

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ.
ЧАСТЬ 8: СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Наведено короткий науково-історичний нарис з всесвітньої історії створення прискорювачів заряджених частинок, що знайшли широке застосування в ядерній фізиці і фізиці високих енергій.

Приведен краткий научно-исторический очерк из всемирной истории создания ускорителей заряженных частиц, нашедших широкое применение в ядерной физике и физике высоких энергий.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительная техника в мире зародилась в конце 20-х годов 20-го столетия [1]. Наступило то время, когда элементарные частицы, испускаемые природными радиоактивными материалами (например, радием Ra , ураном U , торием Th и др. [2]) уже не могли удовлетворить все более возрастающие научно-технические потребности физиков и радиохимиков, активно изучающих атомы, молекулы и их ядра. Кстати, в физике под элементарными частицами понимают большую группу мельчайших материальных частиц, в которую не входят такие сложные микрообразования как атомы и их ядра [3]. Проведение новых опытов, направленных на более углубленное изучение микростроения вещества на нашей планете, требовало иметь в физическом микроинструментарии физиков-ядерщиков высокоэнергетичные частицы. В 1919 г. выдающийся английский физик Эрнест Резерфорд (1871-1937 гг.) одним из первых в мире высказал идею об искусственном ускорении заряженных элементарных частиц, предназначенных для осуществления ядерных реакций [1]. Так в науке и технике сформировалось представление о необходимости начала разработки и создания в указанные годы прошлого века новой специальной техники для проведения сложных и высокоточных ядерно-физических экспериментов – ускорителей элементарных частиц.

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ

Прежде всего, следует отметить, что физика элементарных частиц изучает законы микромира на расстояниях S порядка и меньше ядерных размеров, то есть для $S \leq 10^{-15}$ м [3]. Поэтому физический инструментарий для изучения закономерностей, характерных для объектов микромира на таких расстояниях, должен иметь свои геометрические размеры такого же, а лучше меньшего порядка. Человечество обладало и обладает в настоящее время только единственным подобным микроинструментарием – элементарными частицами. Причем, в современных условиях развития ядерной физики нам надо обладать такими элементарными частицами, которые ускорены до огромных скоростей и соответственно имеют огромные энергии W_p . В этой связи физика элементарных частиц тесно связана с физикой высоких энергий. Какими же величинами энергии W_p должны при этом обладать подобные частицы? Ответ на этот простой вопрос кроется в весьма сложных закономерностях квантовой физики. Из волновой механики известно,

что для ультрарелятивистской элементарной частицы $W_p = h \cdot c / \lambda$ [3], где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; λ – длина волны ускоряемой частицы. Кроме того, при $\lambda = S$ согласно соотношению неопределенности Гейзенберга в данном случае имеем, что $W_p \cdot S \geq h \cdot c / (4\pi)$ [3]. Тогда в соответствии с приведенными соотношениями получаем, что в микромире для расстояний $S \leq 10^{-15}$ м энергия зондирующих его с области макромира научным исследователем при помощи внешних элементарных частиц и эффективно “изучающих” его таким физическим путем должна удовлетворять следующему неравенству: $W_p \geq 10^8$ эВ, то есть величина энергии W_p для рассматриваемых элементарных частиц, ускоряемых в том или ином типе ускорителя заряженных частиц (УЗЧ), должна быть не менее 100 МэВ. Напомним читателю, что указанная выше внесистемная единица энергии 1 эВ составляет примерно $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж [3]. Здесь следует указать, что в современной физике элементарных частиц общепринята их следующая классификация [1, 3]: 1. **Векторные (калибровочные) бозоны**, включающие частицы-переносчики различных ядерных взаимодействий (фотоны – обеспечивают электромагнитное взаимодействие; глюоны – определяют сильное взаимодействие; гравитоны – обеспечивают гравитационное взаимодействие и экспериментально пока никем не обнаружены); 2. **Лептоны**, имеющие полуцелый спин и включающие частицы-фермионы, которые не участвуют в сильном взаимодействии (электроны; позитроны; нейтрино; антинейтрино; мюоны; антимюоны и др.); 3. **Мезоны**, включающие нестабильные частицы, участвующие в слабых и сильных взаимодействиях (пионы; каоны; очарованные мезоны; прелестные мезоны); 4. **Барионы**, имеющие полуцелый спин, являющиеся фермионами и участвующие в сильных ядерных взаимодействиях (протоны; нейтроны; гипероны). Физикам-ядерщикам известно, что все барионы, за исключением заряженных положительным элементарным электричеством протонов, нестабильны. Так как барионы и мезоны обладают в микромире сильным взаимодействием, то по этому признаку ученые-ядерщики объединили их в одну большую группу элементарных частиц и которую назвали термином **адроны** [3].

2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Первой открытой в 1886 г. элементарной частицей стал **протон** (p), обнаруженный в канальных лучах электроразрядной трубки немецким физиком Эу-

геном Гольдштейном (1850-1930 гг.) [1, 4]. Существование в ядрах атомов этой частицы, являющейся носителем элементарного положительного заряда, было экспериментально подтверждено и Э. Резерфордом в 1919 г. в его опытах по их бомбардировке α -частицами (ядрами атома изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$) [3]. Второй открытой в 1897 г. английским физиком Джозефом Томсоном (1856-1940 гг.) частицей оказался **электрон** (e^-) – носитель элементарного отрицательного заряда (Нобелевская премия по физике за 1906 г.). Он также как и протон был обнаружен в хорошо откачанной электропроводной трубке [3, 4]. В 1932 г. известным английским физиком Джеймсом Чэдвиком (1891-1974 гг.) был открыт **нейтрон** (n), лишенный суммарного электрического заряда [3, 4]. Экспериментальные подтверждения существования кванта электромагнитного излучения – **фотона** (γ) были даны известными американскими физиками: в 1915 г. Робертом Милликеном (1868-1953 гг.) и в 1922 г. Артуром Комптоном (1892-1962 гг.) [3]. В 1932 г. в космических лучах американским физиком Карлом Андерсоном (1905-1991 гг.) был обнаружен несущий элементарный положительный заряд **позитрон** (e^+), масса которого равнялась массе электрона m_e [3]. Позитрон явился первой открытой античастицей (Нобелевская премия по физике за 1936 г.) [3, 5]. В 1936 г. при изучении космических лучей американскими физиками К. Андерсоном и Сетом Неддермейером (1907-1968 гг.) были открыты частицы обоих электрических зарядов с массой около $200 \cdot m_e$, названные **мюонами** (μ^+ , μ^-) [3, 5]. В 1947 г. английским физиком Сесилем Пауэллом (1903-1969 гг.) также в космических лучах были обнаружены частицы – кванты сильного взаимодействия, получившие название **пионов** (π^+ , π^-) [3]. В 50-х годах прошлого столетия в космических лучах были выявлены странные частицы с необычными свойствами – **мезоны** (K^+ , K^-), за которые С. Пауэлл в 1951 г. стал Нобелевским лауреатом по физике, и **гипероны** (Λ) [3]. В 1953 г. американским физиком Клайдом Коуэном (1919-1974 гг.) было открыто **электронное нейтрино** (ν_e) [3]. С 50-х годов 20-го века УЗЧ стали основным физическим инструментом для исследования различных свойств и взаимодействий элементарных частиц. С помощью УЗЧ были открыты [1, 3]: в 1955 г. **антипротон** (\bar{p}); в 1956 г. **антинейтрон** (\bar{n}); в 1960 г. **анти-сигма гипероны** ($\bar{\Sigma}^\pm$); в 1962 г. **мюонное нейтрино** (ν_μ); в 1964 г. **омега-минус гипероны** ($\bar{\Omega}$). В 1975 г. с помощью сложных ядерных экспериментов на УЗЧ были обнаружены частицы, представляющие собой аналог тяжелого электрона и мюона – **т-лептоны** [3], а в 1977 г. – тяжелые **Y-частицы** с массой порядка $10 \cdot m_p$, где m_p – масса протона, равная около $1836 \cdot m_e$ [3]. В 1981 г. физиками стали известны **прелестные мезоны** (B^+ , B^-), а в 1983 г. – **векторные бозоны** (W^\pm) [3]. К концу 20-го столетия в области физики высоких энергий было известно свыше 350 элементарных частиц [1, 3].

3. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ПЕРВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В 1927-1928 гг. в Кавендишской научной лаборатории Э. Резерфорда известный английский физик

Томас Аллибон (1903-2003 гг.) осуществил первые успешные эксперименты по получению ускоренных высоким электрическим напряжением в хорошо откачанной электронной лампе релятивистских электронов. В 1925 г. известный шведский физик Густав Изинг (1883-1960 гг.) предложил конструкцию линейного резонансного ускорителя частиц. Кроме того, этот ученый выдвинул две основные идеи не-прямых методов их ускорения: первая – многократное использование для этого одной и той же сравнительно небольшой разности высоких электрических потенциалов между металлическими электродами УЗЧ; вторая – синхронизм между появлением ускоряемой частицы в ускоряющей промежутке УЗЧ и ускоряющего электрического поля в нем. В 1928 г. первые успешные эксперименты на линейном резонансном ускорителе частиц выполнил известный норвежский физик Рольф Видероз (1902-1996 гг.). В этом же г. он опубликовал разработанную им в 1927 г. идею по разработке циклического индукционного ускорителя электронов – бетатрона, в котором электроны ускоряются переменным электрическим полем, которое создается переменным магнитным полем [3, 5]. В 1928 г. им был создан первый линейный резонансный ускоритель с двумя ускоряющими промежутками и разработана его приближенная теория. В 30-е годы ушедшего 20-го столетия с его активным участием был построен мощный бетатрон на энергию ускоряемых электронов до 15 МэВ. В 1943 г. он первым выдвинул идею об использовании в УЗЧ встречных пучков заряженных частиц, то есть идею о создании коллайдера. В 1931 г. известным американским физиком Ван де Граафом (1901-1967 гг.) был разработан и под его научным руководством построен электростатический ускоритель заряженных частиц прямого действия (генератор Ван де Граафа), принцип действия которого был им выдвинут в 1929 г. [1, 6]. К 1933 г. он спроектировал и создал для ускорения протонов электростатический генератор на постоянное электрическое напряжение мегавольтного диапазона с диаметром металлических электродов-сфер в 4,5 м. В 1932 г. известные английские физики Джон Кокрофт (1897-1967 гг.) и Эрнест Уолтон (1903-1995 гг.), применив в УЗЧ, получившим в истории физики название ускорителя по схеме Кокрофта-Уолтона, каскадный метод повышения постоянного электрического напряжения до уровня 0,8 МВ, получили ускоренные протоны до энергии 1 МэВ [1, 4]. С их помощью они в апреле 1932 г. первыми в мире на УЗЧ с искусственно ускоренными элементарными частицами-протонами осуществили расщепление ядра изотопа лития ${}^7_3\text{Li}$ на два разлетающихся с энергией около 8,5 МэВ ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$ (на две α -частицы) [1, 4, 5]. За данное пионерское научное исследование в области ядерной физики они в 1951 г. стали лауреатами престижной Нобелевской премии по физике. Сохраняя историческую хронологию событий, отметим, что в октябре 1932 г. советскими физиками (Вальтером А.К., Синельниковым К.Д., Лейпунским А.И. и Латышевым Г.Д.) в Украинском физико-техническом институте (ныне ННЦ "ХФТИ" НАН Украины, г. Харьков) было впервые в бывшем СССР осуществлено расщепление легкого

ядра указанного изотопа щелочно-земельного лития ${}^7_3\text{Li}$ искусственно ускоренными протонами до энергии 2,5 МэВ [1, 4]. Данный общепризнанный и авторитетный во всем научном мире институт (ХФТИ) со своим мощным линейным ускорителем электронов и другими мощными установками ускорительной техники и поныне является ведущим национальным научным центром Украины в области физики высоких энергий.

Укажем здесь и то, что в 1931 г. выдающимся американским физиком Эрнестом Лоуренсом (1901-1958 гг.) был создан циклический резонансный ускоритель частиц – циклотрон с диаметром полюсных магнитных наконечников 0,28 м на энергию ускоряемых протонов в 1,2 МэВ [1, 4]. За данную пионерскую научно-техническую разработку Э. Лоуренсу в 1939 г. была присуждена Нобелевская премия по физике. Он явился инициатором использования ускоренных в УЗЧ частиц в медицине для борьбы со злокачественными опухолями. За научные заслуги в области мощной ускорительной техники и ее применение при исследовании структуры различных атомов и трансмутаций ряда химических элементов в его честь был назван открытый американскими учеными 103-й химический элемент в периодической системе Д.И. Менделеева – лоуренсий [3, 7]. Отметим, что первый большой циклотрон в Европе был построен в бывшем СССР только в 1937 г. под научным руководством российского физика Льва Мысовского (1888-1939 гг.) в Радиевом институте (г. Ленинград) [1, 5]. На рис. 1 приведена упрощенная классическая принципиальная схема ускорения заряженных частиц в циклотроне.

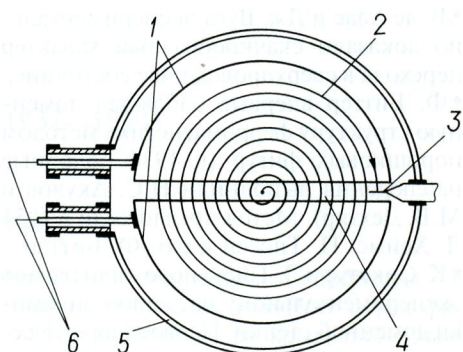


Рис. 1. Схематическое изображение кругового движения ускоряемых в вакуумной камере циклотрона заряженных частиц (1 – коробчатые дуанты; 2 – траектория частицы; 3 – ядерная мишень; 4 – ускоряющий промежуток; 5 – корпус вакуумной камеры; 6 – металлические электроды для подачи на дуанты переменного электрического напряжения) [1]

Согласно рис. 1 заряженные частицы, выпущенные с их источника в центральной зоне УЗЧ, из-за действия на них электродинамической силы Лоренца, обусловленной нормально направленной к плоскости циклотрона напряженностью постоянного магнитного поля между полюсными магнитными наконечниками, приобретают круговое движение по разворачивающейся спирали. Пролетая в вакуумном ускоряющем промежутке между полыми металлическими дуантами дисковой формы, ускоряемые частицы из-за разности электрических потенциалов между этими дун-

тами и соответственно действия на них напряженности электрического поля приобретают дополнительную кинетическую энергию. Частота ускоряющего электрического поля при этом совпадает с частотой обращения частицы в циклотроне (условие резонансного ускорения) [1, 3, 5]. Чем большей становится их скорость на круговой траектории – тем большим становится и радиус их орбиты. Ускорившись до максимальной энергии, они устремляются на ядерную мишень 3 (объект испытаний, см. рис. 1). Циклотроны, предназначенные для ускорения ультрарелятивистских электронов, получили название микротронов [5].

В предвоенные годы в Ленинградском физико-техническом институте под научным руководством доктора физ.-мат. наук Игоря Курчатова (1903-1960 гг.) активно велись работы по созданию в СССР более мощного чем в Радиевом институте циклотрона с диаметром полюсных магнитных наконечников в 1,2 м [1, 4]. Руководство советской науки и наши ведущие физики-ядерщики прекрасно понимало необходимость создания мощной технической базы для отечественной ядерной физики. Запуск его в опытную эксплуатацию планировался на январь 1942 г. Вторая мировая война эти важные научно-технические планы советских ученых перечеркнула полностью и отодвинула их назад на многие потерянные для науки годы.

При создании в мире мощных циклотронов ученые столкнулись с проблемой рассогласования в них процесса ускорения элементарных частиц. Из-за возрастания в циклотроне скорости ускоряемой частицы происходило возрастание ее массы, что приводило к ее торможению, начиная с определенных скоростей. Такое положение приводило к наступлению предела по достигаемой скорости для ускоряемой частицы и соответственно к ограничению ее энергии. Данная острая для УЗЧ научная задача была успешно решена известным советским физиком Владимиром Векслером (рис. 2) в 1944 г. [1, 4]. Независимо от В.И. Векслера эта важная задача для циклотронов была в 1945 г. разрешена и известным американским физиком Эдвином Мак-Милланом (1907-1991 гг.) [1, 4].



Рис. 2. Известный российский физик-ядерщик, академик АН СССР Владимир Иосифович Векслер (1907-1966 гг.)

Этими учеными, оставившими заметный след в физике и технике высоких энергий, были предложены оригинальные методы автофазировки и компенсации увеличения массы ускоряемых в циклотроне частиц [1, 4]: первый – за счет постепенного изменения по мере кругового ускорения частицы в УЗЧ частоты ускоряющего электрического поля в ускоряющем про-

межутке между дуантами УЗЧ; второй – за счет постепенного изменения в процессе ускорения частицы величины напряженности постоянного магнитного поля электромагнита УЗЧ, раскручивающего траекторию ускоряемой частицы. В 1954 г. в г. Беркли (США) вступил в строй протонный синхрофазотрон (бэватрон) на энергию ускоряемых положительно заряженных частиц-протонов в 6,3 ГэВ (рис. 3). Авторами разработки этого мощного УЗЧ была группа американских ученых во главе с упомянутым выше физиком-ядерщиком Э. Мак-Милланом, ставшим лауреатом Нобелевской премии по химии за 1951 г. [1].

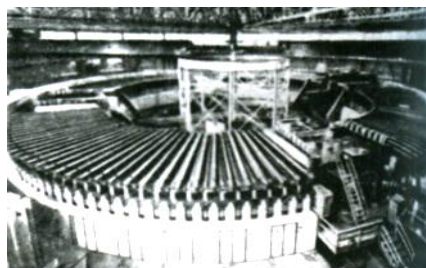


Рис. 3. Внешний вид Берклиевского протонного синхрофазотрона (США) на энергию ускоряемых частиц в 6,3 ГэВ [1]

В 1957 г. в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, СССР) был запущен в работу один из самых мощных на то время протонный синхрофазотрон на энергию ускоряемых частиц в 10 ГэВ (рис. 4). Определяющая роль в научно-технической разработке и создании этого УЗЧ принадлежит российскому физика В.И. Векслеру (Ленинская премия за 1959 г.) [1, 8]. Под руководством В.И. Векслера в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) закладывались основы разработки и сооружения первых советских синхрофазотронов, предназначенных для ускорения электронов (синхротронов) и протонов [1, 8]. В период с 1945 по 1957 годы им по существу создавались в СССР основы новой области науки и техники – физики частиц высоких энергий.

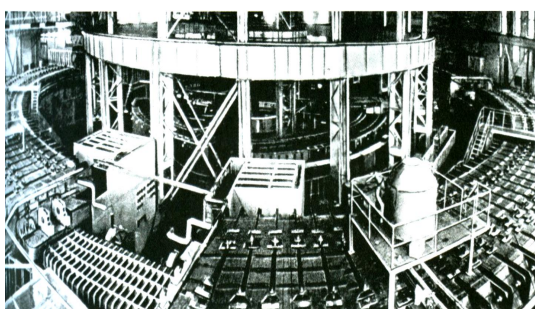


Рис. 4. Внешний вид Дубненского протонного синхрофазотрона (Россия) на энергию ускоряемых частиц в 10 ГэВ [1]

Отметим, что согласно [9] термин "синхрофазотрон" (происходит от греч. слова "synchronos" – "одновременный" плюс "фазотрон") означает мощную электроустановку для ускорения протонов до огромных энергий порядка ГэВ, в которой протоны ускорятся высокочастотным электрическим полем изменяющейся в процессе их ускорения частоты, а стабилизация их круговых орбит достигается вследствие возрастания индукции постоянного магнитного поля.

В 1958 г. В.И. Векслером было сделано сенсационное научное сообщение на Женевской международной конференции по мирному использованию атомной энергии об создании в СССР Дубненского протонного синхрофазотрона на энергию частиц в 10 ГэВ [1, 8]. Великий датский физик-теоретик Нильс Бор (1885-1962 гг.) [10], побывавший на этом циклическом резонансном ускорителе протонов, стоя рядом с В.И. Векслером на смотровой площадке над огромным электромагнитом этого ускорителя (см. рис. 4), сказал [8]: "Чтобы задумать и построить такое сооружение, нужна была очень большая смелость". Недостатки линейных ускорителей частиц (электрический пробой изоляционных промежутков в ускорительной трубе при сверхподъеме высокого напряжения и др.) заставляли ученых искать новые пути для увеличения энергии частиц. С конца 50-х годов 20-го века центр тяжести научных интересов советских физиков-ускорительщиков во главе с В.И. Векслером в области ускорительной техники от традиционных методов ускорения частиц переместился в область их ускорения за счет плазменных эффектов и взаимодействия одних коллективов ускоряемых частиц с другими [1, 8]. С этого времени в СССР и мире стали активно развиваться новые плазменные и коллективные методы ускорения в УЗЧ элементарных частиц [1, 8].

В 1967 г. в г. Станфорде (США) вступил в строй сверхмощный линейный ускоритель электронов на их выходную максимальную энергию до 21 ГэВ [1]. Отметим, что на Станфордском линейном ускорителе электронов (рис. 5) с длиной ускорительной трубы в 2 мили (около 3200 м) была достигнута рекордная на тот период энергия W_p ультрарелятивистских электронов в 21 ГэВ (0,021 ТэВ) [3]. Этой энергии соответствовала длина волны λ_e ускоренного ультрарелятивистского электрона, равная примерно 10^{-17} м.



Рис. 5. Общий панорамный вид сверху на Станфордский сверхмощный линейный ускоритель электронов (США) с их выходной энергией до 21 ГэВ [1]

Заметим, что в линейном ускорителе электронов ускорительная труба с высоко откакумированным внутренним объемом (с вакуумом порядка 10^{-6} мм рт.ст.) состоит из множества полых тонкостенных круглых металлических цилиндров различной длины, расположенных на определенном расстоянии друг от друга вдоль одного прямолинейного направления – продольной оси ускорителя [4, 5]. К данным цилиндрам подводится переменное высокое электрическое напряжение, частота которого строго согласовывается

с длиной этих цилиндров и временем прохождения внутри них ускоряемого пучка (сгустка) электронов.

В 1959 г. в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (на франц. языке *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, CERN, Швейцария) был создан УЗЧ на энергию ускоряемых протонов до 28 ГэВ [1]. К этому времени в мире были выполнены первые научно обоснованные разработки УЗЧ на встречных электронных пучках (электронных коллайдеров), в которых за счет встречных столкновений ускоряемых элементарных частиц получается большой выигрыш по энергии.

Одной из важных причин успешного создания в УФТИ (г. Харьков) и других научных центрах бывшего СССР ускорительной техники оказалось то, что здесь в 30-е годы 20-го столетия под научным руководством известного украинского физика Кирилла Синельникова (1901-1966 гг.) впервые в СССР были созданы высокопроизводительные вакуумные диффузионные паромасляные насосы [4, 5]. Кстати, данные вакуумные насосы (с производительностью до 1000 л/с) разработки харьковских ученых были успешно использованы и при реализации доселе невиданной в мире по своим масштабам научно-промышленной эпопеи в рамках Атомного проекта СССР для создания ядерного оружия в составе технологических комплексов предприятий атомной промышленности по разделению изотопов ядерных материалов [11, 12].

4. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

С конца 60-х и начала 70-х годов 20-го столетия в мире стали энергично развиваться новые методы ускорения сгустков элементарных частиц [1, 8]: по схеме обдува их плазмой или электронным пучком; их радиационное ускорение (за счет воздействия на них светового давления); их ударное ускорение; ускорение ионных сгустков релятивистскими электронными кольцами и др. Новые технические возможности для развития коллективных методов ускорения частиц до сверхвысоких энергий появились у физиков в связи с созданием импульсных сверхсильноточных электронных ускорителей [13, 14], способных выступать в качестве инжектора синхрофазотронов. Здесь следует отметить, что импульсный ток таких мощных электронных ускорителей мог достигать своей амплитуды до 1 МА при его длительности до 10 нс [4, 13].

В 1967 г. вступил в строй сверхмощный Серпуховский протонный синхрофазотрон (СССР) на энергию ускоряемых частиц до 76 ГэВ [1]. В современном ряду супермощных УЗЧ следует указать и релятивистский коллайдер тяжелых ионов RHIC на энергию не менее 33 ГэВ [1], работающий в Брукхейвенской научной лаборатории (США). На рис. 6 приведен общий вид американского сверхмощного ускорителя "Тэватрон" Национальной лаборатории ядерных исследований им. Э. Ферми [1]. Начиная с 1985 г., ускоритель "Тэватрон" (США), работающий на встречных пучках ускоренных протонов, до 2010 г. оставался наиболее мощным в мире УЗЧ. Этот протон-антипротонный коллайдер-рекордсмен обладает энергией ускоряемых элементарных частиц до 1 ТэВ.

Укажем, что в подземном туннеле Европейского центра ядерных исследований CERN (Швейцария) на глубине около 100 м с конца 1995 г. размещалось ускорительное кольцо длиной около 27 км Большого электронно-позитронного коллайдера LEP, имевшего энергию 104 ГэВ на пучок против 14000 ГэВ у размещенного сейчас там современного Большого адронного коллайдера LHC [16]. Дальнейшие мировые разработки в области ускорительной техники показали, что новые успехи в физике высоких энергий оказались тесно связанными с протонными коллайдерами.



Рис. 6. Панорамный вид с высоты птичьего полета на кольцо гигантского ускорителя "Тэватрон" Национальной лаборатории ядерных исследований им. Э. Ферми (США) [15]

5. СОВРЕМЕННАЯ ВЕРШИНА УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ – БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

Данный тип ускорителя элементарных частиц (на англ. языке *Large Hadron Collider* – аббревиатура ЛНС, а на русском сокращенно БАК – Большой адронный коллайдер) является ускорителем заряженных частиц на встречных пучках. Большим он назван из-за своих размеров – длина основного ускорительного кольца ускорителя составляет около 27 км (если точно, то 26659 м [16]). Адронным он назван из-за того, что он ускоряет **адроны**, то есть элементарные частицы, состоящие из трёх кварков (протоны и др.), а коллайдером (от англ. слова "*collide*" – "*сталкиваться*") [9] – из-за того, что пучки этих частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специально отведенных для этого местах большого ускорительного кольца, где и располагаются огромные детекторы элементарных частиц. БАК предназначен для электромагнитного разгона протонов и тяжёлых ионов (например, ионов свинца) до скоростей, приближающихся к скорости света в вакууме, и изучения продуктов их встречных соударений. Данный коллайдер построен в Европейском центре ядерных исследований CERN на границе Швейцарии и Франции недалеко от г. Женевы. БАК на сегодня является самой крупной исследовательско-экспериментальной электроустановкой мира. Руководитель международного проекта по созданию БАК – физик-ядерщик Лин Эванс. В разработке и строительстве БАК с 2001 г. участвовали более 10 тысяч учёных и инженеров из более чем 100 стран мира. Ориентировочная стоимость сооружения БАК – около 4,65 млрд. английских фунтов стерлингов [16]. Он будет являться самым большим УЗЧ в мире. БАК позволит получать новую информацию об элементарных частицах и силах, действующих в космическом пространстве нашей Все-

ленной. Ученые надеются, что БАК позволит воспроизвести физические условия, близкие к имевшим место после "Большого взрыва", породившего согласно принятой в научном мире гипотезе нашу Вселенную. По мнению некоторых ученых (например, доктора физ.-мат. наук, проф. Арефьевой И., Математический институт им. Стеклова РАН, г. Москва), когда энергия БАК сконцентрируется на субатомной частице с "тканью" Вселенной, которую ученые называют "пространство-время", могут произойти весьма странные вещи и эта "ткань" может измениться. Это может привести к рождению первой в мире "машины времени" [17]. Предполагается, что благодаря БАК физики-ядерщики смогут проникнуть внутрь материи так глубоко, как никогда ранее. В сентябре 2008 г. состоялся пробный и неудачный запуск части ускорительного кольца БАК, а в ноябре 2009 г. – удачный запуск всего кольца коллайдера. В 2010 г. энергия ускорительного кольца БАК, содержащего множество последовательно соединенных между собой с высокой точностью отдельных прямолинейных цилиндрических секций (элементов) его сверхпроводящей магнитной системы (рис. 7), была доведена до 3,5 ТэВ.



Рис. 7. Внешний вид устанавливаемого в ускорительное кольцо большого адронного коллайдера элемента его магнитной системы (2006 г., CERN, Швейцария) [16]

Следует заметить, что 1624 цилиндрических элемента этой сверхпроводящей магнитной системы используются в БАК для удержания, коррекции и фокусировки протонных пучков на пути их ускорения. На рис. 8 приведена внутренняя часть одного из элементов сверхпроводящей магнитной системы БАК, находящегося в лабораторном помещении в процессе своего изготовления. Эта сложная система сверхпроводящих магнитов, предназначенная для удержания ускоряемых пучков протонов на заданной круговой траектории, создает в зоне этих пучков сильное постоянное магнитное поле с индукцией порядка 10 Тл [18]. Это поле примерно в 200 тысяч раз превышает уровень индукции постоянного магнитного поля Земли [19].

Отметим, что ускорительное кольцо БАК расположено на глубине в среднем 100 м (кольцо подземного туннеля БАК наклонено примерно на 1,4 градуса – процента относительно поверхности земли) и содержит в системе охлаждения сверхпроводящих обмоток своей магнитной системы (см. рис. 8) около 120 тонн жидкого гелия с температурой 4,22 К. Величина постоянного электрического тока в его сверхпроводящих обмотках составляет до 10 кА. Потребляемая

мощность БАК достигает до 180 МВт. Согласно [18] работы на коллайдере первоначально будут связаны с изучением встречного столкновения двух пучков протонов с суммарной энергией до 14 ТэВ на один протон. Эта энергия оказывается в миллионы раз больше той энергии, которая выделяемая в единичном акте термоядерного синтеза [3, 12]. Кроме того, далее на БАК предполагается проводить ядерные эксперименты с ускоренными ядрами свинца, сталкивающимися при энергии до 1150 ТэВ [18]. Изучая результаты таких столкновений, ученые-ядерщики надеются получить новые данные о строении материи. Чем больше столкновений удастся зафиксировать, тем больше шансов, что они столкнутся с наступлением новых уникальных событий, например, с рождением новых элементарных частиц.



Рис. 8. Внешний вид сверхпроводящей обмотки элемента магнитной системы ускорительного кольца большого адронного коллайдера (2006 г., CERN, Швейцария) [16]

На рис. 9 приведен общий вид одного из выходов ускорительного кольца БАК, в зоне которого будут осуществляться эти столкновения встречных пучков ускоренных практически до световой скорости протонов. Для регистрации результатов столкновения протонных пучков в ускорительном кольце БАК предусмотрены шесть огромных детекторов элементарных частиц [18], основными из которых являются "ATLAS" (рис. 10) и "CMS" (рис. 11).

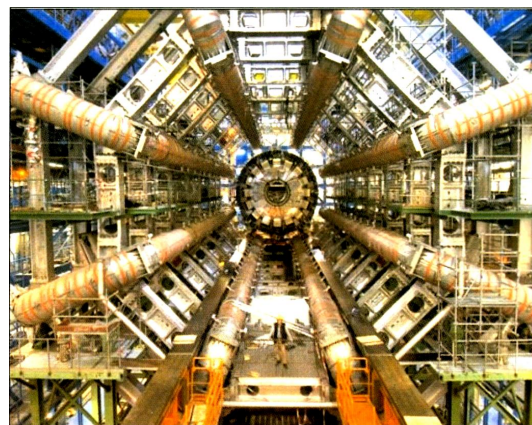


Рис. 9. Внешний вид выхода ускорительного кольца в зоне размещения детектора частиц "ATLAS" большого адронного коллайдера (2005 г., CERN, Швейцария) [17]

Частота столкновений встречных пучков ускоренных протонов в этих огромных детекторах БАК составляет до 800 раз в секунду. Скорость съемки в этих детекторах элементарных частиц БАК достигает 40 млн. кадров/с. Массогабаритные показатели указанных детекторов БАК просто поразительны. Например, вес элементов детектора "ATLAS" составляет около 7 тыс. тонн. Диаметр детектора "CMS" – 24 м.

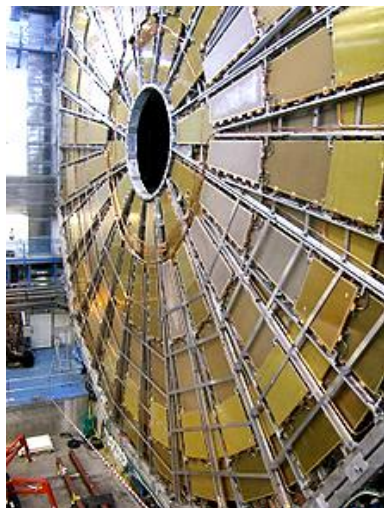


Рис. 10. Внешний вид универсального детектора элементарных частиц "ATLAS" большого адронного коллайдера (2006 г., CERN, Швейцария) [18]



Рис. 11. Внешний вид универсального детектора элементарных частиц "CMS" большого адронного коллайдера (2006 г., CERN, Швейцария) [18]

Объем помещения шахты (подземной каверны в горных породах) под детектор "CMS" составил свыше 200 тысяч м³. Шесть лет ушло на создание только одного такого огромного подземного помещения (зала) БАК под универсальный детектор "CMS". Укажем, что около 15 лет потребовалось специалистам на разработку и сооружение для БАК универсальных детекторов элементарных частиц "ATLAS" и "CMS" [18].

Детектор "CMS" ускорителя БАК (см. рис. 11) – один из двух универсальных детекторов в ускорительном кольце БАК. Полюсный наконечник электромагнита этого детектора имеет диаметр до 11 м, а вес электромагнита детектора "CMS" составляет 280

тонн. Предназначен он для обнаружения широкого круга новых частиц и явлений в протон-протонных и ядро-ядерных столкновениях микро вещества при высоких энергиях. С его помощью в БАК надеются измерить свойства известных частиц с беспрецедентной до сих пор точностью, а также вести поиск совершенно новых непредсказуемых физических явлений и элементарных частиц. Подобные научные исследования помогут человечеству углубить свое понимание материи нашей Вселенной и путей ее происхождения.

Отметим тот один интересный для любознательного читателя факт, что кинетическая энергия всех сгустков частиц-адронов в БАК при полном заполнении ими его ускорительного кольца (около 2800 шт. сгустков в каждом встречном пучке протонов) сравнима с кинетической энергией современного реактивного самолета. Данные сгустки микро вещества проходят (пролетают) один полный круг этого супермощного ускорителя протонов длиной около 27000 м примерно за 100 мкс, то есть совершают около 10 тысяч оборотов в секунду [18]. В то же время масса всех ускоренных частиц-протонов при этом не будет превышать одного нанограмма вещества [18]. Эти ускоренные в БАК микро частицы-адроны даже нельзя будет увидеть невооруженным человеческим глазом. Такая огромная энергия (до 14 ТэВ) в БАК достигается за счёт колоссальной скорости ускоряемых частиц, близкой к скорости света в вакууме и составляющей в ускорительном кольце БАК около $3 \cdot 10^8$ м/с [3].

Считается, что объем ожидаемой научной информации ядерного характера только от одного столкновения встречных пучков ускоренных протонов в БАК до энергии порядка 10 ТэВ будет составлять не менее 200 стандартных компакт-дисков в секунду [18]. Эта научная информация будет в рамках уже разработанной и принятой международной кооперации ядерных исследований на БАК направляться в научные лаборатории 500 университетов мира, где около 5000 ведущих ученых-ядерщиков будет ее оперативно обрабатывать и сообщать полученные результаты в CERN (Швейцария, вблизи г. Женева).

Одной из научных задач при выполнении на БАК будущих ядерных экспериментов будет та, которая связана с обнаружением и исследованием **бозона Хиггса**. Напомним, что бозон Хиггса был назван в честь известного шотландского физика-теоретика Питера Хиггса (1925 г.р.), теоретически открывшего в 1964 г. механизм "появления" масс у **векторных бозонов** в результате спонтанного нарушения своей симметрии (механизм Хиггса) [1]. Предполагается, что эта пока виртуальная элементарная частица отвечает за массу вещества в нашей Вселенной [18]. Предстоящие экспериментальные исследования на БАК должны подтвердить или опровергнуть эту теоретическую точку зрения на данный **бозон**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из представленного автором краткого научно-исторического обзора первых и современных научно-технических разработок и исследований в области ускорительной техники, созданной за последнее столетие выдающимися физиками-ускорительщиками и

инженерами мира, следует, что человечество, несмотря на огромные умственные, физические и материальные затраты, благодаря своим выдающимся достижениям в атомной науке и технике упорно и объективно стремится к более глубокому познанию природы, устройства на микроуровне окружающей нас материи и путей происхождения нашей Вселенной.

2. Родившаяся в умах ученых в 1984 г. физико-техническая идея создания БАК в 2010 г. нашла свое материальное воплощение в создании мировым научным сообществом на базе Европейского центра ядерных исследований CERN (Швейцария) крупнейшего в мире циклического резонансного ускорителя протонов на встречных пучках – протонного коллайдера с кинетической энергией ускоряемых и соударяемых частиц-адронов до 14 ТэВ на один протон.

3. Будущие уникальные ядерные исследования на указанном супермощном БАК помогут землянам глубже проникнуть в тайны мироздания и скрытого от нас завесой вечности сложного микромира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
2. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 2: Открытие и изучение радиоактивности // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – № 3. – С. 3-9.
3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наук. думка, 1989. – 864 с.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
5. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 6: Техника высоких напряжений // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 1. – С. 3-15.
7. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: Открытие периодического закона химических элементов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 2. – С. 3-9.
8. Комар А.А. В.И. Векслер и работы по ускорителям в ФИАН // *История науки и техники*. – 2009. – № 4. – С. 39-44.
9. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
10. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 3: Открытие и изучение строения атома // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 4. – С. 3-9.
11. Коган В.С. "До" и "После". – Харьков: ННЦ "ХФТИ", 2004. – 97 с.
12. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 7: Создание ядерного и термоядерного оружия // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №2. – С. 3-15.
13. Ковальчук Б.М., Котов Ю.А., Месяц Г.А. Наносекундный сверхточный ускоритель электронов с индуктивным накопителем // *Журнал технической физики*. – 1974. – Т. 46. – № 1. – С. 215-217.
14. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
15. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
16. <http://www.allmodernscience.net/>.
17. Арефьева И. Большой адронный коллайдер // *Наука и жизнь*. – 2009. – №2 (10). – С. 19-20.
18. http://ru.wikipedia.org/wiki/Большой_адронный_коллайдер.
19. Баранов М.И. Постоянное магнитное поле планеты Земля. Новая гипотеза происхождения и его приближенный расчет // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 39-42.

Bibliography (transliterated): 1. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 2. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 2: Otkrytie i izuchenie radioaktivnosti // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. – 2011. – № 3. – S. 3-9. 3. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Nauk. dumka, 1989. – 864 s. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydayuschiesya fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 s. 5. Kudryavcev P.S. Kurs istorii fiziki. – M.: Prosveschenie, 1974. – 312 s. 6. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 6: Tehnika vysokih napryazhenij // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. – 2012. – № 1. – S. 3-15. 7. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 1: Otkrytie periodicheskogo zakona himicheskikh `elementov // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. – 2011. – № 2. – S. 3-9. 8. Komar A.A. V.I. Veksler i raboty po uskoritelyam v FIAN // *Istoriya nauki i tehnikе*. – 2009. – № 4. – S. 39-44. 9. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyh slov. – M.: Russkie slovari, 2004. – 957 s. 10. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 3: Otkrytie i izuchenie stroeniya atoma // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. – 2011. – № 4. – S. 3-9. 11. Kogan V.S. "Do" i "Posle". – Har'kov: NNC "HFIT", 2004. – 97 s. 12. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 7: Sozdanie yadernogo i termoyadernogo oruzhiya // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. – 2012. – №2. – S. 3-15. 13. Koval'chuk B.M., Kotov Yu.A., Mesyac G.A. Nanosekundnyj sil'notochnyj uskoritel' `elektronov s induktivnym nakopitelem // *Zhurnal tehnicheckoj fiziki*. – 1974. – T. 46. – № 1. – S. 215-217. 14. Mesyac G.A. Impul'snaya `energetika i `elektronika. – M.: Nauka, 2004. – 704 s. 15. Klimov A.A. Bol'shaya kniga znaniy. – Har'kov: Vesta, 2010. – 160 s. 16. <http://www.allmodernscience.net/>. 17. Aref'eva I. Bol'shoj adronnyj kollajder // *Nauka i zhizn'*. – 2009. – №2 (10). – S. 19-20. 18. http://ru.wikipedia.org/wiki/Bol'shoj_adronnyj_kollajder. 19. Baranov M.I. Postoyannoe magnitnoe pole planety Zemlya. Novaya gipoteza proishozhdeniya i ego priblizhennyj raschet // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. – 2010. – № 5. – S. 39-42.

Поступила 05.05.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт".
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.
An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 8: charged-particle accelerator creation.
A brief scientific and historical essay on the history of creation of charged-particle accelerators widely applied in nuclear and high-energy physics is given.
Key words – history, essay, charged-particle accelerators, structure of matter.