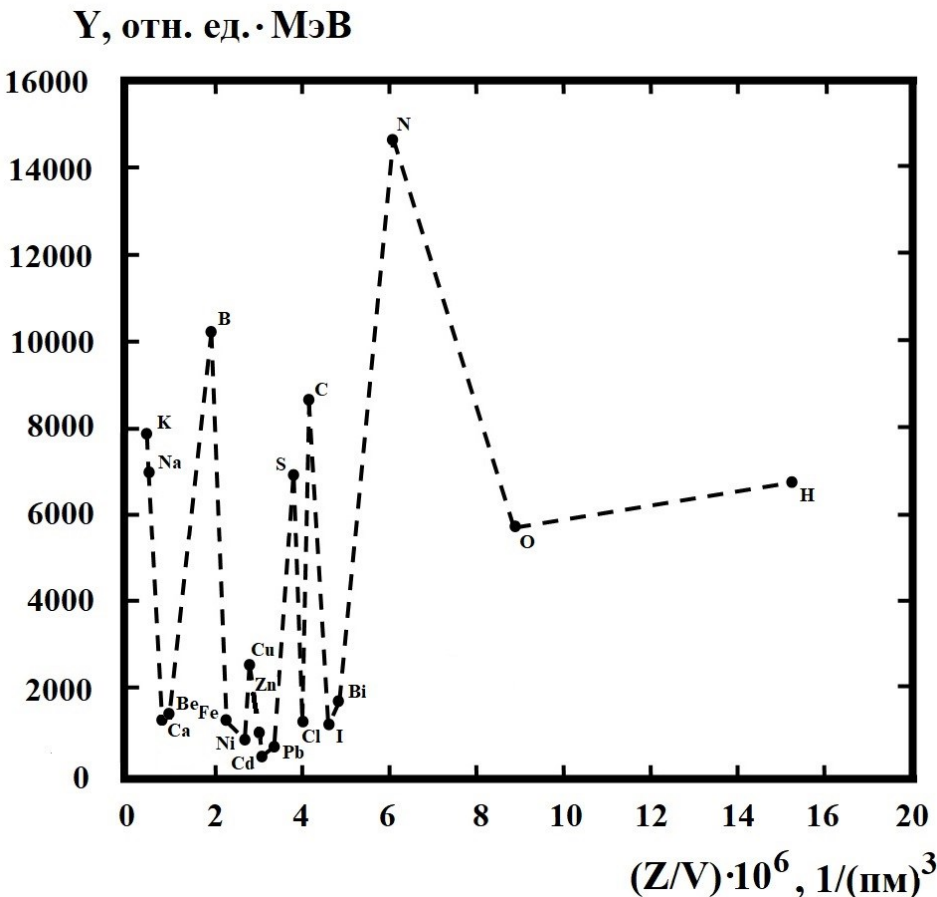
б.

Спектры *ЧИ* цинка (Zn) при разных концентрациях (P) в *опорном* радиаторе: а -  $P = 0.165$  г; б –  $P = 0.383$  г.

# ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВЫХОДА ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО ЧИСЛА Z К ОБЪЕМУ АТОМА

На рисунке представлено соответствие световыходов  $CHI$  ( $Y$ ) веществ отношению  $Z/V$  ( $Z$  – зарядовое число атома,  $V$  – объем атома ( $V = 4/3 \cdot R^3$ ,  $R$  – эмпирический ковалентный радиус атома в [пм]) ( $1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$ )).

Из рисунка видно, что наибольший световыход  $CHI$  наблюдается у исследованных веществ, находящихся практически во всех группах, исключая группу II, и находящихся в начальных рядах – I, II и III, например, для натрия, калия, бора, серы, углерода, азота, кислорода и водорода.



Периодическая таблица Д. И. Менделеева

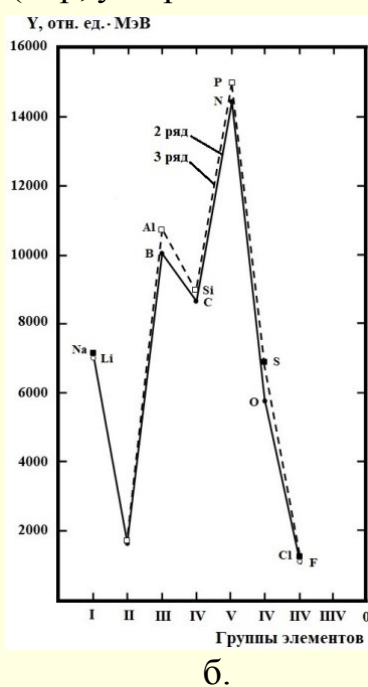
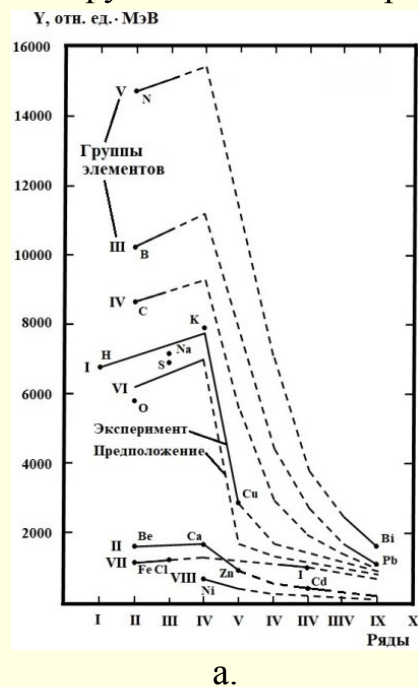
Период	Ряд	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1	(H)						H 1,00797	He 4,0026	Обозначение элемента	Атомный номер
2	2	Li 6,939	Be 9,0122	B 10,811	C 12,01115	N 14,0067	O 15,9994	F 18,9984	Ne 20,179	Li 6,939	3
3	3	Na 11	Mg 24,305	Al 26,9815	Si 28,086	P 30,9738	S 32,064	Cl 35,453	Ar 39,948		Относительная атомная масса
4	4	K 39,102	Ca 40,08	Sc	Ti 47,90	V 50,942	Cr 51,996	Mn 54,9380	Fe 55,847	Co 58,9332	Ni 58,71
5	5	Rb 85,47	Sr 87,62	Y 88,905	Zr 91,22	Nb 92,906	Mo 95,94	Tc	Ru 101,07	Rh 102,905	Pd 106,4
6	6	Cs 132,905	Ba 137,33	La* 138,91	Hf 178,49	Ta 180,948	W 183,85	Re 186,2	Os 190,2	Ir 192,22	Pt 195,08
7	7	Fr 87	Ra 226	Ac** 227	Rf 261	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 264	Hs 265	Mt 266
8	8	Cs 132,905	Ba 137,33	La* 138,91	Hf 178,49	Ta 180,948	W 183,85	Re 186,2	Os 190,2	Ir 192,22	Pt 195,08
9	9	Fr 87	Ra 226	Ac** 227	Rf 261	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 264	Hs 265	Mt 266
10	10	Fr 87	Ra 226	Ac** 227	Rf 261	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 264	Hs 265	Mt 266
11	11	Fr 87	Ra 226	Ac** 227	Rf 261	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 264	Hs 265	Mt 266

Соответствие световыходов  $CHI$  ( $Y$ ) веществ отношению  $Z/V$  ( $Z$  – зарядовое число атома,  $V$  – объем атома ( $V = 4/3 \cdot R^3$ ,  $R$  – эмпирический ковалентный радиус атома в [пм])).

# ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВОХОДА ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО ЧИСЛА Z К ОБЪЁМУ АТОМА

На рисунках, построенных на полученных экспериментальных данных и допущениях, сделана попытка показать поведение световыход  $\chi$  от положения вещества в Периодической системе элементов.

Из рисунков видно, что наибольший световыход  $\chi$  присущ веществам, находящимся в III, IV и V группах и 2 и 3 подгруппах или II и III рядах (бор, углерод и азот – 2 подгруппа; алюминий, кремний и фосфор – 3 подгруппа).



Периодическая таблица Д. И. Менделеева

Период		ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ										
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	1	(H)							H 1,00794	He 4,0026	Обобщенное значение	Атомный номер
2	2	Li 6,939	Be 9,0122	B 10,811	C 12,01115	N 14,0067	O 15,9994	F 18,9984	Ne 20,179	Na 22,98976	Mg 24,3047	Al 26,9815385
3	3	Na 22,98976	Mg 24,3047	Al 26,9815385	Si 28,0858	P 30,97376	S 32,06	Cl 35,453	Ar 39,948	K 39,0983	Ca 40,078	Sc 44,955912
4	4	K 39,0983	Ca 40,078	Sc 44,955912	Ti 47,88	V 50,9415	Cr 51,9961	Mn 54,938045	Fe 55,845	Co 58,933195	Ni 58,6934	Cu 63,546
5	5	Rb 85,4678	Sr 87,62	Y 88,90584	Zr 91,224	Nb 92,90638	Mo 95,94	Tc 98,9062	Ru 101,072	Rh 102,9055	Pd 106,90508	Ag 107,8682
6	6	Cs 132,90545	Ba 137,327	La 138,9047	Hf 178,49	Ta 180,94788	W 183,84	Re 186,207	Os 190,23	Ir 192,222	Pt 195,084	Au 196,966569
7	7	Fr 223	Ra 226	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Lr
8	8	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og			

Зависимость световыход  $\chi$  (Y) веществ от положения вещества в Периодической таблице: а - от номера группы и номера ряда; б - от номера группы для веществ, находящихся в II и III рядах. На рисунке: ●, ■ – значения световыхода  $\chi$ , полученные экспериментально; ○, □ - значения световыхода  $\chi$ , полученные из предположений.

Можно предположить, что световыход  $\chi$ , определяемый поляризацией электронов внешней оболочки атома электромагнитным полем пролетающей заряженной частицы, нарастает с увеличением числа электронов на внешней оболочке атома, достигая максимума в V группе II и III рядов. При дальнейшем увеличении номера ряда световыход  $\chi$  начинает уменьшаться, поскольку заполнение внешней оболочки атома приводит к более устойчивой конфигурации атомной оболочки к внешнему воздействию. Видимо вещества, входящие в 0 группу (инертные газы), имеют минимальный световыход  $\chi$ .

# ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВОХОДА ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО ЧИСЛА Z К ОБЪЁМУ АТОМА

Примерами применения веществ в экспериментальной физике, имеющих хорошие величины световыхода  $CHI$ , являются аэрогель на основе диоксида кремнезема ( $SiO_2$ ), фреон 114 ( $C_2Cl_2F_4$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ), тетраакис (диметиламино) этилен (ТМАЕ) ( $C_2[N(CH_3)_2]_4$ ) и другие.

В химических формулах этих веществ находятся элементы с высокой величиной световыхода  $CHI$  (Si, C, N).

Периодическая таблица Д. И. Менделеева

Период	Ряд	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1	(H)						H 1,00797 Водород	He 4,0026 Гелий	Обозначение элемента Атомный номер Li 3 Литий 6,939 Относительная атомная масса	
2	2	Li 6,939 Литий	Be 9,0122 Бериллий	B 10,811 Бор	C 12,01115 Углерод	N 14,0067 Азот	O 15,9994 Кислорода	F 18,9984 Фтор	Ne 20,179 Неон		
3	3	Na 22,9898 Натрий	Mg 24,305 Магний	Al 26,9815 Алюминий	Si 28,086 Кремний	P 30,9738 Фосфор	S 32,064 Сера	Cl 35,453 Хлор	Ar 39,948 Аргон		
4	4	K 39,102 Калий	Ca 40,08 Кальций	21 44,956 Скандий	22 47,90 Титан	23 50,942 Ванадий	24 51,996 Хром	25 54,9380 Марганец	26 55,847 Железо	27 58,9330 Кобальт	28 58,71 Никель
	5	29 63,546 Медь	30 65,37 Цинк	31 69,72 Галлий	32 72,59 Германий	33 74,9216 Мышьяк	34 78,96 Селен	35 79,904 Бром	36 83,80 Криптон		
5	6	Rb 85,47 Рубидий	Sr 87,62 Стронций	39 88,905 Иттрий	40 91,22 Цирконий	41 92,906 Ниобий	42 95,94 Молибден	43 [99] Технеций	44 101,07 Рутений	45 102,905 Родий	46 106,4 Палладий
	7	47 107,868 Серебро	48 112,40 Кадмий	49 114,82 Индий	50 118,69 Олово	51 121,75 Сурьма	52 127,60 Теллур	53 126,9044 Иод	54 131,30 Ксенон		
6	8	Cs 132,905 Цезий	Ba 137,34 Барий	57 138,91 Лантан	72 178,49 Гафний	73 180,948 Тантал	74 183,85 Вольфрам	75 186,2 Рений	76 190,2 Осмий	77 192,2 Иридий	78 195,09 Платина
	9	79 196,967 Золото	80 200,59 Ртуть	81 204,37 Таллий	82 207,19 Свинец	83 208,980 Висмут	84 [210]* Полоний	85 [210]* Астат	86 [222] Радон		
7	10	Fr 87 [223] Франций	Ra 88 [226] Радий	89 [227] Актиний	104 [261] Резерфордий	105 [262] Дубний	106 [263] Сиборгий	107 [262] Борий	108 [265] Хассий	109 [264] Мейтнерий	110 [271] Дармштадтий
	11	111 [272] Рентений	112 [285] Коперниций	Nh 113 [286] Нихоний	114 [294] Флеровий	115 [294] Московский	116 [294] Ливерморий	117 [294] Теннесси	118 [294] Оганesson		

58 140,12 Церий	59 140,907 Прозеродим	60 144,24 Неодим	61 [137] Прометий	62 150,35 Самарий	63 151,96 Европий	64 157,25 Гадолиний	65 158,924 Тербий	66 162,50 Диспрозий	67 164,930 Гольмий	68 167,26 Эрбий	69 168,934 Тулий	70 173,04 Иттербий	71 174,97 Лютеций
90 232,038 Торий	91 [231] Прометий	92 238,03 Уран	93 [237] Нептуний	94 [244] Плутоний	95 [243] Америций	96 [247] Кюрий	97 [247] Берклий	98 [252]* Калифорний	99 [254] Эйнштейний	100 [254] Фермий	101 [254] Менделевий	102 [254] Нобелий	103 [254] Лоренсий

# Чувствительность разностного метода

---

Чувствительность *разностного метода* исследования вещества, примененного в данной работе, составила не менее  $2.5 \cdot 10^{-5}$ .

Она определялась отношением минимальной дозой исследуемого вещества, добавляемой в *опорный радиатор* (в случае жидкого вещества, например, йод или спирт), находящийся в емкости, составившей 1000 мл.

Минимальная доза исследуемого вещества была определена ценой деления медицинского шприца 0.025 мл.



# Заключение

1. Представлены результаты исследования световыхода черенковского излучения различных веществ *разностным методом*.
2. Результаты подтверждают и показывают, что *ЧИ* присуще как сложным веществам, состоящим из простых ( $C_{12}H_{22}O_{11}$  (сахар),  $NaCl$  (поваренная соль),  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  (медный купорос),  $KCNS$  (калий роданистый),  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  (никель двухлористый)), так и простым веществам (легким ( $Na$ ,  $K$ ) и тяжелым ( $Pb$ ,  $Bi$ )).
3. Сделано предположение, что спектр черенковского излучения сложного вещества, состоит из спектров “относительно независимых” черенковских излучений отдельных веществ. Например, спектр черенковского излучения воды ( $H_2O$ ) состоит из простой суммы спектров черенковских излучений трех атомов - двух атомов водорода и одного атома кислорода.
4. Обнаружено, что характер зависимости световыхода *ЧИ* от концентрации вещества в *опорном* радиаторе одинаков для заряженных частиц разного сорта (позитронов и электронов). Однако, численные значения световыхода *ЧИ* в зависимости от типа заряженных частиц необходимо исследовать дополнительно.
5. Сделано предположение, что черенковское излучение разной степени интенсивности, определяемой степенью заполняемости внешней и внутренней оболочек атомов, присуще всем веществам, составляющих Периодическую систему элементов.
6. Определено, что наибольший световыход *ЧИ* приходится на элементы, находящиеся в IV, V и IV группах II и III рядов.
7. Обнаружено, что характер спектров *ЧИ* сильно зависят от номера группы и концентрации вещества, входящего в радиатор.

# Заключение

8. Определено, что чувствительность представленного метода составляет не менее чем  $2.5 \cdot 10^{-5}$ . Чувствительность метода, предположительно, можно увеличить до  $\sim 10^{-6} - 10^{-7}$  уменьшив дозу исследуемого вещества, увеличив время набора статистики, увеличив чувствительность детектора, регистрирующего черенковское излучение и увеличив интенсивность пучка заряженных частиц.
9. Метод исследования *ЧИ* можно использовать для определения степени загрязненности жидких радиаторов химическими веществами (растворимыми или провзаимодействовавшими с *опорным радиатором*) или мелкодисперсными механическими (пластическими массами, различными нерастворимыми добавками, например, в питьевой воде и. т. п.).
10. Исследование характеристик *ЧИ* выполнено с применением **релятивистских** космических мюонов, однако, характеристики *ЧИ* необходимо выполнить и при **нерелятивистских** энергиях ( $E \ll 1$  ГэВ ) заряженных частиц.
11. Показано, что характер черенковского излучения и его относительная величина индивидуальна для каждого вещества Периодической системы элементов, поэтому черенковское излучение можно применять для определения типа вещества (*черенковская спектрометрия*). Для этого необходимо создать банк данных черенковских излучений различных веществ.
12. Зависимость световыход *ЧИ* от положения вещества в Периодической таблице необходимо изучать более детально.
13. *Черенковская спектроскопия* может найти применение в различных областях, связанных с гидрологией, экологией, геологией (как твердые, так и нефте-газовые ископаемые) и в других областях.

**Замечание:** В работе исследование характеристик *ЧИ* выполнено с применением релятивистских космических мюонов, поэтому зависимость характеристик *ЧИ* от энергий заряженных частиц необходимо выполнить при нерелятивистских энергиях заряженных частиц ( $E \ll 1$  ГэВ ).

# Черенковское излучение как способ анализа вещества

---

Спасибо за внимание !