

ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

В.Б.Ефимов

АННОТАЦИЯ

В данной работе проводятся оценки возможности реализации проекта по увеличению концентрации ультрахолодных нейтронов (УХН) путем их термализации при рождении фононов в сверхтекучем гелии. Проблема заключается в общем тепловом потоке в сверхтекучий гелий после экранирования и термализации нейтронов при их охлаждении последовательно: свинцовым экраном, графитовым замедлителем, объемом жидкого дейтерия (собственно, который и охлаждает нейтроны до $T \approx 20$ К), такой тепловой поток минимально оцениваются в ≈ 10 – 20 Вт. Однако, принципиально высокую концентрацию УХН возможно достичь при температурах сверхтекучего гелия ниже 1 К и, соответственно, при достаточно низком давлении паров криогенных жидкостей, что и представляет собой сложную инженерную проблему с учетом возможных конструкций установки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ, СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

PROBLEM OF PRODUCTION OF ULTRACOLD NEUTRONS

V.B.Efimov

ABSTRACT

In this paper, the feasibility of implementing a project to increase the concentration of ultracold neutrons (UCN) by thermalizing them during the birth of phonons in superfluid helium is assessed. The problem lies in the total heat flux into superfluid helium after screening and thermalization of neutrons during their successive cooling: with a lead screen, a graphite moderator, and a volume of liquid deuterium (which actually cools neutrons to $T \approx 20$ K), this heat flux is minimally estimated at ≈ 10 – 20 W. However, a sufficiently high concentration of UCN can be achieved at superfluid helium temperatures below 1 K and, accordingly, at a sufficiently low vapor pressure of cryogenic liquids, which is a difficult engineering problem take into account the possible design of the facility.

KEYWORDS

ULTRACOLD NEUTRONS, SUPERFLUID HELIUM, THERMALCONDUCTIVITY, VACUUM SYSTEMS

ВВЕДЕНИЕ

Проблема накопления ультра-холодных нейтронов (УХН) является одной из фундаментальных задач нейтронной физики. УХН определяются как нейтроны, движущиеся со скоростями меньше нескольких метров в секунду, что соответствует тепловой энергии \sim мК и длине волны нейтрона в сотни ангстрем. Необычайно низкие энергии термодинамические температуры УХН определяют особенности их взаимодействия с окружающими стенками, если энергия нейтрона ниже псевдопотенциала материала стенки, то эти нейтроны отталкиваются от стенки и их можно хранить в таком объеме - нейтронном накопителе. Возможность увеличения плотности УХН с тепловой энергией \sim мК в экспериментальном объеме позволит

проводить измерения по поиску электрического дипольного момента нейтрона. Еще одна фундаментальная задача физики нейтронов связана с измерением с высокой точностью времени жизни нейтрона, что принципиально важно для понимания процессов формирования тяжелых элементов на ранних стадиях развития Вселенной [1]. С помощью УХН было показано существование квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле Земли [2].

Разрабатываемые и работающие в настоящее время источники УХН основаны на термализации нейтронов при их неупругом взаимодействии со средой. Быстрые нейтроны реактора (с энергией больше 1 МэВ) теряют энергию на возбуждение и расщепление ядер вещества среды термализации. После многочисленных столкновений с атомами и молекулами среды термализации скорость нейтронов становится сравнимой со скоростью теплового движения атомов и для нейтронов устанавливается максвелловское распределение по скоростям. При термализации при комнатной температуре, например на молекулах воды, количество нейтронов УХ диапазона скоростей составляет $N_{UCN}(T=300\text{ К}) \sim 10^{-8}$ от общего количества термализованных нейтронов. При термализации нейтронов в жидком или твердом дейтерии $N_{UCN}/N(T=19\text{ К}) \sim 10^{-6}$.

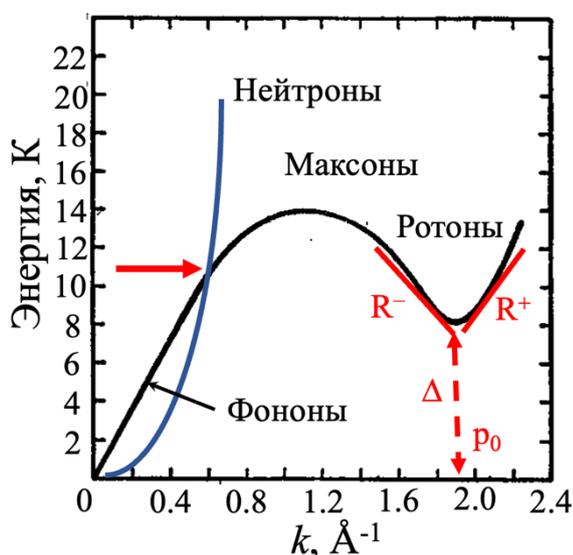


Рис. 1. Дисперсионные зависимости энергий жидкого гелия и нейтронов.

В последнее время рассматривается способ увеличения плотности УХН при взаимодействии холодных нейтронов со сверхтекучим гелием, когда нейтрон отдает почти всю свою энергию охлаждаясь до УХ состояния рождая фонон (стрелка на рис.1) На энергетическом спектре сверхтекучего гелия малым импульсам соответствуют длинноволновые возбуждения жидкого гелия (продольные звуковые волны – фононы), возбуждения, соответствующие локальному минимуму на кривой $E(k)$ были названы ротонами. Дисперсионная кривая для ротонов имеет квадратичный вид: $E(p) = \Delta + \frac{(p-p_0)^2}{2\mu}$, где Минимуму соответствует энергия $\Delta \approx 8.6\text{ К}$ и волновой импульс $k_0 \approx 1.99\text{ \AA}^{-1}$. Эффективная масса ротона $\mu = 0.26\text{ } m_{\text{He}}$ (где m_{He} – масса атома гелия-4). При взаимодействии холодного нейтрона с энергией $\approx 12\text{ К}$ с атомами гелия возможно рождение фонона, энергия нейтрона при этом может уменьшиться до мК величин. При

этом непрореагировавшие нейтроны пройдут через стенку камеры накопления, в то время как УХН будут отталкиваться от стенок камеры накопления.

Однако на дисперсионной зависимости возбуждений в сверхтекучем гелии есть особенность связанная с ротонными возбуждениями, взаимодействие с которыми переводит УХН в более энергичное состояние, что уменьшает концентрацию УХН за счет ухода ХН из сосуда накопления. Концентрация УХН будет определяться как скоростью набора таких нейтронов, так и процессами их исчезновения: собственным временем полураспада нейтронов, взаимодействием нейтронов со стенками и, в основном, процессом взаимодействия нейтронов с ротонами в сверхтекучем гелии. Вероятность таких взаимодействий можно записать как:

$$\tau^{-1} = \tau_{\beta}^{-1} + \tau_{Wall}^{-1} + \tau_{He}^{-1}$$

из которых лишь время жизни при взаимодействии с ротонами τ_{He} экспоненциально зависит от температуры. Оценки показывают, что при $T=1.25$ К время взаимодействия в ротонами составит $\tau_{He} = 30$ с, при $T=1.15$ К – 50 с и при $T=0.8$ К уже на порядок больше $\tau_{He} = 610$ с [3], что определяет желаемую температуру камеры накопления ниже 0.8 К.

Для осуществления проекта с термализацией нейтронов в сверхтекучем гелии необходимо решить несколько технических проблем в том числе передачу выделяемых тепловых потоков из камеры накопления в систему охлаждения и создание такой системы охлаждения откачкой паров гелия.

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ПРИ НАКОПЛЕНИИ УХН

Тепловые потоки к сверхтекучему гелию после всех систем тепловой защиты и последовательной термализации нейтронов: свинцовым экраном, графитовым замедлителем, объемом жидкого дейтерия (собственно, который и охлаждает нейтроны до $T \approx 20$ К) минимально оцениваются в $\approx 10-20$ Вт [4]. Измерения поведения гелиевого криостата при таких тепловых потоках ($W \approx 15$ Вт) к сверхтекучему гелию в полномасштабной технологической модели источника ультра-холодных нейтронов показало, что при максимальной откачке гелия-4 не удастся получить температуры ниже ≈ 1.3 К [5]. Для достижения требуемых в задаче температур ниже 1 К необходимо ввести в систему охлаждения посредством откачки паров гелия-3, который при этом будет стоком тепла через сверхтекучий гелий-4. Расстояние между камерой накопления УХН и камерой с ^3He должна быть разнесена на некоторое расстояние, что определяется эффективным поглощением нейтронов гелием-3. Таким образом общее тепловыделение в камере накопления (КН) УХН будет испытывать тепловое сопротивление (скачок Капицы) на поверхностях, разделяющих КН и хладопровод сверхтекучего гелия (ХСГ), и ХСГ и камеру откачки ^3He . Кроме этого в самой трубе со сверхтекучим гелием обязательно будет возникать тепловое сопротивление, определяемое турбулентностью вихревой системы гелия. Более подробно описание и оценки тепловых сопротивлений при разных режимах эксперимента можно найти в статье [6].

Высокая теплопроводность сверхтекучего гелия определяется противотоком нормальной и сверхтекучей компонент при этом сверхтекучая компонента движется к источнику тепла, нормальная от него. Кратко можно отметить, что при разумном размере трубы ХСГ ($D \approx 100$ мм) плотность теплового потока имеет порядок $0.1-0.2$ Вт/см², что превосходит величины развития турбулентности в такой трубе. При трубе длиной в несколько метров тепловое сопротивление на данном участке может быть порядка 0.2 К,

при этом стоит учесть возможность суммирования теплового сопротивления в жидкости наряду с турбулентным режимом (режим Гортра-Меллинка) также и ламинарный режим (режим Ландау) противотока нормальной и сверхтекучей компонент. К сожалению оценить величины теплового сопротивления, влияния ламинарного и турбулентного режима противотока в интересующем нас температурном интервале можно лишь экстраполируя поведение вихрей в тепловом потоке при более высоких температурах (>1.3 К), где имеются экспериментальные данные. Так что для ответа на вопрос теплопроводности сверхтекучего гелия при температурах ниже 1 К необходимы эксперименты на модельных трубках разного диаметра (1, 2 и 10 мм), что позволит определить влияние ламинарного и турбулентного режима противотока [6].

Скачок Капицы на двух металлических границах тоже по экстраполяции экспериментальных данных порядка 0.1 К. Стоит отметить, что величина скачка Капицы сильно зависит от температуры сверхтекучей жидкости, материала границы раздела и качеством его поверхности, что также требует экспериментального исследования.

Приведенные выше оценки показывают, что температура жидкого ^3He для достижения требуемых параметров камеры накопления ($T < 0.8$ К) должна быть порядка 0.5–0.6 К.

ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ОТКАЧНОЙ СИСТЕМЫ

Расчеты мощности откачной системы разделим на две части – *тестовых измерений* для определения режимов передачи тепла через сверхтекучий гелий и через металлические поверхности при скачке Капицы и предполагаемые *режимы работы установки* для получения ультра холодных нейтронов.

При откачке ^3He скрытая теплота испарения L не сильно меняется при понижении температуры жидкости. Так для $T=1.0$ К $L \approx 38$ Дж/моль, 0.8 К – 36, для 0.5 К – 30 – поэтому для оценок мы можем принять теплоту испарения в ≈ 35 Дж/моль, давление паров гелия для указанных температур будут 8.7, 2.8 и 0.16 мм рт. ст.

При тестировании элементов конструкции будем считать температурный диапазон 0.5–1.0 К. Исследование тепловых сопротивлений противотока нормальной и сверхтекучих компонент предполагается проводить до плотностей теплового потока $\dot{q} \approx 0.2$ Вт/см², что несколько превосходит оценки для работы хладопровода установки из сверхтекучего гелия. Для капилляров с сечением σ в 1 мм² максимальное тепловыделение будет $\dot{Q} \approx 2$ мВт, для капилляров с $\sigma = 3$ мм² $\dot{Q} \approx 6$ мВт и 0.2 Вт для трубки 1 см² при всех температурах.

Тепловое сопротивление поверхности, определяемое скачком Капицы, сильно зависит от температуры, свойств поверхности твердого тела. В упрощенном виде сопротивление Капицы – это коэффициент отражения от границы раздела двух тел с существенно разными скоростями фононов и, соответственно, с разными углами полного внутреннего отражения для фононов. В общем виде сопротивление Капицы металлической пластины, разделяющей два объема сверхтекучего гелия, определяется в виде соотношения $R_K = \Delta T / \dot{q}$. Сопротивление Капицы на границе жидкий гелий-металл-жидкий гелий учитывается как сумма двух сопротивлений (тепловым сопротивлением в теплопроводности материала границы двух областей сверхтекучего гелия пренебрежем), или $R_K \approx R_{K(He-Me)} + R_{K(Me-He)}$. Для оценки скачка Капицы примем константы R_K соответствующие границе полированной меди и сверхтекучего гелия $R_K(0.5\text{K})=0.024$ м²К/Вт, $R_K(0.6\text{K})=0.01$ м²К/Вт, $R_K(0.7\text{K})=0.0053$ м²К/Вт и $R_K(0.8\text{K})=0.0027$ м²К/Вт [7]. При

размере площади измерительной ячейки с \varnothing 4 см для получения разности температур $\Delta T \approx 50$ мК на двух сторонах исследуемой пластинки оценки для тепловыделения дают \dot{Q} (0.5 К) \approx 2.6 мВт, 0.6 К – 6.3 мВт, 0.7 К – 12 мВт и 0.8 К – 23 мВт.

Для поглощения тепловыделения в 1 Вт требуется откачивать $\approx 1/35$ моля ^3He в секунду, а это ~ 0.7 литра/сек газа при нормальных условиях. Проведем оценки мощности откачки для проведения тестовых измерений.

Типичная зависимость скорости откачки для форвакуумного насоса 2НВР-90Д, взятого нами для примера, приведена на рис. 2.

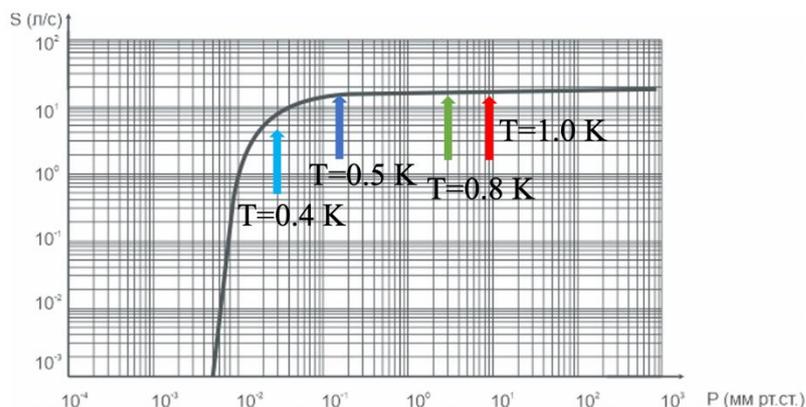


Рис. 2. График зависимости быстроты откачки от давления на входе в насос 2НВР-90Д. Стрелками указаны давления соответствующие температуре жидкого ^3He .

Производительность насоса определяется как $S=G/p$, где G – количество газа, удаляемого в единицу времени, p – давление на входе насоса. Нетрудно видеть, что $G=p*S$, т.е. при практически постоянном S , $G \sim p$. Если считать для насоса 2НВР-90Д производительность указанной на рисунке стрелками, то нагрев в 1 Вт может быть откачан этим насосом при $T \approx 1.4$ К, при более низких температурах откачиваемое тепловыделение в объеме будет резко уменьшаться (рис.3)

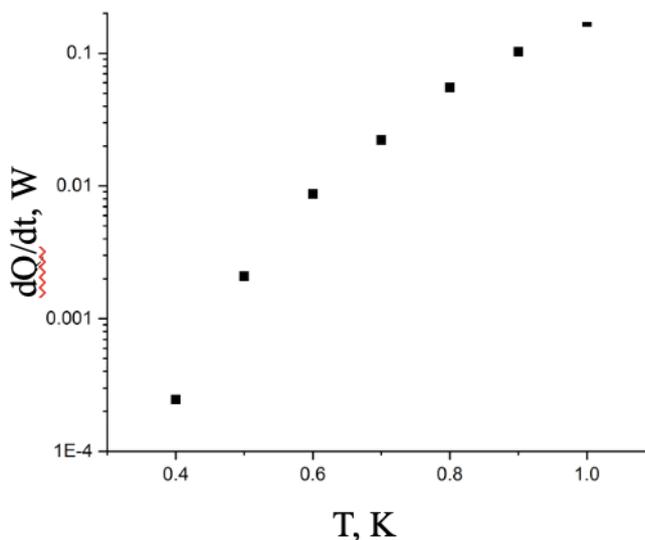


Рис. 3. Тепловыделения, которые обеспечиваются откачкой насосом 2НВР-90Д при разных температурах жидкого ^3He .

Из графика 3 можно видеть, что для многих тестовых измерений почти во всем интересующем нас диапазоне можно осуществить с помощью откачки ^3He форвакуумным насосом 2НВР-90Д. При общей мощности тепловыделения в эксперименте в 0.2 Вт такой откачкой можно достичь температуры в ≈ 1 К, но для достижения такого же тепловыделения при температуре в 0.5 К скорость откачки необходимо иметь на два порядка больше.

Если, для примера, использовать вакуумную систему RUTA WAU 2001/SP250/G (скорость откачки при давлении 0.1 мбар – $1530 \text{ м}^3/\text{час} \approx 400 \text{ л/с}$) то при $T=0.5$ К откачка справится с тепловыделением в ≈ 0.04 Вт.

РЕАЛИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ.

Если принять за величину тепловыделения в камере накопления УХН в 10 Вт, то для удаления такой мощности необходимо откачивать $\approx 1/3$ моля ^3He в секунду. Проблемы возврата такого количества гелия в камеру откачки для непрерывной работы установки, предварительного охлаждения такого потока гелия в систему, дополнительные теплопритоки по этому потоку – это отдельная проблема и здесь не рассматриваются. $1/3$ моля гелия это откачка ≈ 7 литров гелия в секунду при атмосферном давлении. Производительность насоса в ~ 5000 л/с при давлении в 0.5 мм рт. ст. позволит достичь температуры в 0.6 К в камере испарения, производительность в $\sim 1.5 \cdot 10^4$ л/с при давлении 0.16 мм рт. ст. – температуры в 0.5 К. Пара рутс с форвакуумным насосом, на пример, DRYVAC DV 650 и RUVAC WHU 2500 дают скорость откачки ≈ 700 л/с, что позволит охладить камеру откачки всего до $T \approx 0.8$ К. Можно поставить в параллель несколько таких спарок и это может решить проблему откачки. В проекте с откачкой жидкого гелия-4 [4] предполагается откачивать сверхтекучий ^4He при температуре 1.2 К, давление паров которого при этой температуре ≈ 0.6 мм рт.ст, расход гелия-4 при этом должен составлять 7.5 литра жидкости в час (скрытая теплота парообразования ^4He примерно вдвое выше чем для ^3He), скорость откачки двумя насосами $8 \text{ м}^3/\text{с}$.

При техническом решении проблемы создания реальной установки по получению УХ нейтронов возникает еще одна сложность – чисто финансовая, связанная с объемом газообразного ^3He для его конденсации в системе, объем линий возврата, система дросселирования. Стоимость гелия-3 по последним данным ≈ 2750 \$ за литр газа при нормальных условиях. При количестве газообразного гелия-3 100 литров при нормальных условиях (а это $\approx 300\,000$ \$) объем камеры испарения будет примерно 200 мл, при этом возврат гелия в систему должен происходить через 15 секунд с его полным охлаждением и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной статье оценки показывают технические проблемы на пути создания установки для резкого увеличения концентрации ультрахолодных нейтронов в охлажденном до температур ниже 1.0 К гелия-4 как термализатора нейтронов при отдаче холодным нейтроном энергии фону. Как показывают расчеты понижение температуры камеры накопления до 0.8 К может на порядок повысить количество УХН в ней за счет увеличения времени обратного процесса – взаимодействия УХН с ротонами и ухода нейтронов из ловушки.

Для достижения требуемых параметров камеры накопления необходимо экспериментально определить условия на тепловые сопротивления как разделительных

стенки установки (тепловой скачок Капицы уменьшается при увеличении площади границы раздела), так и линии хладопровода из сверхтекучего гелия-4. Уменьшение плотности теплового потока уменьшает градиент температуры между камерой накопления и камерой откачки.

Выделение мощности в 10 Вт в системе требует откачки $\approx 1/3$ моля гелия-3 в секунду, а это ≈ 7 л газа при нормальных условиях. При температуре камеры откачки в 0.5 К давление паров ^3He 0.16 мм рт.ст. и необходимая скорость откачки при этом давлении $S \sim 1.5 \cdot 10^4$ л/с, при $T=0.6$ К $S \sim 5000$ л/с и при $T=0.8$ К – $S \sim 700$ л/с.

Работа была выполнена в рамках ГосЗадания ИФТТ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Серебров А.П.*, Вест. Российской академии наук. **79**, 23 (2009)
https://www.ras.ru/publishing/raserald/raserald_articleinfo.aspx?articleid=ac2287e4-b5f7-4444-b487-3c6bb134f2f1.
2. *Nesvizhevskii V.V. et al.*, Nature, **415**, 297 (2002); <https://doi.org/10.1038/415297a>
Несвижевский В.В., УФН, **173**, 102 (2002), DOI:[10.3367/UFNr.0174.200405g.0569](https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200405g.0569)
3. *Yoshiki H., et al.*, Phys. Rev. Lett., **68**, 9, 1323 (1992),
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1323>
4. *Серебров А.П., В.А. Митюхляев, А.А. Захаров и др.*, ФТТ, **52**, 5, 969 (2010)
5. *Серебров А.П., et al.*, Журнал технической физики, 87, 2, 301 (2017),
<https://doi.org/10.21883/JTF.2017.02.44142.1941>
6. *Ефимов В.Б.* Поверхность, Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования, (2024)
7. *Лоунасмаа О.В.* Принципы и методы получения температур ниже 1 К. Москва: Мир, 1977. С. 356

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефимов Виктор Борисович – доктор физико-математических наук, ВНС, (ORCID: 0000-0002-9195-2458). Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка Московской обл.
e-mail: efimov@issp.ac.ru