

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 341.1н

П-34

13/хн-76

P13 - 9997

4948/2-76

А.Ф.Писарев

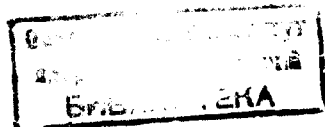
ПСЕВДОКИПАЩИЙ ТРЕКОВЫЙ НИТЯНОЙ ГОДОСКОП

**1976**

P13 - 9997

А.Ф.Писарев

ПСЕВДОКИПАЩИЙ ТРЕКОВЫЙ НИТЯНОЙ ГОДОСКОП



### *Введение*

Современная экспериментальная физика высоких энергий богато оснащена различными методами трековой регистрации частиц. Сейчас, пожалуй, невозможно указать такой экспериментальной задачи, которую невозможно было бы эффективно решить с помощью этих детекторов. Особенно сильный прогресс в развитии трековой методики достигнут в последнее десятилетие, когда были изобретены и освоены в экспериментах стримерные и искровые оптические камеры и нитяные искровые и пропорциональные трековые системы. Но вместе с тем область экспериментальной физики нейтрино пока стоит особняком от этого прогресса. Причиной тому является, как известно, исключительная малость сечения процессов взаимодействия нейтрино с веществом, приводящая к необходимости иметь в детекторе большое количество вещества. Поэтому успех в разработке газоразрядных трековых приборов практически не принес новых ощутимых возможностей для экспериментов с нейтрино. Эта область физики явно нуждается в разработке своего "собственного" детектора, который содержал бы большое количество рабочего вещества и был бы способен эффективно регистрировать треки вторичных частиц, образующихся в нейтринных процессах. Поисковым исследованиям разработок специфически нейтринного детектора в последние годы уделялось достаточно внимания /<sup>1-3</sup>/, однако решительного успеха достичь не удалось. Так, путь, начатый в 1968 году группой

Альвареца /2/ по исследованию детектора со свойствами размножения электронов ионизации в одноатомных жидких средах под действием сильно неоднородного поля, не привел к желаемой цели. Экспериментаторы добились самого эффекта размножения электронов в жидкой среде, однако интенсивность процесса оказалась весьма слабой и далеко не достаточной для реализации рабочего детектора. В несколько ином плане были сделаны попытки разработки нитяного детектора в группе Долгошеина /3/, где исследовался эффект инжекции первичных электронов ионизации из жидкости в паровую фазу и последующее размножение этих электронов в электрическом поле нитей. Авторам /3/ удалось добиться устойчивой работы такого детектора при облучении  $\gamma$ -квантами и заряженными частицами, однако ряд технических причин принципиального характера не позволил им в конечном счете создать рабочий прибор.

В настоящей статье анализируется новый подход к разработке нейтринного детектора. Отправной идеей для него послужили результаты исследований Шарпака в 1963 году /4/ по регистрации следов частиц в жидкой среде, насыщенной газовыми пузырьками. Прибор Шарпака представлял собой сосуд с прозрачными стенками, заполненный трансформаторным или парафиновым маслом. Через керамическое пористое дно сосуда в жидкость непрерывно генерировались газовые пузырьки из неона, аргона или гелия. Пузырьки имели диаметр около 2 мм и сравнительно быстро всплывали через всю толщину слоя жидкости. В сосуде размещались два вертикальных высоковольтных электрода, один из которых был выполнен из прозрачной металлической сетки и через него велось наблюдение за треками. Под действием высоковольтного электрического поля в газовых пузырьках, пересекаемых частицами, возникало разрядное свечение, которое легко наблюдалось визуально и фотографировалось. В этих исследованиях было установлено, что свечение в пузырьках по следу частиц может эффективно возникать при самых разнообразных режимах высоковольтного питания: импульсном, высокочастотном, низкочастотном и постоянном поле. Светимость пузырьков была высокой, однако глубина ви-

димости треков из-за сильного рассеяния света на газовых пузырьках была чрезвычайно мала и не превышала нескольких миллиметров. По той же причине треки имели сильное диффузное оптическое размытие. Эти два принципиально неустранимых недостатка, присущих гетерогенным системам, свели на нет возможность практической реализации оптического трекового годоскопа.

Сейчас представляется, что указанные недостатки детектора можно полностью обойти, если в принципе отказаться от оптического способа съема трековой информации и перейти к методу сбора зарядов на координатные нити считывания, как это обычно делается в нитяных искровых и пропорциональных камерах. Здесь открываются две интересные возможности трековой регистрации частиц. Во-первых, заряды, образующиеся в газовых пузырьках по следу частицы и дополнительно размноженные под действием высоковольтного поля, будут подниматься в жидкости вместе с пузырьками при их всплывании до места расположения нитяных электродов считывания и в момент пересечения последних формировать полезные сигналы. В наипростейшем варианте такой детектор мог бы быть выполнен, например, следующим образом. Помимо двух высоковольтных вертикальных или горизонтальных электродов в приповерхностном слое жидкости устанавливается дополнительная XY-нитяная система считывания. Высоковольтные электроды в таком приборе будут осуществлять электрический разряд в пузырьках по следу частиц, а система считывания - сбор зарядов в этих пузырьках и выдачу необходимой информации о координатах треков. Причем координаты в плоскости XY будут следовать непосредственно из геометрии расположения нитяных элементов в системе считывания, а глубинная координата - из относительного времени запаздывания прихода пузырьков на нити. Сохранение геометрии трековой картины при "транспортировке" ее в виде ионизованных пузырьков из глубины жидкости к системе считывания можно обеспечить за счет строгой калибровки пузырьков по диаметру, при котором скорость их всплывания будет одинаковой для всех.

Вторая возможность заключается в том, что разможенные заряды вытягиваются электрическим полем из газовых пузырьков в жидкость и затем собираются на нити считывания. В этом варианте, как видим, заряды переносятся с места возникновения к нитям считывания не за счет движения в пузырьках, а путем дрейфа в электрическом поле. Поэтому нитяные электроды считывания могут размещаться в жидкости как вертикально, так и горизонтально. Для одноатомных жидкостей, обладающих подвижностью электронов, этот вариант интересен еще и в том отношении, что электроны ионизации при своем движении в электрическом поле между электродами могут многократно попадать из жидкой среды в газовые пузырьки, размножаться в них и затем вновь выходить в жидкость и собираться на нитях. Слой нагнетанной жидкости между электродами в этом случае будет играть роль электронных усилительных элементов. Каждый отдельный газовый пузырек можно рассматривать как элементарный диод, размножающий электроны. Полный коэффициент размножения электронов в таком своеобразном усилителе может регулироваться величиной внешнего электрического поля, составом газа в пузырьках, их размером, концентрацией и величиной межэлектродных промежутков. Характерное время размножения электронов и сбора на нити будет определяться в основном временем их дрейфа в межэлектродном промежутке. Так, при зазоре в 1 см и скорости дрейфа электронов  $\sim 10^6$  см/с это время составит  $\sim 1$  мкс.

Ниже излагаются некоторые особенности работы предлагаемого детектора и расчетные данные его характеристик.

#### *Генерирование газовых пузырьков, калиброванных по диаметру*

Как и в детекторе Шарпака<sup>/4/</sup>, элементом для интенсивного генерирования газовых пузырьков в жидкости может служить плоское дно сосуда, выполненное из пористого материала, например, пористой керамики, ши-

роко используемой в химической промышленности, или спекшегося гранулированного металла. Для получения пузырьков с хорошей однородностью по диаметру достаточно создать в пористой пластине ультразвуковые колебания. Соответствующим подбором амплитуды и частоты колебаний ультразвукового излучателя при заданном давлении подводимого газа можно получить необходимую калибровку пузырьков. Существующие экспериментальные данные в этой области свидетельствуют о том, что при частоте колебаний  $\sim 10$  МГц газовые пузырьки, генерируемые, например, в воде, имеют размер  $< 1$  мм и разброс в несколько процентов от величины диаметра. Такие пузырьки в слабо-вязких жидкостях всплывают со скоростью  $\sim 15$  см/с и имеют среднеквадратичное отклонение от вертикали всплытия  $\sim 0,2$  мм на метр высоты подъема. Очевидно, эта величина будет характеризовать пространственное размытие трека в плоскости системы считывания при подъеме пузырьков на один метр.

Концентрация пузырьков в жидкости может быть равной величине, занимающей половину рабочего объема сосуда. При диаметре пузырьков  $\sim 1$  мм их концентрация составит  $\sim 2 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>. Это будет соответствовать отношению плотности вещества газа к суммарной плотности рабочего вещества в годоскопе  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ , т.е. основную часть плотности вещества в приборе будет составлять жидкая среда.

Вероятное число ионизируемых пузырьков на пути частицы при указанной концентрации должно быть  $\sim 10$  см<sup>-1</sup>.

#### *Схема размещения электродов*

Рассмотрим варианты исполнения трекового годоскопа в соответствии с двумя принципами переноса зарядов к нитям считывания - методом транспортировки в пузырьках и методом дрейфа в электрическом поле. Система электродов в детекторе, работающем по первому принципу, должна состоять из двух типов: высоковольтных электродов и электродов считывания. Первые могут размещаться в детекторе вертикально и быть выполненными из сплошных металлических пластин или проводя-

щих сеток. Электродная система считывания в этом варианте должна располагаться в объеме жидкости параллельно ее поверхности над высоковольтными электродами. Возможен также и чисто горизонтальный вариант размещения всех электродов. Высоковольтные электроды в этом случае должны быть выполнены из металлических сеток с большим шагом, намного превышающим размер пузырьков. Над каждым высоковольтным электродом или их группой устанавливается нитяная ХУ-система считывания. Окончательный выбор конкретной схемы размещения электродов в детекторе должен опираться, естественно, на экспериментальные данные. Однако по ряду соображений представляется, что горизонтальное расположение всех электродов является более практичным.

В детекторе, работающем по принципу дрейфового переноса зарядов в электрическом поле, электроды в жидкости могут размещаться произвольно, т.е. как горизонтально, так и вертикально. Методы регистрации зарядов в следах частиц, хорошо разработанные к настоящему времени для нитяных газовых детекторов, могут быть всецело распространены на данный вариант годоскопа.

*Класс жидкостей и газов,  
пригодных для использования в годоскопе*

Одним из свойств, которым должны обладать жидкости, является их высокая диэлектрическая прочность. В случае многоатомных жидкостей необходимо удовлетворять еще двум требованиям. Жидкости должны обладать низкой упругостью собственного пара и слабой электроотрицательностью молекул к захвату электронов. Выполнение первого из этих требований диктуется необходимостью устранения механизма сильного гашения электрического разряда в пузырьках. Слабая же электроотрицательность молекул жидкости или полное отсутствие в них эффекта захвата электронов требуется для сохранения в пузырьках в свободном состоянии начальных электронов ионизации и, соответственно, для облег-

чения условий инициирования разряда. Исключение может составить лишь случай, когда возникнет необходимость в сохранении начальных и размноженных зарядов в пузырьках в виде ионов для эффективной транспортировки их к нитям считывания.

В качестве рабочих газов могут быть использованы как чистые газы, так и смеси, обычно применяемые в искровых и пропорциональных камерах. Приведем несколько примеров комбинаций жидкостей и газов, подходящих для применения в годоскопе. При комнатных температурах в качестве жидких сред могут быть использованы трансформаторное масло, вакуумное масло, глицерин, парафиновое масло, гексан и другие органические жидкости. Рабочими газами для формирования пузырьков в них могут быть аргон, неон, ксенон, гелий, водород, метан и их смеси. При необходимости в качестве электроотрицательных добавок к этим газам может быть использован, например, газообразный фреон. При низких температурах возможны следующие комбинации жидкостей и газов. Так, в жидком ксеноне можно генерировать пузырьки из аргона, неона, гелия, водорода и метана; в жидком аргоне - пузырьки неона, гелия и водорода и, наконец, в жидком водороде - пузырьки гелия.

Для годоскопического детектора небольшого размера существует еще возможность использования в жидкости пузырьков газа того же типа, что и сама жидкость. Так, если к жидкому аргону подвести газ того же наименования с температурой, несколько выше температуры жидкости, то пузырьки во время всплывания не будут успевать термализоваться и полностью коллапсировать. Однако для нормальной работы такого детектора потребуются хорошая система термостатирования жидкости во всем объеме.

Здесь уместно отметить, что в объеме одноатомных жидкостей и жидком водороде путем облучения ультразвуком можно непрерывно генерировать кавитационные газовые полости и в них осуществлять размножение электронов. Кавитирующие слои жидкости между электродами в этом случае будут выполнять роль электронных размножителей.

Одной из примечательных особенностей работы пузырькового детектора является его всережимность, т.е. способность работать как в переменных, в частности, импульсных и высокочастотных, так и в постоянных полях. Во всех этих случаях, как следует из работы <sup>14/</sup>, может происходить интенсивное размножение электронов в пузырьках. При импульсном варианте питания детектор может работать в режиме селективного управления. В таком приборе с помощью очищающего электрического поля можно в широких пределах управлять временем памяти, убирая электроны ионизации из объема пузырьков на их стенки. В силу малости размера пузырьков время памяти можно сократить до величины  $\ll 1$  мкс.

При работе с одноатомными жидкостями в режиме селективного управления размножением электронов в пузырьках, после действия основного высоковольтного импульса потребуется наложение дополнительного импульса меньшей амплитуды для обеспечения быстрого дрейфа размноженных электронов к нитям считывания.

Режим питания постоянным или медленно меняющимся полем /например, с частотой 50 Гц/ обеспечит прибору непрерывную чувствительность к частицам. Это свойство детектора будет особенно ценным для регистрации нейтральной компоненты космического излучения, в том числе нейтрино. Благодаря хорошим электроизоляционным свойствам жидкости прибор будет обладать высокой электрической прочностью. Это обстоятельство означает, что в таком приборе можно будет получать большой коэффициент контролируемого /в частности, пропорционального/ размножения электронов в пузырьках, не рискуя вызвать спонтанного электрического пробоя в объеме жидкости.

Мыслим также комбинированный импульсно-высокочастотный режим питания, при котором управляемым импульсом осуществляется ионизация пузырьков по следу частиц, а последующим наложением высокочастотного поля малой амплитуды достигается поддержание этой ионизации в течение всего времени движения пузырьков до элементов считывания.

Нитяные электроды считывания могут работать, в свою очередь, в двух режимах: пассивном, осуществляя лишь сбор зарядов в пузырьках, и активном, производя дополнительное их размножение. Последнее может оказаться весьма полезным в тех случаях, когда первичные электроны ионизации в пузырьках могут сохраняться в течение всего времени движения пузырьков до электродов считывания, где они могут размножиться в электрическом поле нитей. При пропорциональном режиме размножения появится дополнительная информация об ионизационных потерях в следах частиц. Сохраняемость электронов в пузырьках может быть достигнута за счет применения в них повышенного давления газа, либо путем использования возбужденных метастабильных состояний атомов газа. К аналогичному эффекту может привести также небольшая добавка к газу электроотрицательной молекулярной примеси с малой энергией связи электронов. При попадании таких отрицательных ионов в сильное поле нитей произойдет срыв захваченных электронов и их размножение. Отрыв электронов от отрицательных ионов в плоскости считывания может быть достигнут также за счет фотоэффекта при облучении пузырьков лазерным светом с подходящей длиной волны.

Здесь уместно отметить, что в каждый момент времени нити электродов считывания будут окружены большим числом всплывающих пузырьков. Поэтому в одноатомных жидкостях в сильных электрических полях можно осуществить дополнительную инжекцию электронов ионизации из следов частиц в жидкости в эти пузырьки и произвести их размножение /в духе идеи <sup>13/</sup>/.

Угол наклона трека к плоскости уровня жидкости может быть определен, как отмечалось выше, по относительному времени запаздывания подхода ионизованных пузырьков к нитям считывания. В принципе, в обсуждаемом детекторе существует также возможность определения абсолютной величины глубинных координат пузырьков в треках, если использовать для этих целей в качестве реперного начала отсчета времени момент внешнего триггерного запуска или момент появления на высоковольтных электродах индуцированного импульса

ионизации газа в пузырьках. Такой импульс в режиме постоянного питания годоскопа будет возникать всякий раз благодаря токам смещения при формировании электрического разряда.

### *Области применения годоскопа*

Во вводной части обращалось внимание на предпочтительность использования предлагаемого прибора для нужд экспериментальной нейтринной физики, так как для регистрации частиц, взаимодействующих с веществом, по электромагнитному механизму или каналу сильных взаимодействий существует достаточно большой выбор высокоэффективных детекторов. Вместе с тем, обсуждаемый прибор может найти широкое применение и в этой области физики. Так, в частности, трековый годоскоп может использоваться в экспериментах на ускорителях в качестве селективно-управляемой трековой мишени аппендиксного типа. При толщине слоя жидкости в мишени ~5 см можно будет осуществлять около десяти запусков детектора за время одного импульса сброса частиц в цикле.

Совершенно очевидно, что пузырьковый нитяной годоскоп с размножением зарядов между электродами может иметь большой рабочий объем, и для исследования ряда физических задач на ускорителях будет способен эффективно конкурировать с пузырьковыми камерами.

В заключение автору приятно поблагодарить Б.М.Понтекорво, А.А.Тяпкина, Л.М.Сороко и В.Г.Зинова за полезные обсуждения проблемы регистрации слабо взаимодействующих частиц.

### *Литература*

1. Г.Зацепин, Б.Понтекорво. Письма в ЖЭТФ, 12, 347, 1970.
2. L. W. Alvarez. Preprint UCRL-672, 1968.
3. Б.А.Долгошеин. Труды третьей школы физики ИТЭФ, вып. 3, 82, Атомиздат, М., 1975.
4. J. Charpak. Nucl. Instr. Meth., 20, 482, 1963.

*Рукопись поступила в издательский отдел  
28 июля 1976 года.*