

Принцип фазовой стабильности и ускорительная программа в Беркли (1945-54)

Эдвард Лофгрэн
Почетный помощник директора
Лаборатория имени Лоуренса в Беркли

Открытие принципа фазовой стабильности Владимиром Векслером и Эдвином Макмилланом и конец войны высвободили волну ускорительной деятельности в Лаборатории имени Лоуренса в Беркли (тогда Радиационной лаборатории Калифорнийского университета). Шесть ускорителей основанных на принципе фазовой стабильности были построены в период 1945-1954.

Во-первых, я напомним о состоянии с развитием ускорителей в Беркли в 1939-40, как раз перед тем, как Радиационная лаборатория, как она была известна в то время, полностью обратилась к исследованиям военного характера. Ускорителем на наивысшую энергию в Беркли, да и в мире, был только что завершённый 60-дюймовый циклотрон, который давал пучок дейтронов с энергией 16 МэВ. Лоуренс, который был на вершине своего расцвета, стал, даже перед тем как 60-дюймовый циклотрон дал свой первый пучок весной 1939 г., думать о следующем шаге к цепи ускорителей на все большую и большую энергию. Сто МэВ стали его целью. Именно такого было тогдашнее ограничение на энергию циклотрона налагаемое релятивистским ростом массы известных ионов, однако практический предел не был ясен. Предел можно было бы отодвинуть более высоким напряжением на дуантах, сетками или другими деталями геометрии на границах дуантов, или некая новая идея могла бы возникнуть. На эту тему происходил живой обмен письмами между Гансом Бете и Эдом Макмилланом. В Беркли было убеждение в том, что 1 миллионом вольт на дуантах энергия в 100 МэВ могла бы быть достигнута. Публикация Л. Х. Томаса в 1938 году о возможности обойти релятивистский предел по энергии введением азимутальной вариации магнитного поля опережала настолько основы понимания теории и практики циклотронов, что была просто пропущена [1].

Развитие ускорителей пришло в упадок в Беркли в 1940-41 с тем как ведущие персоны, включая Эвина Макмиллана и Луиса Альвареца, оставили лабораторию из-за срочной работы над радаром, сонарами и другими военными разработками. Да и сама по себе лаборатория обратилась к военным исследованиям. Магнит 184-дюймового циклотрона был завершён с высоким приоритетом в начале 1942 и превратился в узловой кусок для развития электромагнитного метода сепарации изотопов названного Калутрон.

Летом 1945, тогда как война приближалась к очевидному финалу, умы многих ученых возвратились к довоенным задачам, побужденными возросшим опытом и технологиями, приобретенными в период военных исследований. Альварец видел во множестве преимуществ радара с длинной волны 1.5 метра способ строительства линейного ускорителя электронов на 500 МэВ. Макмиллан первым думал о строительстве очень большого кольцевого бетатрона. Однако, осознавая, что это же будет за машина, он продолжил думать о резонансном ускорении.

В полном неведении относительно публикаций Владимира Векслера, он имел ту же проницательность, и быстро сформулировал принцип фазовой стабильности [2]. Он решил на электронный синхротрон на 300 МэВ как первое применение. Альварец думал, что это будет таким превосходным средством для получения высоких энергий с электронами, что его размышления переключились с электронных на протонные линейные ускорители. Все это было в Лос-Аламосе во время первых дней июля, как раз перед испытаниями бомбы на Аламогордо 16 июля 1945 г.

Правительство, помнящее о ведущей роли Лоуренса, Макмиллана, Альвареца, да и Радиационной лаборатории как учреждения исследований военного времени, было очень заинтересовано в воссоздании лаборатории как исследовательского центра мирного времени, чтобы исследовать все области связанные с атомной энергией и ускорителями. Срочное одобрение было дано программе финансирования завершения 184-дюймового циклотрона,

строительству электронного синхротрона на 300 МэВ и линейного протонного ускорителя. До войны все финансирование лаборатории было из частных фондов и отдельных персон и со много меньшим размахом.

Довоенные планы для 184-го как обычного циклотрона были возрождены и несколько больших компонентов были изготовлены. При столкновении с трудными проблемами обычного циклотрона при высоких энергиях предложение Макмиллана перепроектировать его как ускоритель с фазовой частотной модуляцией – синхроциклотрон – стало очень привлекательно. Однако, тогда считалось, что будут некоторые очень сложные проблемы. Как вы будете модулировать радиочастотную мощность? Сделают ли трудными инжекцию и вывод пучка малые промежутки между оборотами пучка? Приведет ли сравнительно медленное ускорение к чрезмерным потерям при рассеянии на газе? В совокупности, считалось, что применение автофазировки для ускорения протонов будет труднее для протонов, чем для электронов. На деле последнее обстоятельство оказалось в значительной степени верным. Соответственно было решено в начале 1946 г. построить работающую модель синхроциклотрона для доказательства принципа фазовой стабильности и найти решения ожидавшимся проблемам.

37-дюймовый циклотрон был разобран в ноябре 1941 г. и его магнит был использован для предварительной разработки Калутрона. Он вновь был преобразован для новой цели. Полюсные наконечники были увеличены до 41-го дюйма (хотя мы продолжали звать его 37-дюймовый циклотрон) и они были сужены, чтобы привести к снижению магнитного поля на 13% от центра к радиусу 18 дюймов. Это бы дало такое же уменьшение частоты вращения как и ускорение дейтронов в 184-дюймовом циклотроне с уменьшением на 10.7% спада магнитного поля соответствующего релятивистскому росту массы и на 2.3% для обеспечения аксиальной фокусировки. Модуляция высокой частоты при 2000 Гц была достигнута с помощью механически вращающегося конденсатора. С напряжением на дуантах всего в 3 кВ был быстро получен циркулирующий пучок дейтронов с энергией 7.5 МэВ и током 3 мкА. Пучок был выведен с помощью стандартного дефлектора с эффективностью 10% [3]. Мои записи напоминают мне, что первый пучок был получен в начале марта 1946 г всего три месяца спустя после начала проектирования. Насколько мне известно, это был первый ускоритель, в котором принцип фазовой стабильности стал частью проекта. Вслед за этим, высокочастотная система была модифицирована для обеспечения ускорения протонов до 15 МэВ, и пучок использовался для р-р рассеяния и других экспериментов. После двухлетней службы в Беркли ускоритель был перемещен в Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе, где на 10 лет стал центральным элементом ядерных исследований и учебных программ для студентов-выпускников. Быстрое строительство и прекрасная работоспособность 37-дюймового циклотрона не оставили сомнений, что изначальный проект 184-дюймового циклотрона должен быть отброшен, и что он должен быть завершен как синхроциклотрон. Новое проектирование и строительство началось немедленно.

Эта работа была завершена, и первое функционирование 184-дюймового синхроциклотрона было достигнуто 1 ноября 1946 г.

С очень незначительными сложностями он дал пучок дейтронов на 195 МэВ, вдвое большей энергией, чем та, которую казалось трудным добиться в то время, когда машина была только предложена. На деле Лоуренс оказался прав в своем убеждении, что если есть проблемы, то возникнет новая идея. Поздние модификации обеспечили протоны на 350 МэВ и другие ионы на 750 МэВ. Начальные годы экспериментальной программы были очень продуктивны и включали в себя первое ускорительное рождение пионов. Позже машина обеспечила пучки для пионерских медицинских программ, и в последние годы функционирования его программа была полностью медицинской.

Само здание теперь содержит в себе источник синхротронного света, а ярмо почтенного 184-дюймового магнита стоит как монумент в центре кольца.

Хотя Макмиллан имел очень важное направляющее влияние на первые синхроциклотроны, его «собственным» проектом был синхротрон на 300 МэВ. Его проектирование и строительство началось в сентябре 1945 г. Радиус орбиты был выбран в 1 метр в магните из слоистой кремниевой стали. Магнит питался от накапливающих емкостей, полученных из другого проекта военного времени. Вакуумный объем со всеми его входами и арматурой был сделан из пластмассы. Он оказался слишком пористым и был заменен

спаянным кварцевым тором. Усилия по запуску машины в действие были долгое время в тупике из-за неоднородностей малого магнитного поля при инжекции от остаточной намагниченности слоев сердечника. Первое функционирование достигалось до ноября 1948 г. [5]. Те же трудности испытывались и другими группами, пытавшимися запустить в действие синхротроны на высокие энергии, хотя синхротроны на низкие энергии были запущены еще в 1946 г.

Наиболее заметное достижение с синхротроном на 300 МэВ было открытие в апреле 1950 нейтрального пиона.

Альварец, который был убежден, что идея синхротрона занята областью ускорения электронов, собрал команду и начал проектирование линейного протонного ускорителя, как только вернулся в Беркли осенью 1945 г. Он предназначался стать прототипом первой секции ускорителя протонов на высокие энергии. Высокая частота была выбрана 200 МГц, потому что разработки радаров развили технологию и компоненты на эту частоту.

Размер имевшегося здания определил длину ускорителя в 40 футов и, следовательно, проектную энергию в 32 МэВ. Все остальное должно было быть развито. Инжекция от герметизированного Ван де Графа на 4 МэВ была на 1 МэВ выше, чем энергия пучка от любого из существовавших ускорителей такого типа.

Невозможно достичь и ускорения и фокусировки с открытыми трубками дрейфа. Первое решение, бериллиевые фольги на открытых концах дрейфовых трубок, ушло во вспышку, когда контейнер в первый раз дал искру.

Фольги были заменены вольфрамовыми сетками, и пучок проектной энергии был получен 16 октября 1947 г. Это была наивысшая энергия протонов до тех пор, пока 184-дюймовый циклотрон не был переделан, чтобы ускорять протоны. После нескольких лет работы в качестве исследовательского инструмента для производства новых изотопов и выполнения экспериментов по рассеянию линейный ускоритель Альварца был передан Университету Южной Калифорнии. Хотя этот тип ускорителей не уже был развит для достижения наивысших энергий протонов, он был использован как инжектор в каждом протонном синхротроне на высокие энергии. Он был также очень удачно приспособлен для ускорения тяжелых ионов.

Еще в 1946 го Уильям Бробек начал думать над осуществимостью протонного синхротрона, и он выполнил схематические чертежи и приблизительные оценки ускорителя на 10 БэВ (ныне ГэВ) [7]. Это потребовало бы вариации и магнитного поля и ускоряющей частоты. Эта концепция привлекла очень мало внимания до начала 1948 г. по очевидной причине, что штат лаборатории был полностью занят во всех других проектах. Тогда были дискуссии с Комиссией по атомной энергии и сотрудниками недавно образованной Брукхейвенской национальной лаборатории, в результате которых в мае 1948 г. КАЭ санкционировала работу по ускорителю на 3 БэВ в Брукхейвене и ускорителю на 6 ГэВ в Беркли. Последний стал известен как Бэватрон. Опять, как и в случае синхроциклотрона не было сомнений относительно базового принципа, однако имелось много вопросов. Какая потребуется энергия инжекции и как инжектировать? Какая потребуется апертура? Приведут ли прямолинейные промежутки к избыточным колебаниям орбиты пучка?

Также были ранее не существовавшие требования в механической и электрической технологии. Как и с синхроциклотроном в 1946 г., было принято решение о строительстве протонного синхротрона в четверть размера запланированного Бэватрона.

Радиус орбиты должен быть 12.5 фута, максимальная апертура 9.5 на 36 дюймов, соответствуя 38 на 144 дюйма полномасштабного размера. Ядро магнита было также в четверть размера, но энергетическое питание магнита обеспечивало для магнитного поля только 1000 Гаусс, давая энергию протонов 6.5 МэВ. Думалось, что большинство проблем встретятся при инжекции и в начале ускорения. Было построено два инжектора – Кокрофт-Уолтон на 500 кэВ и циклотрон на 700 кэВ.

Это отражало неопределенность относительно того, какой инжектор использовать в полномасштабной машине. Следует помнить, что линейный ускоритель протонов только становился функционирующим, и что ускорители Ван де Графа были очень хлопотными примерно свыше 4 МэВ. На самом деле, только циклотронный инжектор был использован для модели. Развитие линейного ускорителя протонов продвигалось так быстро и успешно, что линейный ускоритель с предускорителем Кокрофта-Уолтона был использован на полномасштабном Бэватроне, как и на всех последующих синхротронах.

Как я отметил ранее, мы могли продвигаться быстро в те дни, и мы получали пучок за 9 месяцев и 10 дней после принятия решения о строительстве модели [8]. Наиболее важным результатом работы стало то, что она дала основу для выбора апертуры полномасштабного Бэватрона. В начальном проекте был создан запас для возможной вертикальной апертуры в 4 фута, соответствующей энергии менее 2 БэВ.

Полюсные наконечники, уменьшающие апертуру и дающие большую энергию, могли бы быть установлены позже. Это была бы очень серьезная задержка и большие расходы. Немедленный вывод из функционирования модели состоял в том, что вертикальная апертура не должна превышать два фута, соответствуя энергии 3.7 БэВ. Планировалось увеличить энергию модели Бэватрона до 1 БэВ, устанавливая полюсные наконечники в магнит и увеличивая мощность магнита и использовать ее в исследованиях пока строится полномасштабная машина. Однако это не было сделано. Работа приостановилась в октябре 1949 г. как на модели, так и полномасштабном Бэватроне, когда лаборатория предприняла развитие ускорителя на высокие энергии с очень высоким током для производства нейтронов – проекта МГА. Однако это другая история. Модель Бэватрона была отдана Калтеху, где была превращена в электронный ускоритель на 1 БэВ и была использована в исследованиях в течении нескольких лет.

После двухлетнего перерыва, работа возобновилась на Бэватроне. Пересмотр результатов с модели вместе с работой над Космотроном в Брукхейвене, дали убеждение, что апертура может быть менее чем 2 фута. Пановски и независимо Макмиллан вычислили пороговую энергию для рождения антипротонов, и они настояли на том, что энергия Бэватрона должна быть выше порога. Соответственно, апертура была установлена в 1 фут, который соответствовал энергии 6.2 БэВ. Первое функционирование на проектной энергии был 1 апреля 1954 г. Было много технических и технологических неприятностей для преодоления с тем, как возможности ускорителя непрерывно нарастали – слишком долгая история, чтобы углубиться в нее сейчас. До начала 1960-х он был одним из наиболее продуктивных ускорителей на высокие энергии, и с тем, как он был превзойден несколькими ускорителями на более высокие энергии в мире, можно было бы увидеть конец.

Однако это не было концом, Бэватрон был превращен в уникальный ускоритель тяжелых ионов на высокие энергии, Бевалак, инъекцией ионов от существующего ускорителя тяжелых ионов (Хайлак). Он был способен ускорять ионы любого элемента до энергии 1 ГэВ на нуклон. Он поддержал множество программ в ядерной физике, физике космоса, биологии, медицинских исследованиях и клинической медицине.

В конце концов, после 38 лет и 10 месяцев очень продуктивного функционирования Бэватрон был остановлен в феврале 1993 г., не из-за нехватки возможностей или хороших программ, а из-за нехватки финансирования его работы.