

КАК ЗАРЕГИСТРИРОВАТЬ "ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО" ГАЛАКТИКИ, ЕСЛИ ЕГО СОСТАВЛЯЮТ НЕЙТРАЛЬНЫЕ СЛАБОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ С МАССАМИ $1 \div 10 \text{ ГэВ}/c^2$

А.С.Барабаш, А.И.Болоздыня

Предлагается использовать эмиссионный детектор с жидким предельным углеводородом в качестве рабочей среды для регистрации частиц холодного темного вещества Галактики с массами $\geq 0,7 \text{ ГэВ}/c^2$.

По современным представлениям масса гравитирующего вещества Галактики на порядок превышает массу наблюдаемого вещества ¹. Есть основания полагать, что ненаблюдаемое пока "темное вещество" имеет небарионную природу ², и его составляют нейтральные массивные частицы, взаимодействующие с барионами с сечениями порядка сечений слабого взаимодействия ³. Такие частицы принято называть вимпами (от англоязычной аббревиатуры WIMP — Weakly interacting massive particle). В качестве кандидатов в частицы темного вещества обсуждаются новые типы нейтрино, аксион, суперсимметричные частицы, голдстоуновские бозоны, зеркальные частицы и т.д. ^{3,4}.

Среди предложенных способов регистрации вимпов наиболее привлекательна возможность прямой регистрации частиц с массой $1 \div 10^3 \text{ ГэВ}/c^2$ по ядрам отдачи, которые при любом механизме взаимодействия частиц с рабочим веществом детектора могут быть зарегистрированы. Этот принцип реализован в эксперименте по поиску вимпов с помощью низкофонового германиевого полупроводникового детектора; получено ограничение на массу дираковских нейтрино в роли вимпов $m_{\nu_D} < 12 \text{ ГэВ}/c^2$ ⁵. Это ограничение продиктовано в основном порогом регистрации детектора, который в данном случае составлял $\sim 3 \text{ кэВ}$. В дальнейшем предполагается использовать кремниевые детекторы с порогом регистрации $\sim 0,8 \text{ кэВ}$, что позволит повысить чувствительность установки к массам m_{ν_D} вплоть до $4 \text{ ГэВ}/c^2$.

Мы бы хотели обратить внимание на два обстоятельства. Во-первых, из кинематических соображений ясно, что оптимальной мишенью для частиц с массой $1 \div 10 \text{ ГэВ}/c^2$ яв-

ляются легкие ядра, такие как ^1H и ^{12}C (рис. 1). Ядро ^1H , кроме того, обладает большим ядерным спином, а потому пригоден для регистрации аксиально-взаимодействующих частиц. Среди наиболее распространенных природных изотопов германия и кремния сравнимым ядерным спином обладают лишь ядра ^{73}Ge и ^{29}Si , распространенность которых невелика — 7,8 и 4,7%, соответственно. По этой причине детекторы на основе естественной смеси изотопов германия и кремния малочувствительны к аксиально-взаимодействующим вимпам.

Во-вторых, порог регистрации вимпов может быть существенно понижен, если воспользоваться газоразрядной методикой регистрации, чувствительной к одиночным электронам. Совместить высокую плотность рабочего вещества (для эффективной регистрации слабозаимодействующих частиц) с высокой чувствительностью к ионизации газоразрядной методики позволяет эмиссионный детектор, который мы предлагаем использовать для поиска вимпов.

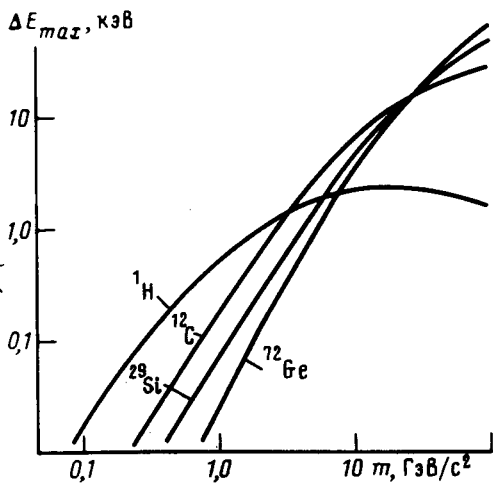


Рис. 1

Рис. 1. Максимальное энерговыделение ΔE_{max} при упругом рассеянии частиц с массой m на различных ядрах

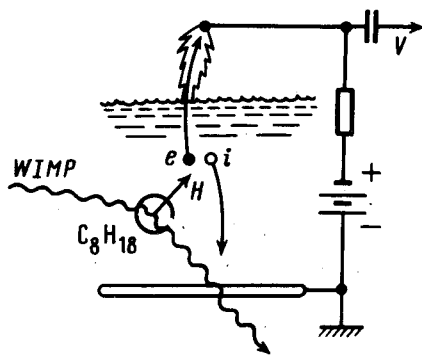


Рис. 2

Рис. 2. Схема регистрации вимпа (волнистая линия) в эмиссионном детекторе с жидким углеводородом (изооктаном C_8H_{18}) в качестве рабочей среды

В качестве рабочего вещества детектора могут быть использованы жидкие при комнатной температуре 2,2,4-триметилпентан (изооктан) или 2,2,4,4-тетраметилпентан, из которых возможна эмиссия электронов, а в их парах возможно размножение электронов^{6,7}. Из этих двух сред изооктан более предпочтителен из-за сравнительно низкого порога эмиссии (70 В/см против $\geq 10^3$ В/см для тетраметилпентана).

Принцип работы детектора иллюстрирует рис. 2. Вимп упруго рассеивается на ядре водорода (в случае аксиального взаимодействия) или на ядре углерода (если рассеяние носит когерентный характер), входящих в состав молекулы изооктана C_8H_{18} . Если энергия, переданная ядру, превышает энергию связи соответствующего атома в молекуле (≈ 2 эВ), атом или ион отдачи покидает молекулу и при достаточно большой кинетической энергии ионизует изооктан. Ионизационный выход свободных зарядов на 100 эВ поглощенной энергии в жидком изооктане $G_{fi} = 0,33$ ⁸. Откуда следует, что вероятность выхода с трека одного электрона ~ 1 , если ионизирующая частица имела энергию

$\sim 100 \text{ эВ}/G_{fi} = 300 \text{ эВ}$. Эту величину можно принять за порог регистрации детектора на изооктане.

Электроны, образованные при ионизации изооктана атомом или ионом отдачи, дрейфуют во внешнем электрическом поле к границе раздела фаз и, если напряженность поля $\gtrsim 100 \text{ В/см}$, с вероятностью ~ 1 выходят из жидкости в равновесную газовую фазу, где регистрируются в пропорциональном режиме на проволочном аноде.

Таким образом, предлагаемый детектор с вероятностью ~ 1 будет регистрировать события, в которых ядро отдачи получило энергию $\gtrsim 300 \text{ эВ}$. Это позволит зарегистрировать частицы холодного темного вещества Галактики, если они обладают массой $\gtrsim 0,7 \text{ ГэВ}/c^2$.

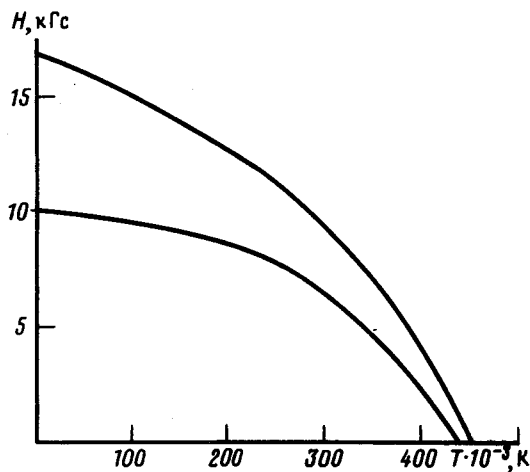


Рис. 3. Зависимость скорости счета актов рассеяния вимпов в 100 л жидкого изооктана от массы вимпов в случае когерентного рассеяния с сечением дираковского нейтрино (а), и в случае некогерентного рассеяния с сечением майорановского нейтрино (б)

Если в качестве рабочей среды использовать 100 л изооктана, то скорость счета вимпов, взаимодействующих с сечением майорановского нейтрино, составит $\sim 50 \text{ сут}^{-1}$, если их масса $1 \text{ ГэВ}/c^2$, и $\sim 20 \text{ сут}^{-1}$ при $10 \text{ ГэВ}/c^2$; скорость счета вимпов, взаимодействующих как стандартные дираковские нейтрино, составит $\sim 200 \text{ сут}^{-1}$ и $\sim 500 \text{ сут}^{-1}$ при массах $1 \text{ ГэВ}/c^2$ и $10 \text{ ГэВ}/c^2$, соответственно (см. рис. 3). Оценки, проведенные в работе ⁹, показывают, что если такой детектор поместить в условия подземной лаборатории типа Баксанской нейтринной обсерватории, окружить детектор жидким сцинтиллятором, играющим роль активной антисовпадательной защиты, а также использовать пассивную защиту в виде слоя дистиллированной воды ($\sim 1 \text{ м}$), низкофонового бетона ($\sim 0,5 \text{ м}$) и дунитового щебня ($\sim 1 \text{ м}$), то в интересующем нас энергетическом диапазоне фон не превысит 35 событий в сутки. Таким образом чувствительность установки к холодному темному веществу будет ограничена в основном порогом регистрации, то есть обеспечит возможность регистрации вимпов с массами вплоть до $\sim 0,7 \text{ ГэВ}/c^2$. Указанием на обнаруженный эффект будут вариации скорости счета на уровне $5 \div 8\%$, связанные с орбитальным движением Земли ¹⁰. Разделить эффекты от когерентного и некогерентного рассеяния частиц позволит постановка опытов с различными рабочими средами.

Литература

1. Trimble V. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1987, 25, 425.
2. Hegyi D., Olive K. App. J., 1986, 303, 56.
3. Smith P.F. Preprint RAL-86-029, apr. 1986.
4. Волошин М.Б., Окунь Л.Б., Эллис Дж. О поиске новых нейтральных частиц. Текст лекции. М.: МИФИ, 1987, с. 40.
5. Caldwell D.O., Feisberg, Grumm D.M. et al. Preprint UCSB-HEP-88-6, Univ. California, Santa Barbara, 1988.
6. Болосдыня А.И., Лебедев В.Н., Родионов Б.У. и др. ЖТФ, 1978, 48, 1514.
7. Anderson D.F., Charpak G., Holroyd R.A., Lamb D.C. NIM A, 1987, 261, 445.

8. *Schmidt W.F.* Preprint HMI-B156, BS-12, Berlin; 1974.

9. *Барабаш А.С., Болоздыня А.И.* Препринт ИТЭФ №12. М.: Атоминформ, 1989.

10. *Sprengel D.N.* Phys. Rev. D., 1988, 37, 1353.

Институт теоретической и
экспериментальной физики

Поступила в редакцию
15 февраля 1989 г.
