

T-32

49

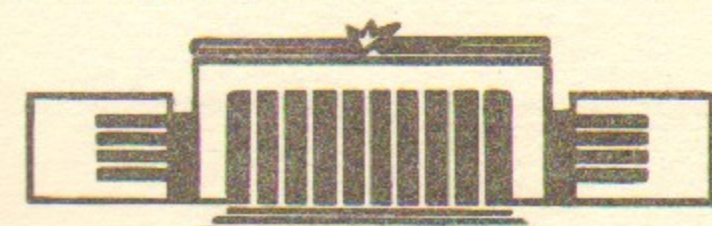
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

А.Б.Темных

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
FLIP—FLOP ЭФФЕКТА
ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ

ПРЕПРИНТ 82-148

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИМБ. 82



Новосибирск

ИСТИННОСТЬ ИЛИ НЕИСТИННОСТЬ

ИСТИННОСТЬ

ИСТИННОСТЬ

ИСТИННОСТЬ

ИСТИННОСТЬ

ИСТИННОСТЬ

ИСТИННОСТЬ

В работе исследуется феноменологическая модель взаимодействия встречных пучков в накопителе. В рамках данной модели удается предсказать условия возникновения *flip-flop* эффекта. Некоторые выводы, полученные в рамках этой модели, сравниваются с экспериментальными данными различных установок со встречными электрон-позитронными пучками.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

FLIP-FLOP ЭФФЕКТА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ

В.Б.Темных

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется феноменологическая модель взаимодействия встречных пучков в накопителе. В рамках данной модели удается предсказать условия возникновения *flip-flop* эффекта. Некоторые выводы, полученные в рамках этой модели, сравниваются с экспериментальными данными различных установок со встречными электрон-позитронными пучками.

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \left(\frac{2J_1 J_2}{\sigma_1 \sigma_2} \right) \\ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \left(\frac{2J_1 J_2}{\sigma_1 \sigma_2} \right) \end{aligned} \right.$$

В работе исследуется феноменологическая модель взаимодействия встречных пучков в накопителе. В рамках данной модели удается предсказать условия возникновения *flip-flop* эффекта. Некоторые выводы, полученные в рамках этой модели, сравниваются с экспериментальными данными различных установок со встречными электрон-позитронными пучками.

Одним из характерных проявлений электромагнитного взаимодействия встречных пучков является наблюдаемое на всех установках увеличение вертикального размера пучков. При этом иногда имеет место так называемый *flip-flop* эффект. Суть этого эффекта заключается в том, что вертикальные размеры пучков с равными токами могут сильно отличаться друг от друга. Например, первый пучок может иметь размер близкий к естественному, а размер второго пучка при этом будет сильно увеличен. Под действием внешнего возмущения ситуация может измениться на противоположную. Размер первого пучка может резко увеличиться, в то время как размер второго пучка уменьшится до естественного. Подобные явления наблюдались на установках *SPEAR/1/*, ВЭШ-2, ВЭШ-2М, *PETRA/2/*.

I. Экспериментальные данные по различным установкам показывают, что при взаимодействии сильного пучка со слабым пучком зависимость вертикального размера слабого пучка от тока сильного во многих случаях хорошо аппроксимируется выражением:*

$$\sigma_1^2 = \sigma_0^2 + \left(\frac{a J_2}{\sigma_2} \right)^{\rho} \quad (1)$$

где σ_1 - среднеквадратичный вертикальный размер слабого пучка в месте встречи; σ_0 - естественный вертикальный размер при нулевом токе встречного пучка; σ_2, J_2 - вертикальный размер в месте встречи и ток сильного пучка; a и ρ - константы.

На рис. I-4 представлены экспериментальные данные и результат аппроксимации для различных установок.

Рассмотрим теперь случай, когда токи в обоих пучках сравнимы по величине и их взаимным влиянием пренебречь нельзя. Предполагая, что в этом случае справедливы те же две закономерности для обоих пучков, вместо (I) мы должны записать систему:

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = \sigma_0^2 + \left(\frac{a J_2}{\sigma_2} \right)^{\rho} \\ \sigma_2^2 = \sigma_0^2 + \left(\frac{a J_1}{\sigma_1} \right)^{\rho} \end{cases} \quad (2)$$

* Вид этого выражения определяют две закономерности:

- 1) сохраняется приблизительно гауссовское распределение плотности пучка;
- 2) среднеквадратичный размер пучка определяется плотностью частиц в центре встречного пучка.

Аналогичный случай при $\rho = 2$ описан в работе [2].

2. В общем случае система (2) сводится к уравнению, которое всегда можно решить численно. Это будет сделано позже, а пока рассмотрим некоторые простые ситуации, которые часто встречаются на практике. Будем считать, что $J_1 = J_2 = J$. Для упрощения выкладок перейдем к переменным $t_1 = \sigma_0/\sigma_1$, $t_2 = \sigma_0/\sigma_2$ область изменения которых составляет:

$$0 < t_1, t_2 \leq 1$$

При этом система (2) запишется в форме:

$$\begin{cases} t_1 = f(J, t_2) \\ t_2 = f(J, t_1) \end{cases} \quad (3)$$

где: $f(J, t) = \left(1 + \frac{a^\rho}{\sigma_0^{\rho+2}} J^\rho t^\rho\right)^{-1/2}$

Если теперь в плоскости t_1, t_2 изобразить графики зависимостей t_1 от t_2 , используя первое уравнение системы (2), и t_2 от t_1 , используя второе уравнение, то точки пересечения этих графиков будут давать решения системы. Такие графики приведены на рис.5 и рис.6.

На рис.5 изображена зависимость t_1 от t_2 и t_2 от t_1 при достаточно малой величине тока J . Здесь имеется только одна точка пересечения, которая соответствует решению $t_1 = t_2$ или $\sigma_1 = \sigma_2$, т.е. оба пучка имеют одинаковый размер. На рис.6 приведены зависимости t_1 от t_2 и t_2 от t_1 при большой величине тока J . Здесь имеется уже три точки пересечения графиков. Первая точка пересечения дает решение $t_1 = t_2$ или $\sigma_1 = \sigma_2$ т.е. размеры пучков равны. Во второй точке пересечения графиков $t_1 \approx 1, t_2 < 1$ или $\sigma_1 \approx \sigma_0, \sigma_2 > \sigma_0$ т.е. эта точка соответствует случаю, когда первый пучок имеет вертикальный размер $\sim \sigma_0$, а размер второго пучка увеличен. Третья точка пересечения соответствует обратной ситуации, размер первого пучка увеличен, размер второго $\sim \sigma_0$. Таким образом, при токе больше некоторого критического тока J^* существуют три возможных состояния системы двух пучков, или тоже самое существует вероятность появления *flip-flop* эффекта.

Величину критического тока J^* легко найти из условия, что в точке $t_1 = t_2$ производная $\partial f(J^*, t)/\partial t = -1$. Это дает:

$$J^* = \frac{\sigma_0^{1+\frac{2}{\rho}}}{a} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho-2}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{\rho-2}\right)^{1/\rho}$$

и,

$$\sigma^* = \sigma_0 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho-2}\right)^{1/2}$$

где $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma^*$ - решение системы (2) при $J = J^*$. Отметим, что при $\rho > 2$, J^* и σ^* стремятся к бесконечности. Это фактически означает, что при $\rho \leq 2$, *flip-flop* эффекта быть не может.

3. Для демонстрации того, насколько правильно система (2) описывает явления, связанные с *flip-flop* эффектом приведены графики на рис.7 и рис.8.

На рис.7 представлена зависимость σ_1 и σ_2 от тока пучков, полученная путем численного решения системы (2), при условии $J_1 = J_2 = J$, $\rho = 5,32$, $a = 0,53$. Величины параметров ρ и a взяты из измерений, сделанных на установке ВЭШ-2М (см. рис.2). Из этого графика видно, что при токе $J < J^*$ имеется только одно решение системы (2) $\sigma_1 = \sigma_2$ т.е. оба пучка имеют одинаковый размер и с ростом тока этот размер постоянно увеличивается. При токе $J > J^*$ появляются два дополнительных решения системы (см. рис.6). Одно из них соответствует случаю, когда размер первого пучка увеличен, размер второго остается $\sim \sigma_0$. Другое дополнительное решение соответствует обратной ситуации, увеличен размер второго пучка, размер первого $\sim \sigma_0$. Таким образом, при токе $J > J^*$ возникает *flip-flop* эффект, что в действительности всегда наблюдалось на ВЭШ-2М.

На рис.8 представлена расчетная зависимость σ_1 и σ_2 от величины тока в первом пучке J_1 при условии, что $J_2 = const$, причем $J_2 > J^*$. Из этого графика видно, что весь диапазон изменения $J_1 (0 \div \infty)$ можно разделить на три области. Первая область соответствует достаточно малым величинам J_1 . Здесь существует только одно решение системы (2), которое представляет собой случай, когда увеличен размер первого пучка, а второй пучок имеет размер $\sim \sigma_0$, и при увеличении J_1 раз-

меры обоих пучков существенно не изменяются. В этой области токов *flip-flop* невозможен. Во второй области изменения J_1 система (2) имеет уже три решения и соответственно имеется три возможных состояния системы двух пучков. На графике рис.8 в этой области представлены только два решения, которые соответствуют точкам II и III рис.6. Наличие в этой области нескольких возможных состояний системы двух пучков говорит о том, что здесь может наблюдаться *flip-flop*.

В третьей области изменения J_1 система (2) имеет опять только одно решение. Оно соответствует случаю, когда первый пучок имеет размер $\sim b_0$, а размер второго пучка с ростом тока в первом увеличивается $\sim J_1^{1/2}$. Подобное поведение системы двух пучков в действительности наблюдалось на ВЭШ-2М, а также на других установках, где наблюдался *flip-flop* эффект.

4. Экспериментальные данные и расчетные величины критического тока для различных установок собраны в таблице I. В первой графе таблицы приведены названия установок и ссылки на источник информации, во второй - приведены значения параметров a и ρ , в третьей - расчетная величина критического тока J^* , в четвертой - примечания и данные о наблюдении *flip-flop* эффекта.

Таблица I

Установка	Параметры		J^*	Примечания
	a	ρ		
ВЭШ-2 /3/	0,10	3,8	14,9 мА	<i>flip-flop</i> наблюдался при токах 20 мА
ВЭШ-2М /4/	0,53	5,3	1,8 мА	Взаимодействие пучков в дополнительном месте встречи. <i>flip-flop</i> наблюдался при токах 2 мА и выше
ВЭШ-2М /4/	0,07	3,7	18,8 мА	Взаимодействие пучков в основном месте встречи. При токах вплоть до 15 мА <i>flip-flop</i> не наблюдался
PETRA /5/	0,09	3,2	отн.ед.	Обсуждение этого случая см. ниже

Как видно из таблицы I, экспериментальные данные по установкам ВЭШ-2 и ВЭШ-2М не противоречат выводам, сделанным в рамках описанной выше модели взаимодействия двух пучков.

К сожалению, из-за отсутствия достаточной информации, трудно применить эту модель к установкам SPEAR и PETRA. В работе /1/, где приведены результаты исследования *flip-flop* эффекта на SPEAR, нет экспериментальных данных о зависимости вертикального размера слабого пучка от тока сильного и не приводится величина тока, при котором начинается *flip-flop* эффект. В работе /2/ сообщается о факте существования *flip-flop* эффекта на установке PETRA и приводятся экспериментальные данные о зависимости удельной светимости от токов в пучках. При этом утверждается, что эта зависимость хорошо согласуется с решением системы (2) при $\rho = 2,0$. Здесь же высказывается идея о том, что если бы параметр ρ был равен 2,25, а не 2,0, то можно было бы объяснить наблюдаемый на PETRA *flip-flop* эффект. На рис.9-12 экспериментальные данные из работы /2/ сравниваются с зависимостью удельной светимости от тока, полученной в результате решения системы (2). В первом случае (рис.9,II) система (2) решалась при условии $\rho = 2,0$, $J_1 = J_2$. Величины b_0, a считались свободными параметрами и выбирались из условия наилучшего совпадения расчетной зависимости с экспериментально измеренной. Во втором случае свободными параметрами считались уже все три величины: ρ, a, b_0 . Результаты вычислений приведены на рис.10,12. Видно, что здесь согласование с экспериментальными данными лучше, чем на рис.9, II. Значения ρ и a для PETRA, представленные в таблице I и на рис.5, были получены в результате обработки экспериментальных данных о зависимости вертикального размера слабого пучка от тока сильного пучка: приведенных в работе /5/. Согласно нашим представлениям, в условиях при которых были получены эти экспериментальные данные, при достаточно большом токе в пучках должен наблюдаться *flip-flop* эффект.

5. Рассмотрение *flip-flop* эффекта на основе модели, описанной выше, предсказывает при определенных условиях существование трех равновесных состояний системы двух пучков. Однако в рамках данной модели сделать заключение об устойчивости этих состояний или об условиях перехода системы из одного состояния в другое нельзя. Для решения этой задачи необходимо уже при-

влекать знания о динамике поведения системы.

Следует отметить также, что величины параметров и играющие решающую роль в данной модели, определяются совокупностью самых разнообразных факторов. Среди наиболее важных, по-видимому, следует выделить: выбор рабочей точки по бетатронным частотам, наличие и величину энергетической дисперсии в месте встречи, соотношение вертикального и горизонтального размеров пучков в месте встречи, точность сведений электронной и позитронной орбит, а также величину декремента радиационного затухания и величину квантовых флуктуаций.

В заключение автор выражает искреннюю признательность И.Б.Вассерману, С.И.Мишневу за полезные обсуждения в процессе выполнения работы, а также Г.М.Тумайкину и А.А.Жоленцу за большую помощь в написании данной работы.

Л и т е р а т у р а

- /1/ M.H.Donald and J.M.Paterson, An Investigation of the Flip-Flop Effect in SPEAR, IEEE, Vol. NS-26, No. 3, 3580 (1979).
- /2/ G.Voss "Space Charge Effects in PETRA". XI International Conference on High-Energy Accelerators, p. 148 Birkhäuser Verlag 1980.
- /3/ Мишнев С.И. Диссертация, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1975.
- /4/ Вассерман И.Б. Диссертация, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1975.
- /5/ D.Degele et al. "Study of the Beam-Beam Effect in PETRA". Int. Report DESY M-81/03 March 1981.

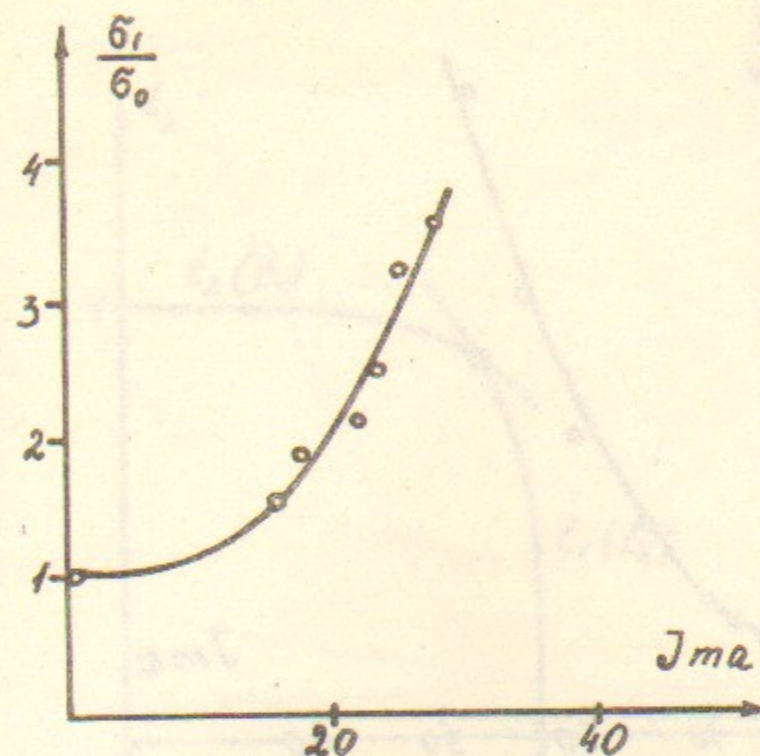


Рис.1. ВЭШ-2М, основное место встречи, $\rho = 3,72$, $a = 0,069 / 2/$

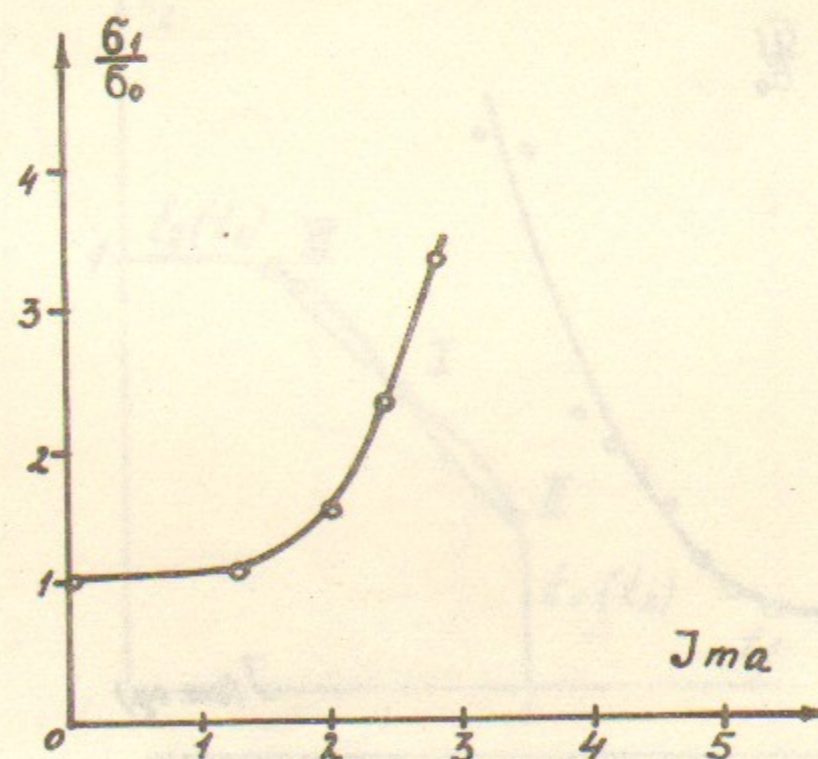


Рис.2. ВЭШ-2М, дополнительное место встречи, $\rho = 5,32$, $a = 5,36 / 2/$

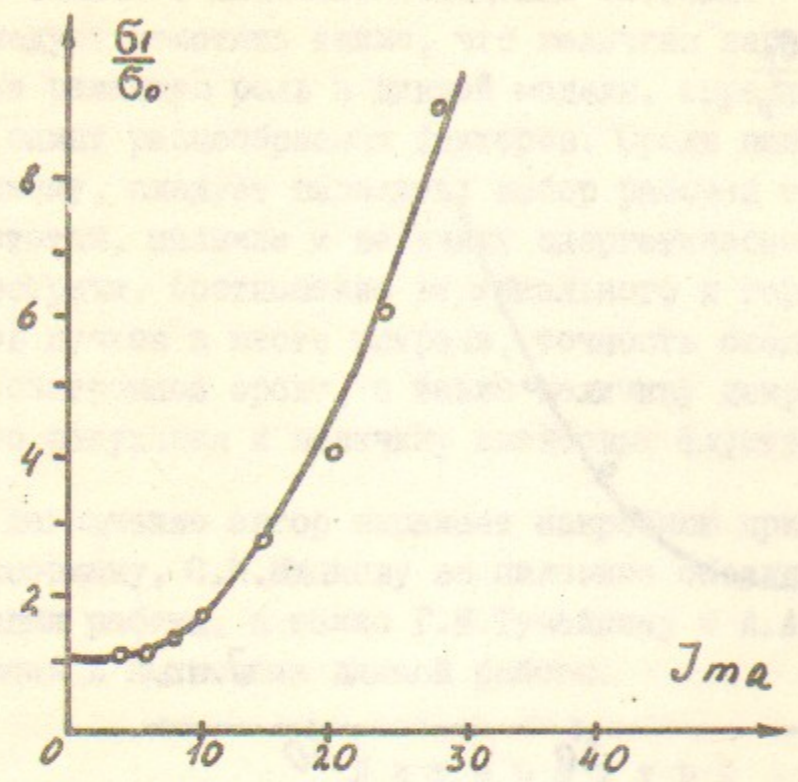


Рис.3. ВЭШ-2, $\rho = 3,8$, $a = 0,108 /3/$

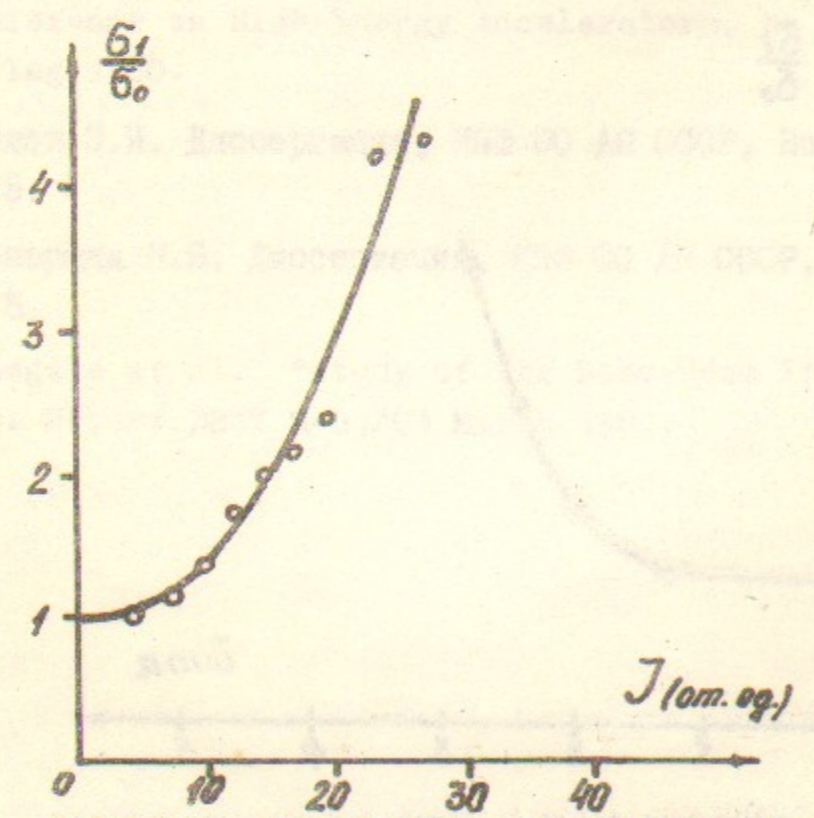


Рис.4. ПЕТРА, $\rho = 3,21$, $a = 0,094 /5/$

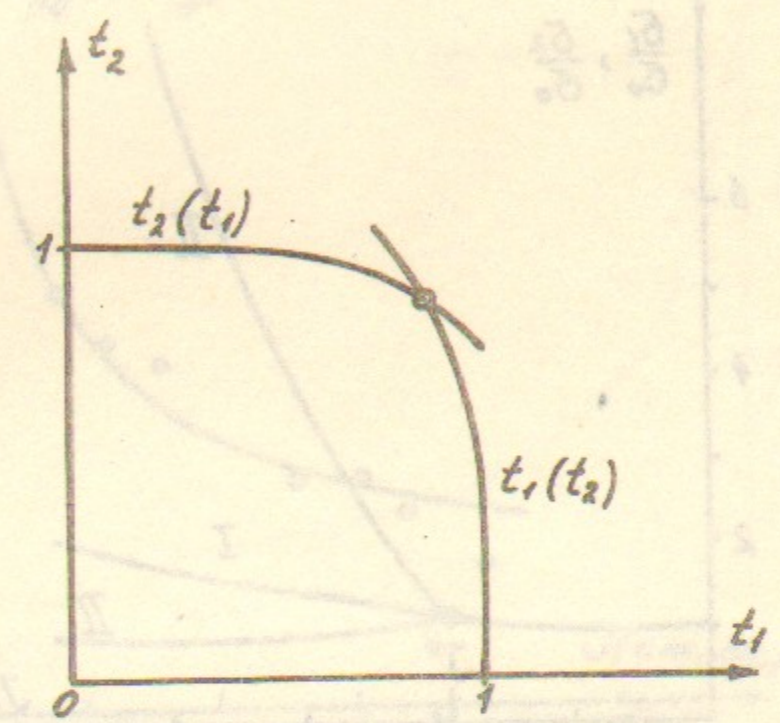


Рис.5. Зависимость $t_1(t_2)$ и $t_2(t_1)$ при $\rho = 5,32$, $a = 0,536$, $J = 1,7$

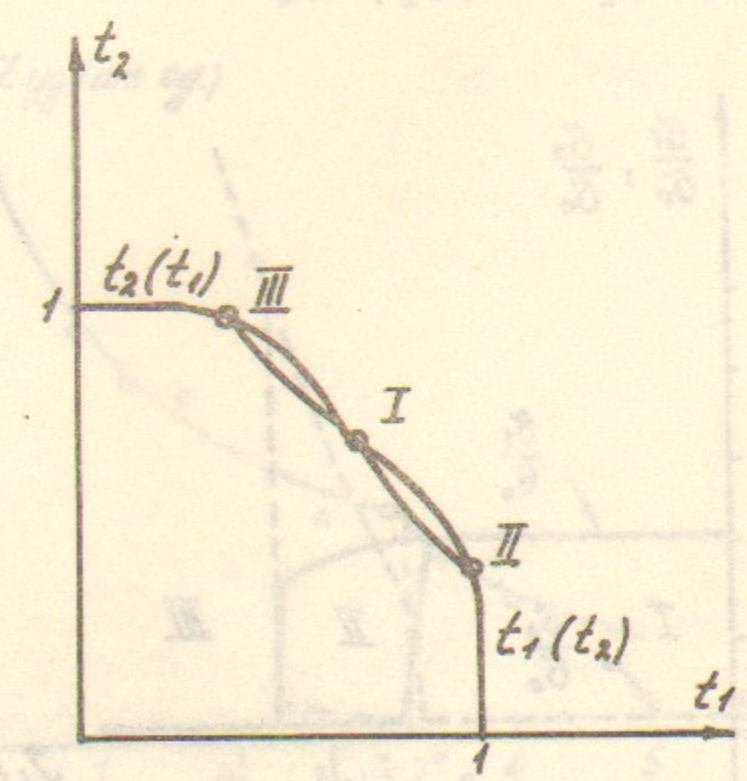


Рис.6. Зависимость $t_1(t_2)$ и $t_2(t_1)$ при $\rho = 5,32$, $a = 0,536$, $J = 2,7$

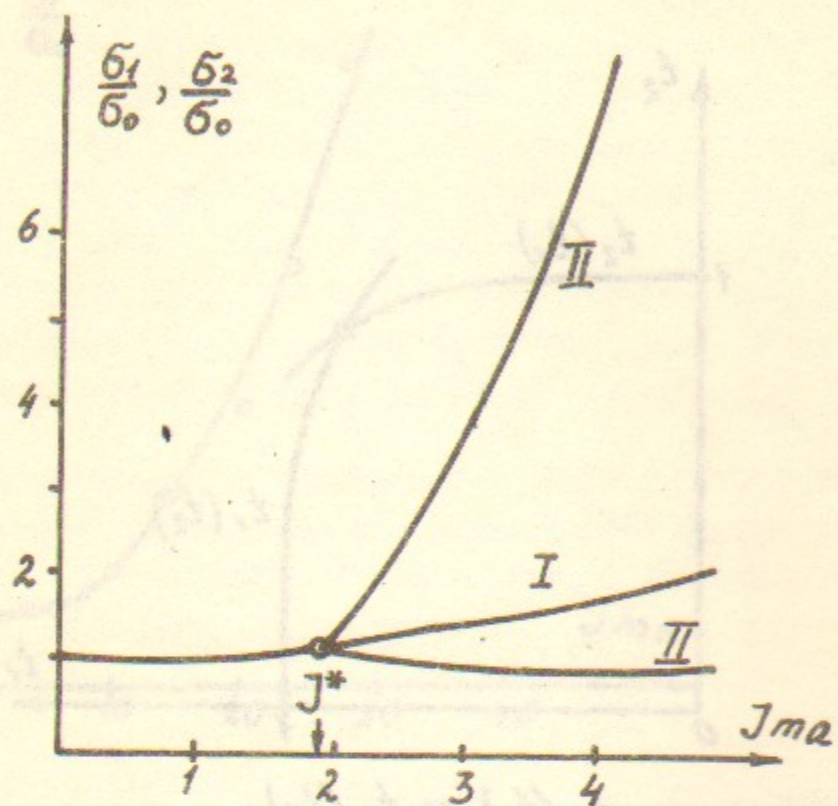


Рис.7. Зависимость $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \frac{\sigma_2}{\sigma_0}$ от J при $\rho = 5,32, \alpha = 0,536$
 I) $\sigma_1 = \sigma_2$ II) $\sigma_1 \neq \sigma_2$

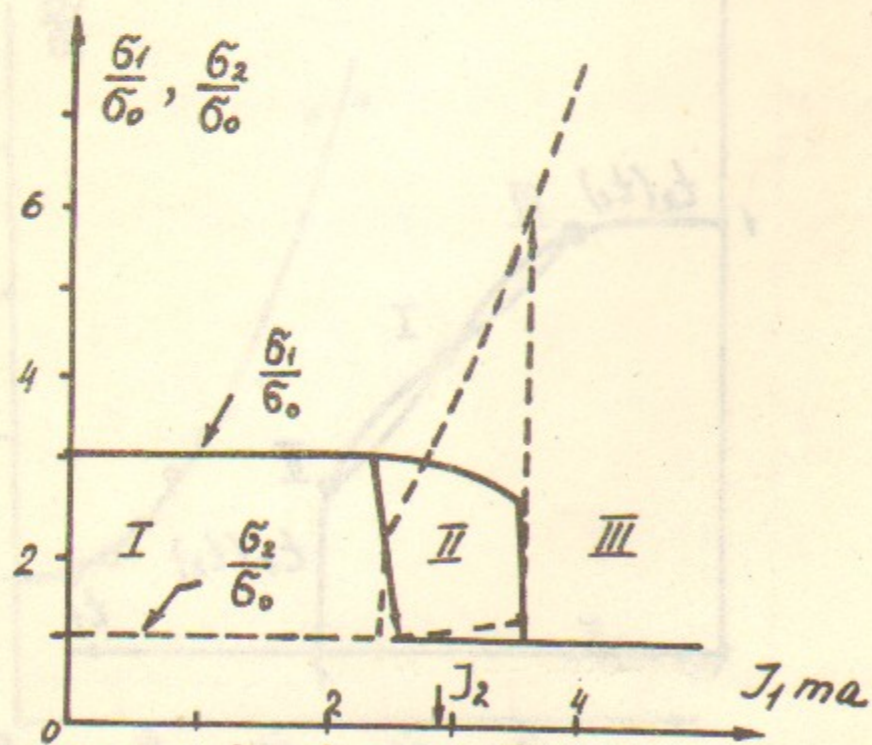


Рис.8. Зависимость $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \frac{\sigma_2}{\sigma_0}$ от J_1 при $J_2 = 2,7, \rho = 5,32, \alpha = 0,536$

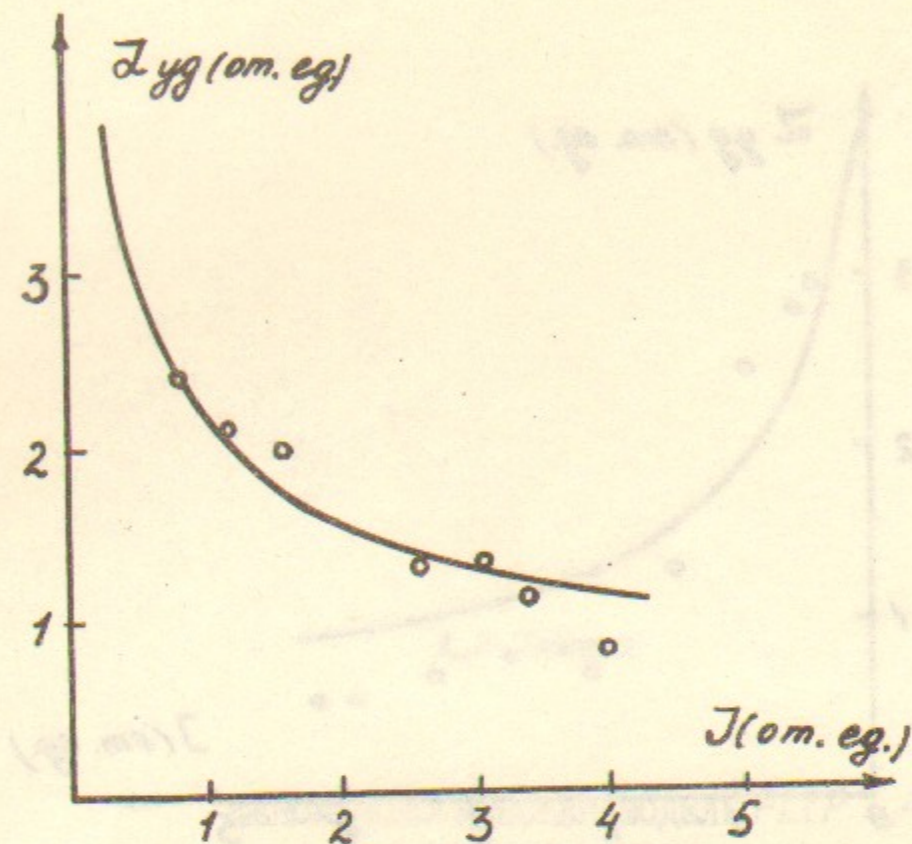


Рис.9. PETRA, $E = 6$ ГэВ, $\rho = 2,12$

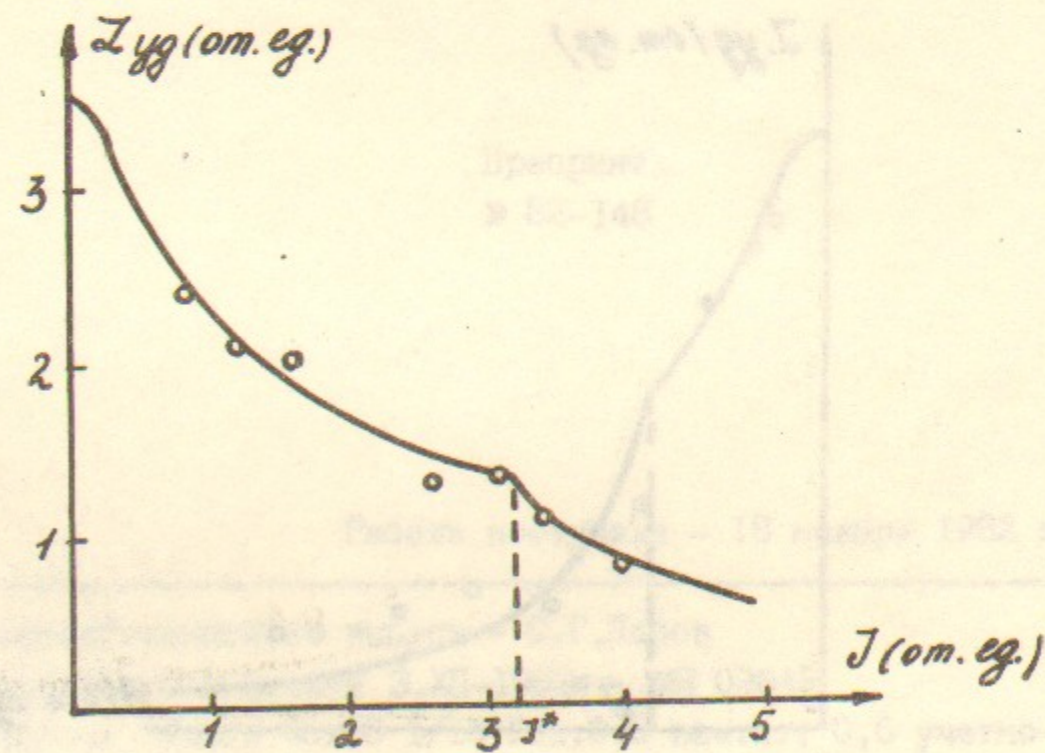


Рис.10. PETRA, $E = 6$ ГэВ, $\rho = 2,36$

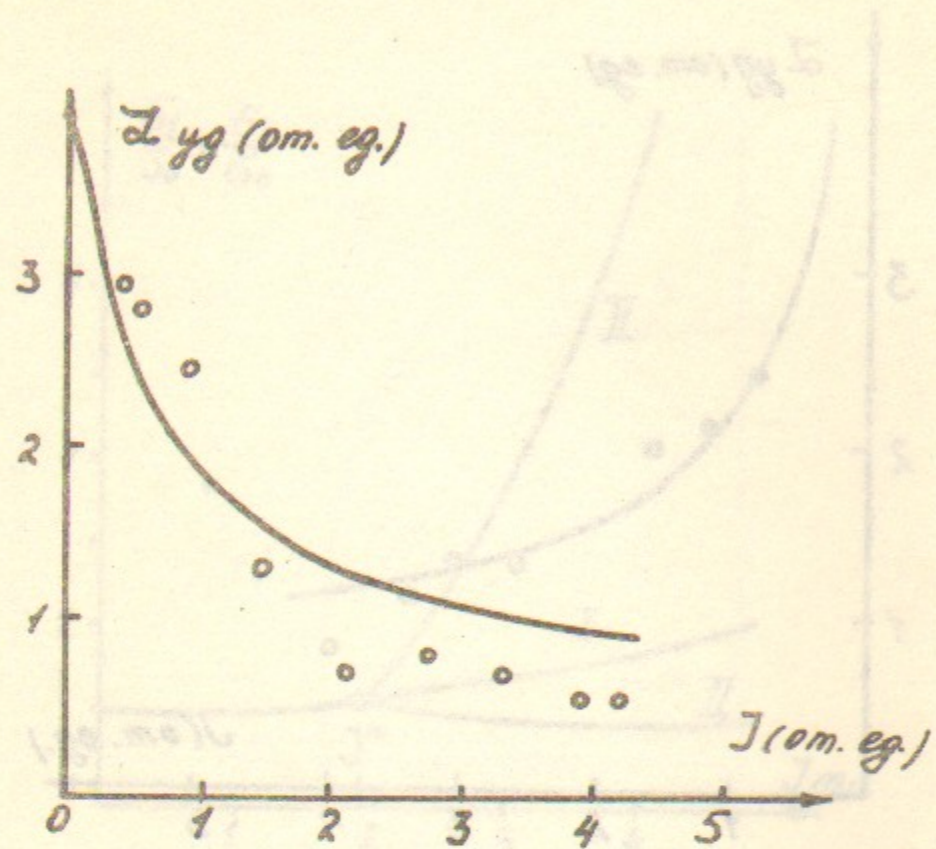


Рис.11. *PETRA*, $E = 11$ ГэВ, $\rho = 2.0/21$

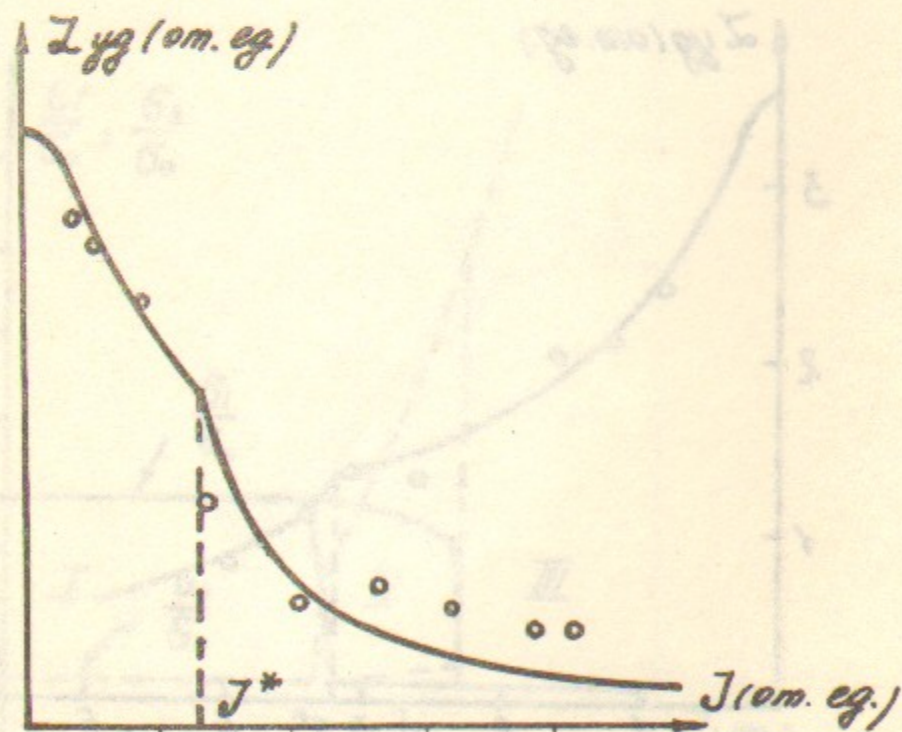


Рис.12. *PETRA*, $E = 11$ ГэВ, $\rho = 3.0$

А.Б.Темных

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ *FLIP - FLOP* ЭФФЕКТА
ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ

Препринт
№ 82-148

Работа поступила - 18 ноября 1982 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 3.XI-1982 г. МН 03643
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ №148.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90