

Иванов И.И.
СЗ45а

✓
+

И429/88



Б1-9-88-449

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-88-449

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1988

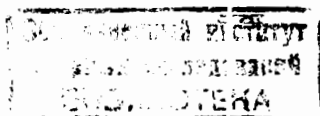
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объединительское научно-методическое отделение

Б1-9-88-449

Иванов И.Н.

ОБЗОР ПРЕДЛОЖЕНИЙ И ПРОГРАММА СОЗДАНИЯ
УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В ОБЛАСТИ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



Рукопись поступила
в подателеский кабинет
..23.06.88 г.

г. Дубна, 1988 г.

1988-1993 годы будут годами экспериментов в новой области энергий - десятки ТэВ для протонов и сотни ГэВ на нуклон для тяжелых ионов. Новое поколение ускорителей, таких как УНК, LEP, HERA, SLC, SSC, создаст возможность не только для прорыва в область ТэВ-ных энергий, но и значительно расширит возможности экспериментов, поскольку на этих установках планируется иметь самый разнообразный набор пучков p^+ , P , организация столкновений $P, P, P, \bar{P}, e, P, e, \bar{P}, e, e^+$. К этим перечисленным выше проектам дополняется значительное число разрабатываемых и реализуемых комплексов ускорителей тяжелых ионов на энергии сотни МэВ на нуклон, коллайдеров с энергией сотни ГэВ/нуклон и оснащение действующих установок накопительными кольцами для тяжелых ионов с применением стохастического или электронного охлаждения.

Развитие ускорителей всегда определялось потребностями физики. Видимо, сейчас возникла необходимость иметь тяжелые ионы практически во всем диапазоне энергий, хотя гонка за энергией и интенсивностью ускоренных пучков всегда сопровождала ускорители, начиная с самых первых установок. Физика требовала или новых энергий, для экспериментов в новых областях, или повышение интенсивности для поиска редких событий. Разграничение и акценты здесь весьма условны, и чтобы двигать рабочую точку на плоскости интенсивность-энергия, шло непрерывное развитие ускорителей. Качественные "скачки" шли по трем направлениям: новые идеи, технология, организация пучков. Новые идеи рождали новые схемы ускорителей, принципы фокусировки частиц (например, переход к ускорителю с разделенными функциями). Технология определила степень энергозатрат, а следовательно и габариты вновь создаваемых установок. Здесь пальма первенства несомненно принадлежит технологии использования в ускорительной технике сверхпроводимости. Наконец, организация пучков - это

организация бустеров, накопительных колец, столкновений, оснащение ускорительных комплексов разветвленной системой обладающими специфическими свойствами вторичных пучков.

Ускорители тяжелых ионов используют в своем развитии все эти три направления. Ускорение тяжелых ионов имеет ряд особенностей по сравнению с ускорением элементарных частиц. Во-первых, это проблема получения тяжелых ионов с максимальным зарядом. Пока возможности современных источников тяжелых ионов требуют дорогостоящих предускорителей: причем, как правило, последовательно несколько ступеней ускорителей различного типа с несколькими этапами обдирки для повышения темпа набора энергии. Надо сказать, что практически все современные проекты тяжело-ионных ускорителей и развитие старых установок предполагают использование систем, предложенных и разработанных Капчинским и Тепляковым^{/I/}. Ионный пучок обладает не только разбросом по энергии, что естественно для любого ускорителя, но и разбросом по заряду ускоряемого пучка, что создает дополнительные трудности для динамики пучка в ускорителе, его удержания, и, в конечном счете, для точного знания кинематики пучка при его взаимодействии с мишенью или с другим пучком.

Для повышения качества ускоренного пучка служит организация накопительных колец и охлаждение пучков.

Если посчитать, сколько событий $\langle n \rangle$ в среднем происходит за время T , при условии, что это событие имеет сечение Σ , то можно написать

$$\langle n \rangle = L \Sigma T$$

где коэффициент пропорциональности L имеет название светимость. Размерность $[L]$ - $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$. Светимость наиболее физично выражается для случая двух сталкивающихся пучков и поэтому является основным параметром коллайдеров, поскольку определяет эффективность ра-

боты такой установки. В этом случае^{/2/}

$$L = N^2 f / 4\pi \sigma^2$$

где N - число частиц в каждом пучке, f - частота работы установки, σ - радиус сечения пучка (в приближении круглого пучка с равной плотностью по сечению). Параметры пучка в месте встречи определяются формулой:

$$\varepsilon = \frac{4\pi \sigma^2 \gamma}{\beta}$$

γ - релятивистский фактор пучка (его энергия); β - некоторая специфическая ускорительная функция, определяющая свойства магнитного поля ускорителя или кольца в месте встречи пучков, а ε - очень важная характеристика пучка, так называемый эмиттанс. Физический смысл ε - фазовый объем пучка, грубо определяемый как произведение поперечного размера пучка на величину углового разброса пучка. Объединяя эти две выше приведенные формулы, мы получим:

$$\langle n \rangle = \sum \frac{N^2 \gamma}{\beta} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$$

(мы учли, что $T \sim 1/f$). Из этой формулы ясно, что увеличение N ,

γ повышает эффективность ускорителя, что естественно, но затруднительно, а также, существенно для повышения эффективности уменьшение ε , эмиттанса пучка, целям чего служит охлаждение. Однако роль охлаждения пучка даже шире, чем было сказано. Дело в том, что качество пучка (интенсивность, размеры, разбросы по энергии и импульсам частиц) определено самим ускорителем, а именно условием захвата частиц в режим ускорения и самим процессом ускорения. Если вы после этого "сбрасываете" пучок на фиксированную мишень и качество пучка вас устраивает, то в этом случае ничего больше делать не надо. Если же это не так и вам необходимо или улучшить

качество пучка для вывода на мишень, или накопить частицы для повышения эффективности поиска редких процессов, вы должны вывести пучок в соответствующее накопительное кольцо, которое вместе с пучком образует консервативную систему и пучок, в ней будет сохранять свой фазовый объем, из-за универсальности теоремы Лиувилля. Единственным отклонением от консервативности системы являются эффекты рассеяния частиц пучка на остаточном газе и друг на друге, что особенно важно для пучков тяжелых ионов. Но эти эффекты увеличивают фазовый объем и приводят к уменьшению L и следовательно $\langle n \rangle$. Таким образом, цель охлаждения – уменьшение фазового объема пучка или его эмиттанса. Эта цель достигается созданием условий для диссипации энергии частиц из ее поперечного движения и поэтому этот процесс получил название охлаждения.

Итак, если мы создадим условия для охлаждения пучка, мы достигнем следующего:

а) уменьшение геометрических размеров пучка и его разброса по поперечным углам, следовательно, улучшим его кинематические свойства;

б) уменьшение фазового объема позволит накапливать частицы и, следовательно, увеличивать интенсивность пучка для дальнейших экспериментов или накапливать редкие частицы, получаемые из, к примеру, первичного пучка;

в) получаем возможность длительного удержания пучка, поскольку имеем возможность бороться с увеличением его размеров из-за рассеяния.

В настоящий момент в ускорительной технике используются два способа охлаждения: стохастический и электронный.

Идея стохастического метода ускорения достаточно проста и видна из рис. I. Частицы проходят измерительное устройство (пикап)

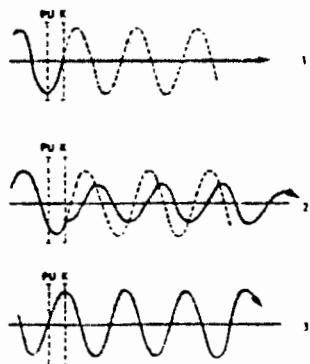
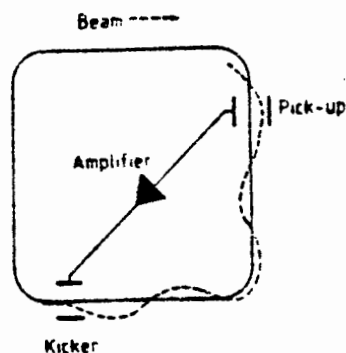


Рис. I.

частиц, имеющих набор фаз, амплитуд и т.д. Поэтому смысл работы систем охлаждения состоит в том, чтобы выделить на каждом обороте частиц, имеющих общую фазу при прохождении отклоняющего устройства, и так малыми порциями за много оборотов погасить колебания в пучке. Такой процесс дал название этому методу охлаждения.

При использовании электронного охлаждения диссипация поперечной энергии пучка происходит за счет взаимодействия (кулоновского рассеяния) частиц охлажденного пучка с частицами другого пучка — данном случае электронного. Для этого протонный пучок или пучок тяжелых ионов проходит на участке некоторой длины совместно с пучком электронов, причем, нужно, чтобы $V_e = V_i$ и электронный пучок был монохроматичен по энергии. Схему электронного охлаждения см. на рис.2. Есть несколько физических аналогий механизму электронного охлаждения. Например, аналогия смешивания двух потоков газа,

сигнал с которого, пропорциональный отклонению частицы от оси ускорителя через усилитель передается на специальное устройство (кикер). Это устройство в свою очередь вырабатывает соответствующий импульс электромагнитного поля, гасящий отклонение частицы. Внешне система стохастического охлаждения выглядит очень просто но на самом деле реальная ситуация гораздо сложнее. Во-первых, даже одна частица, как на приведенном примере, меняет свою скорость, массу, фазу прохождения пикапа в процессе ускорения и все эти изменения должны отрабатываться усилительным устройством. Во-вторых, в пучке присутствует целый ансамбль

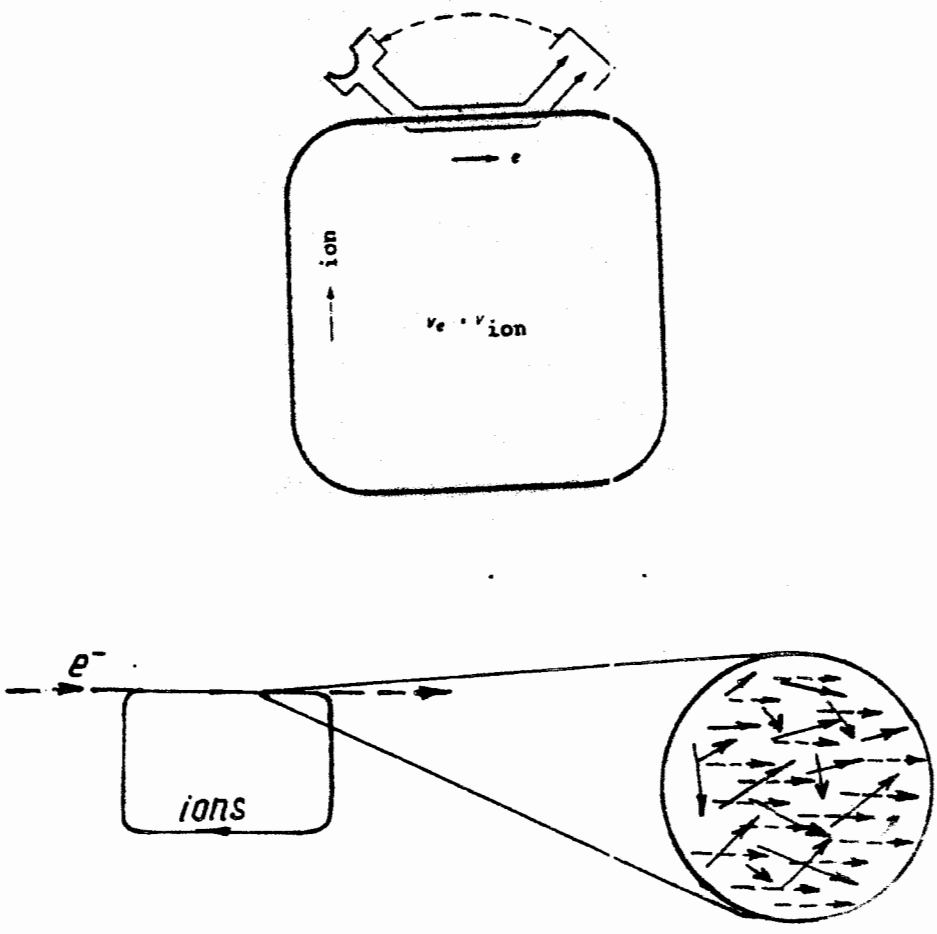


Рис.2.

теплого и холодного при котором теплый поток уменьшает свою температуру, а холодный увеличивает. Другая интерпретация - рассеяние ионов на электронном газе. Если считать пучок электронов монохроматическим и перейти в систему координат, в которой электронный пучок покоится, то ионный пучок в этой системе будет проходить через электронный газ с различными поперечными скоростями. При этом ионы будут рассеиваться на газе, терять свою энергию. Синхронизм скорости электронного и ионного пучка требует увеличения энергии электронного пучка в зависимости от энергии ионного. Это видно из следующей таблицы^{/2/} :

Таблица I.

Энергия иона (МэВ/н)	Энергия электронного пучка (кэВ) и мощность пучка (кВт) на 1 А тока
1	0.5
10	5.4
100	54
500	272
1000	545

Основным эффектом, конкурирующим с процессом электронного охлаждения, является процесс рекомбинации ионов, изменение его заряда за счет захвата электронов, поэтому при реализации механизма электронного охлаждения нужно создавать условия, при которых время охлаждения было бы значительно меньше времени рекомбинации.

Не вдаваясь в точный расчет и детали механизма этих двух способов охлаждения, трудно объяснить когда нужно применять тот или другой способ охлаждения. Ясно, что стохастический способ лучше применять при большом начальном эмиттансе пучка и больших энергиях, электронный способ лучше применять на начальных энергиях или при достаточно малых эмиттансах пучка.

На рис.3 можно увидеть области наибольшей эффективности работы того или другого метода охлаждения. Разделение этих областей, конечно, носит условный характер и служит в основном для иллюстрации (рис.3а - зависимость времени охлаждения от эмиттанса пучка или разброса по импульсам; рис.3б - поперечное сечение пучка, для которого наиболее эффективна работа электронного и стохастического охлаждения).

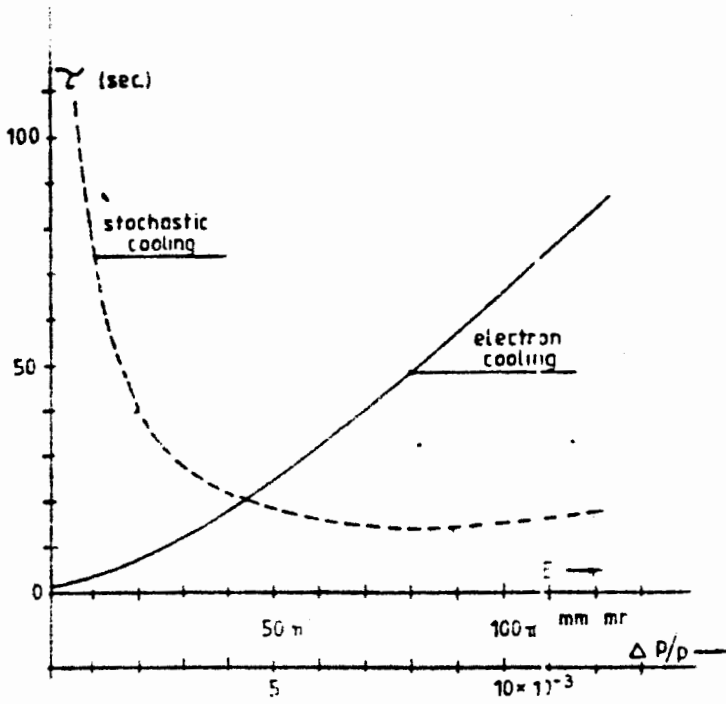


Рис. 3а.

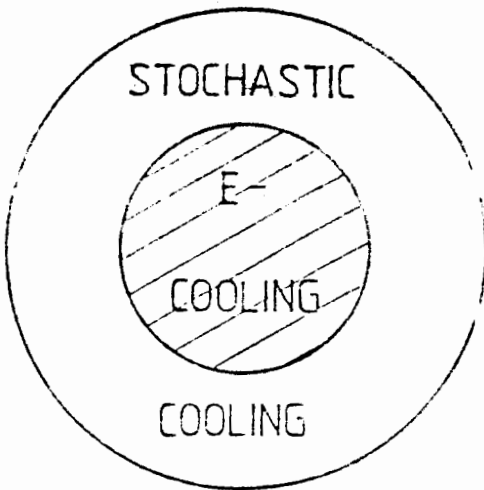


Рис. 3б.

В действительности в существующих проектах оснащения современных центров ускорителей накопительными кольцами для охлаждения пучков используются оба эти метода или их комбинации. Эти предложения собраны в таблице 2 /3/ .

Успешное осуществление методов охлаждения позволили прийти к проектированию коллайдеров - ускорительных установок в которых осуществляется соударение двух ускоренных пучков тяжелых ионов. Если энергия каждого пучка ионов E_k , то в системе центра масс энергия соударения $E_{ц.м} = E_k^2 / E_0$, где E_0 - энергия покоя иона. Энергия $E_{ц.м}$ фактически определяет энергетический выигрыш от применения коллайдеров. В основном, все предложения по сооружению коллайдеров определяются возможностями получения кварк-глюонной плазмы в ядре. Расчеты показывают /4/ , что минимальная необходимая для этого плотность энергии $\sim \Gamma \approx V / \phi^3$ и зависит от атомного кольца ускоренного иона так, как показано на рис.4. Ограничься этими общими замечаниями об основных ускорительных принципах будущих комплексов тяжелых ионов, проанализируем эти предложения, так сказать, по географическому принципу - месту расположения.

Перспективы тяжело-ионных ускорителей в области средних и релятивистских энергий на американском континенте связывают с развитием центров в Беркли (LBL), Сук-Ридше (ORNL) и Брук-хайвене (BNL).

Лаборатория в Беркли имеет давние традиции в этой области. Ускоритель Бевалак - комбинация Супершилака и Беватрона. Характеристики этой установки в урановой области следующие: источник дает + 5-ти зарядные ионы с энергией 112 кэВ/н; эти ионы, ускоренные на I-ой стадии Супершилака до энергии 1,2 МэВ/н, обдираются до заряда + 13 и ускоряются полностью в Супершилаке до энергии 8,5 МэВ/н, после чего их заряд на стриппере повышается до + 40,

COOLER STORAGE RINGS FOR HEAVY IONS									
name	circum- ference (m)	injector type	ions (A)	ξ/A	T_{max} (MeV/A)	cooling type	operation in	status	
INDIANA COOLER	168	cyclotron K = 220	1-20	1-0.5	500-150	E	1986	construction	
CELSIUS UPPSALA	81.8	cyclotron K = 190	1-20	1-0.3	1200-395	E	1987	construction	
COSY KFA JÜLICH	183.4	cyclotron K = 45	1-20	1-0.5	2500-550	S,E	?	proposal	
ALR AARHUS	31.8	6 MV tandem	4-238 + e ⁻	0.5-0.1	41-2	E,L	?	construction	
TSR HEIDELBERG	35	tandem + linac	12-130	0.5-0.37	27-13	E	1988	construction	
CRYRING STOCKHOLM	30.5	RFQ	20-208	0.5-0.3	24-9	E	1989	construction	
TARN II INS TOKYO	75.6	RFQ+linac or cycl.	1-100	1-0.25	1300-140	S,E	1987	construction	
ESR GSI, DARMSTADT	103.2	linac + HI-synchr.	20-238	0.5-0.39	834-556	S,E	1988/89	construction	

ионы переводятся в синхротрон Беватрон и получают окончательную энергию ~ 1 ГэВ/н. Дальнейшее увеличение энергии иона ограничено его зарядом. Эксперименты в Беркли показали ^{/4/}, что оптимум для получения чистого ядра урана лежит при энергии ≥ 450 МэВ/н.

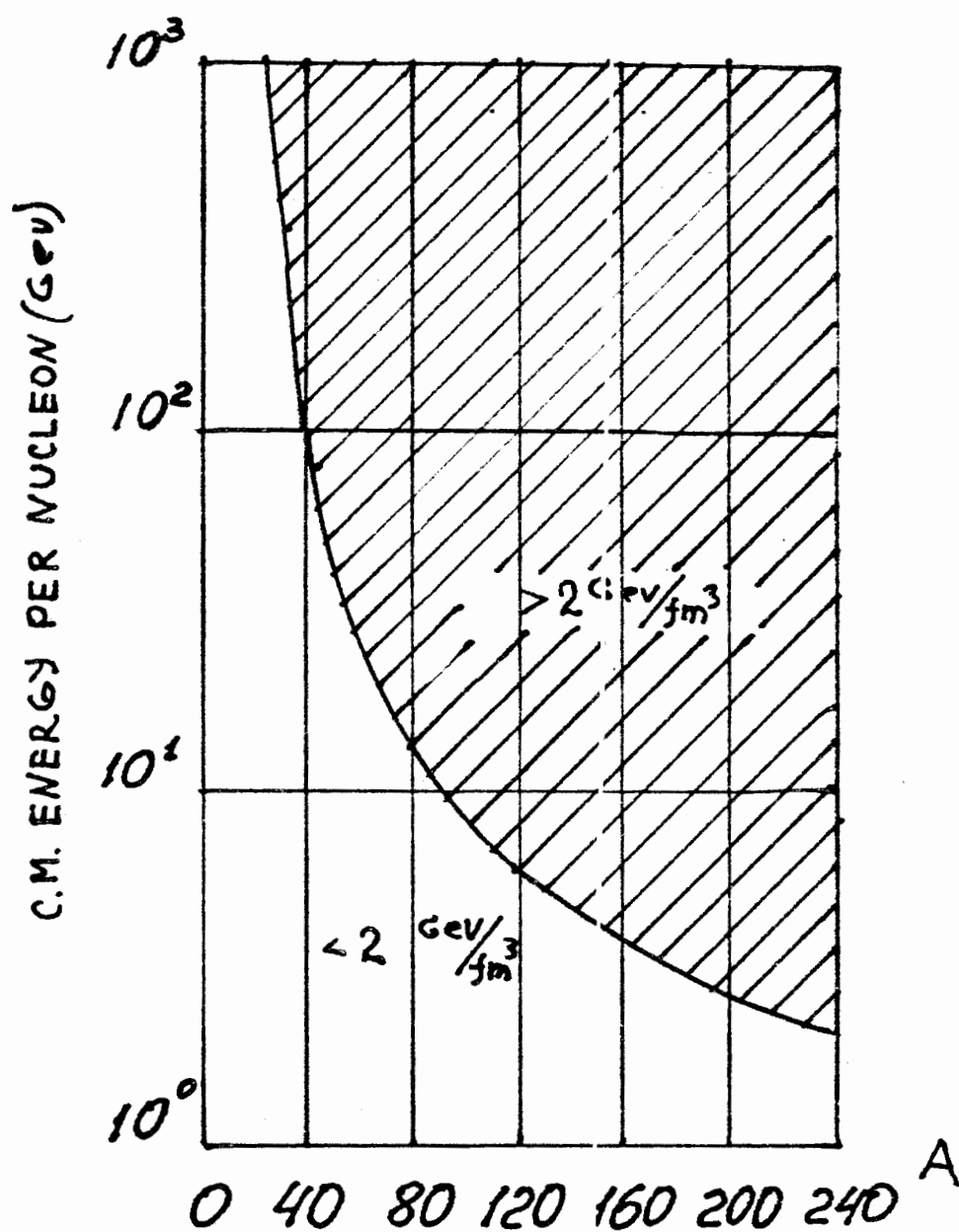


Рис. 4.

Первый и наиболее престижный проект развития LBL связан с сооружениями VENUS, рассчитанной на получение на фиксиро-

ванной мишени энергий урана от 20 МэВ/н до 20 ГэВ/н и в режиме коллайдера 2 x 20 ГэВ/н. Схема проекта *VENUS* представлена на рис.5. Однако этот проект все еще далек от реализации из-за своей высокой стоимости (~100 М\$ в ценах 1979 г.). Поэтому в настоящее время рассматривается возможность сооружения миниколлайдера с максимальной энергией 4 ГэВ/н. Планируется использовать комплекс Бевалак для получения ионов урана с энергией ≥ 400 МэВ/н, после чего они будут полностью обдираться и инжектироваться в 2 накопительных кольца с длиной дорожки 200 м. Далее последуют процессы накопления, охлаждения (стохастического) и доускорения до энергии 1 ГэВ/А. Ожидаемые параметры миниколлайдера показаны в таблице 3.

Элемент	максимальная кинетическая энергия ГэВ/н	светимость ($\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$) при 1 ГэВн
уран	3 - 4	3×10^{23}
золото	3 - 4	4×10^{23}
неон	4 - 5,3	2×10^{25}
протон	9 - 12	4×10^{26}

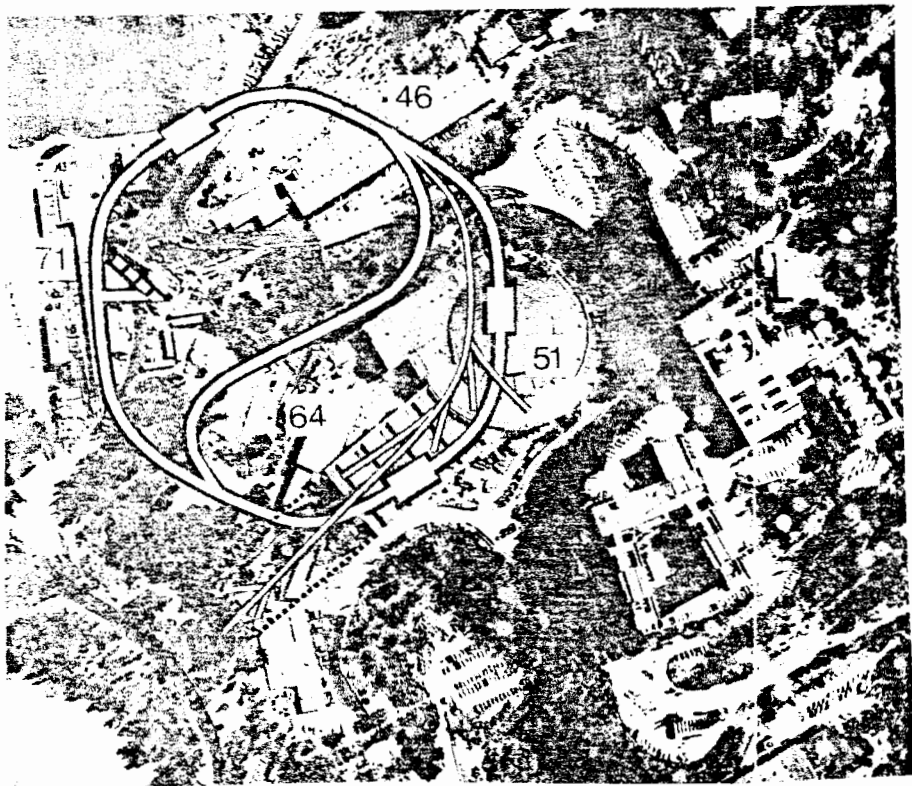


Рис.5.

Основными ускорительными установками *ORNL* в настоящее время являются крупный Тандем Ван-дер-Грааф с потенциалом 25 МВ и изохронный циклотрон. Ближайшее будущее этой лаборатории связано с реализацией проекта по сооружению бустерного кольца (138 м) на энергию 488,7 МэВ/н (при этом Тандем служит инжектором). После бустера пучок будет переводиться в два накопительных кольца (длина дорожки примерно в 6 раз больше бустера) с максимальной энергией в режиме коллайдера 10 ГэВ/н. Схема установки показана на рис. 6, а ожидаемые параметры пучков в таблице 4.

Ион	Ион/	Кинетическая энергия (ГэВ/н)	Светимость ($\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$)
^{12}C	$1,1 \cdot 10^{10}$	12,7	$3,6 \cdot 10^{28}$
^{32}S	$4,0 \cdot 10^9$	12,7	$4,6 \cdot 10^{27}$
^{63}Cu	$2,0 \cdot 10^9$	11,6	$1,1 \cdot 10^{27}$
^{127}I	$1,6 \cdot 10^9$	10,4	$5,0 \cdot 10^{26}$
^{127}Au	$1,2 \cdot 10^9$	10,0	$3,3 \cdot 10^{26}$

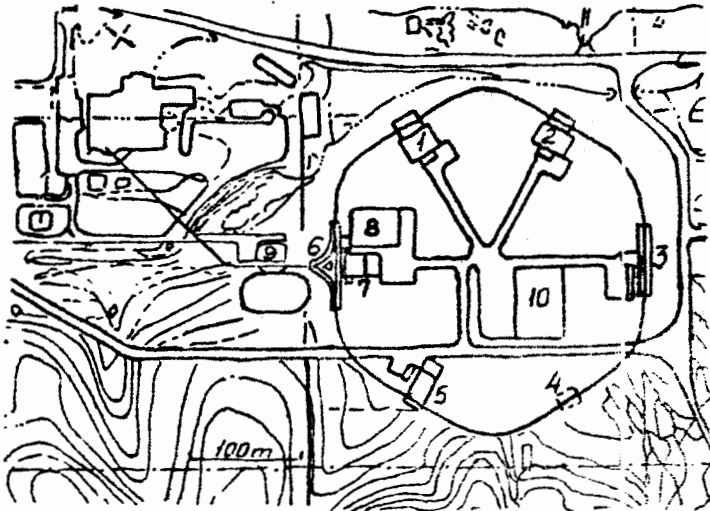


Рис. 6.

Планы BNL предлагают реализацию наиболее крупного проекта ионного коллайдера. Область энергий от нескольких ГэВ до 100 ГэВ/н. Основой для такой установки являются:

а) наличие 2-х Тандем-генераторов с напряжением (5 МВ)
тоннель примерно километровой диаметра (сооруженной для установки ISABELLA);

б) больших производственных мощностей для сооружения сверхпроводящих магнитов (созданных для той же установки) и

в) 28 ГэВ-ного протонного синхротрона AGS.

Сейчас заканчивается сооружение километрового канала для перевода пучка из Тандема-генератора в AGS. На этой стадии планируется получить легкие полностью ионизованные ядра с энергией 15 ГэВ/н. На второй стадии планируется сооружение бустерного кольца (см.рис.7). Бустер позволит получать ионы вплоть до золота с энергией 367 МэВ/н, а после дополнительной обдирки ускоритель



Рис.7.

в *AGS* до энергии 10 ГэВ/н и вывести для экспериментов на фиксированную мишень. И наконец, третья стадия проекта - сооружение релятивистского тяжелоионного коллайдера (*RHIC*) с энергией столкновения 2×100 ГэВ/н. Ожидаемые светимости *RHIC* от 10^{30} для легких ионов до $10^{27} \frac{1}{\text{см}^2 \text{сек}}$ для ионов в районе золота. Стоимость всего проекта $\sim 140 \text{ М } \$$ в ценах 1984 г.

Программу развития ускорительных установок для тяжелых ионов в Японии можно продемонстрировать на примере комплекса Института ядерных исследований (*INS*) вблизи Токио. Несколько лет назад был предложен проект релятивистского тяжелоионного ускорителя *NUMATRON*. Однако, по различным причинам его реализация была отменена, а для изучения ряда вопросов динамики пучка, в частности его охлаждения, было сделано испытательное накопительное кольцо диаметром ~ 10 м, инжектором для которого служит циклотрон. Установка получила название *TARN* и на ней были успешно проведены эксперименты по стохастическому охлаждению пучка. Сейчас начались эксперименты на установке *TARN-II* /5/, которая представляет из себя фактически синхротрон на энергию 1,3 ГэВ для протонов. Установка имеет участки для электронного и стохастического охлаждения (см.рис.8), рассчитана на получение ионов с энергией 450 МэВ/н для $Z/A = 0,5 \pm 0,2$ с энергетическим разрешением пучка на уровне 10^{-5} . Кроме этой, несомненно очень интересной машины, в Японии работают комплексы ЛУ+циклотрон на максимальную энергию для тяжелых ионов $\sim 540 \frac{Z}{A}$ МэВ/н (Институт физических и химических исследований) и Тандем циклотронов в исследовательском центре для ядерной физики с максимальной энергией для α -частиц 340 МэВ.

В Европе одним из крупнейших центров в области физики тяжелых ионов является Дармштадт, где в течение последних 10 лет успешно эксплуатировался *UNILAC*, ускоряющий в области до 10 МэВ/н

все ионы, включая уран. В следующем году в этом центре должно

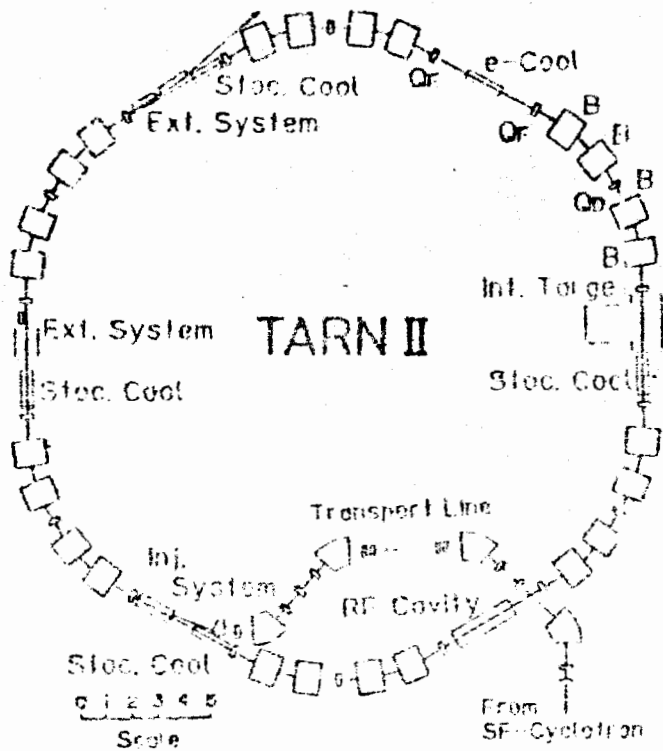
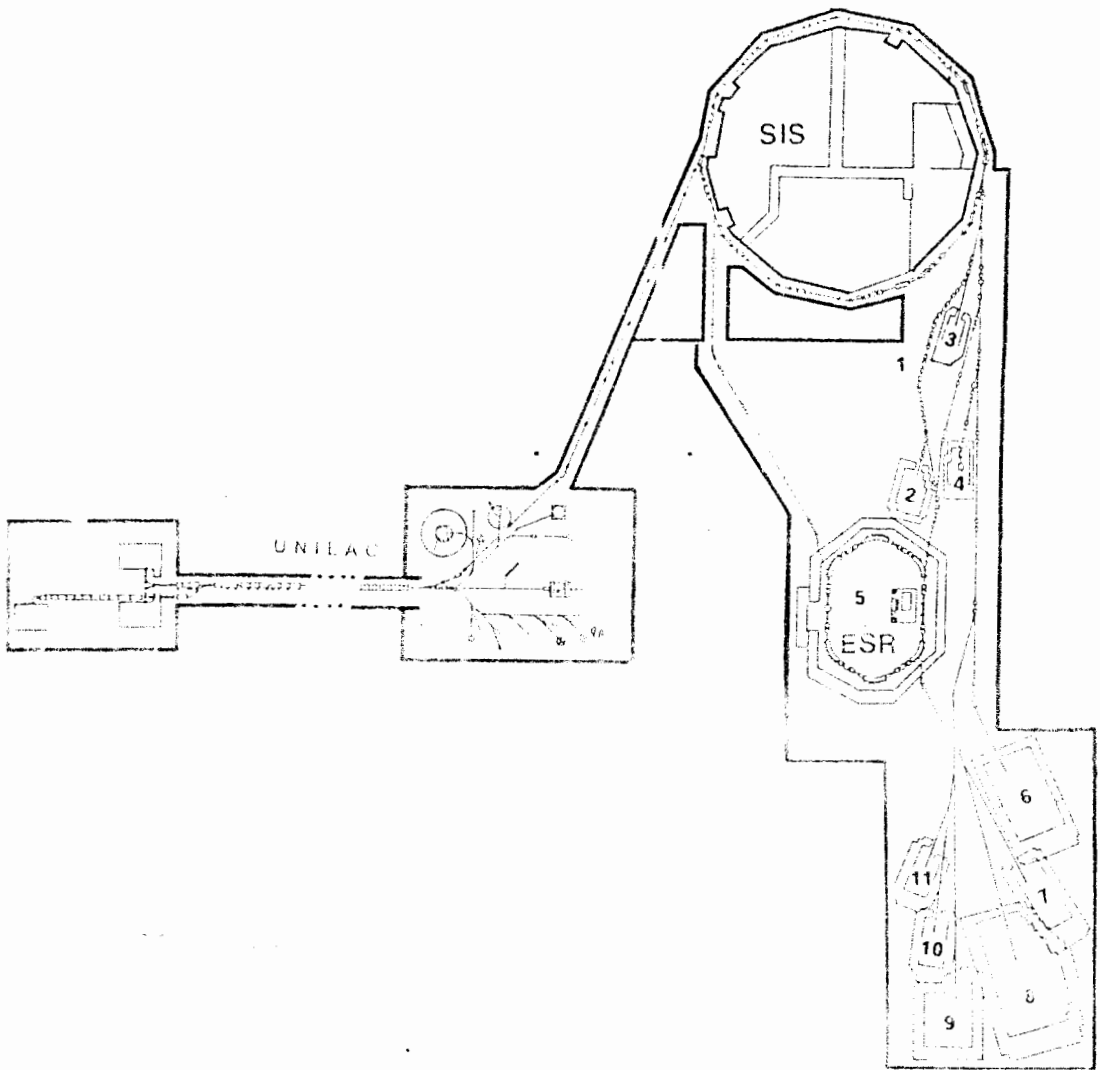


Рис.8.

закончиться строительство комплекса, включающего в себя модернизированный *UNILAC* как инжектор, тяжелоионный синхротрон (*SIS*) и экспериментальное накопительное кольцо (*ESR*)^{16/}. Общий вид комплекса показан на рис.9. Ионы будут иметь энергию 19 МэВ/н. после *UNILAC*'а и 1+2 ГэВ/н после *SIS*'а. *ESR* дает возможность накапливать, охлаждать пучок ионов, уменьшив его эмиттанс до величины 0,17 мм·мрад и импульсный разброс до 10^{-5} . Полностью комплекс войдет в строй в 1991 г.

Самые большие энергии ионов в настоящее время получены в ЦЕРНе с использованием 400 ГэВ протонного синхротрона (*SPS*). ^{+6}O (кислород) из источника ускорялся в 50 МэВ'ном линейном ускорителе, бустере и "старом" протонном синхротроне до энергии 17 ГэВ/н.



1

Рис. 9.

На этой энергии ионы полностью обдирались и инжектировались в *SPS*, где энергия достигала 200 ГэВ/н. Достигнутая интенсивность — 10^8 ион/имп. Сейчас в этом центре разрабатываются организации соударений ионов кислорода при энергии 200 ГэВ/н с 400 ГэВ'ными антипротонами. Успех в ускорении ионов кислорода в ЦЕРНе дал толчок развитию фантастических идей получения ультрарелятивистских ионов

в других центрах^{/4/}. Так, например, разрабатываются планы получения 400 ГэВ/н ионов в ТЭВАТРОНе и их соударение с антипротонами на энергии 1 ТэВ (ожидаемая светимость 10^{28} $\text{I}/\text{см}^2\text{сек}^{-1}$). Появились также предложения использовать в будущем разрабатываемую сейчас установку SSC 20 x 20 ТэВ для ионного коллайдера с энергией 2 x 8 ТэВ/н со светимостью 10^{30} $\text{I}/\text{см}^2\text{сек}^{-1}$. Однако последние два предложения носят пока чисто теоретический характер и могут рассматриваться сейчас только как проявление определенной тенденции

В Советском Союзе один из наиболее крупных реализуемых проектов - УКТИ ИТЭФ^{/7/}. Он основывается на протонно синхротроне, который модернизируется для продолжения работы с протонами 9,3 ГэВ и ускорения легких ионов 3,4÷3,7 ГэВ/н и тяжелых до 1 ГэВ/н. Для этого предполагается сооружение специального ионного предускорителя. Такая модернизация составит 1-й этап работы. 2-ой этап предусматривает сооружение дополнительного кольца в "теплом" варианте, параметры которого позволят получить протоны с энергией 15 ГэВ и тяжелые ионы 5 ГэВ/н. И наконец 3-й этап работы - сверхпроводящее кольцо для достижения 50-70 ГэВ для протонов и 20-25 ГэВ/н для тяжелых ионов.

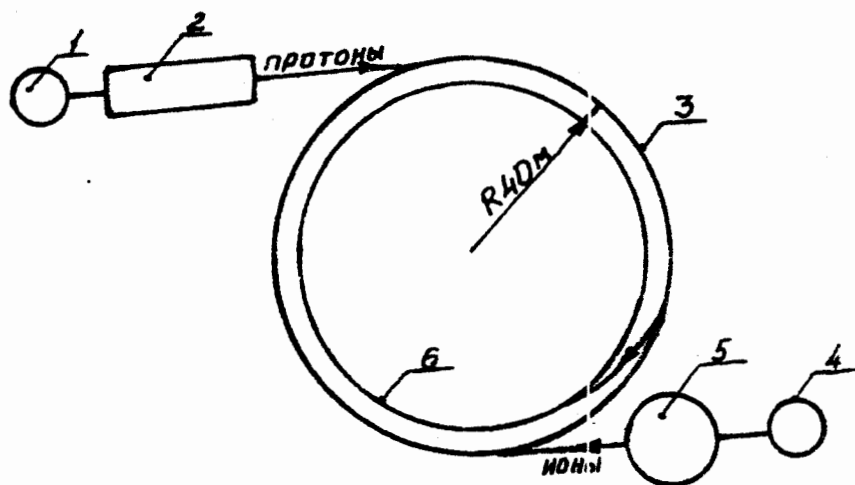


Рис. 10.

Характерная особенность проекта состоит в том, что он не рассчитывался на работу с чистыми ядрами. Общая схема установки - рис. 10.

В ОИЯИ эксперименты с тяжелыми ионами считаются основным направлением исследования на базовых установках Института. В области низких энергий таковым является циклотрон У-400, ускоряющий легкие ионы до энергии 9-13 МэВ/н с интенсивностью $2 \cdot 10^{14}$ част./сек и ионы в районе криптона до энергии 5,3+6 МэВ/н с интенсивностью $5 \cdot 10^{11}$ - $2 \cdot 10^{12}$ част./сек. Требование современных физических программ по экспериментам при энергии 100-200 МэВ/н может быть выполнено созданием ускорительного комплекса тандема циклотронов У-400 + У-400М^{/8/}. Планируется, что этот комплекс обеспечит ускорение ионов от He до U с энергией 120±20 МэВ/н и интенсивностью до 10^{12} част./сек. Основные параметры комплекса приведены в таблице 5.

	У-400	У-400М
Масса ионов (А)	16-238	16-238
Энергия ионов (МэВ/н)	2,5-1,7	120-20
Отношение А/	16-20	2-5
Интенсивность (част./сек)	10^{14} - 10^{13}	$5 \cdot 10^{12}$ - 10^{11}

Программа работы с релятивистскими ионами ОИЯИ основывается на использовании синхрофазотрона ОИЯИ на 10 ГэВ как ускорителя тяжелых ионов. Этот ускоритель имеет рекордные интенсивности в области средних ядер с энергией ~ 4 МэВ/н. В настоящее время полным ходом идет сооружение Нуклотрона^{/9/} - специально сооружаемого ускорителя тяжелых ионов на энергию 6 ГэВ/н для всех ядер вплоть до U.

Параметры нуклотрона собраны в таблице 6.

Энергия инжекции	- 5 МэВ/н (проект 12 МэВ/н)
Конечная энергия:	
для ядер с $Z/A = 0,5$	- 6 ГэВ/н
для $^{238}_{82}$	- 4 ГэВ/н
Периметр кольца	- 250 м
Интенсивность	- 10^{11} А/ 2 част./цикл
Частота циклов при длительности медленного вывода 1 с	- 0,5 Гц
Максимальная длительность медленного вывода	до 10 с
Максимальная магнитная жесткость	- 46,14 Т.м.
Импульсный разброс:	
- при инжекции	$\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$
- в конце ускорения	$\pm 1,0 \cdot 10^{-3}$

Нуклотрон будет использовать магниты нового типа ("Дубна").

На основе этих магнитов разрабатывается проект Супернуклотрона-коллайдер релятивистских тяжелых ионов с энергией 60 ГэВ/н.

Реализация проекта Супернуклотрона может начаться после запуска Нуклотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капчинский А.М. Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.
2. O.Möhl. 1986 RCNP KIKUCHI SUMMER School. Osaka, 1986, p.251-295.
3. H.Klein. The Symposium 10 Year Uranium Beam at the UNILAC, Darmstadt, 1986.
4. A.G.Ruggiero. IEEE, vol.NS-32, No.5, 1985, p.1596-1600.
5. Y.Hirao. IEEE, Trans. Nuclear Science, vol. NS-32, No.5, p.1565-1570.
6. K.Blashe et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1981, NS-28, No.3, p.2013.
7. Алексеев Н.Н. и др. Физическое обоснование протон-тяжелоионного ускорительного комплекса на базе протонного синхрофазотрона ИТЭФ. ИТЭФ-ИИО, 1985.
8. Флеров Г.Н. и др. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Д9-87-105. Дубна: ОИЯИ, 1987, т.1, стр.109.
9. A.M.Baldin and all. Proc. 1983 Particle Accelerators Conference. IEEE Trans., Nuclear Science, NS-30, No.4, 1983, p.32-47.