

**Поиск тяжелых векторных
бозонов Z' и Z^* в эксперименте
ATLAS на ускорителе LHC**

Е. Седых, ЛАФ ОФВЭ ПИЯФ

План доклада

- Мотивация;
- Модели, в которых появляются тяжелые калибровочные бозоны Z' ;
- Новая модель – возбужденный киральный бозон Z^* (М. Чижов, ОИЯИ);
- Поиск тяжелых бозонов Z' и Z^* в эксперименте ATLAS.

Мотивация

- Множество моделей предсказывают существование тяжелых калибровочных бозонов;
- Есть основания считать, что хотя бы один из них достаточно лёгкий (~ 1 ТэВ):
 - Обеспечение устойчивости массы Хиггс-бозона требует существования частиц с массой ~ 1 ТэВ для сокращения расходимостей во втором порядке ТВ (проблема иерархии);
- Самые простые каналы для поиска $Z' \rightarrow ee$, $Z' \rightarrow \mu\mu$:
 - Вклад данных каналов в сечение небольшой, но зато отсутствует фон от струй.
- Низкий фон (в основном от процесса Дрелла-Яна - неустранимый);
- Относительно большое сечение (0.1-0.5 пб для $m_{Z'} \sim 1$ ТэВ) позволит обнаружить или поставить ограничения на массу и взаимодействия с известными частицами уже на начальном этапе работы ЛНС.

Стандартная модель

- Электродинамика:
 - группа $U(1)_{em}$ – 1 фотон, $r=1$
- Электрослабая теория:
 - группа $SU(2)_L \times U(1)_Y$ – 4 безмассовых калибровочных бозона до нарушения симметрии (после нарушения фотон, W^{\pm}, Z^0), $r=1+1=2$
- Квантовая хромодинамика:
 - группа $SU(3)_C$ – 8 глюонов, $r=2$
- Стандартная модель = КХД + Электрослабая теория
 - группа $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$, $r=2+1+1=4$

Теории великого объединения

Объединение в электрослабой теории не полноценно, т.к. вводится две существенно разные константы связи, которые связаны через угол Вайнберга и отвечают двум отдельным частям модели – $SU(2)_L$ и $U(1)_Y$.

Для полноценного объединения и введения единой константы взаимодействия нужна простая группа, включающая в себя $SU(2)_L$ $U(1)_Y$.

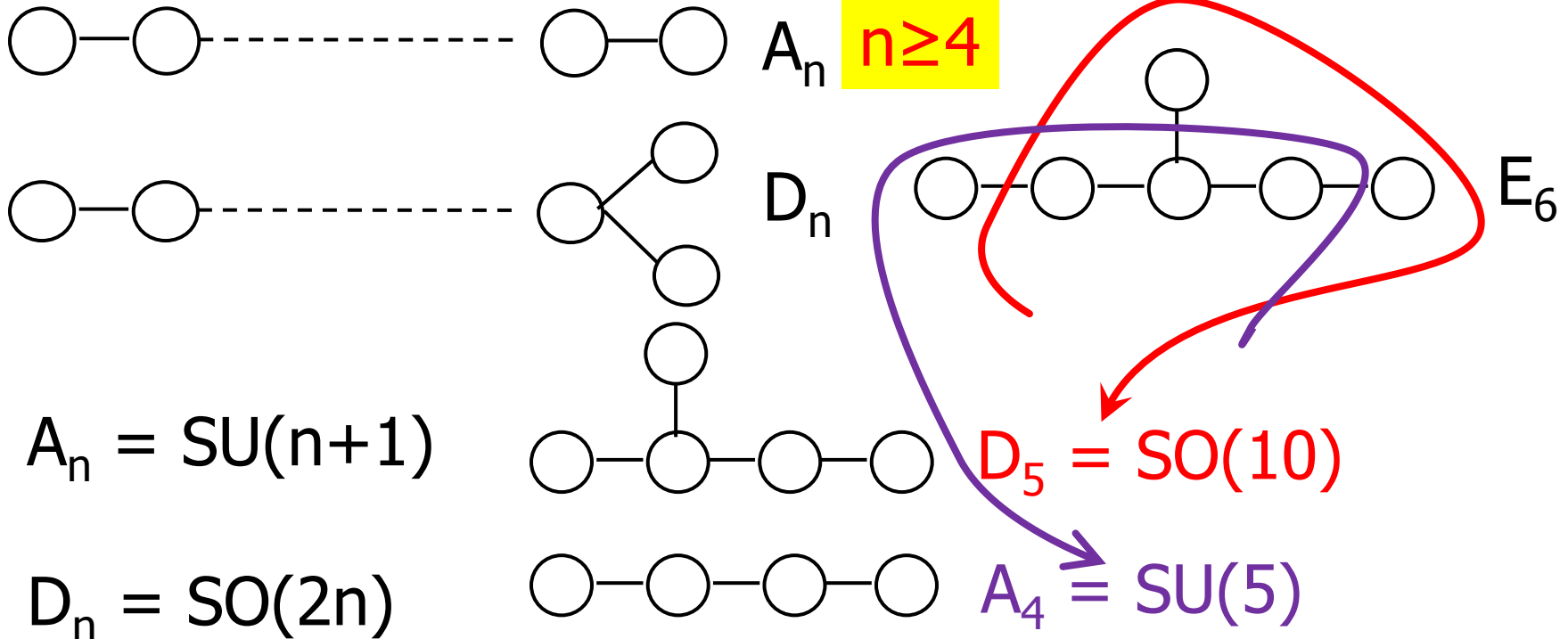
Соответственно, чтобы получить ТВО с одной константой связи, необходимо найти группу, включающую в себя $SU(3)_C$ $SU(2)_L$ $U(1)_Y$ с рангом не менее 4.

Группы для построения ТВО

В 1974 впервые была предложена ТВО на основе группы $SU(5)$ (Glashow, Georgi). Почему именно такая группа?

- 1) Группа должна включать в себя $SM \rightarrow$ ранг группы ≥ 4 ;
- 2) Группа должна содержать представления в виде комплексных матриц.

$SU(5)$ является минимальной подходящей группой. Кроме того существуют ТВО на основе других групп (важное обобщение – группа E_6).



Часто используемые модели с Z' – ТВО - 1

В общем случае, если $E_6 \rightarrow SO(10)$ $U(1)_\psi \rightarrow SU(5)$ $U(1)_\psi$ $U(1)_\chi$

$$Z'(\theta) = Z'_\psi \cos \theta + Z'_\chi \sin \theta$$

$Z''(\theta) = Z'_\psi \sin \theta - Z'_\chi \cos \theta$ – для простоты будем считать очень тяжелым и ненаблюдаемым на LHC.

Обычно рассматривают особые случаи:

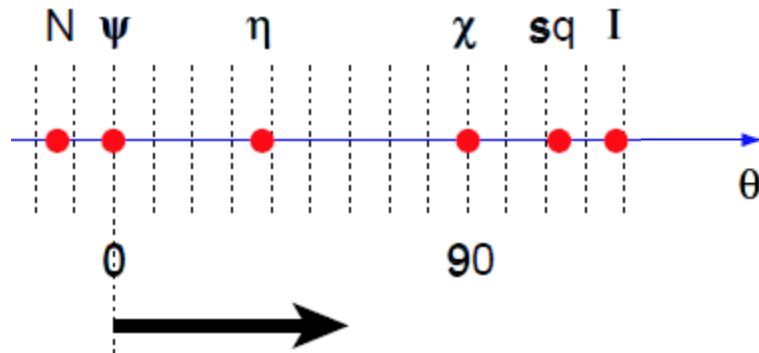
$$Z'_\psi : \theta = 0, Z' = Z'_\psi$$

$$Z'_\chi : \theta = 90, Z' = Z'_\chi$$

$$Z'_\eta : \theta = 37,76$$

$$Z'_I : \theta = 127,76$$

} Из суперструнных теорий



$$Z'_{sq} : \theta = 113,28$$

$$Z'_N : \theta = -14,48$$

} SUSY, генерация масс нейтрино

Часто используемые модели с Z' – ТВО - 2

Другой тип моделей ТВО – **лево-правые симметричные модели** (LRSM, Left-Right Symmetric Model) с группами

$SU(4)_C \quad SU(2)_L \quad SU(2)_R$ (Pati, Salam)

или

$SU(3)_C \quad SU(2)_L \quad SU(2)_R \quad U(2)_{B-L}$

или

$SU(3)_C \quad SU(2)_L \quad SU(2)_R$

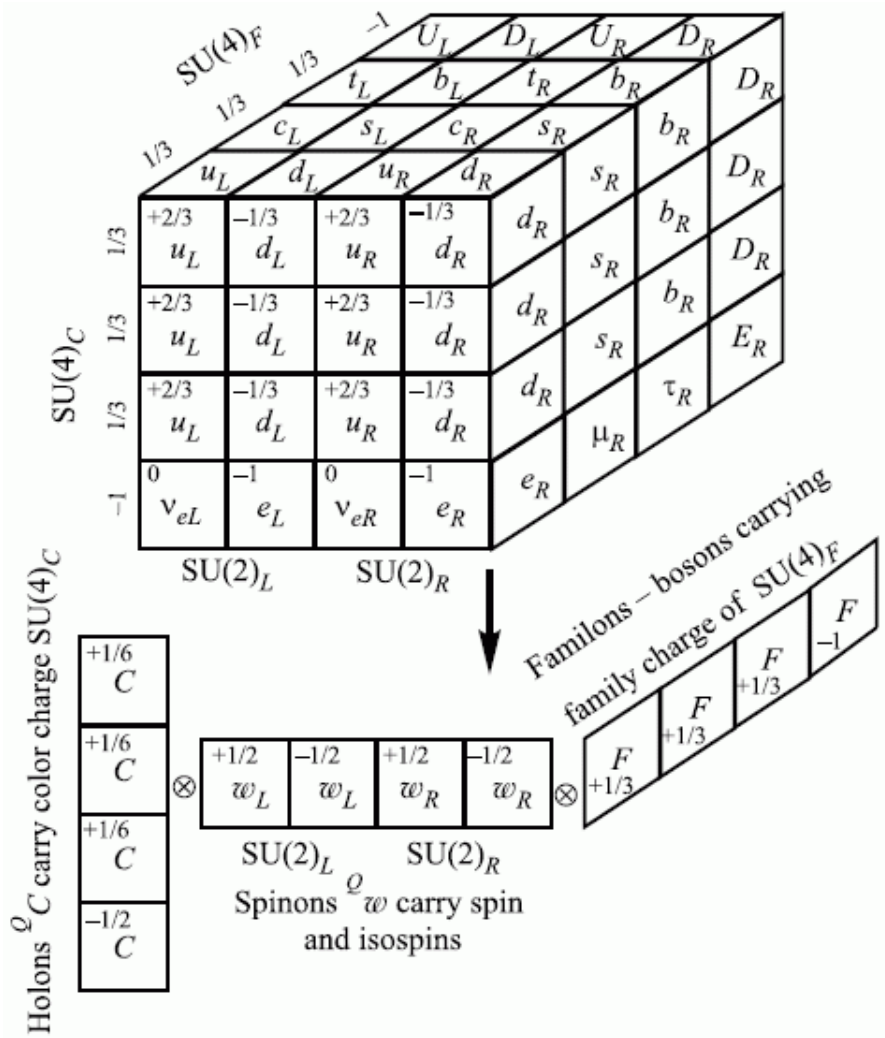


Fig.1. Terazawa scheme of composite fermions wC as bound states of w -fermions and C -bosons. Numbers show the electric charge

Часто используемые модели с Z' – ТВО - 3

Кроме того, пользуются популярностью и другие модели, в которых возникает Z' :

- 1) т.н. модели с малым Хиггсом;**
- 2) Модели с динамическим нарушением симметрии (вводятся новые типы взаимодействий, например новый Z' предпочитает взаимодействовать с 3-им поколением, за счет чего происходит нарушение симметрии);**
- 3) Дополнительные пространственные измерения;**
- 4) Теория суперструн;**
- 5) Суперсимметричные варианты моделей;**
- 6) -N)**

Часто в качестве самой простой модели используется также тяжелый аналог Z (SSM, Sequential Standard Model), хотя такая возможность отвергается теорией.

Новая модель – возбужденный Z^* - 1

М. Чижов (ОИЯИ) предложил искать другой тип векторных частиц, испытывающий тензорные взаимодействия – возбужденные бозоны Z^* .

Одним из объектов для поиска являются возбужденные состояния фермионов (e^*, q^*, \dots):

$$\mathcal{L}_{e^*} = \frac{g}{\Lambda} \bar{e}^* \sigma^{\mu\nu} e \cdot \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu$$

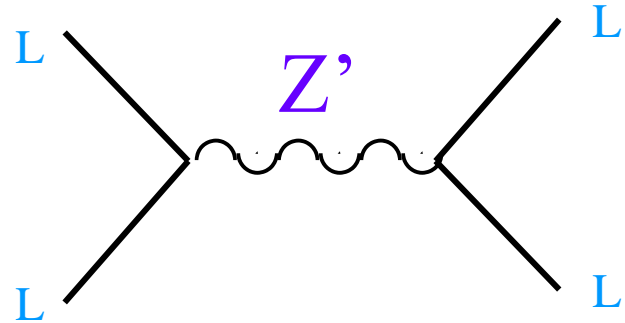
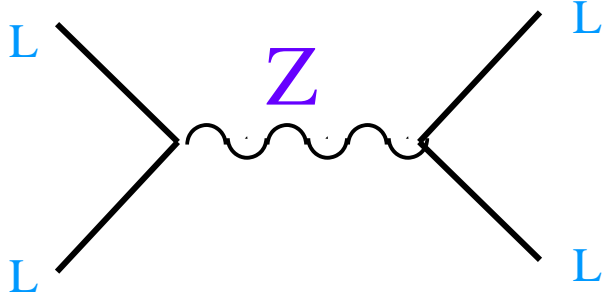
Возможно также ввести возбужденные бозонные состояния:

$$\mathcal{L}_{Z^*} = \frac{g}{\Lambda} \bar{e} \sigma^{\mu\nu} e \cdot \partial_\mu Z_\nu^* - \partial_\nu Z_\mu^*$$

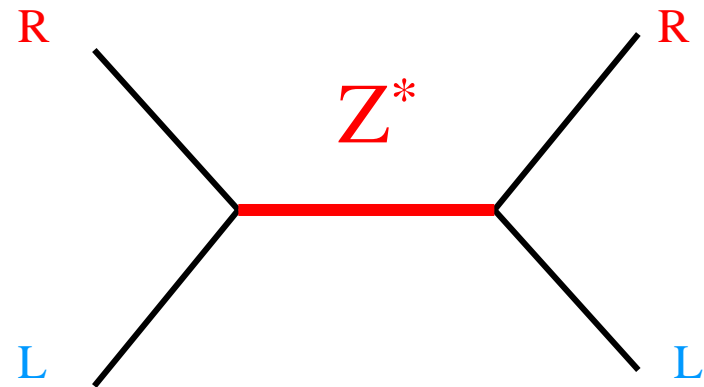
Взаимодействие Z^* с лептонами отличается от Z' :

$$\mathcal{L}_{Z'} = \bar{e} \gamma^\mu (g_V - g_A \gamma^5) e \cdot Z'_\mu$$

Новая модель – возбужденный Z^* - 2



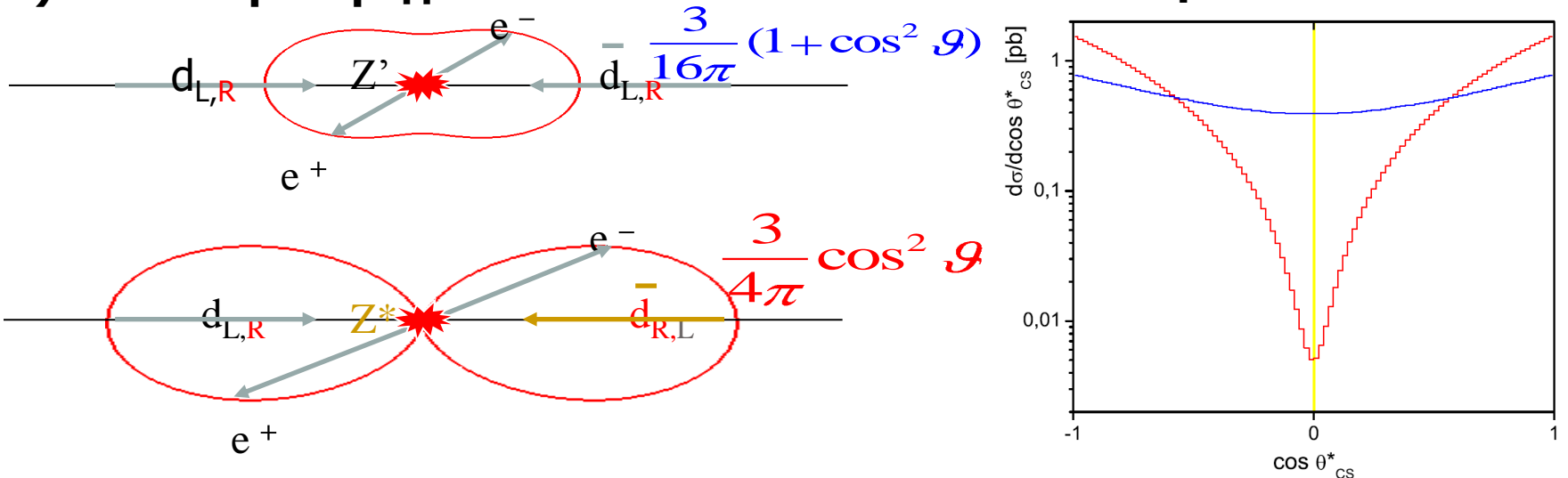
Новый тип частиц смешивает левые и правые фермионы, т.е. несет киральный заряд (или не сохраняется киральность во взаимодействиях).



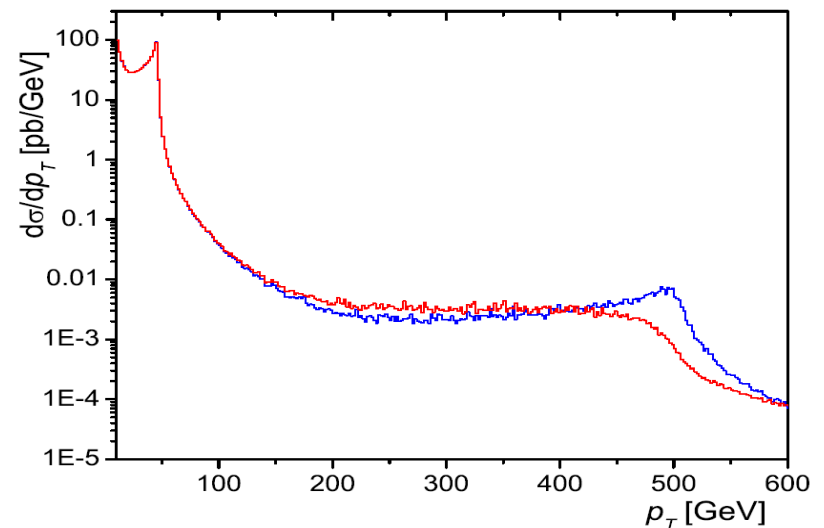
Новая модель – возбужденный Z^* - 3

Некоторые свойства позволяют отделить Z^* от Z' :

1) Угловое распределение в системе Коллинса-Сопера:



2) Распределение лептонов по поперечному импульсу:



Текущие ограничения

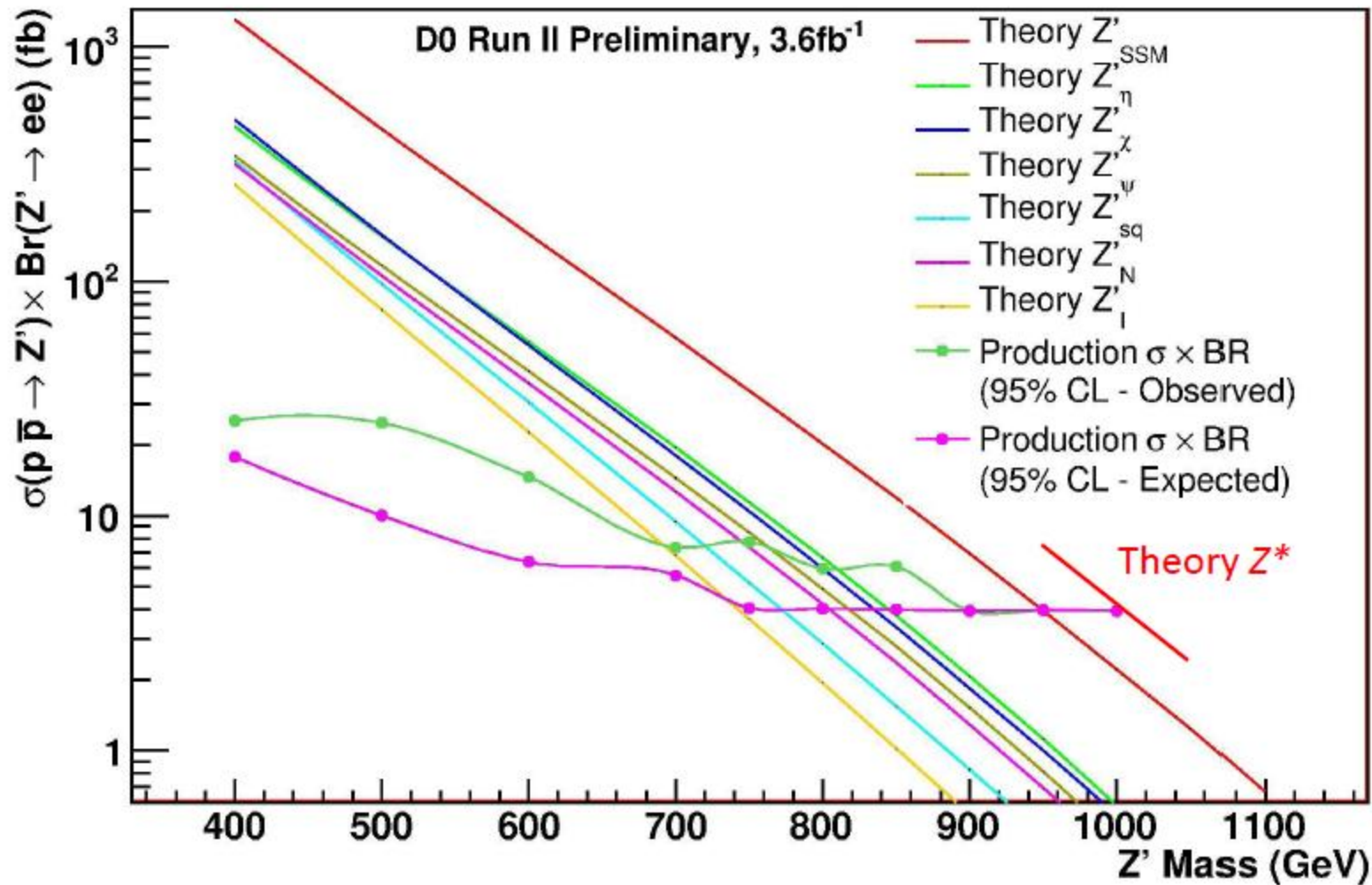
Ограничения на массу Z' получены из двух источников:

- 1) Прямой поиск в экспериментах (CDF – лучшие ограничения).**
- 2) Поиск отклонений от СМ при изучении электрослабых взаимодействий.**

Модель Z'	Z'_{SSM}	Z'_{ψ}	Z'_{χ}	Z'_{η}	Z'_I	Z'_{LR}	$Z'_H^{0,5}$	$Z'_H^{1,0}$
CDF (GeV/c ²)	923	822	822	891	737	630	760	900
Электрослабые измерения (GeV/c ²)	1500	146	680	619	-	860	-	-

Z' Model	Indirect Searches (GeV)	Direct Searches (GeV)	
		e^+e^- Colliders	p^+p^- Colliders
Z'_{χ}	680	781	864
Z'_{ψ}	481	366	853
Z'_{η}	619	515	933
Z'_{LRSM}	804	518	-
Z'_{SSM}	1787	1018	966

Ограничения D0



Сечения

m_{Z', Z^*}	1000	1500	2000
7 ТэВ $\sigma (Z^* \rightarrow ee), \text{ фб}$	257	28,5	3,8
10 ТэВ $\sigma (Z^* \rightarrow ee), \text{ фб}$	554	-	-
10 ТэВ $\sigma (Z' \rightarrow ee, \text{SSM}), \text{ фб}$	251	76,1	-
14 ТэВ $\sigma (Z' \rightarrow ee, \text{SSM}), \text{ фб}$	507	170	24

Источники фона

Неустранимый фон: процесс Дрелла-Яна

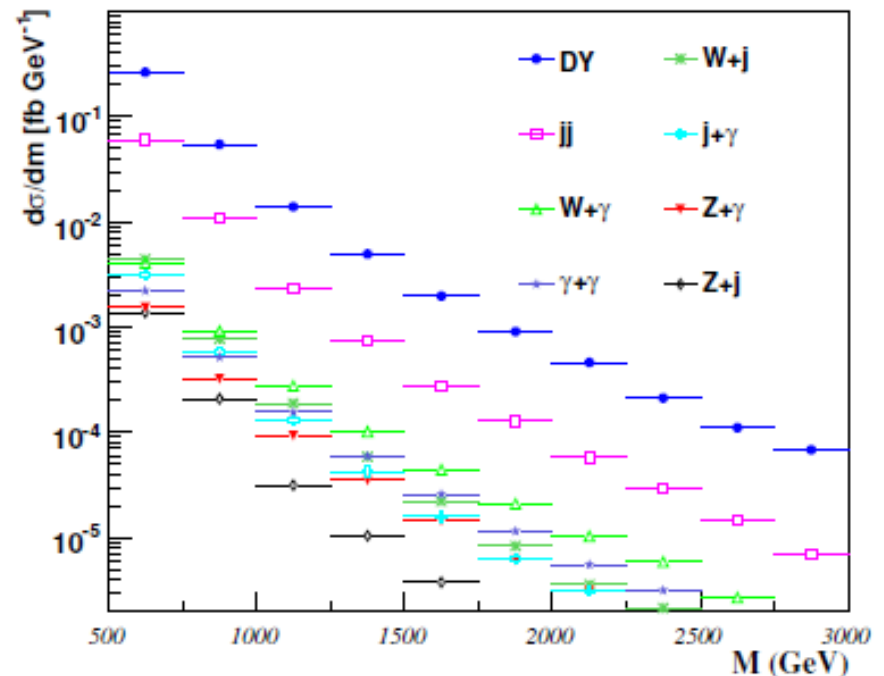
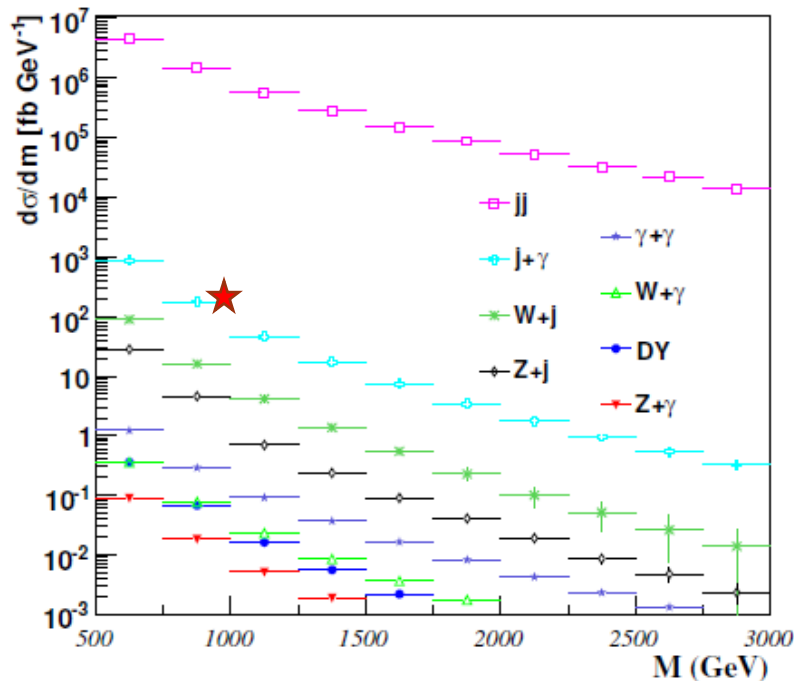
Устранимые источники фона: jets, W + jets, W + γ , Z + jets, Z + γ , γ + jets, $\gamma\gamma$

После требований:

1) Струя – фактор режекции 4000, фотон – 10;

2) $|\eta| < 2,5$;

3) Хотя бы один объект с $p_T > 65$ ГэВ.



Остальные источники фона пренебрежимо малы (<10% от вклада ДЯ).

Моделирование отклика детектора

Были официально произведены 5000 событий Z^* ($m=1$ ТэВ), события для Z' разных масс находятся в официальном списке production физической группы по экзотике (SSM) и были произведены ранее. Все данные доступны в GRID.

В данный момент ведется работа по созданию наборов данных по Z^* для других масс (для энергии столкновений 7 ТэВ).

Для генерации событий использовались:

Z' : Pythia

Z^* : CompHep + Pythia (в Pythia отсутствует возможность генерации Z^*)

Для моделирования детектора, получения отклика и реконструкции использовалось стандартное ПО ATLAS.

Условия отбора событий

Применяются следующие условия отбора:

- 1) 2 кандидата в электроны с $|\eta| < 2,5$;
- 2) 2 электромагнитных кластера ассоциированы с треками;
- 3) 2 loose электрона;
- 4) По крайней мере один электрон с $p_T > 65$ ГэВ;
- 5) Сработал триггер (т.н. e55);
- 6) Объекты имеют противоположные заряды.

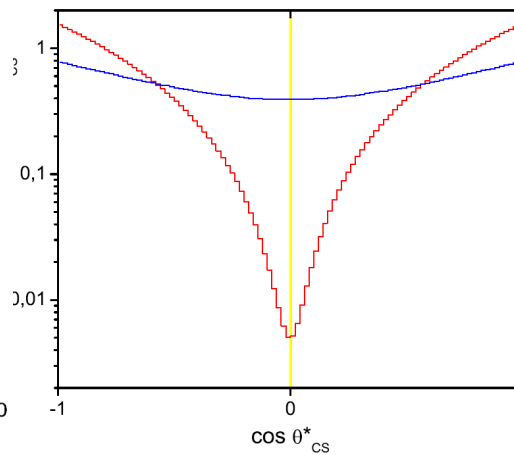
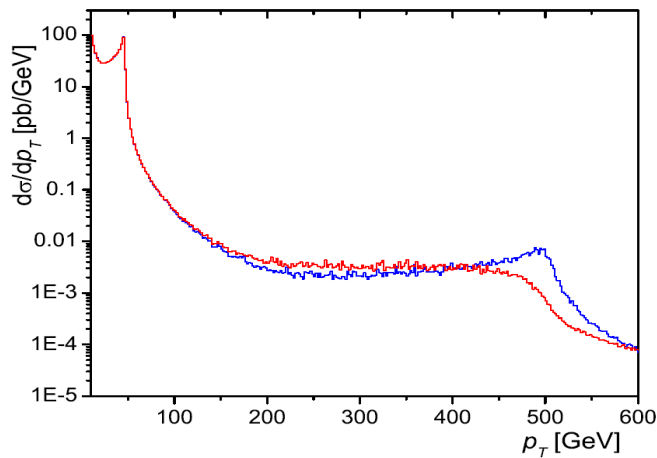
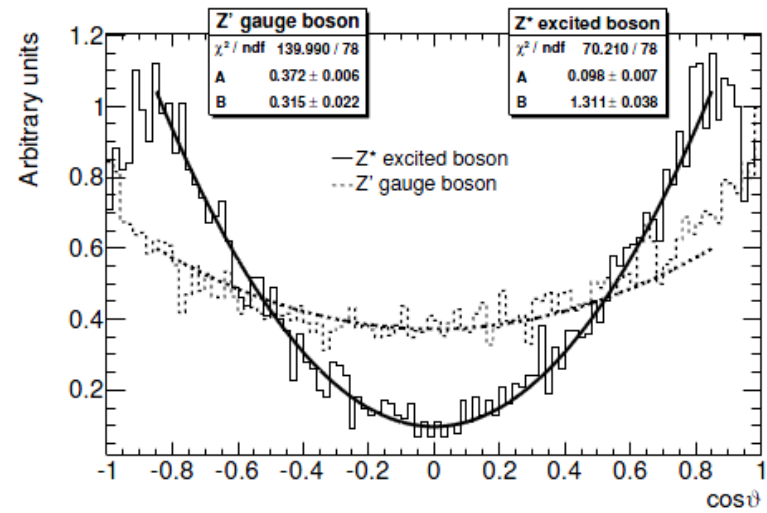
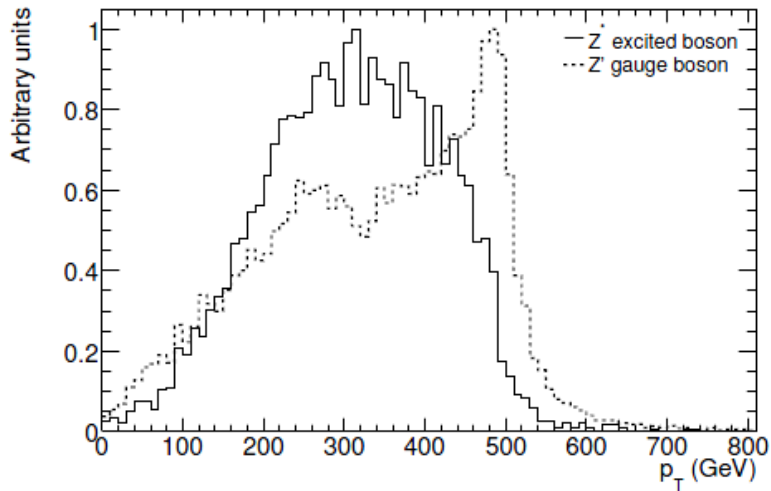
Selection	Signal at 1 TeV	DY at 1 TeV
	347.	3.56
2 generated e^\pm , $ \eta < 2.5$	299.	3.07
2 clusters with a track	201.	2.06
2 loose electrons	190.	1.96
At least one $p_T > 65$ GeV	190.	1.96
Event triggered	173.	1.77
2 opposite charges	166.	1.70

Для Z^* применялись немного другие условия отбора:

Selection criteria	Z^*		DY	
	cross-sec.(fb)	efficiency(%)	cross-sec.(fb)	efficiency (%)
	417		4.49	
2 generated e^\pm $p_T > 50$ GeV, $ \eta < 2.47$	411.	98.5 ± 0.2	4.17	93 ± 4
2 clusters $E_T > 50$ GeV, $ \eta < 2.47$	366.	87.7 ± 0.5	3.52	79 ± 6
back-to-back $\Delta\phi > 2.9$	355.	85.1 ± 0.6	3.42	76 ± 6
Loose	347.	83.2 ± 0.6	3.10	69 ± 7
Loose and opposite charges	317.	76.0 ± 0.7	2.99	67 ± 7

Результаты (Монте-Карло)

Сравнение Z'_{SSM} и Z^* :



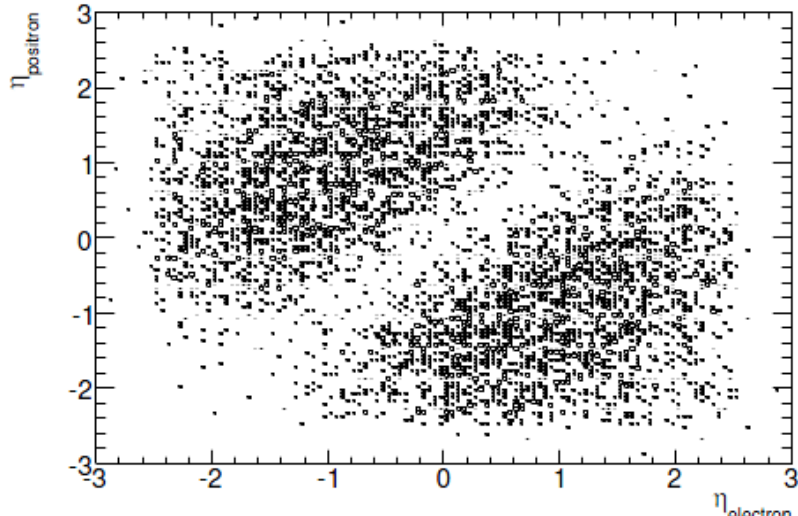
$$A + B \cos^2 \theta_{CS}$$

$$Z' : A = B \approx 1$$

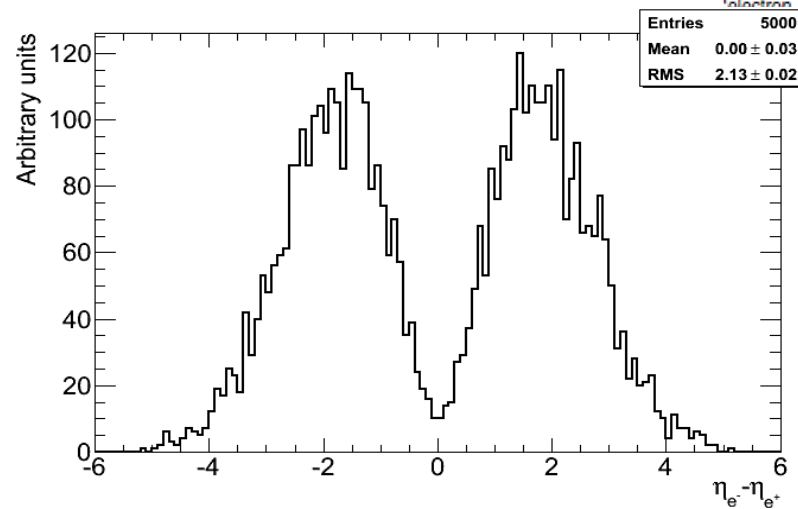
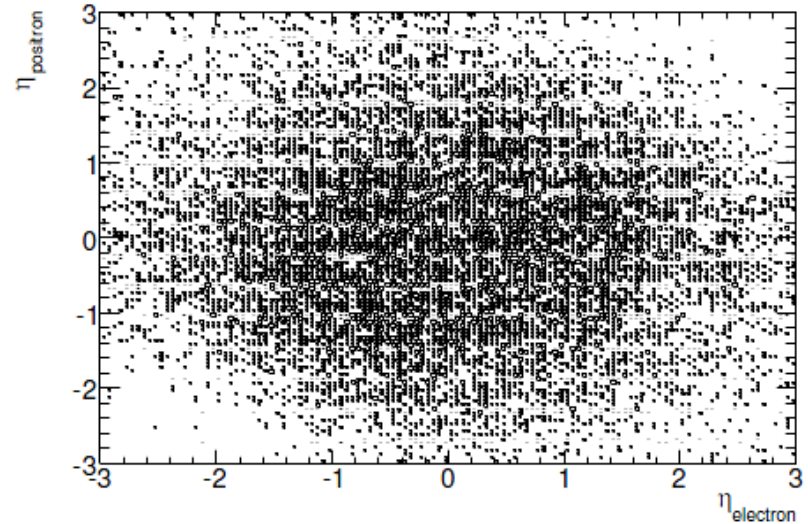
$$Z^* : A \approx 0, B \approx 1$$

Результаты (Монте-Карло)

$$\rho_{Z^*} = (-0.38 \pm 0.01)$$

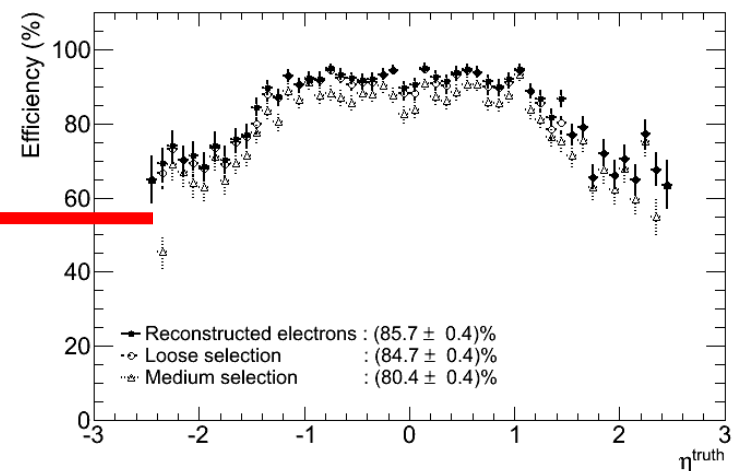
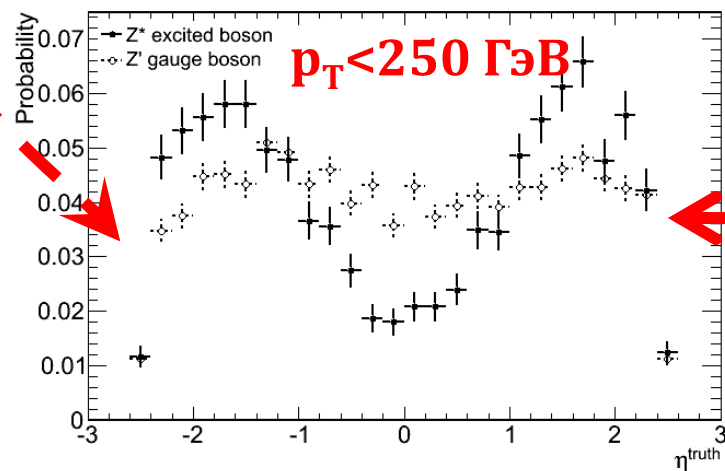
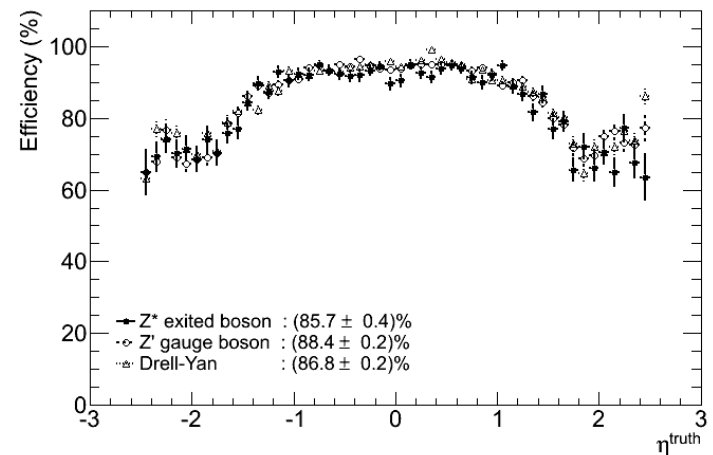
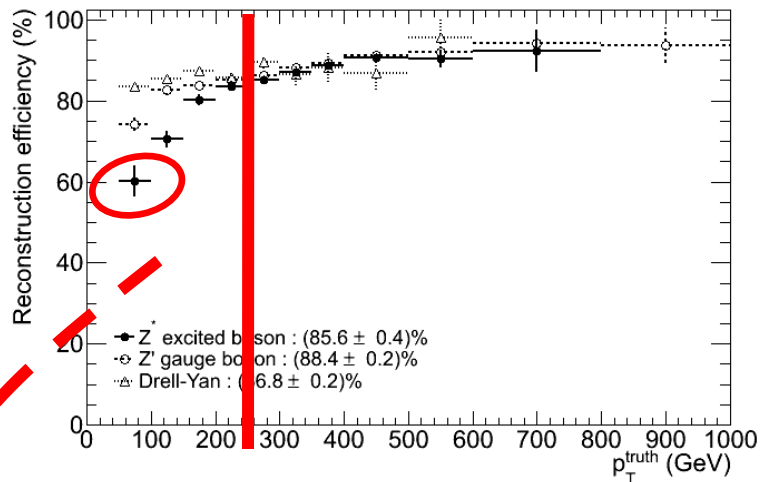


$$\rho_{Z'} = (-0.05 \pm 0.01)$$



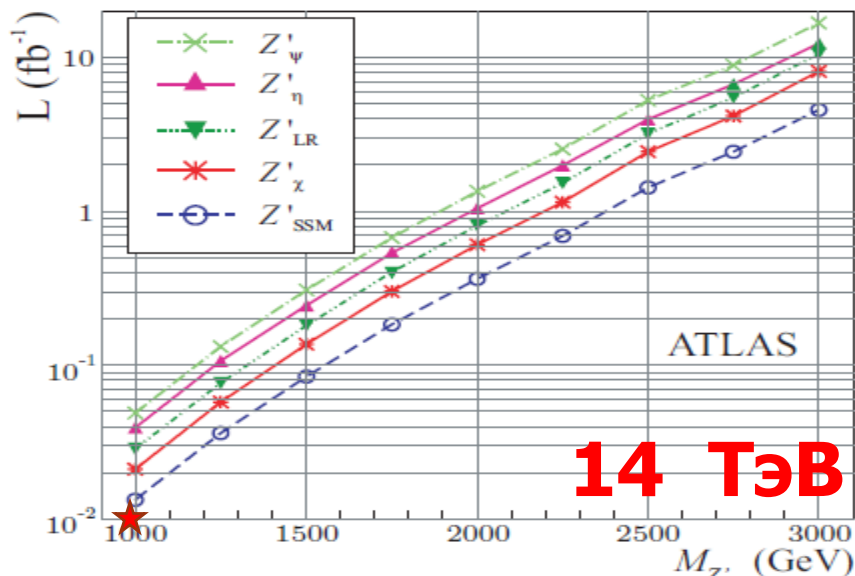
Эффективность реконструкции электронов

Эффективность реконструкции одиночных электронов от Z^* значительно меньше чем для случая Z' для относительно низких p_T , что объясняется большими отличиями в распределениях по η .



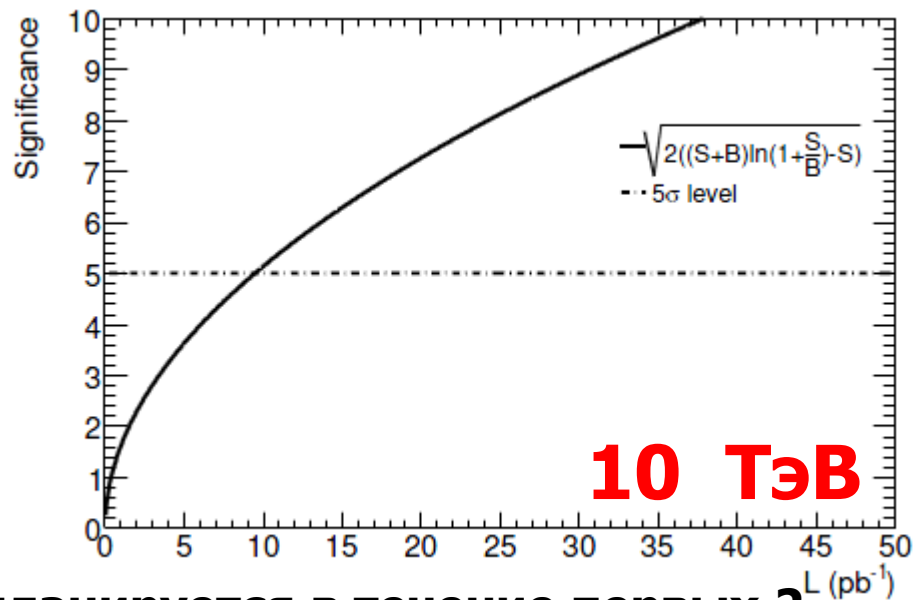
Требуемая светимость

Различные модели Z'



14 ТэВ

Возбужденный Z^* (1000 ГэВ)



10 ТэВ

Для энергии ЛНС 7 ТэВ, которая планируется в течение первых 2 лет, сечения падают в ~ 2 раза по сравнению с 10 ТэВ и в ~ 4 раза по сравнению с 14 ТэВ..

Для 5σ открытия резонанса массой 1 ТэВ при **3,5 + 3,5 ТэВ ...**
 Z^* необходимо набрать $\sim 20 \text{ пб}^{-1}$;

Z' необходимо набрать $\sim 50\text{-}100 \text{ пб}^{-1}$;

Для разделения Z'/Z^* /другие резонансы соответственно нужно в несколько раз больше статистики ($\sim 0.5 \text{ фб}^{-1}$).

На ЛНС планируется набрать порядка 1 фб^{-1} за ~ 2 года работы.

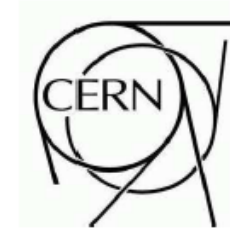
Подготовлена note



ATLAS NOTE

ATL-COM-PHYS-2009-609

November 13, 2009



Search for spin-1 excited bosons with ATLAS

M. V. Chizhov^{1,2}, V. A. Bednyakov², J. A. Budagov²,
O. L. Fedin³, V. P. Maleev³, E. V. Sedykh³

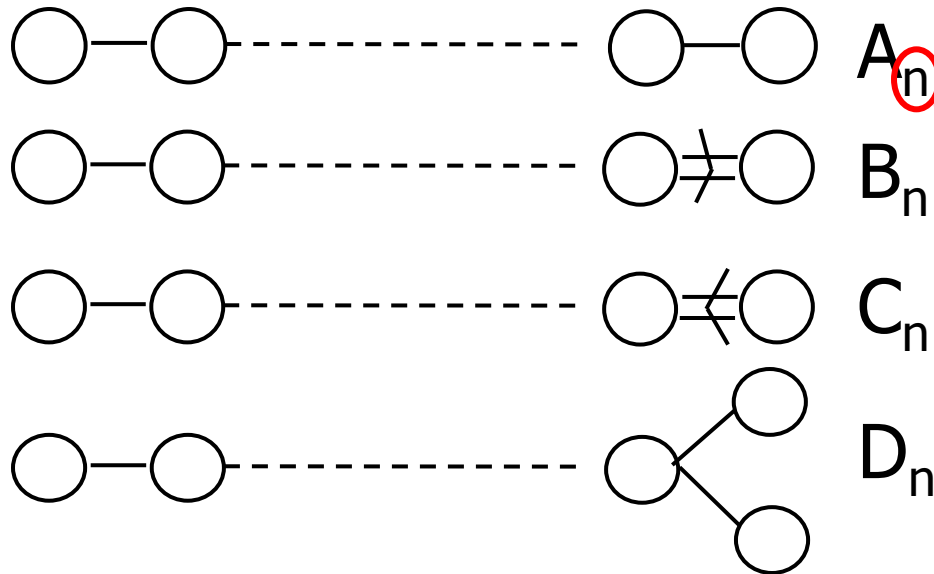
¹ Centre for Space Research and Technologies,
Faculty of Physics, University of Sofia, 1164 Sofia, Bulgaria

² Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems,
Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia

³ Petersburg Nuclear Physics Institute,
Gatchina, Leningrad district 188300, Russia

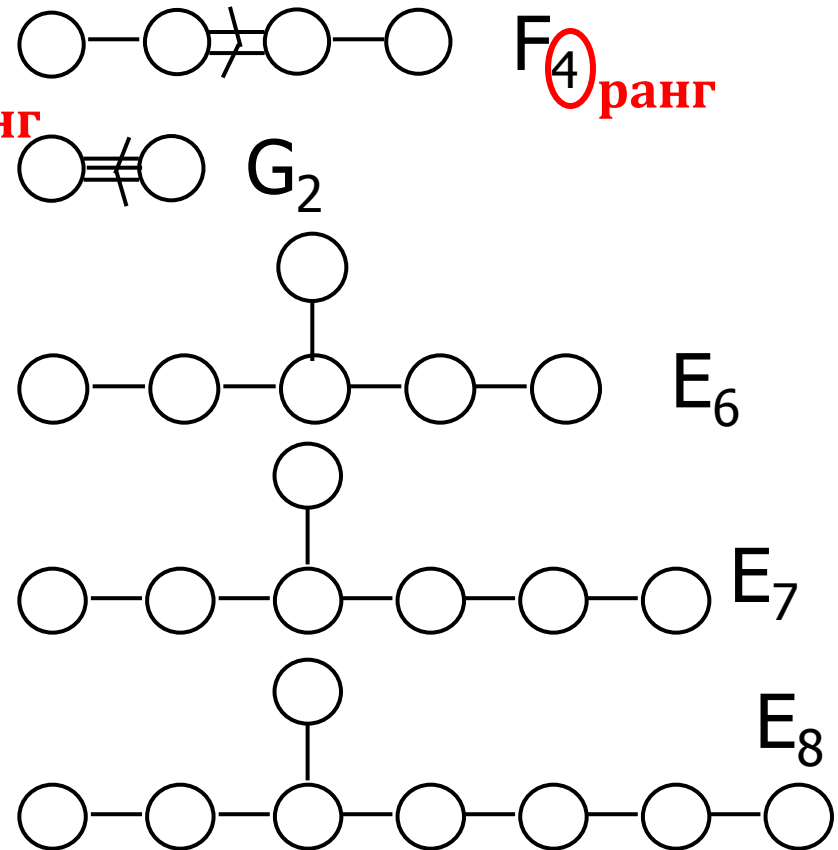
Дополнительные слайды

Классификация алгебр Ли

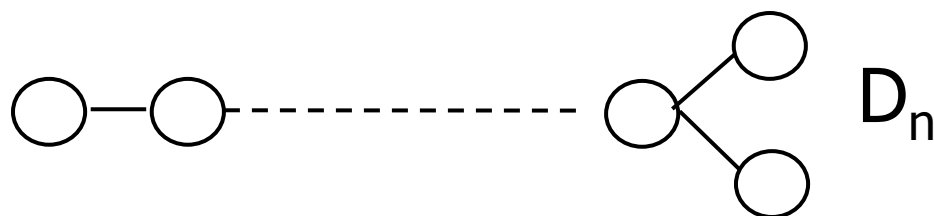
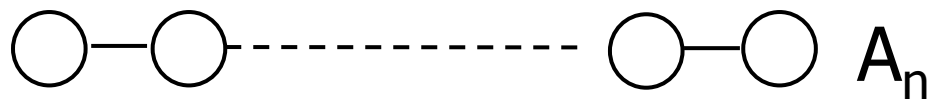


Классификация алгебр Ли проведена Картаном, Вейлем, завершена Мальцевым и Дынкиным.

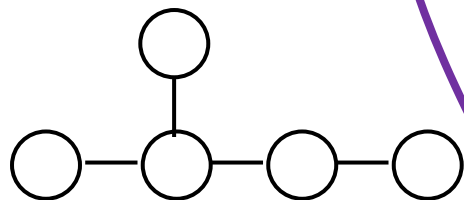
Диаграммы Дынкина (1952) удобны для представления алгебр Ли.



Алгебры Ли в ТВО

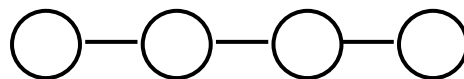


$$A_n = SU(n+1)$$

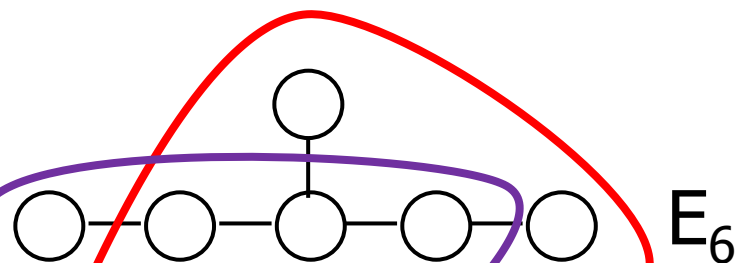


$$B_5 = SO(10)$$

$$D_n = SO(2n)$$



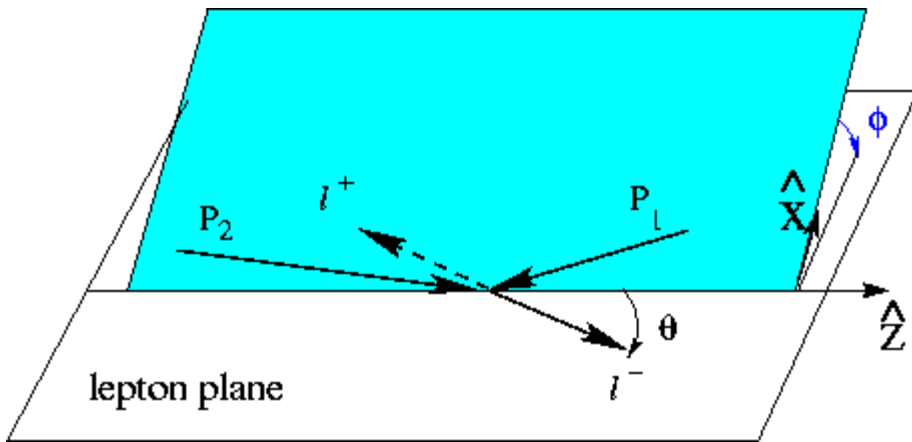
$$A_4 \cong SU(5)$$



E_6 – самая популярная группа для ТВО, включает:

- $SU(5)$ – минимальная ТВО (Glashow, Georgi, 1974), исключена экспериментально (LEP, распад протона);
- $SO(10)$ – популярная группа для ТВО;
- $SU(4)$, $SO(8)$ – менее популярные ТВО;
- более привычные группы – $SU(3)$, $SU(2)$, $U(1)$ – используется во многих ТВО.

Collins-Soper frame



- CS frame is a particular rest frame of the lepton pair
- z axis bisects the angle between p_1 and p_2
- general form for $\cos \theta_{CS}$ (see arXiv:0812.2045)

$$1 + A \cos^2 \mathcal{G} + B \cos^4 \mathcal{G}$$

- for graviton (spin=2) production via gluon $A=0, B=-1$, via quarks $A=-3, B=4$
- Scalar resonance decay into ee $A=B=0$ (SM background)
- Vector (Z') $A=\alpha, B=0$ (for SM $\alpha \in \mathbb{1}$) $A \cos^2 \mathcal{G} + B \cos^4 \mathcal{G}$
- Z^*

$$C=B=0, A \neq 0.$$

Parameter C is needed to
discovery Z^* boson

$$\cos \mathcal{G}_{CS} = 2 \frac{(p_{e^-}^2 + p_{e^-} p_{e^+} \cos \mathcal{G}_{e^-e^+})(p_{e^-} + p_{e^+}) - p_{e^-} (\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+})^2}{M^2 \sqrt{(\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+})^2}}$$