

**Электромагнитные исследования
в физике частиц и ядер в области
энергии электронов $E(e) = 2$ ГэВ.**

Г.А.Сокол (ФИАН), Е.М.Лейкин (НИИЯФ МГУ)

План сообщения.

1. В.И.Векслер (принцип автофазировки),
Е.Л.Фейнберг, Э. Макмиллан.
2. Серия ускорителей электронов
(30, 250, 600, 1300 МэВ-ные синхротроны)
3. Проект создания нового ускорителя на энергию
 $E(e) = 2$ ГэВ (на основе криогенных ВЧ структур с
ускорением $\Delta E = 25$ МэВ/м) (СЕБАФ - $\Delta E = 5$ МэВ/м)
4. Расположение нового 2-х ГэВ-ного ускорителя
электронов и экспериментальных установок в
ускорительном комплексе ФИАН в г. Троицке
5. Что понимается под электромагнитными исследованиями ?
 - структура нуклонов, мезонов. кварков
 - влияние ядерной среды на характеристики (масса, время жизни)
мезонов, частиц, резонансов
 - мезонные ядра
 - η – ядра (ФИАН)
6. Преимущества исследований структуры ядер и частиц
с помощью e^- , γ -пучков по сравнению в пучками
частиц и ядер в А-А столкновениях

7. Механизм возникновения массы у частиц и кварков
8. Состояние КХД (точечность , безмассовость кварков)
9. Как наблюдать влияние ядерной среды на характеристики (масса, время жизни) мезонов и частиц ?
10. Выбор η -, ω -, η' -, ϕ - мезонов .
11. Условия проведения эксперимента с мезонами в ядерной среде.
- 12 η - ядра (А.И. Лебедев, результаты ФИАН, В.И. Ритус)
- 13 Перспективы изучения η -ядер на 2-х ГэВ-ном ускорителе электронов.
Организация ЦЭМИ - Центра электромагнитных исследований (ФИАН, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, МИФИ, ЛФВЭ ОИЯИ, ИЯФ ТПУ и др.) для осуществления электромагнитных исследований на ускорителе.
14. Заключение
 - создание нового ускорителя электронов на энергию 2(3) ГэВ
 - организация ЦЭМИ
 - проведение фундаментальных исследований на новом ускорителе

1. В.И.Векслер
(принцип автофазировки),
Е.Л. Фейнберг, Э. Макмиллан.

(история и традиции в науке)
XX -века



Владимир Иосифович ВЕКСЛЕР
(1907 – 1966) - академик РАН , автор принципа “автофазировки”, позволивший осуществлять ускорение релятивистских частиц, лауреат Международной премии “АТОМ для МИРА”(вместе с Э.Макмилланом), лауреат Ленинской и Государственных премий, основатель Эталонной лаборатории ФИАН, руководитель фундаментальных исследований по физике ядра и частиц на созданных им ускорителях электронов с энергиями 30, 280, 600, 1300 МэВ (ФИАН) и на ускорителе протонов (синхрофазотроне) с энергией 10 ГэВ (ОИЯИ. г.Дубна)



Евгений Львович ФЕЙНБЕРГ (1912- 2006 гг.) - академик РАН, выдающийся физик-теоретик, известный своими работами в ядерной физике, физике частиц и космических лучей.

Е.Л. Фейнберг внес существенный вклад в обоснование принципа “автофазировки”, предложив В.И.Векслеру уравнение фазовой устойчивости пучка ускоряемых частиц в переменном магнитном поле.

A handwritten signature in cursive script, which appears to read "Feinberg". The signature is written in dark ink on a light background.



В.И. Векслер и Э. Макмиллан Дубна 1963 г.

1944 - первые публикации В.И.Векслера

**“О новом методе ускорения релятивистских частиц”
ДАН СССР(1944) т.43(8),с.346 - без упоминания Е.Л. Фейнберга
ДАН СССР(1944) т.44(9), с.393 -без упоминания Е.Л. Фейнберга**

1945 - J. of Physics v. IX, (1945),p. 153

**“ The author expresses his appreciation to E.Feinberg
for detailed discussion an for helpful suggestion”**

**2005 -Теле-интервью Е.Л.Фейнберга в передаче “ Властелины
колец” о своем участии в обсуждении с В.И.Векслером
устойчивости пучка ускоряемых частиц в переменном
магнитном поле.**

**1945 - статья Э. Макмиллана об ускорении релятивистских
частиц.**

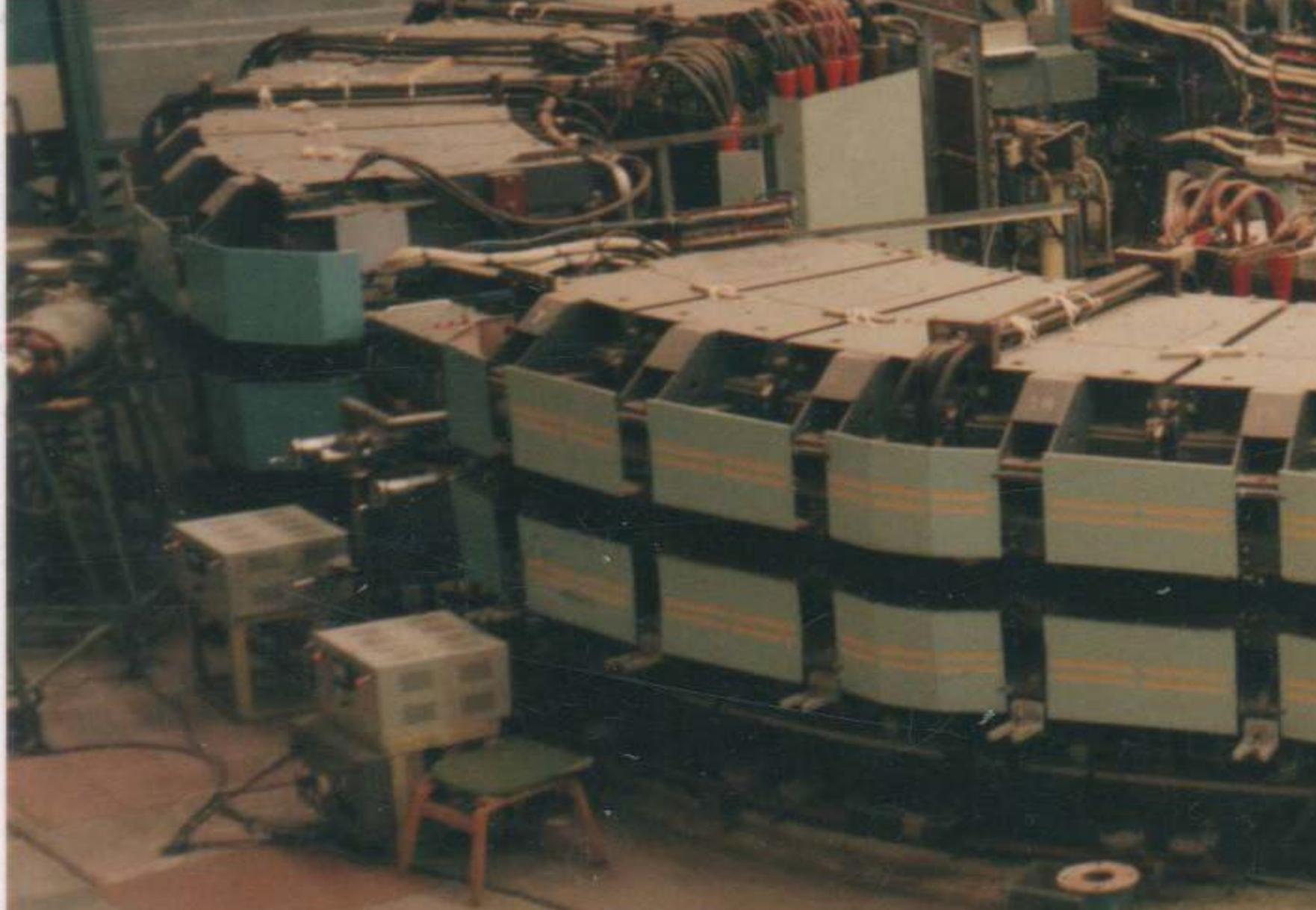
(Э. Макмиллан признал приоритет В.И.Векслера)

**2. Серия ускорителей
электронов (синхротронов),
созданных В.И.Векслером
в ФИАНе**

1. $E(e) = 30$ МэВ- ФИАН (Миуссы)—1948-49 гг.
(затем перебазирован на “Питомник”)
участие П.Черенкова, А. Прохорова и др.
2. $E(e) = 280$ МэВ - ФИАН, Питомник , 1949 г.
(на берегу р.Чуры, на окраине г. Москвы)
3. $E(e) = 600$ МэВ - ФИАН, Склад-2, 1954 г.
(прототип 10 ГэВ р - ускорителя в г. Дубне)
4. $E(e) = 1300$ МэВ - ФИАН. г. Троицк , 1975 г.
(лаборатория фотомезонных процессов)

Эта серия ускорителей новыми разработками ускорителей не пополнялась.

В настоящее время назрела необходимость создания ускорителя электронов с энергией 2 ГэВ для решения фундаментальных задач физики средних энергий



Синхротрон ПАХРА на энергию 1300 МэВ

3. Проект создания ускорителя электронов на энергию 2 ГэВ

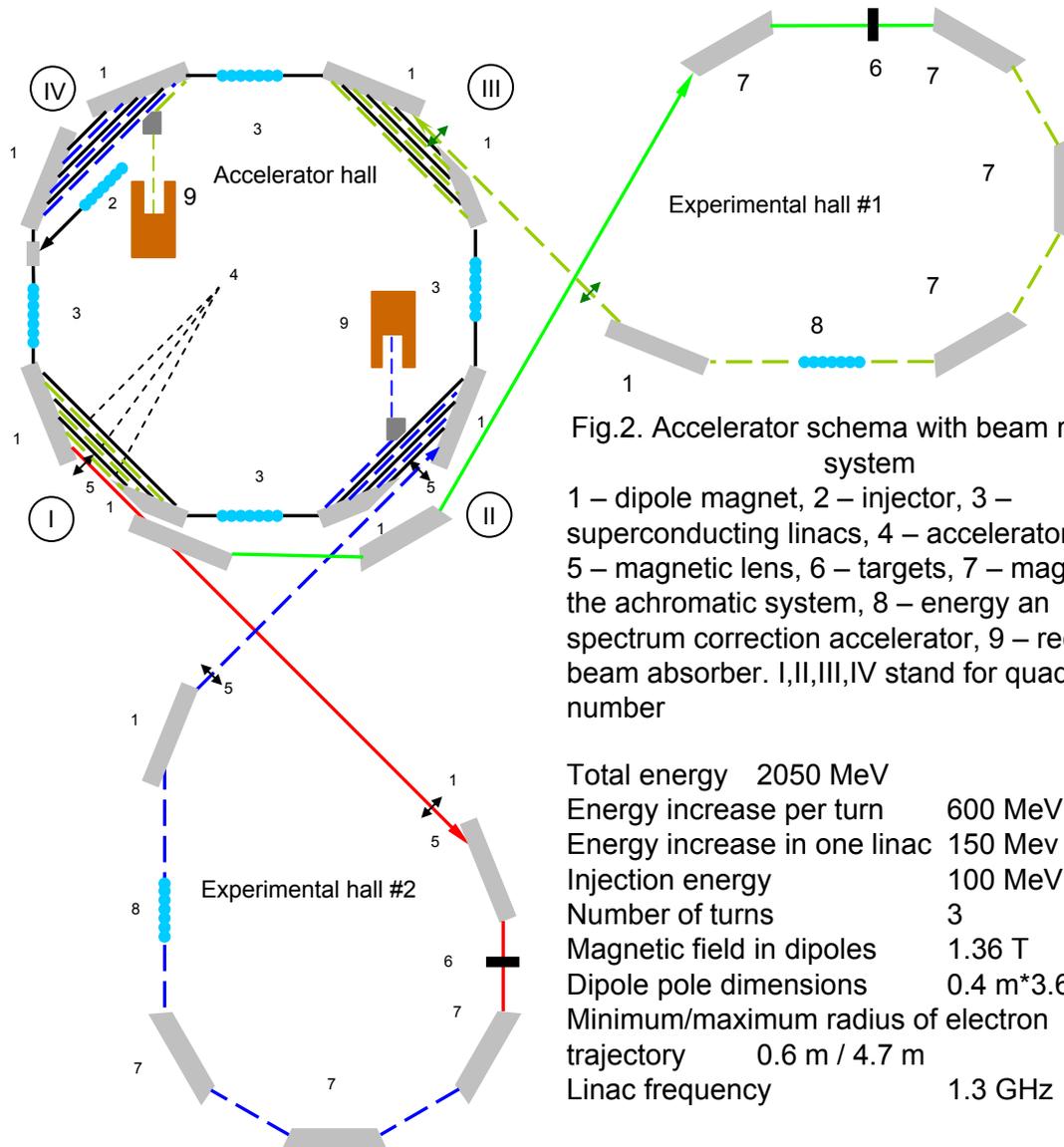


Fig.2. Accelerator schema with beam recovery system

1 – dipole magnet, 2 – injector, 3 – superconducting linacs, 4 – accelerator orbits, 5 – magnetic lens, 6 – targets, 7 – magnets of the achromatic system, 8 – energy an spectrum correction accelerator, 9 – recovery beam absorber. I,II,III,IV stand for quadrant number

Total energy	2050 MeV
Energy increase per turn	600 MeV
Energy increase in one linac	150 MeV
Injection energy	100 MeV
Number of turns	3
Magnetic field in dipoles	1.36 T
Dipole pole dimensions	0.4 m*3.6 m
Minimum/maximum radius of electron trajectory	0.6 m / 4.7 m
Linac frequency	1.3 GHz

Table 1. Main accelerator parameters

Современные ускорители в настоящее время сооружаются на основе криогенных ВЧ структур, что обеспечивает непрерывность во времени и малую пространственную и энергетическую расходимость пучка .

До 90-ых годов использовались ВЧ- структуры с ускорением $\Delta E(e) = 5-8$ МэВ/м (СЕБАФ имеет ВЧ-структуры с $\Delta E(e) = 5$ МэВ/м)

В настоящее время существуют разработки с $\Delta E(e) = 70-75$ МэВ/м. В Европе ряд фирм освоил промышленный выпуск ВЧ структур с $\Delta E = 25-3$ МэВ/м и больше.

Проект предусматривает использование ВЧ-структур с $\Delta E = 25$ МэВ/м и поворотных магнитных линз для осуществления кругового движения пучка электронов. При 3-х оборотах возможно получение энергии е-пучка до 2-х ГэВ

Рассматривается вариант увеличения энергии до 3-х ГэВ за счет использования ВЧ структур с большим ускорением

**4. Расположение нового
ускорителя электронов
с $E(e) = 2$ ГэВ в ускорительном
комплексе ФИАН в г. Троицке**

Предполагается расположить по 10 ускорительных ВЧ-структур (вдоль каждой стороны ускорительного зала) и 4-х магнитных линз, для обеспечения круговой траектории пучка.

Предполагается осуществить вывод пучка электронов и создание:

- системы **мечения гамма-квантов** :

$E(\gamma) = E(e) - E(e')$, где $E(e')$ – энергия рассеянного электрона,

- системы **мечения по энергии мезонов**:

$E(M) = E(\gamma) - E(p)$, где $E(p)$ - энергия протона, на котором рождается мезон.

- квазимонохроматического пучка фотонов путем столкновения

электронного пучка с лазерным пучком

(обратный комптон-эффект)

Отработанный е-пучок возвращается в ускорительную систему

(**рекуперация энергии е-пучка**), что значительно

сокращает энергозатраты всей системы

Рассматривается вариант создания **накопительного кольца**

на энергию 2 ГэВ и получения интенсивных высококачественных

(4-е поколение) **СИ -пучков**

5. Что понимается под электромагнитными исследованиями ?

Исследования структуры частиц и их взаимодействий с помощью e^- и γ -пучков, т.е. посредством не ядерного, а электромагнитного процесса.

Субъекты исследования:

- структура нуклонов, мезонов и кварков**
- изучение влияния ядерной среды на характеристики мезонов и резонансов**
- образование и исследование мезонных ядер**
- изучение взаимодействия электрона с пучком лазерных квантов**
- исследование поляризационных эффектов во взаимодействии электронов (гамма-квантов) с нуклонами**

6. Преимущества исследования структуры частиц и ядер с помощью e^- и γ – пучков по сравнению с $A - A$ взаимодействием

- - Для $A - A$ – взаимодействия характерна очень сложная картина, связанная с возникновением ряда фаз (предравновесной, равновесной и постравновесной), включающих образование кварк-глюонов, мезонов и нуклонов.

Существующие модели основаны на гидродинамике. Очень трудно выделить отдельные частицы и сопоставить их с конкретной фазой.

- Для e^- и γ - пучков характерно;
 - точечность падающей частицы (размер e^- порядка 10^{-16} см. а нуклона 10^{-13} см)
 - известен характер взаимодействия (эл.магн.) и существует теория возмущений
 - объект исследования не разрушается в результате взаимодействия

кварк-
глюонная
плазма

Свободный
Разлет
адронов

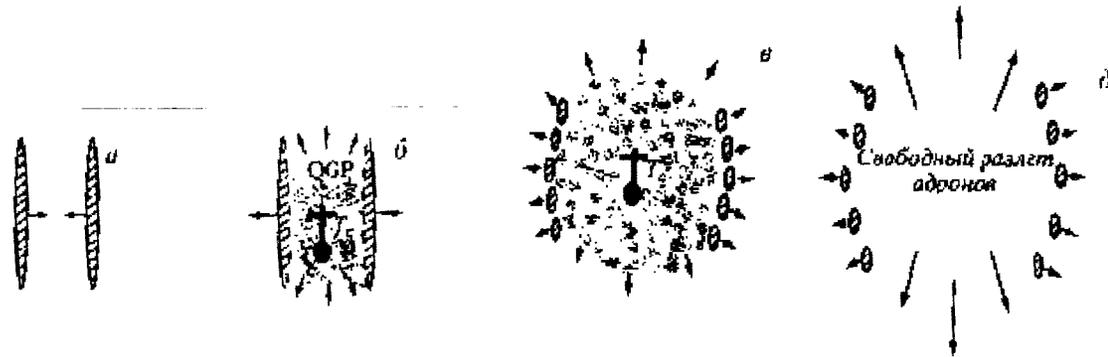


Рис. Схематическое представление последовательных стадий центрального столкновения двух одинаковых тяжелых ядер
(S.Hands. Contemp. Phys.(2001) v.42,p.209)

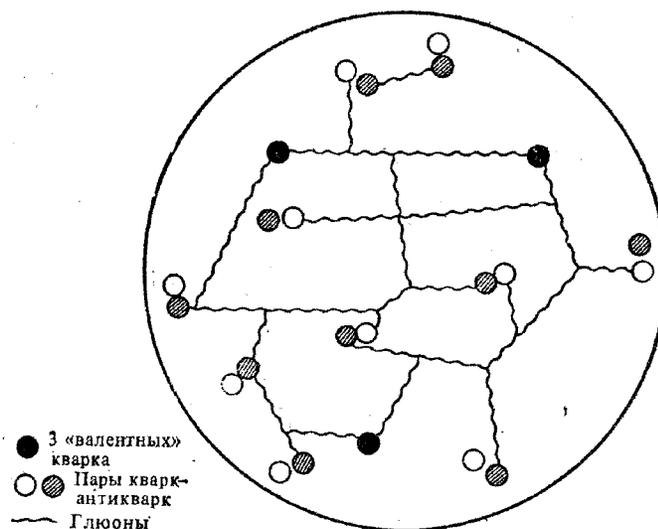


Рис. Так выглядит протон при наблюдении с помощью излучателя, обеспечивающего разрешение 10^{-15} см. Три валентных кварка почти неразличимы среди изобилия кварк – антикварковых пар и глюонов

7. Механизм возникновения массы у частиц и кварков.

- Наш видимый мир составляет всего (5- 10) % всей Вселенной.
- Существует темная энергия и темная материя**
- Существует гипотеза Большого взрыва**

-В микромире также существуют проблемы, не понятые до сих пор и одна из них:

как частицы и кварки приобретают свою массу ?

кварки	u	d	s	c	b	t
масса(МэВ)	1,5-3,3	3,5-6,0	104 ± 30	1270 ± 90	4200 ± 120	171200 ± 2100
лептоны	e	μ	τ			
масса(МэВ)	0,510	105,66	1776,84			
мезоны	π^{+-}	π^0	η	ω	η'	ϕ
масса(МэВ)	139,57	134,98	547,85	782,65	957,66	1019,45
нуклоны	p	n				
масса (МэВ)	938,27	939,56				

Возможный механизм возникновения массы кварков— динамическое спонтанное нарушение киральной симметрии
 (аналог - шар на вершине холма)

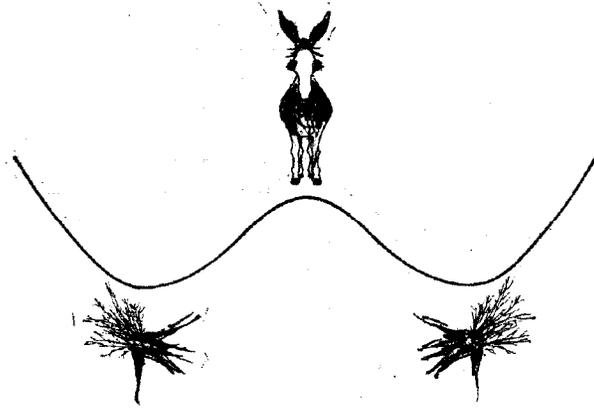


Рис. Буриданов осел, в нерешительности стоящий между двумя равноудаленными пучками моркови. Будучи не в состоянии сделать выбор, он обречен на голодную смерть в идеально симметричном мире

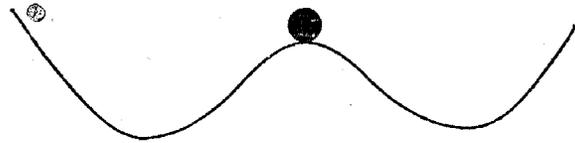
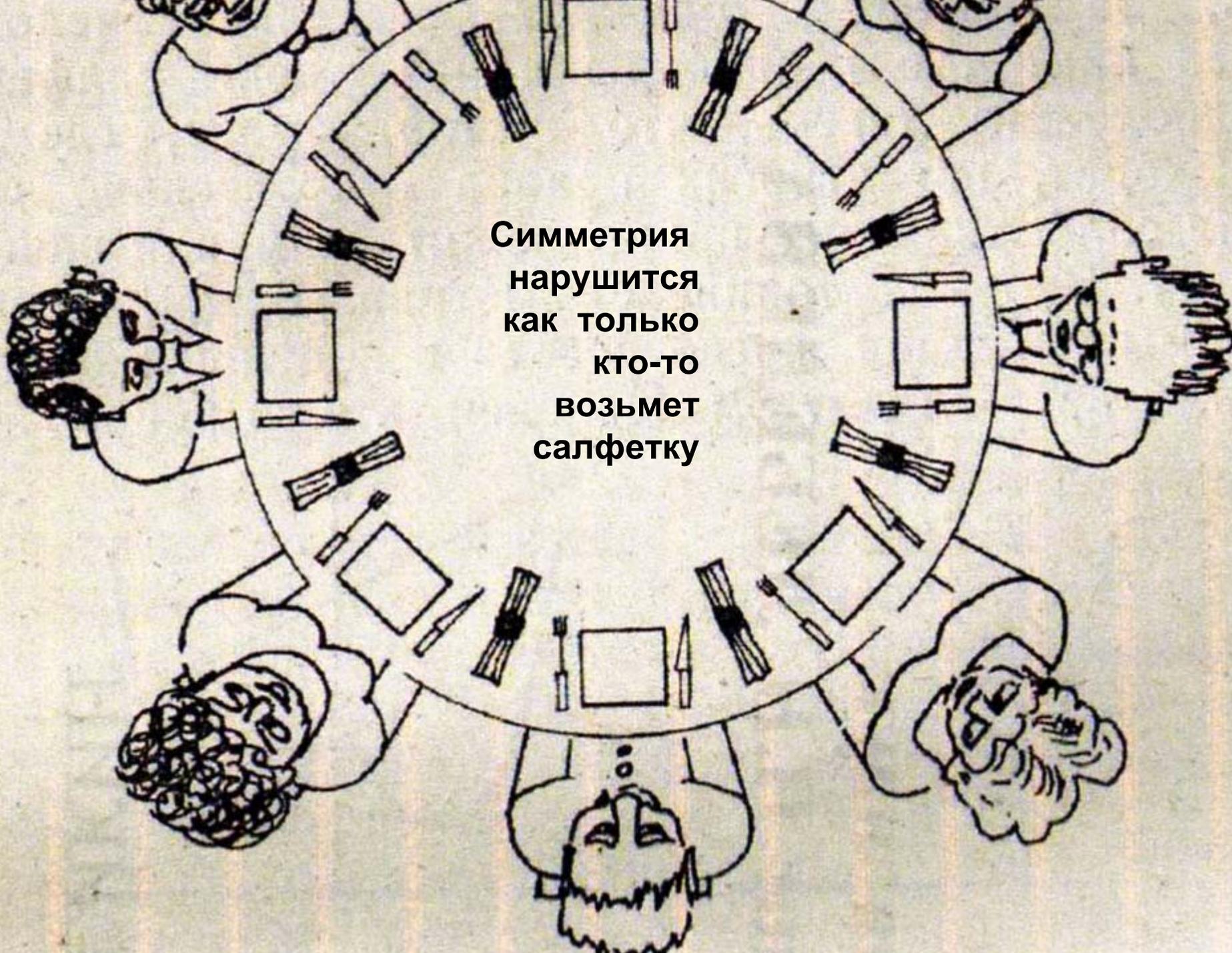


Рис. Мир продолжает оставаться идеально симметричным, однако физическая ситуация теперь неустойчива: шар все же скатится в ту или иную из долин, и симметрия станет “скрытой”



**Симметрия
нарушится
как только
кто-то
возьмет
салфетку**

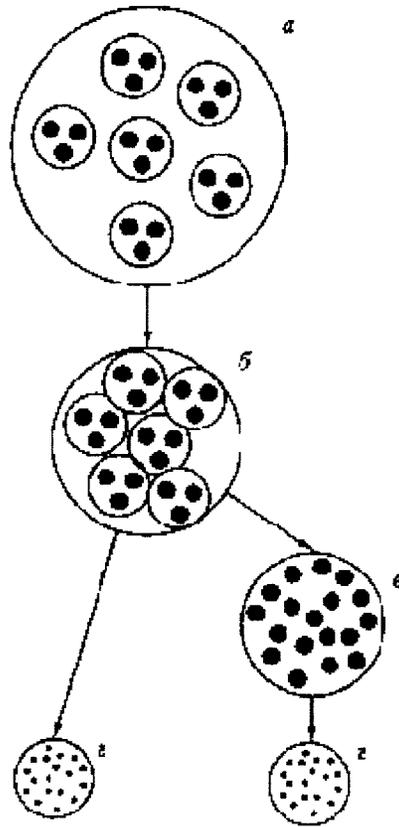


Рис. Схематическое представление возможных путей эволюции “холодного” ядерного вещества по мере его сжатия

(Е.Л. Фейнберг.
Препринт ФИАН,
177(1989 г.))

8. Состояние КХД- теории сильного взаимодействия

**Существующая теория сильного взаимодействия –
квантовая хромодинамика (КХД) :**

- хорошо “работает“ при больших энергиях (десятки ГэВ) взаимодействия и малых расстояниях между взаимодействующими частицами ($\Delta x (i) \rightarrow 0$) т.е. когда константа взаимодействия α (с.вз.) < 1 .

КХД в этом случае является аналогом теории возмущений для частиц с нулевой массой ($m (i) = 0$) и не имеющих размеров ($\Delta r (i) = 0$).

- для средних энергий взаимодействия и больших расстояний α (с.вз.) > 1 и КХД в виде теории возмущения уже не “работает“

Нужны новые подходы и понимание как и почему кварки перестают быть точечными и приобретают массу.

- динамическое спонтанное нарушение киральной симметрии - возможна причина возникновения массы кварков

9. Как наблюдать влияние ядерной материи на характеристики частиц ?

Наблюдение и исследование влияния ядерной материи на характеристики частиц (массу, время жизни, размеры и др.), как одной из причин возникновения у частиц массы, является, пожалуй, наиболее доступным способом получения хоть каких-то сведений об этой проблеме.

Ответ состоит в сопоставлении распределений по энергии распадающихся частиц для конкретного субъекта (мезона, резонанса) в случае, когда субъект находится в свободном состоянии и когда субъект находится в поле действия ядерных сил, т.е. в ядре.

Сдвиг по энергии распределений и указывает на воздействие ядерной среды.

Только в этом случае мы наблюдаем не *возрастание* (возникновение) массы субъекта, а *уменьшение* (исчезновение) массы.

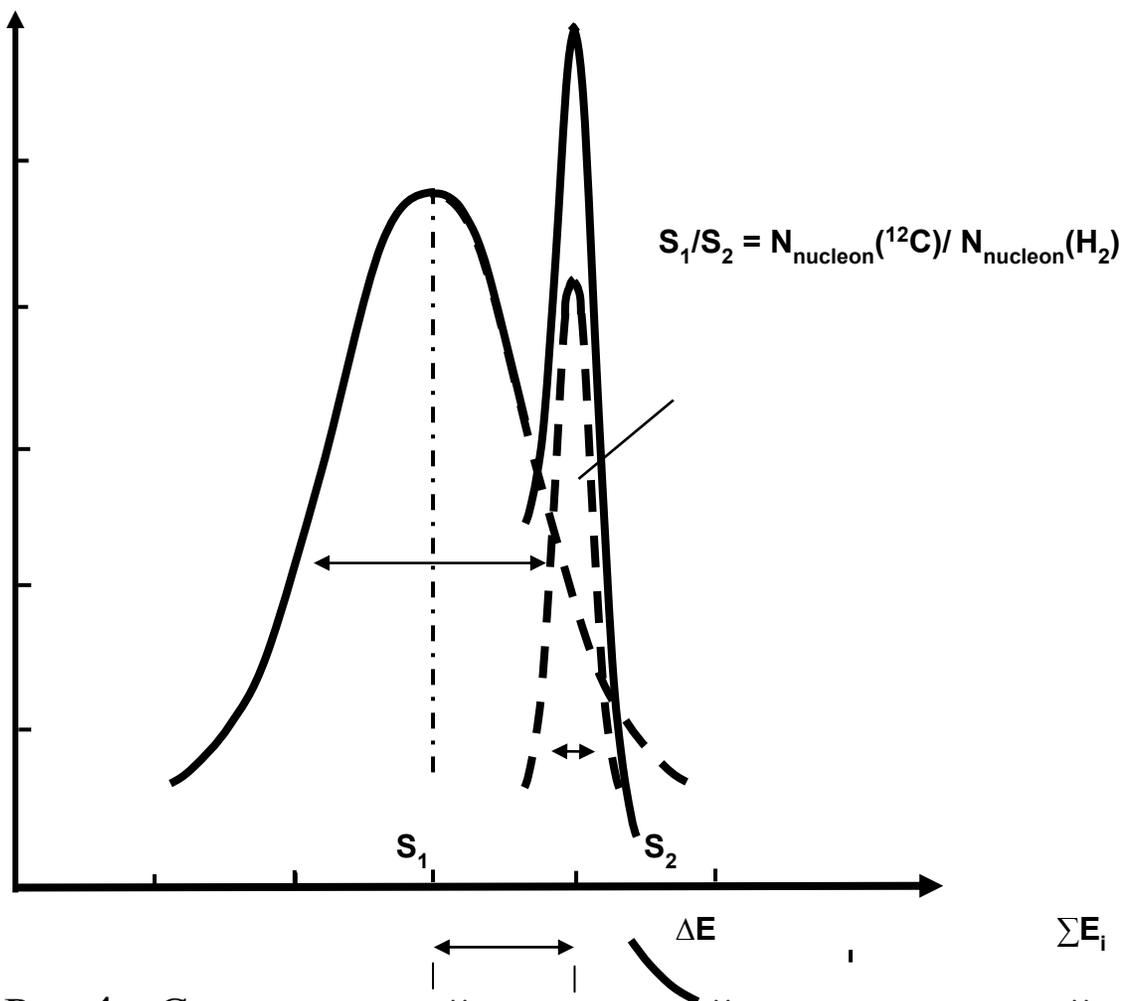


Рис.1. Схематический ожидаемый энергетический спектр по суммарной энергии ΣE_i частиц от распада мезона M , возникающего в результате рождения на ядерном нуклоне ядра ^{12}C или на ядре H в составной мишени CH_2 .

**10. Выбор η -, ω -, η' -, ϕ -
изоскалярных мезонов для
экспериментов по обнаружению
влияния ядерной среды на
характеристики мезонов**

Для проведения экспериментов по изучению изменения массы мезонов в ядерной среде выбраны изоскалярные мезоны, которые характеризуются :

- узким распределением по массе
- распадом на 2 частицы или 2 гамма-кванта.

Если поместить мезон в ядро, то из-за ядерного взаимодействия, если оно существует между мезоном и нуклонами, масса мезона уменьшится и энергия частиц, распадающегося в ядре мезона, должна быть меньше по сравнению с распадом мезона в свободном состоянии.

Таблица изоскалярных мезонов

	η	ω	η'	ϕ
Энергия E(МэВ)	$547,85 \pm 0.02$	$782,65 \pm 0.12$	$957,66 \pm 0.24$	$1010,51 \pm 0,1$
Ширина Γ (МэВ)	$1,30 \pm 0,07$	(КэВ) $8,49 \pm 0.08$	$0,205 \pm 0.015$	$4,26 \pm 0.05$
распад	$\gamma\gamma$	π^+, π^-	$\gamma\gamma$	K^+, K^-
%	$39,31 \pm 0.5$	$1,53 \pm 0.12$	$2,10 \pm 0.12$	$49,2 \pm 0.6$

11. Условия проведения эксперимента с мезонами в ядерной среде

Для осуществления эксперимента необходимо выполнение следующих условий :

- образование мезона должно осуществляться в условиях **безотдачной кинематики**, т.е. когда кинетическая энергия мезона равна нулю.

В этом случае мезон находится внутри ядра практически все время до своего распада и влияние ядерной среды будет максимальным.

- для регистрации частиц распада целесообразно использовать 2 спектрометра, расположенных под 180° друг к другу и под 90° к пучку, чтобы уменьшить фоновый вклад.
- **эксперимент следует проводить с использованием сложной мишени, так чтобы кроме ядер A , в ней находились и ядра водорода H ,**

Тогда будет автоматически осуществляться калибровка по энергии.

Постановка эксперимента описана в КСФ ФИАН, 7.(2009) р.15

12. Эта (η) - ядра, результаты ФИАН

Впервые возможность создания связанной системы η – мезона и ядра A рассмотрели L. Liu and Q. Haider (1986)

По их предложению был проведен эксперимент в БНЛ (1988 г.)



в котором ожидался пик протонов с энергией $E_p = 240$ МэВ,

под углом $\theta = 15^\circ$. Однако, **- пик не был обнаружен**

эксперимент не удался (!)

(регистрацию p не смогли осуществить из-за сильного фона)

Эксперименты по изучению ядерного взаимодействия мезонов были прекращены более чем на 10 лет !

А.И. Лебедев и В.А. Трясучев впервые рассмотрели возможность образования η – ядер в фотореакции (1991 г.)



Эксперимент был осуществлен в ФИАНе, на синхротроне

ПАХРА (1999 г.) - первая регистрация η -мезонных ядер

Использовалась регистрация (π^+, n) - пар от распада $S_{11}(1535)$ резонанса, возникающего в η - ядре



В.И. Ритус назвал эта-ядро” ядерным резонатором“, который испытывает колебания $\eta N \leftrightarrow S(1535)$, но обладает плохой добротностью, т.к. очень быстро распадается по каналу πN

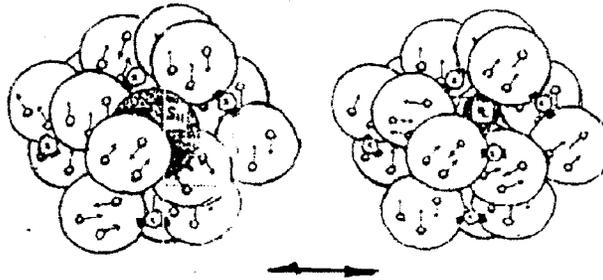


Рис. Два состояния η -мезонного ядра :

- с η -мезоном в ядре (справа)
- с $S_{11}(1535)$ нуклонным резонансом (слева)

Оба состояния переходят друг в друга за время

$\Delta\tau \approx 0.8 \cdot 10^{-23}$ сек вследствие процесса:



А.И. Лебедев, В.А Трясучев J.Phys.G.17,1197 (1991)

Первый расчет сечения фоторождения эта-ядер

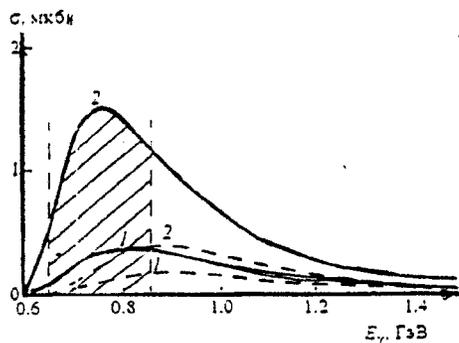
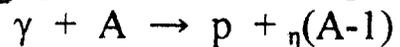


Рис. 3 Зависимость полных сечений фоторождения η -ядер на углеродной (1) и на кислородной (2) мишенях от энергии γ -квантов.

----- реакция на s-оболочечных нуклонах
_____ реакция на нуклонах p-оболочки

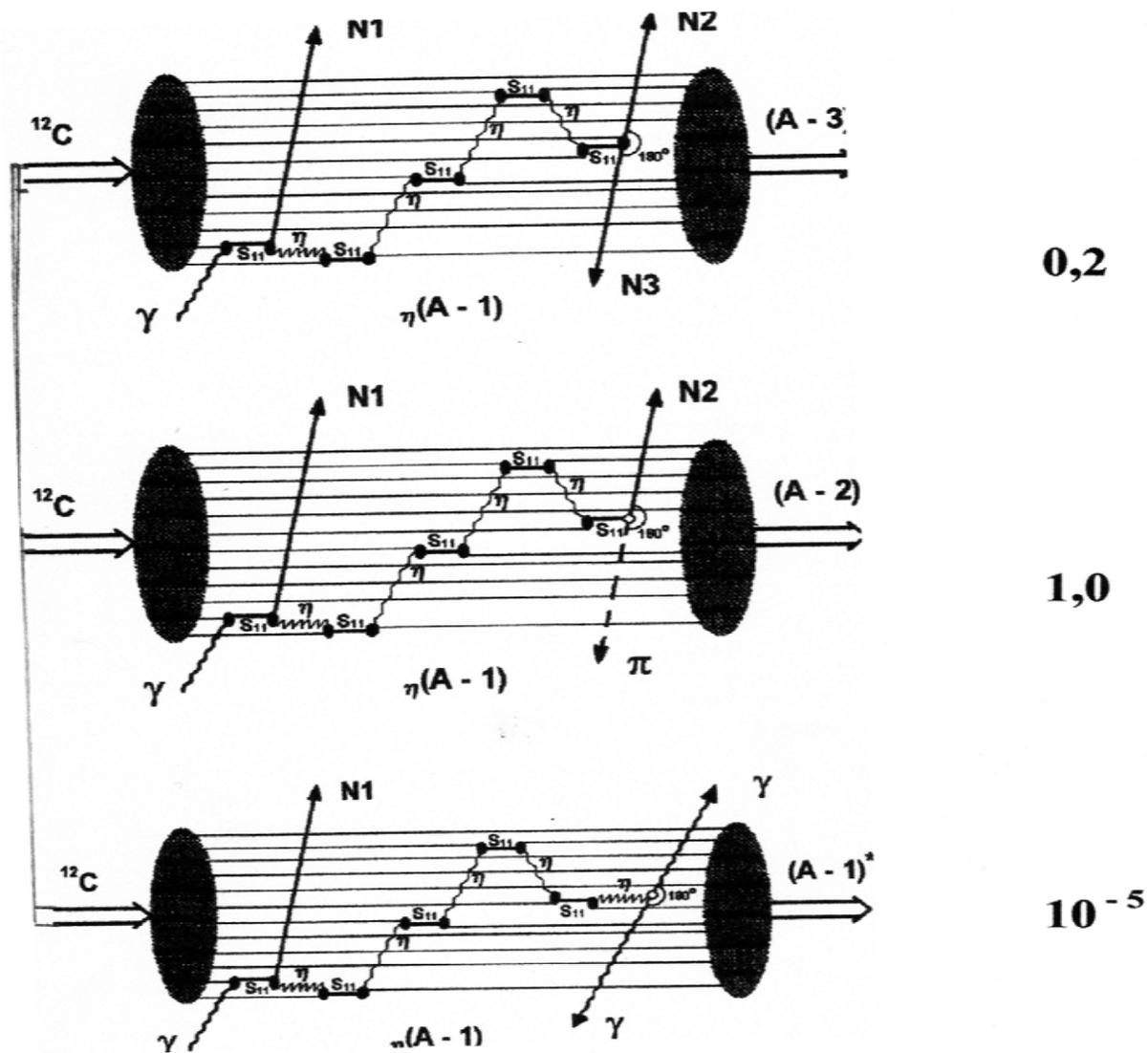
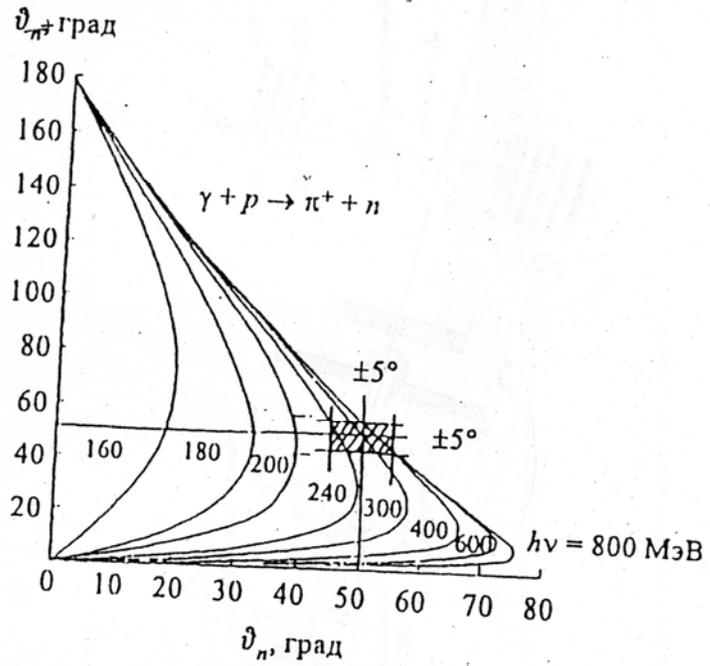
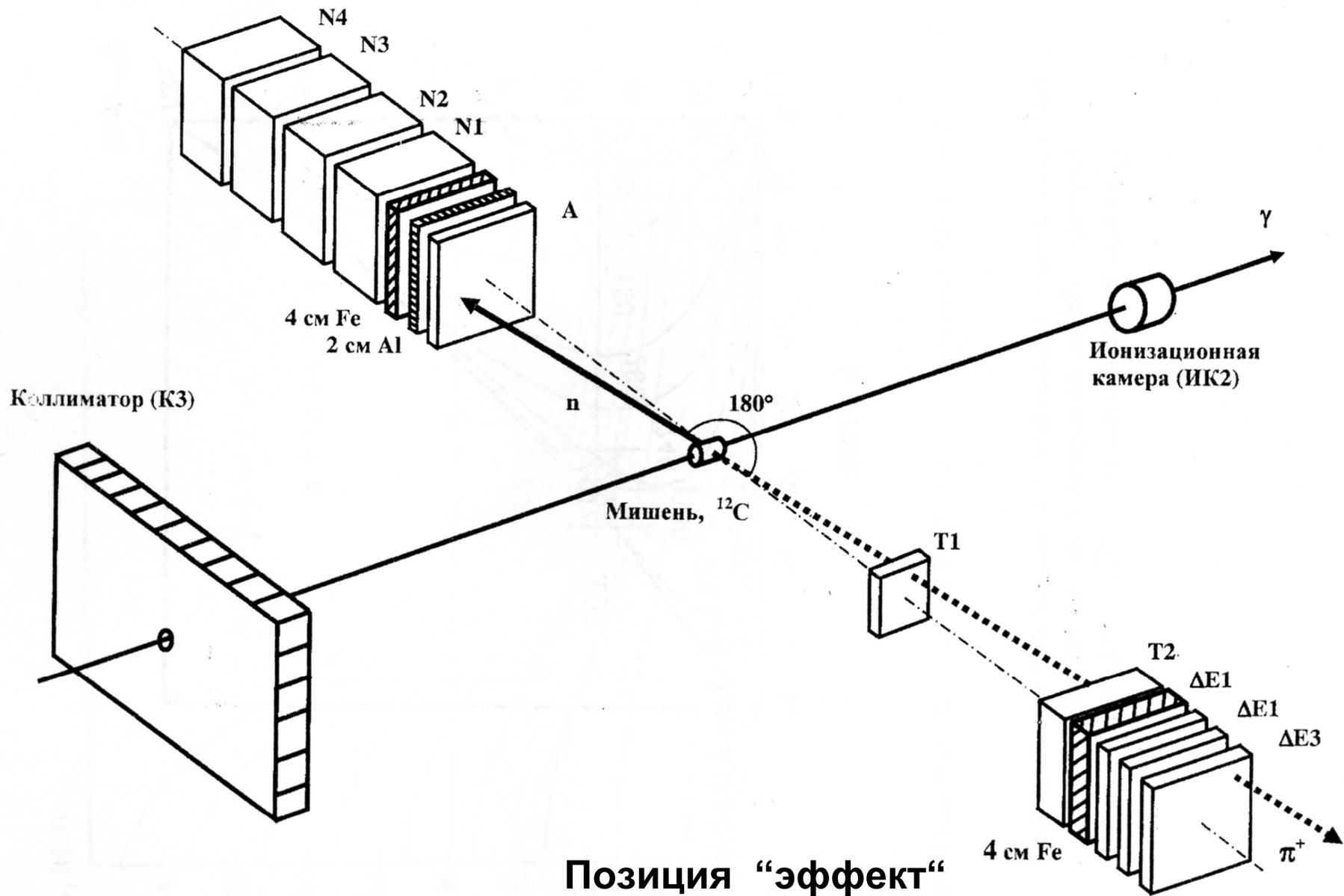
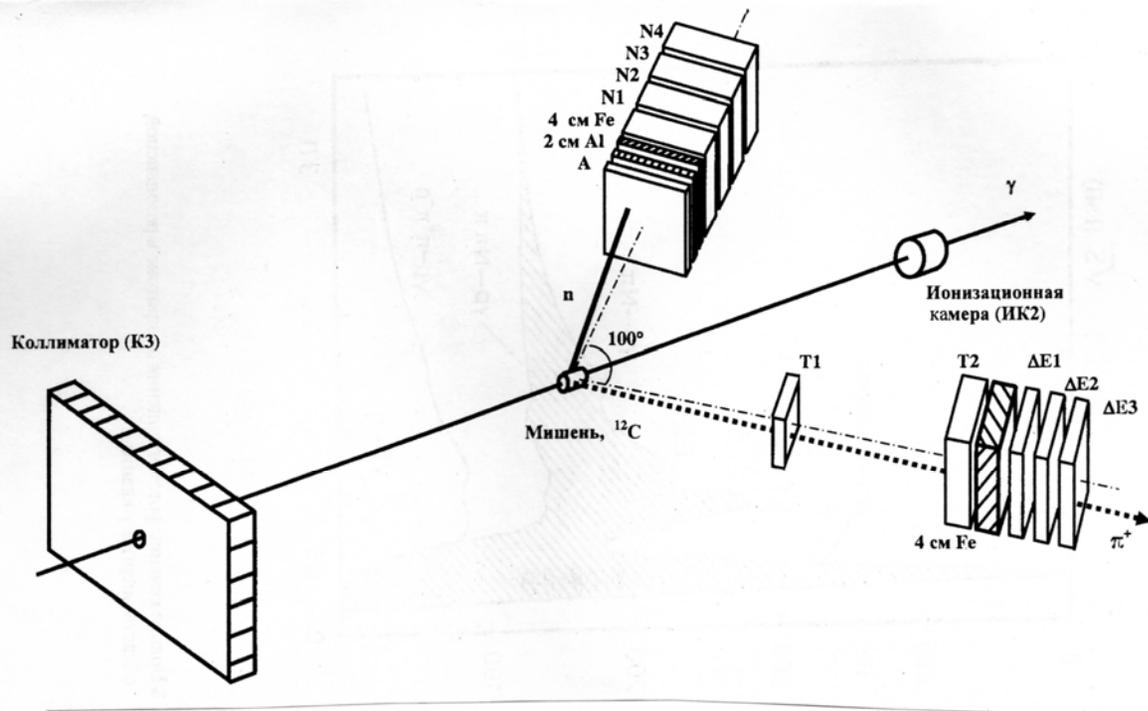


Рис. 5. Схема образования η – мезонного ядра в γA - реакции, его эволюция и распад по NN , πN и $\gamma\gamma$ - каналам



Кинематика фоторождения пионов





Позиция “калибровка”

$$E_{\gamma \max} = 850 \text{ МэВ}$$

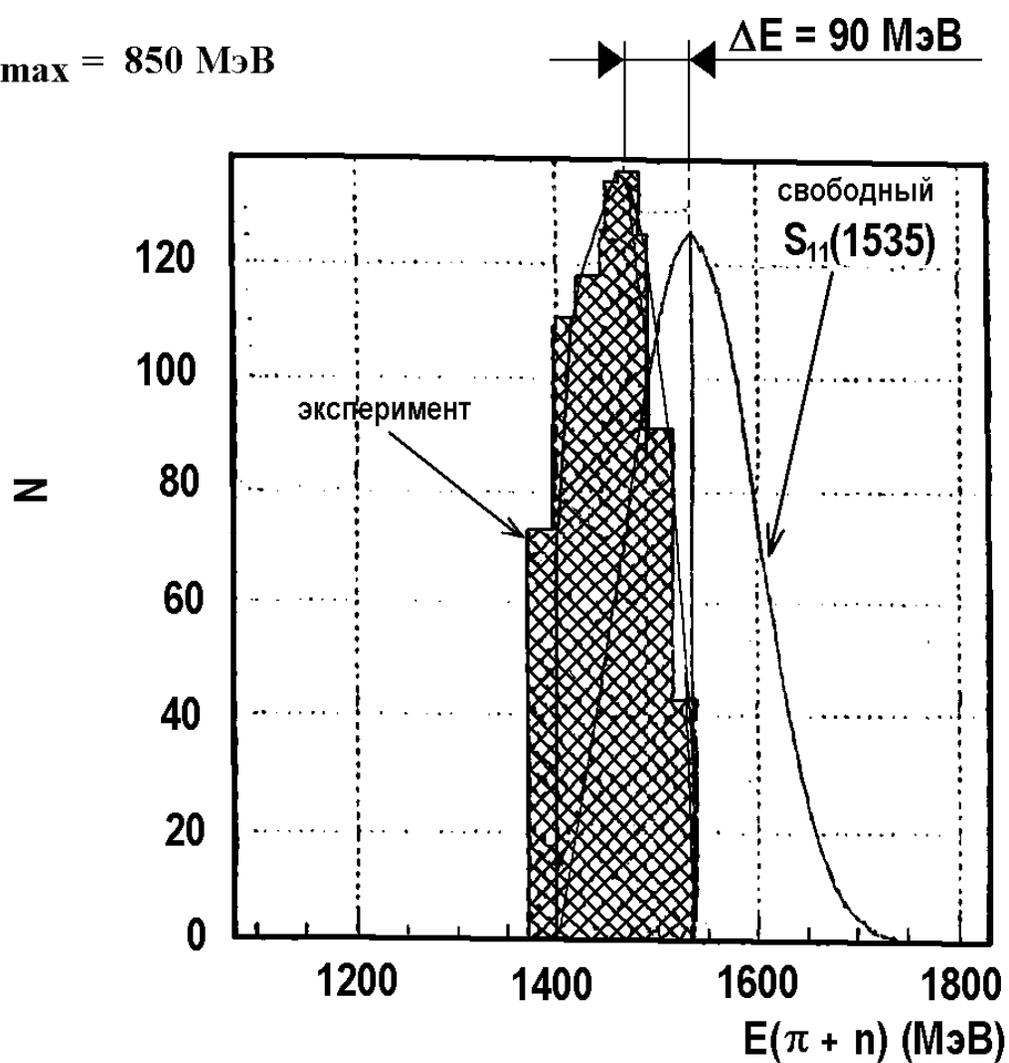
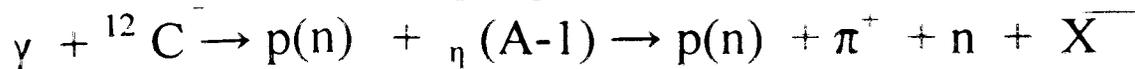


Рис. 4 Экспериментальное распределение по суммарной энергии $E = E_{\pi} + E_n$ продуктов распада $S_{11}(1535)$ резонанса внутри ядра в сравнении с распадом свободного S_{11} резонанса.

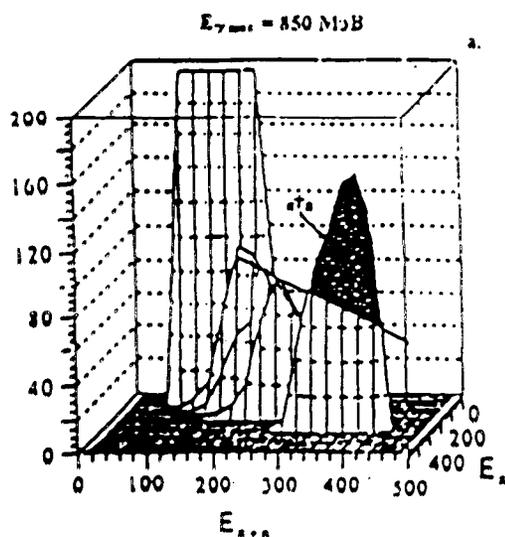
- G.A. Sokol et al. *Fizika B (Zagreb)* 8, 81 (1999)

Первое наблюдение (обнаружение) эта- ядер в
ФИАНе на синхротроне "ПАХРА":



по регистрации π^+n - пары.

$E(\gamma) = 850$
МэВ



$E(\gamma) = 650$
МэВ

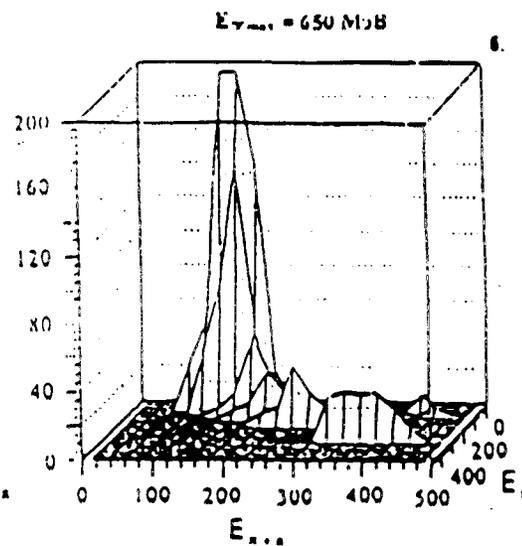


Рис. Зависимость кинетической энергии $E_{\Sigma}(E_{\pi} + E_n)$ - (π^+n) - пары и кинетической энергии π^+ - мезона для двух энергий $E_{\pi \text{ max}}$ - конца спектра тормозного излучения: 650 и 850 МэВ

13. Перспективы изучения мезонных- ядер на ускорителе электронов с энергией 2 ГэВ

Для η - ядер :

- зависимость сдвига ΔE от A -мишени в распределении продуктов распада S_{11} -резонанса в ядре и свободного S_{11} – резонанса.
- зависимость $\Gamma(E)$ распределения от A - мишени

Для других мезонных ядер

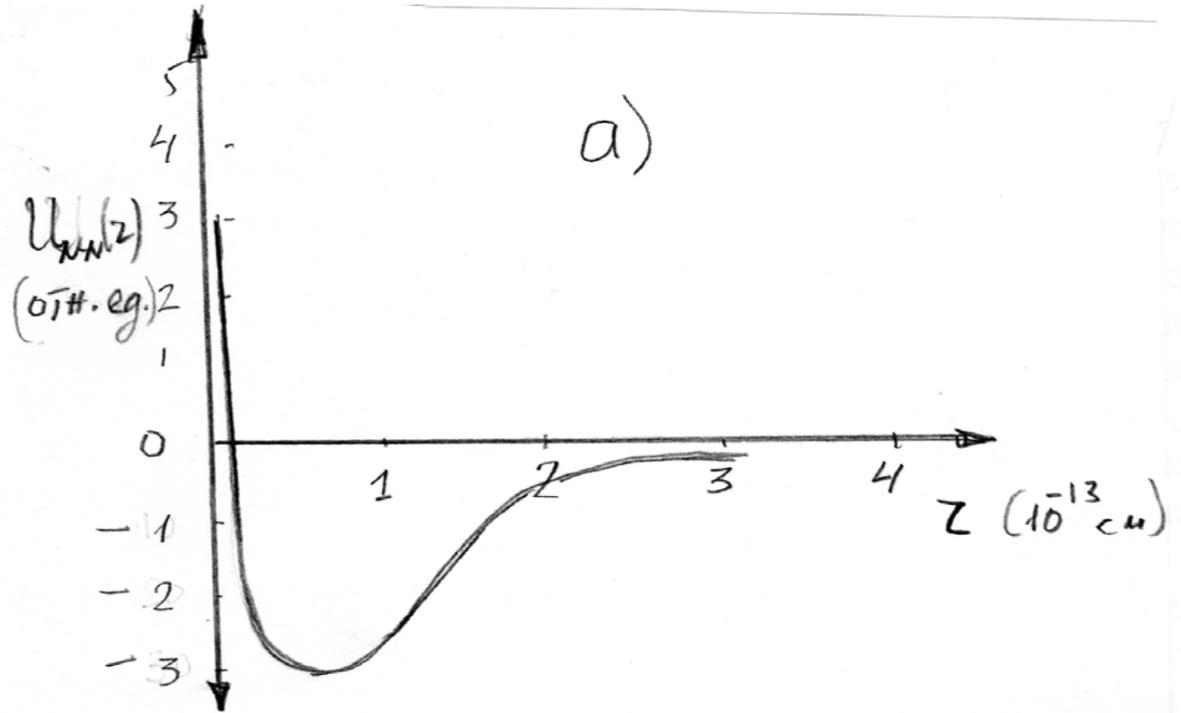
- факт существования мезонного ядра:
(наблюдение сдвига в распределении $\sum E_i$)
- зависимость $\Delta E, \Gamma(E)$ от A - мишени

Эксперимент желательно осуществлять при соблюдении условий :

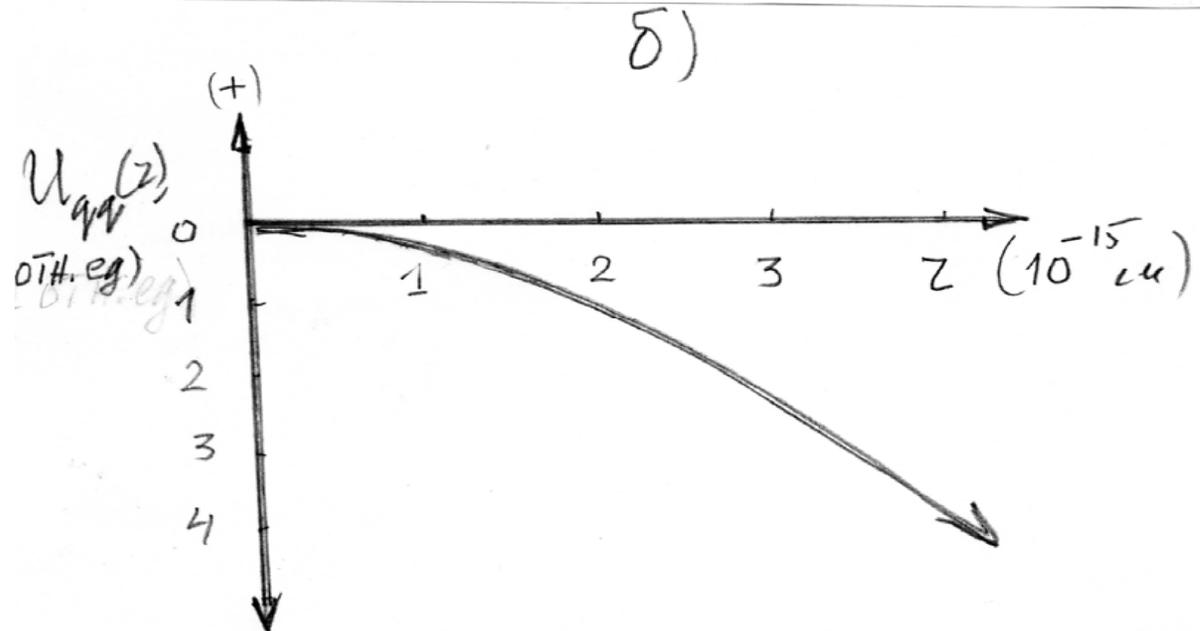
- безотдачная кинематика
- регистрация 2-х частичных распадов мезона, находящегося в ядре
- использование сложной мишени, содержащей ядра A и H .

Потенциал
взаимодействия
2-х нуклонов

П
О
Т
Е
Н
Ц
И
А
Л



Потенциал
взаимодействия
2-х кварков



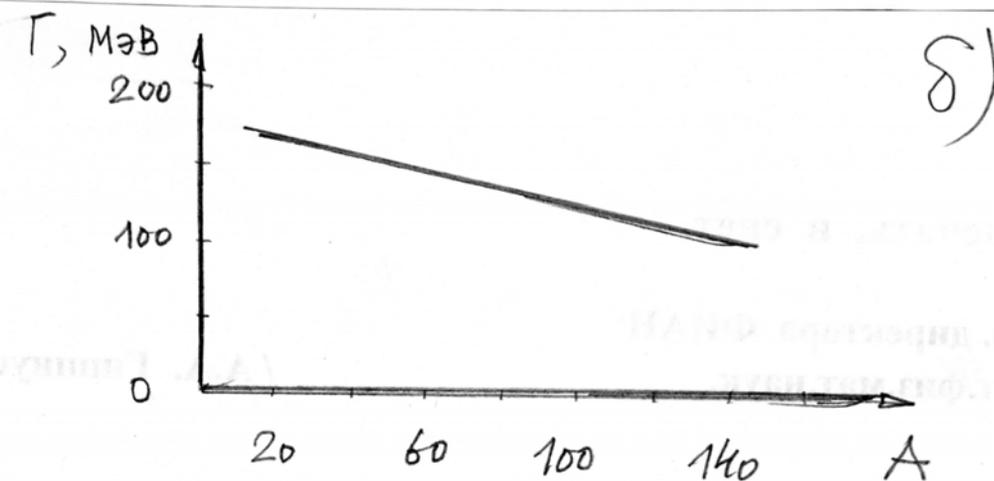
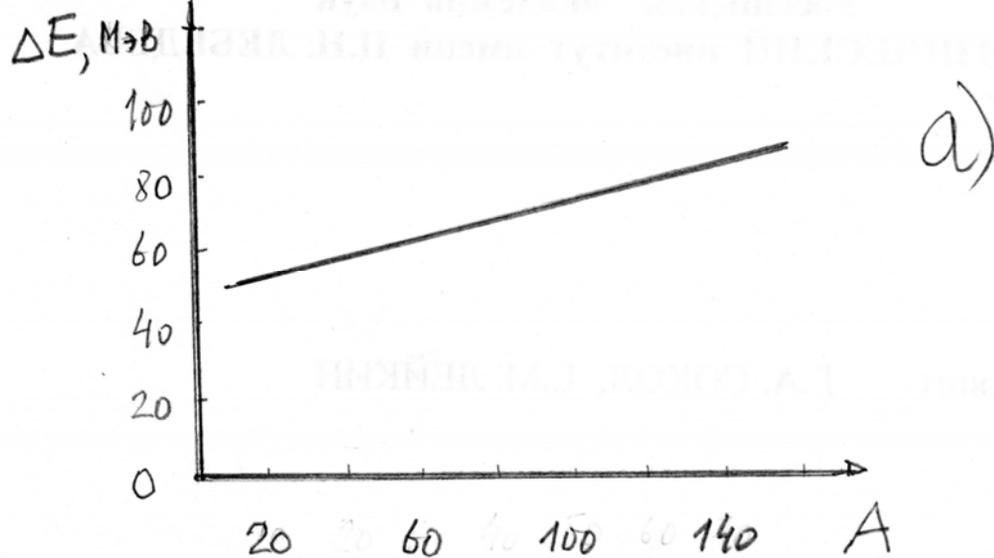


Рис. Ожидаемое смещение средней энергии ΔE (МэВ) а) и ширины Γ (МэВ) б) экспериментального распределения по суммарной энергии $\sum E_i$ частиц распада S_{11} – резонанса, находящегося внутри ядра, в зависимости от A ядра.

14. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные задачи :

- **создание нового ускорителя электронов** на энергию 2 ГэВ
- **организация ЦЭМИ** – Центра электромагнитных исследований в г. Троицке (ФИАН, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ЛФВЭ ОИЯИ, МИФИ, ИЯФ ТПУ и др.)
- **проведение исследований** на ускорителе

По результатам предполагаемых

экспериментов будут получены сведения :

- **о ядерном взаимодействии** изоскалярных мезонов
- **о влиянии ядерной среды** на характеристики (масса) мезонов (что, возможно, обеспечит продвижение в понимании природы массы)

СПАСИБО !