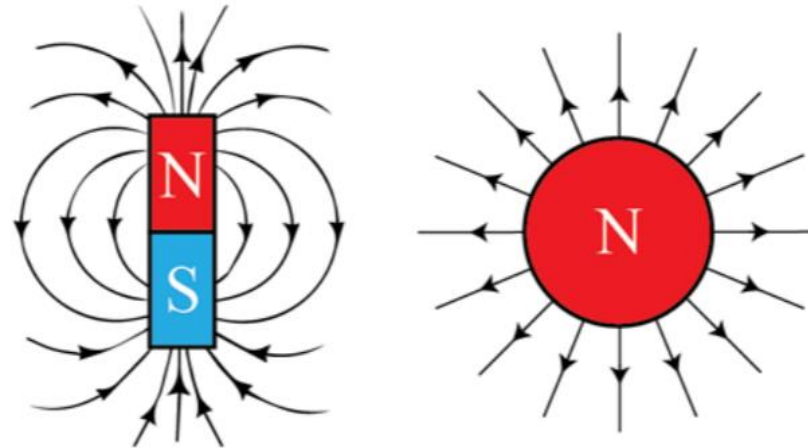




Поиски магнитных монопольей



Левченко Михаил
Лаборатория Адронной Физики ПИЯФ



Уравнения Максвелла



- В классической теории электромагнетизма взаимодействие электрически заряженных частиц с электромагнитным полем описывается уравнениями Максвелла

Laws	Without magnetic monopoles	With magnetic monopoles
Gauss's law	$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e$
Gauss's law for magnetism	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 4\pi\rho_m$
Faraday's law	$-\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$-\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + 4\pi\mathbf{J}_m$
Ampère's law	$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + 4\pi\mathbf{J}_e$	$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + 4\pi\mathbf{J}_e$

- Только плотность электрического заряда и плотность электрического тока являются источником электрического и магнитного поля в уравнениях Максвелла
- Отсутствие магнитного заряда или плотности магнитного тока не является предсказанием теории, а результат анализа экспериментальных данных
- Наличие магнитного заряда должно приводить к симметризации уравнений Максвелла



Монополю Дирака

- В 1931г Поль Дирак выдвинул гипотезу о существовании магнитного монополя
- Монополю это окончание бесконечно длинного и тонкого соленоида
- Условие квантования Дирака:

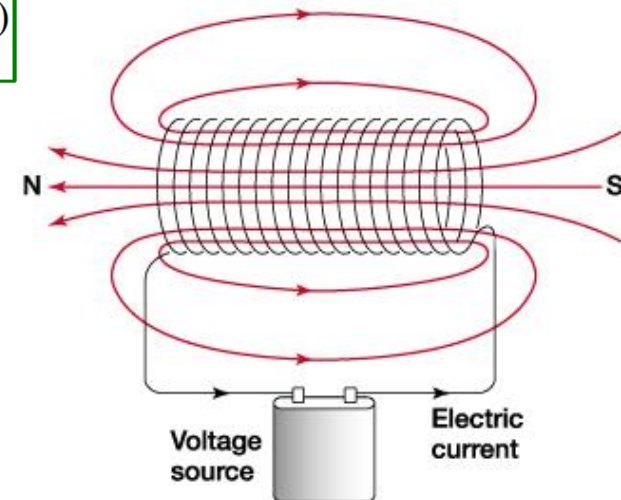
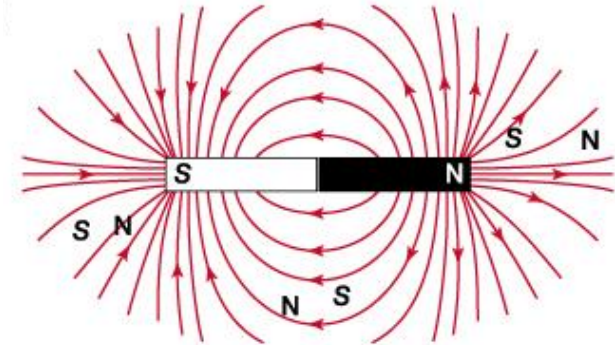
$$ge = \left[\frac{\hbar c}{2} \right] n \quad \text{OR} \quad g = \frac{n}{2\alpha} e \quad \left(\text{from } \frac{4\pi e g}{\hbar c} = 2\pi n \quad n = 1, 2, 3.. \right)$$

g – магнитный заряд,

α – постоянная тонкой структуры 1/137

- Таким образом $g = 68.5e$ (при $n=1$)
- Если магнитный монополю существует, то это приводит к квантованию электрического заряда

$$e = \left[\frac{\hbar c}{2g} \right] n$$



Дираковская струна



GUT и Электрослабый сектор

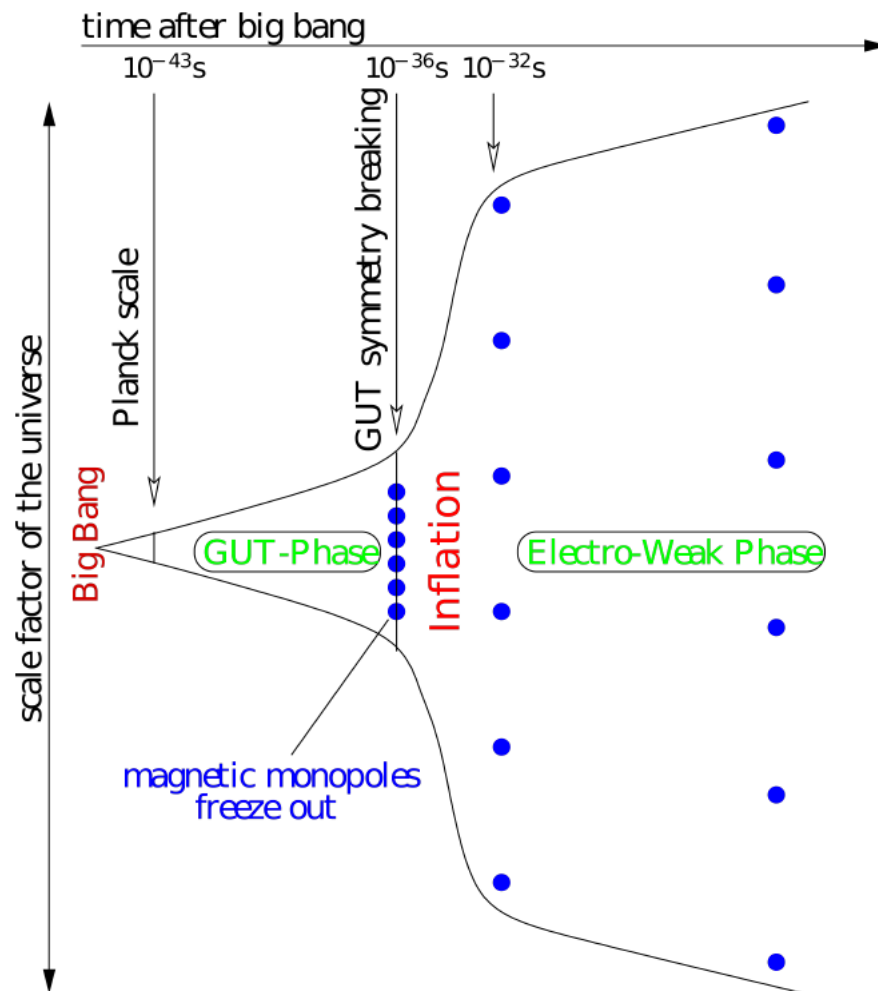


- 1974 t'Hoof и Поляков показали что монополи являются фундаментальным решением для теорий великого объединения (GUT)
- В отличие от Дираковской теории монополь в теориях великого объединения (GUT) должен обладать определенной массой
 - $M_{\text{GUT}} \sim 10^{18} \text{ GeV}$
 - $R_{\text{GUT}} \sim \text{fm}$

Не могут родиться на ускорителях частиц

- Некоторые электрослабые теории [arXiv:1212.3885v6] предсказывают существование магнитных монополей:
 - $M_{\text{EW}} \sim 4 - 7 \text{ TeV}, g=2g_D$

Вполне могут родиться на ускорителях частиц



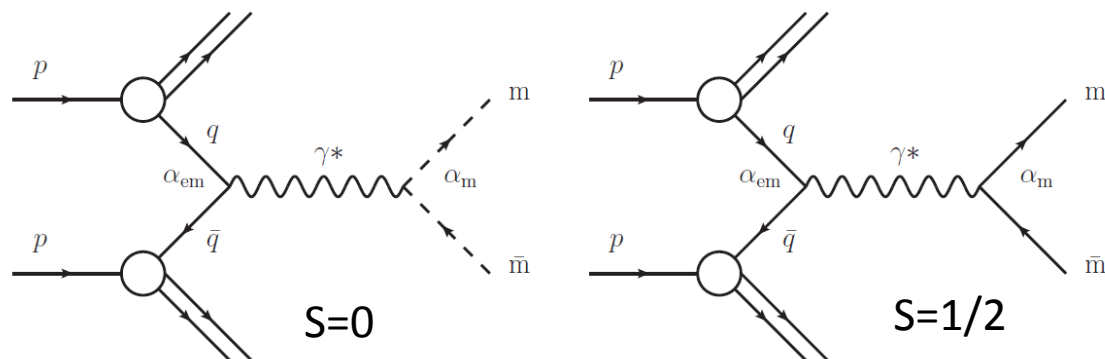
T. Glösenkamp 10



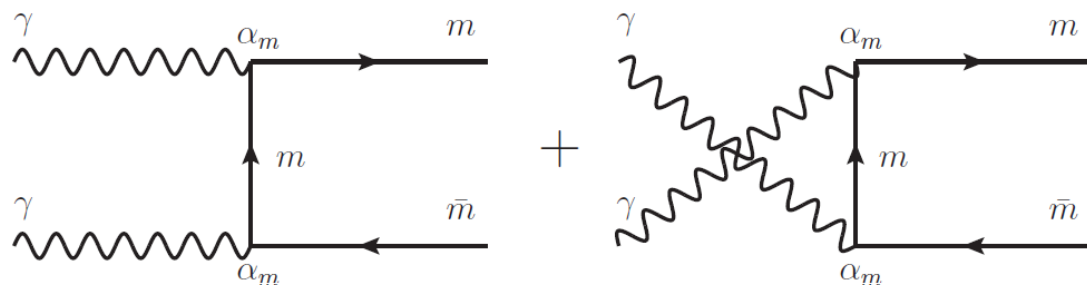
Рождение магнитных монополей



- Основной процесс, рассматриваемый при изучении рождения магнитных монополей, это Дрелл-Ян



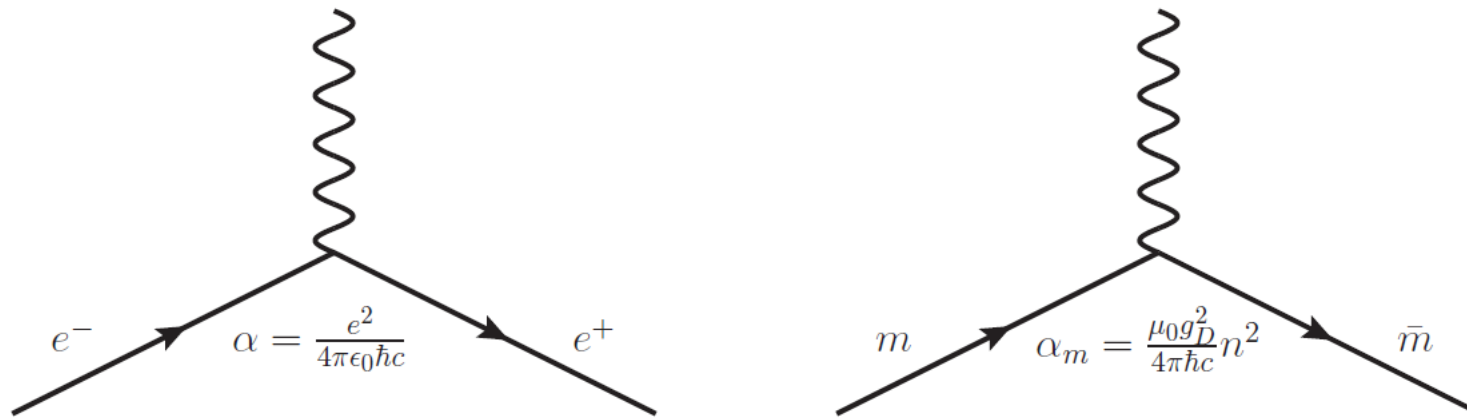
- Также для рождения магнитных монополей может рассматриваться процесс фотонного слияния (photon fusion)



- Для магнитных монополей со спином $S=1/2$ сечение рождения при энергии пучков 8 TeV сравнимо с сечением Дрелл-Ян. При энергии 14 TeV сечение становится в **50 раз больше**



Магнитная константа связи



- Взаимодействие электрона с фотоном определяется с помощью константы тонкой структуры
- Аналогично с этим константу магнитного взаимодействия можно определить заменив электрический заряд на магнитный

$$\alpha = \frac{\mu_0 e^2 c}{4\pi\hbar} \xrightarrow{e \rightarrow g = ng_D / c} \alpha_m = \frac{\mu_0 g_D^2}{4\pi\hbar c} n^2.$$

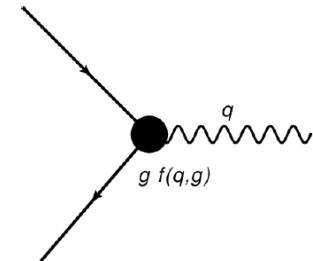
- В результате при $n=1$ $\alpha_m \approx 34.24$



СВОЙСТВА МОНОПОЛЯ



- Существование ММ объясняет квантизацию электрического заряда
 - Магнитный заряд (Дираковский заряд): $g_D = 68.5e$
 - более высокие заряды кратны дираковскому заряду: $g = ng_D, n = 1, 2, \dots$
- Монополь у которого есть электрический и магнитный заряд называется Дюон
- Фотон-монополь константа магнитного взаимодействия
 - $g/\hbar c \sim 35$
- В отличие от электрических зарядов монополи ускоряются вдоль линий магнитного поля, в соответствии с выражением



$$\vec{F} = g \left(\vec{B} - \vec{v} \times \vec{E} \right)$$

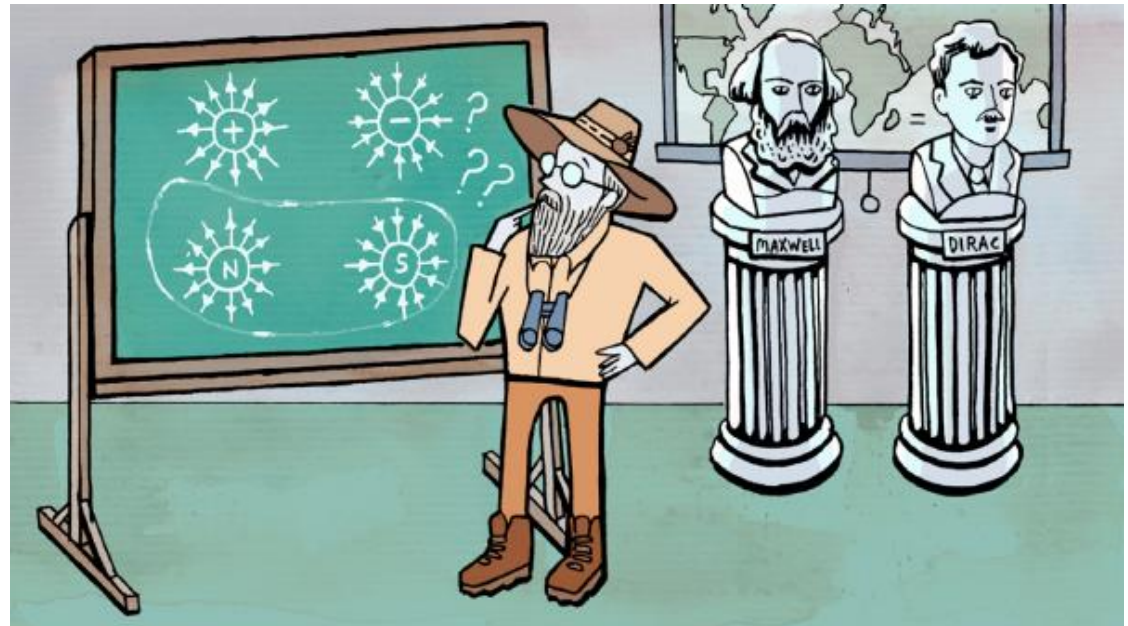
- На **спин** монополя не накладывается никаких ограничений
→ свободный параметр
- **Масса** Монополя теоретически не зафиксирована
→ свободный параметр



Поиск магнитных монополей



- Особенности регистрации
- Предыдущие результаты
- Поиски на БАК





Особенности регистрации



Сила действующая на частицу с электрическим и магнитным зарядом

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) + g \left(\vec{B} - \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c^2} \right)$$

Ионизационные потери электрически заряженной частицы описываются формулой Бете-Блоха

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

Если в первом приближении заменить электрический заряд на магнитный, то ионизационные потери магнитного монополя должны быть $68.5^2 \approx 4700$ раз выше чем МИП

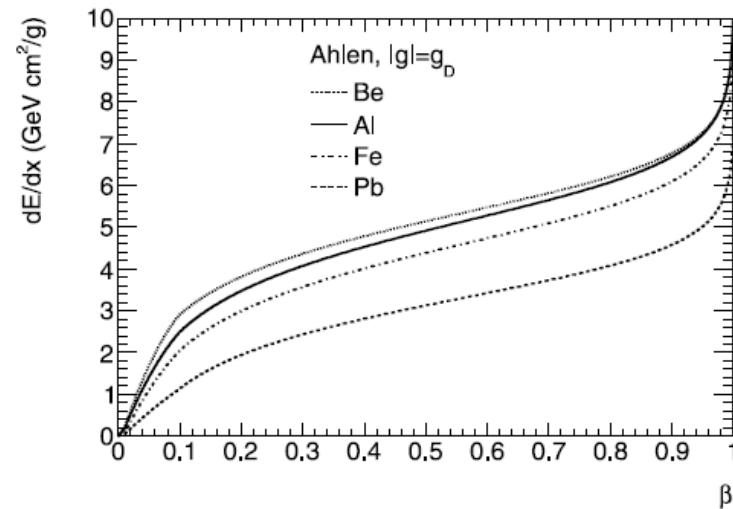
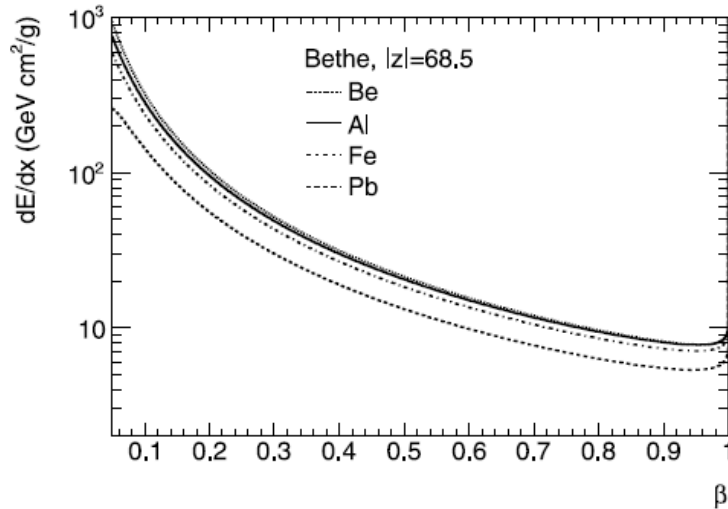
Точно ионизационные потери для монополей описываются формулой Бете-Алена

$$-\frac{dE}{dx} = K \frac{Z}{A} g^2 \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I_m} + \frac{K |g|}{2} - \frac{1}{2} - B(g) \right]$$

- Большинство тяжелых, стабильных, электрически заряженных частиц медленно двигаются через вещество и оставляют много энергии в процессе ионизации. Таким образом в процессе поиска магнитных монополей возможна регистрация сигналов от других частиц: заряженных объектов с высоким электрическим зарядом (NECOs) или высоко-ионизирующих частиц (HIPs)



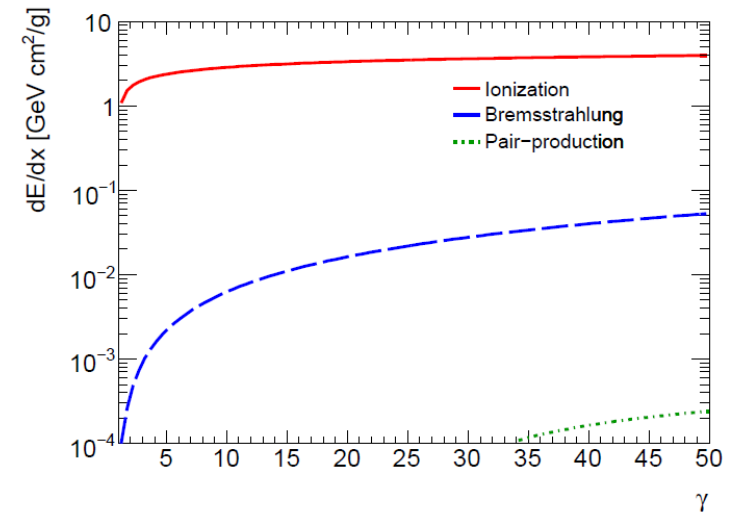
Особенности регистрации



- Потери **магнитного монополя** при малых скоростях $\beta < 0.01$ можно аппроксимировать формулой

$$\text{где } n = g/g_D \quad -\frac{dE}{dx} = (45 \text{ GeV cm}^{-1})n^2\beta$$

- Также при прохождении **магнитного монополя** через вещество он может терять свою энергию на тормозное излучение и рождение пары e^+e^- , но эти процессы играют свою роль в основном для **ультрарелятивистских частиц** которые могут присутствовать в космических лучах

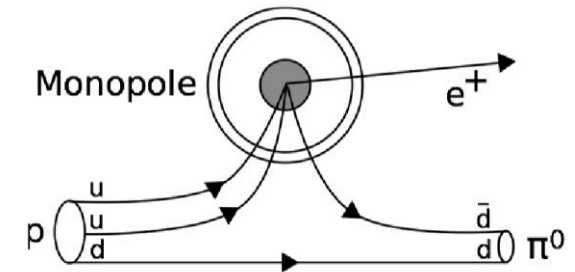
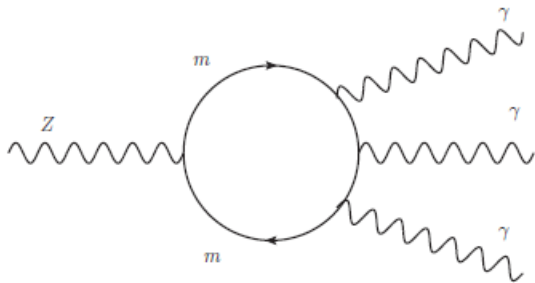




Способы детектирования монополей



- Прямое обнаружение:
 - Индукционная техника обнаружения с использованием суперпроводящих катушек. *HERA (H1), MoEDAL ...*
 - Изучение повреждений от прохождения магнитных монополей в пластиковых пленках и ядерных эмульсиях – *MoEDAL, SLIM, ANITA*
 - Глубоководные и ледяные эксперименты: *ANTARES, IceCube*
 - Сильный ионизационный след в газовых детекторах или сцинтилляторах-*Tevatron (CDF), MACRO, ATLAS, ...*
 - Регистрация Черенковского излучения в сцинтилляторах
Коллайдеры: PETRA, CERN ISR, Tevatron (D0), LEP (MODAL, OPAL), LHC (MoEDAL)
 - Катализ ядерных распадов
Космологические монополи могут аккумулироваться и катализировать распад протонов на Солнце – эффект Каллан-Рубакова - Sudan, MACRO, IMB, v-telescopes (IceCube, Super-Kamiokande)
- Непрямые поиски:
Z- $\rightarrow\gamma\gamma$ (L3-LEP), Diphotons (D0)



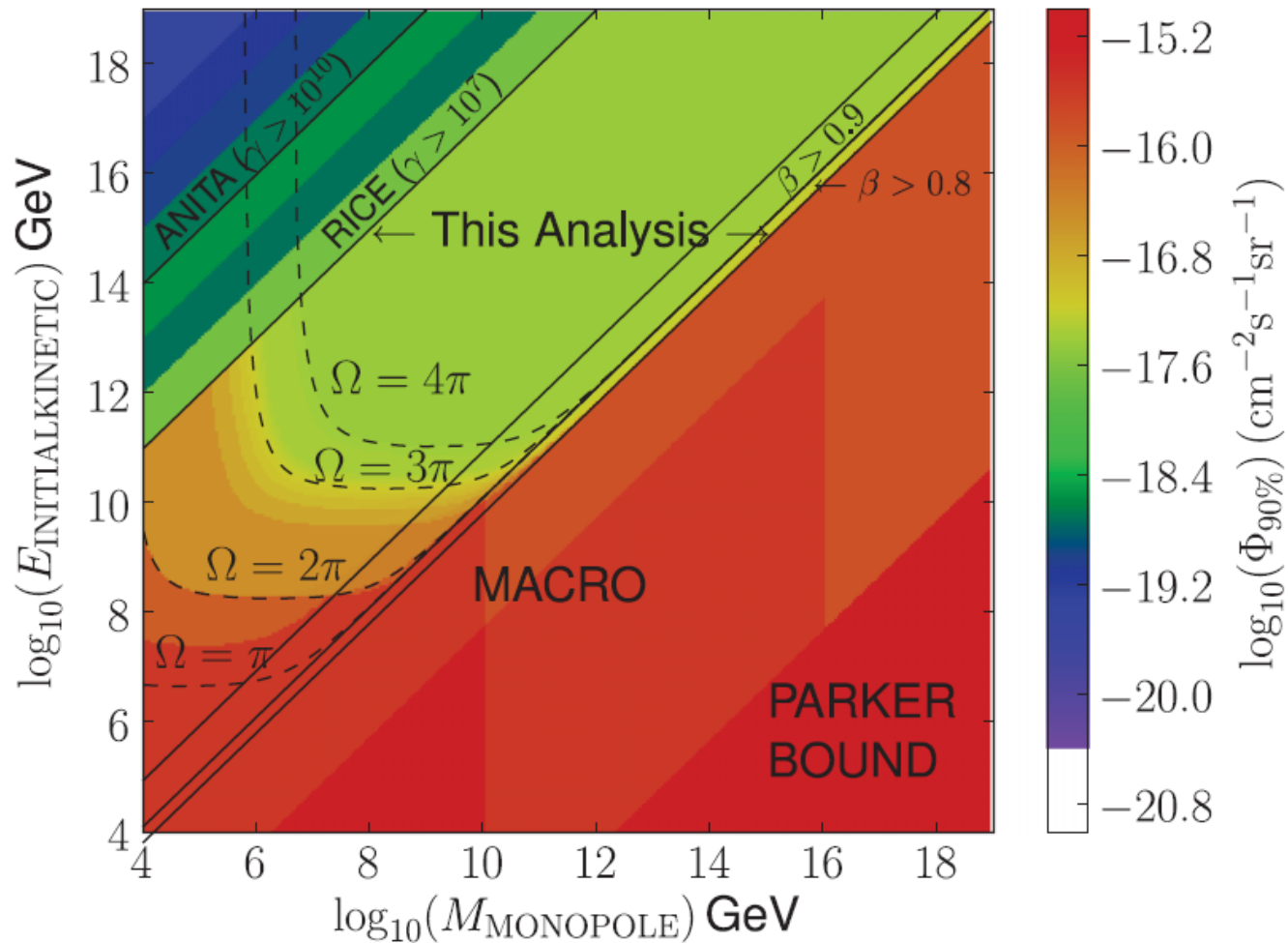
Механизм Каллана-Рубакова



Наблюдение событий похожих на магнитные монополи

Наблюдение событий которые могут быть интерпретированы как магнитные монополи

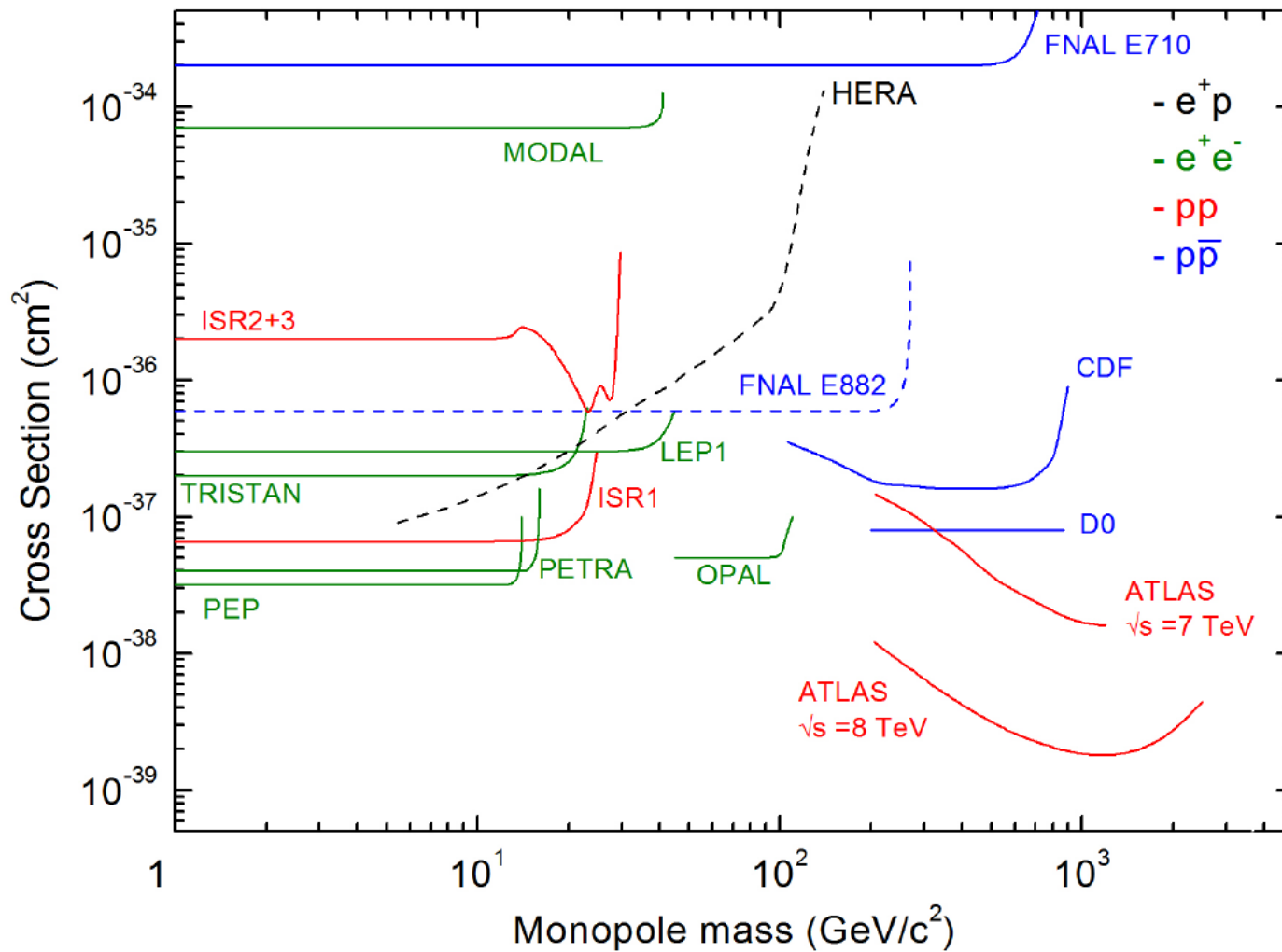
- **Price et al. 1975** – балонный эксперимент по исследованию тяжелых космических лучей с $Z \geq 60$, с использованием нескольких слоев NTD, слоя ядерной эмульсии и черенковского детектора. Обнаружено событие, которое можно было отнести к магнитному монополю с магнитным зарядом $2g_D$ и массой больше 200 GeV
- **Cabrera 1982** – эксперимент основанный на использовании индукции для поиска монополей в космических лучах. Прохождение монополя с зарядом g_D через магнитные катушки должно соответствовать измеренному магнитному потоку $8\varphi_0$. Одно событие было зарегистрировано за 151 день.
- **Anderson et al. 1983** – набор ядерных эмульсий в Pb-Hg экранах поместили на глубину 1370м, чтобы полностью экранироваться от космических лучей и локальной радиации. Обнаружено 7 треков, которые не могут быть ассоциированы с прохождением α – частиц.
- **Caplin et al. 1986** – эксперимент основанный на использовании индукционной техники зарегистрировал одно событие с магнитным потоком $0.83\varphi_0$. Подозрений на неправильную работу детектора нет, поэтому считается кандидатом в монополи.



Верхние пределы на поток монополей на поверхности земли с $|g| = 1.0g_D$



Результаты поисков до 2015 года





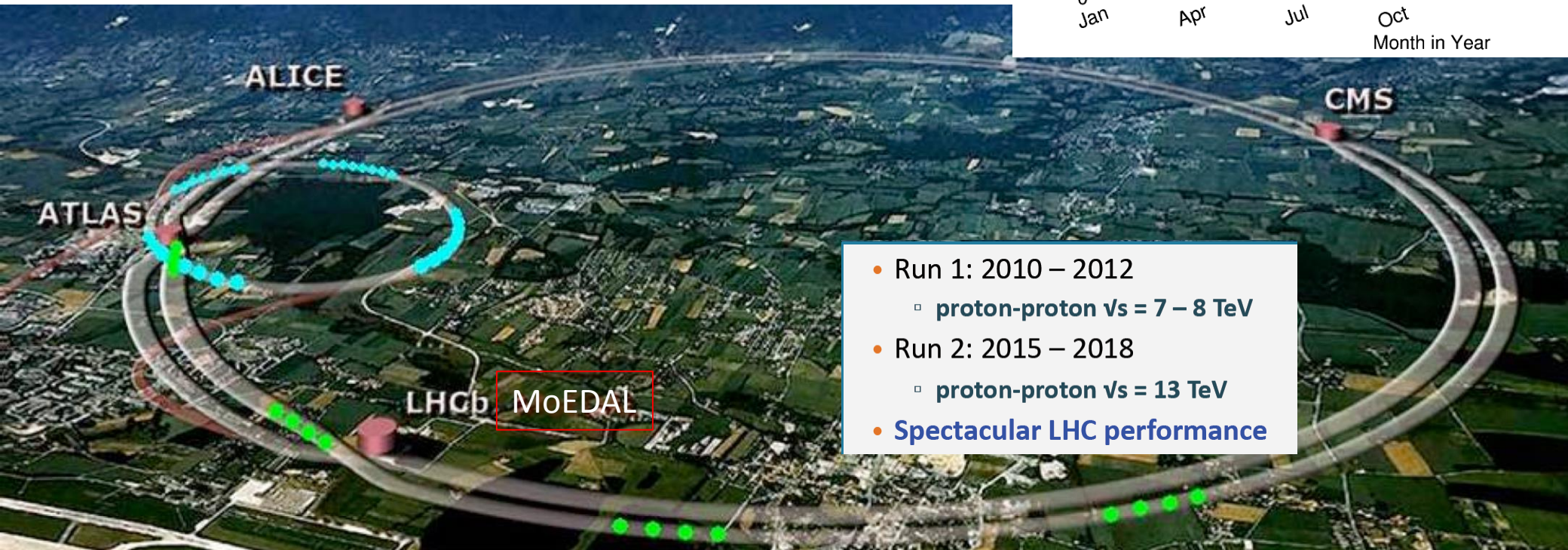
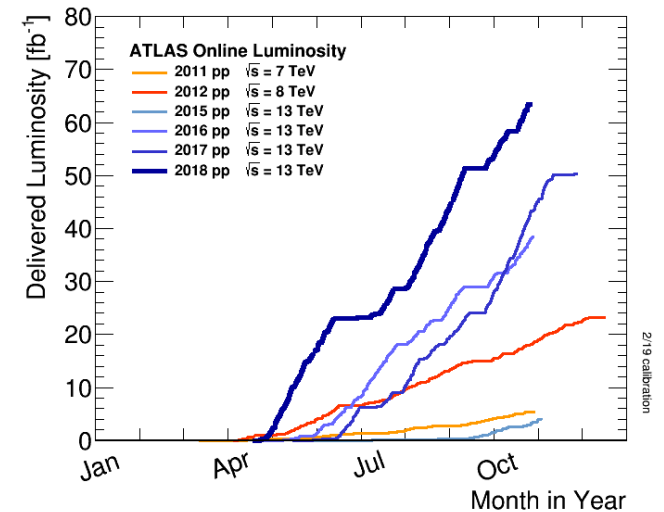
Поиски монополей на LHC



Поиски магнитных монополей на LHC проводятся экспериментами ATLAS, CMS и MoEDAL

Светимость MoEDAL ~ 50 раз меньше чем ATLAS и CMS

- ATLAS, CMS многоцелевые детекторы
- MoEDAL в основном состоит из пассивных детекторов



- Run 1: 2010 – 2012
 - proton-proton $\sqrt{s} = 7 - 8$ TeV
- Run 2: 2015 – 2018
 - proton-proton $\sqrt{s} = 13$ TeV
- Spectacular LHC performance



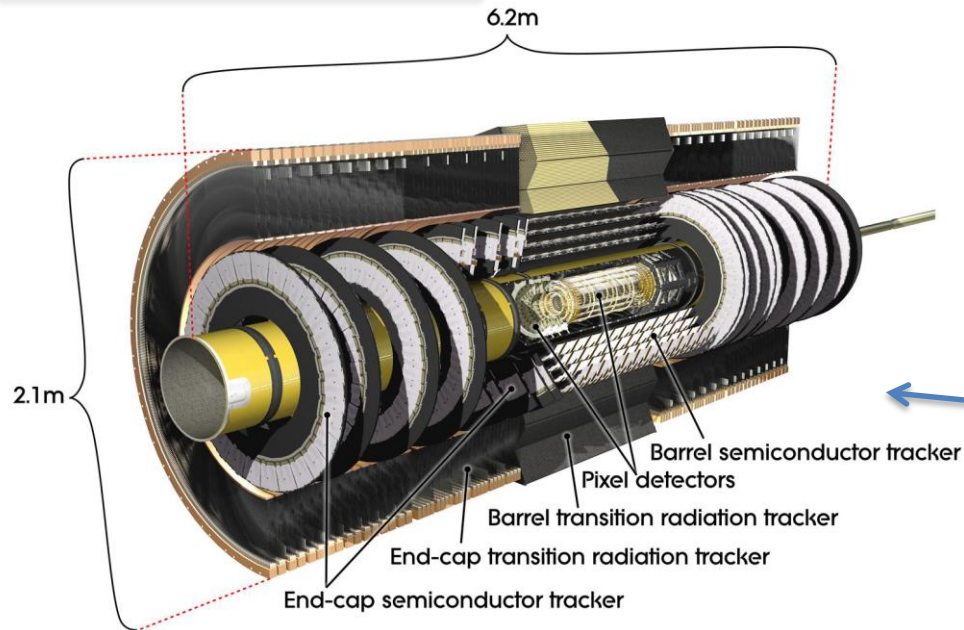
Детектор АТЛАС для поисков монополей



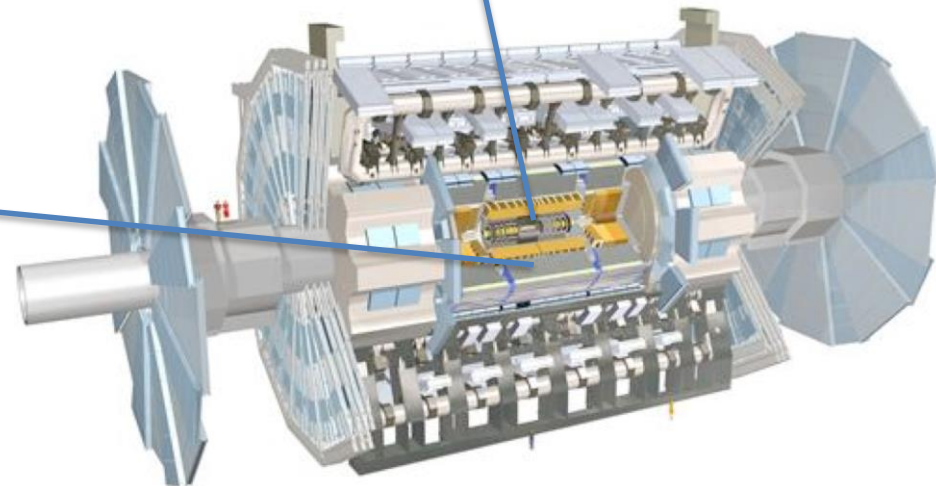
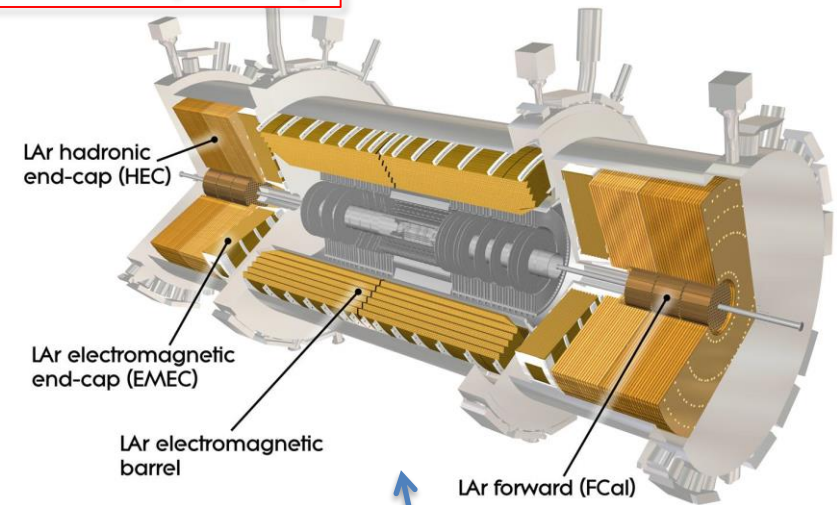
Поиски монополей в эксперименте ATLAS основаны на регистрации ионизационных потерь при прохождении частиц через:

- Электромагнитный калориметр
- Детектор переходного излучения (TRT)

Внутренний детектор



EM - калориметр





Типичный сигнал монополя в ATLAS



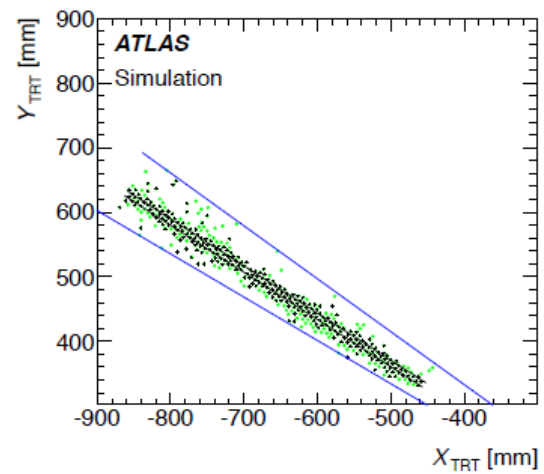
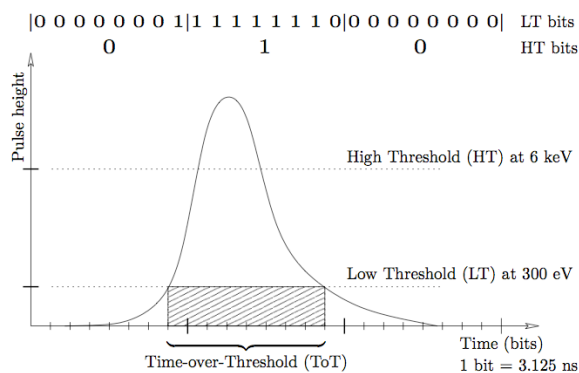
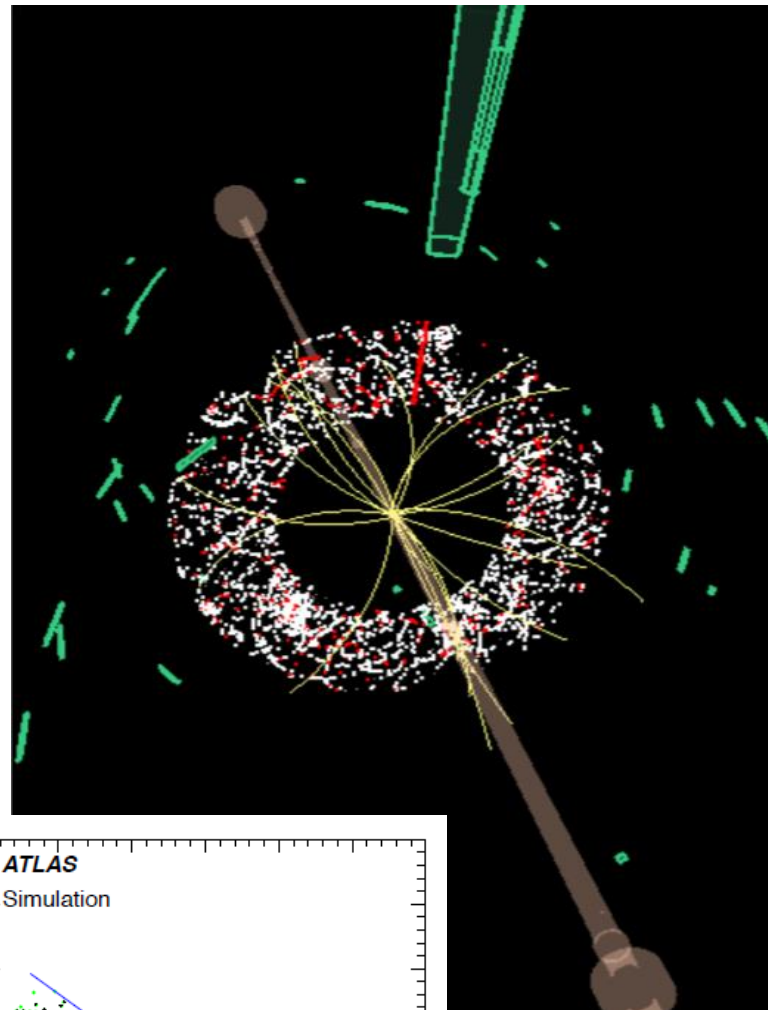
Трекер (TRT-детектор переходного излучения):

- Магнитный монополю регистрируется как прямой трек в плоскости r-φ (r-z)
- Из-за высокой ионизации и излучения δ-электронов трек зарегистрированный в TRT В основном состоит из хитов с высоким порогом регистрации

Электромагнитный калориметр:

- Так как потери энергии идут в основном за счет ионизации монополю не рождает ливня в калориметре и оставляет узкий след

Дальше EM калориметра монополю обычно не проникает

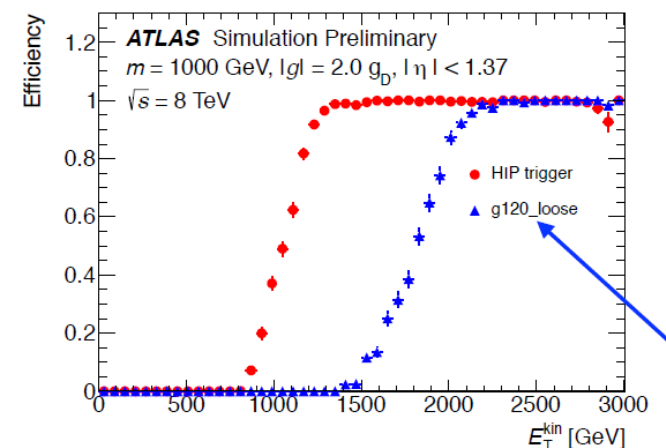




Регистрация сигнала магнитного монополя

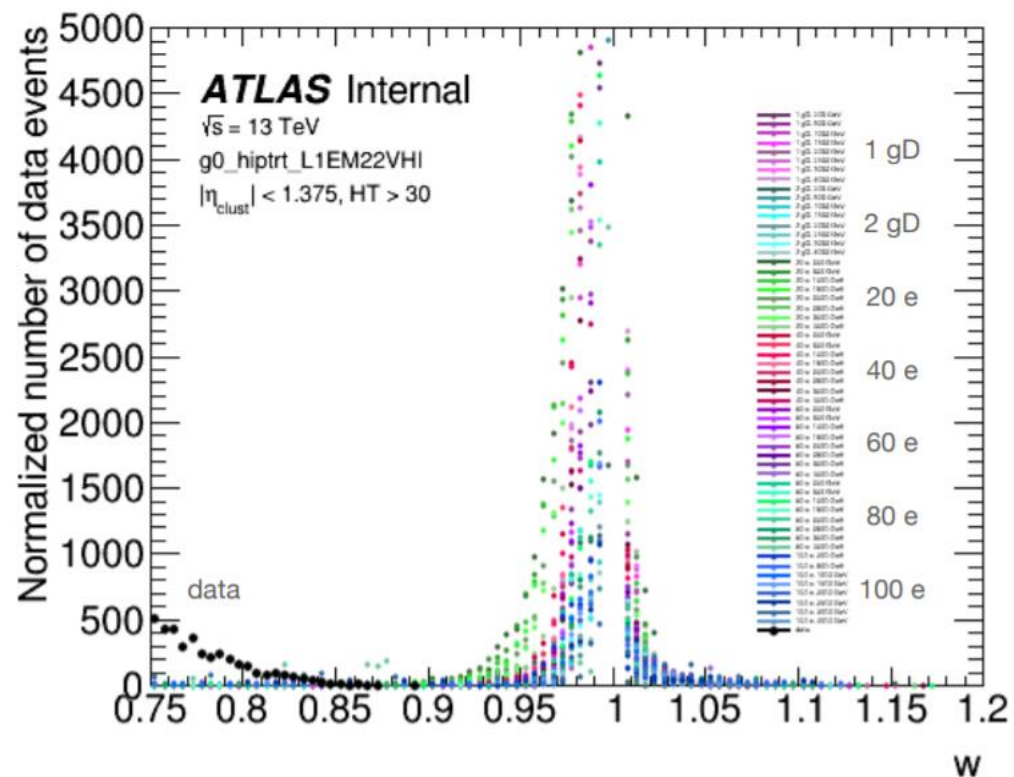
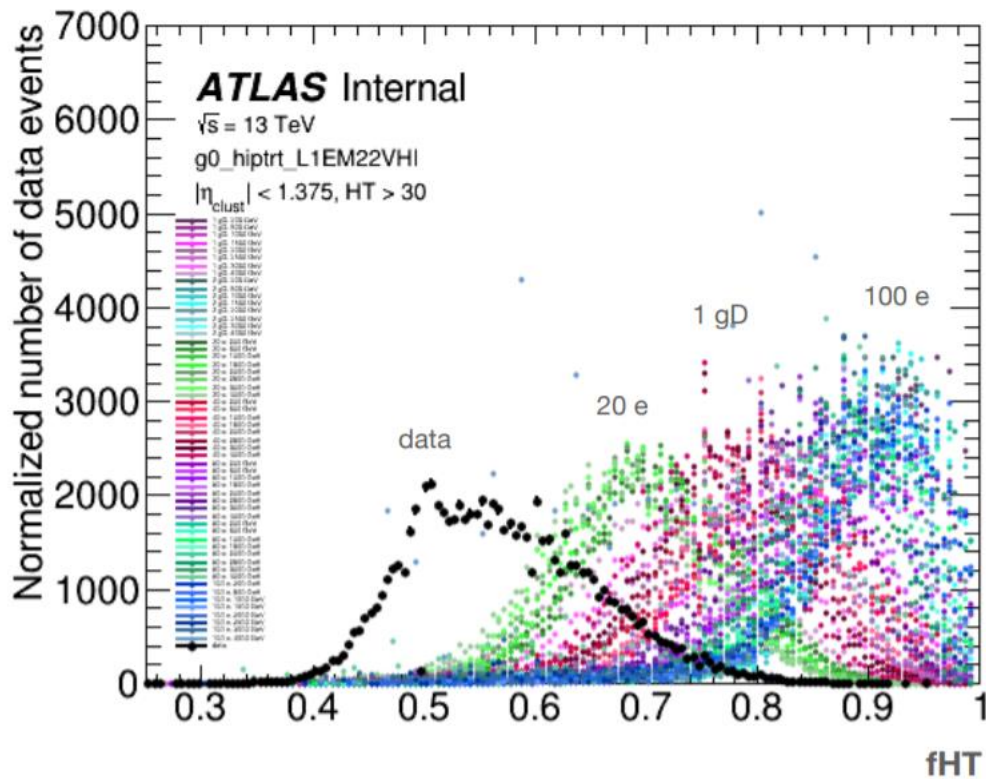


- **Trigger** основан на количестве и фракции TRT HT хитов в узкой области $\Delta\phi = \pm 0.015$ вокруг зарегистрированного сигнала в EM калориметре
 - вето на сигнал в адронном калориметре
- **Оффлайн отбор** усилен использованием комбинации **fHT** и энергетической дисперсии EM калориметра **w**
 - TRT: большинство хитов с высоким порогом регистрации (HT), **fHT**, оставляемая монополем и излученными δ -электронами
 - EM калориметр: монополь замедляется и останавливается, оставляя при этом всю свою энергию в тонком луче, в отличие от электрона
 - w**: для отбора используется энергетическая дисперсия ; отображающая фракцию энергии оставленной в наиболее энергетичных ячейках калориметра
- **Фоновые события**
 - треки от заряженных частиц и шумы TRT
 - высокоэнергетичные электроны и шумы в EM калориметре
- **Data-driven** оценка фоновых событий основана на использовании ABCD метода в плоскости (**w**, **fHT**)





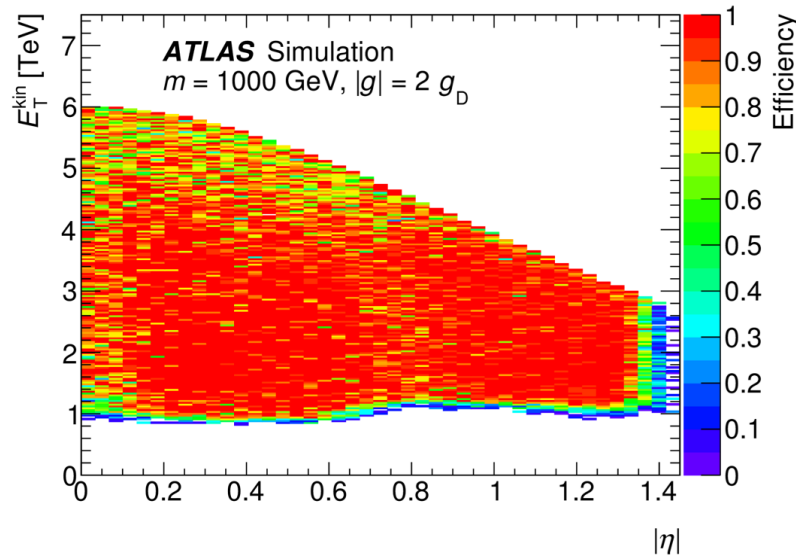
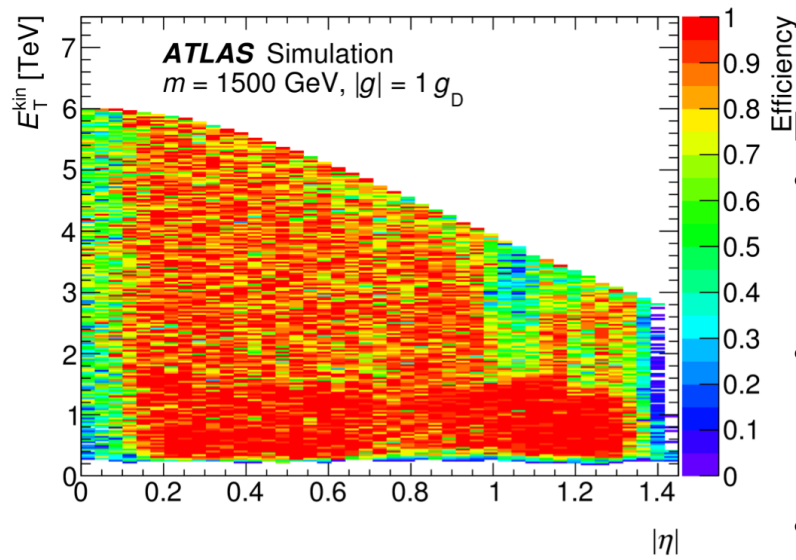
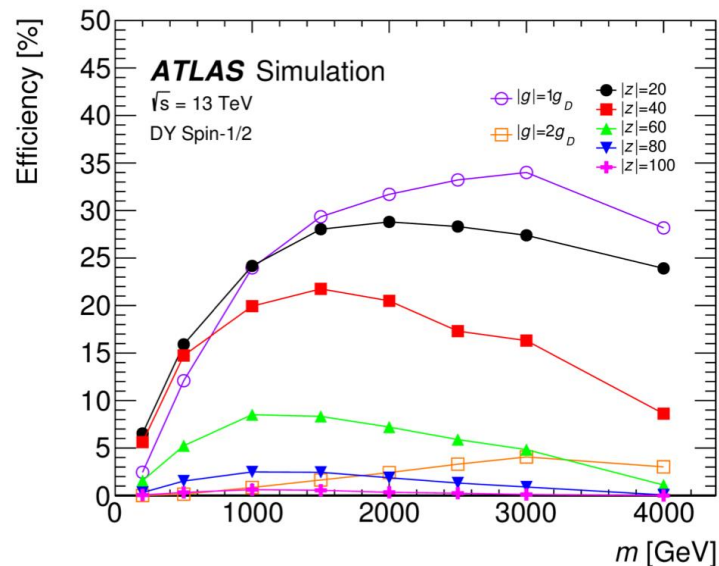
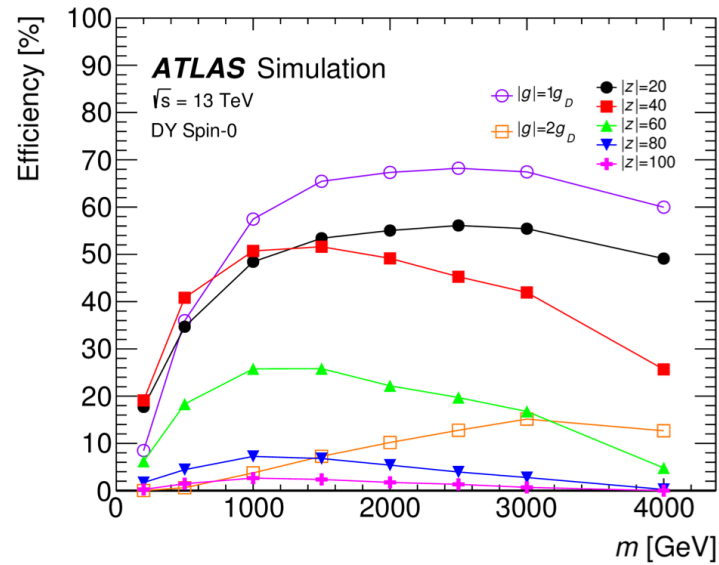
Дискриминационные переменные



Сравнение распределений дискриминационных переменных для данных и Монте-Карло



Эффективность отбора



Потеря эффективности:

- частица останавливается до EM калориметра
- слишком мало энергии тратится в EM калориметре
- частица проникает в адронный калориметр и срабатывает вето



Результаты ATLAS



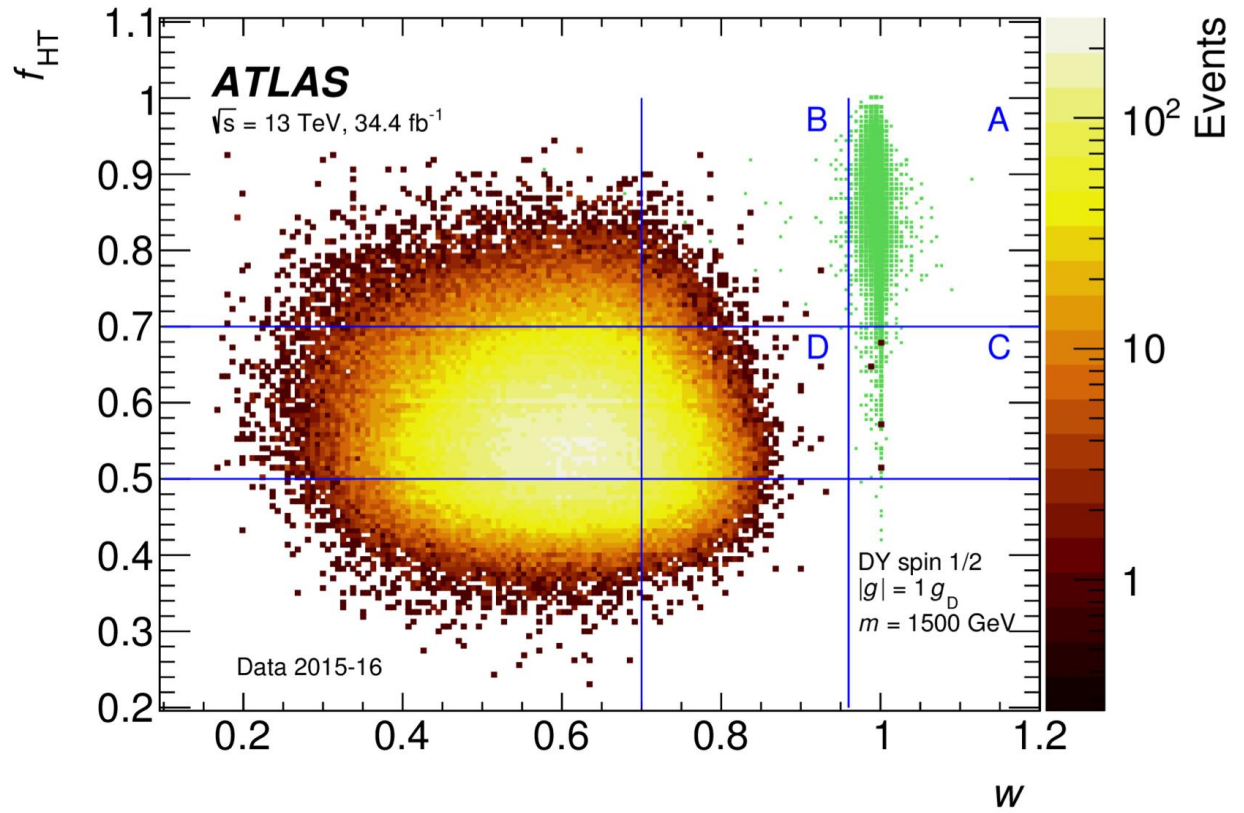
- Были обработаны данные за 2015+2016 (34.4 fb^{-1})
 - ▣ впервые были произведены поиски монополя при энергии $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$!
- Данные изучались в плоскости дискриминационных переменных (f_{HT}, w) , в сигнальной области **A** ни одного события обнаружено не было

$0.20 \pm 0.11 \text{ (stat)} \pm 0.40 \text{ (sys)}$

Фоновых событий

Ожидаемое количество событий

$$N_A^{\text{exp}} = N_B N_C / N_D$$

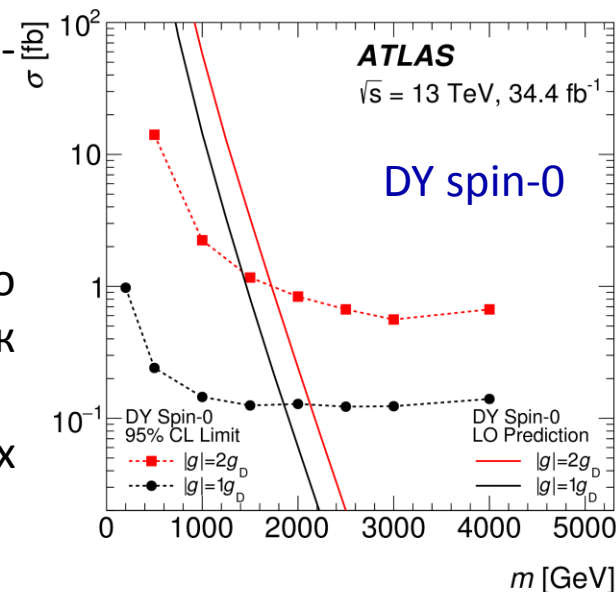




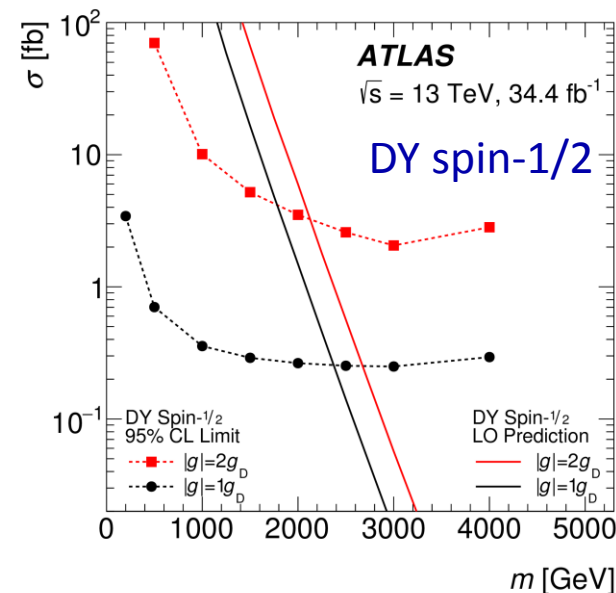
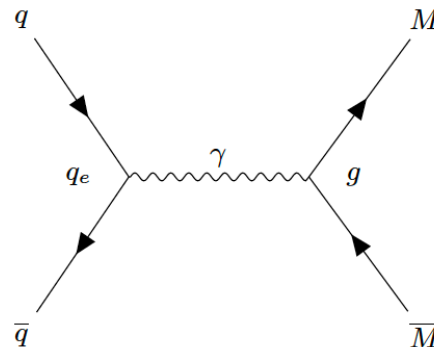
Интерпретация



- Результаты полученные из данных ATLAS интерпретированы с точки зрения магнитного заряда $1 < |g| < 2.0 g_D$
 - Что улучшило предыдущие результаты ($\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ $|g| \leq 1.5 g_D$)
- Определены верхние пределы на сечение парного рождения в процессе Дрелл-Ян со спином 0 и $\frac{1}{2}$ как функция от массы магнитного монополя
- Установлены нижние пределы на массу дираковских монополей рожденных в процессе Дрелл-Ян

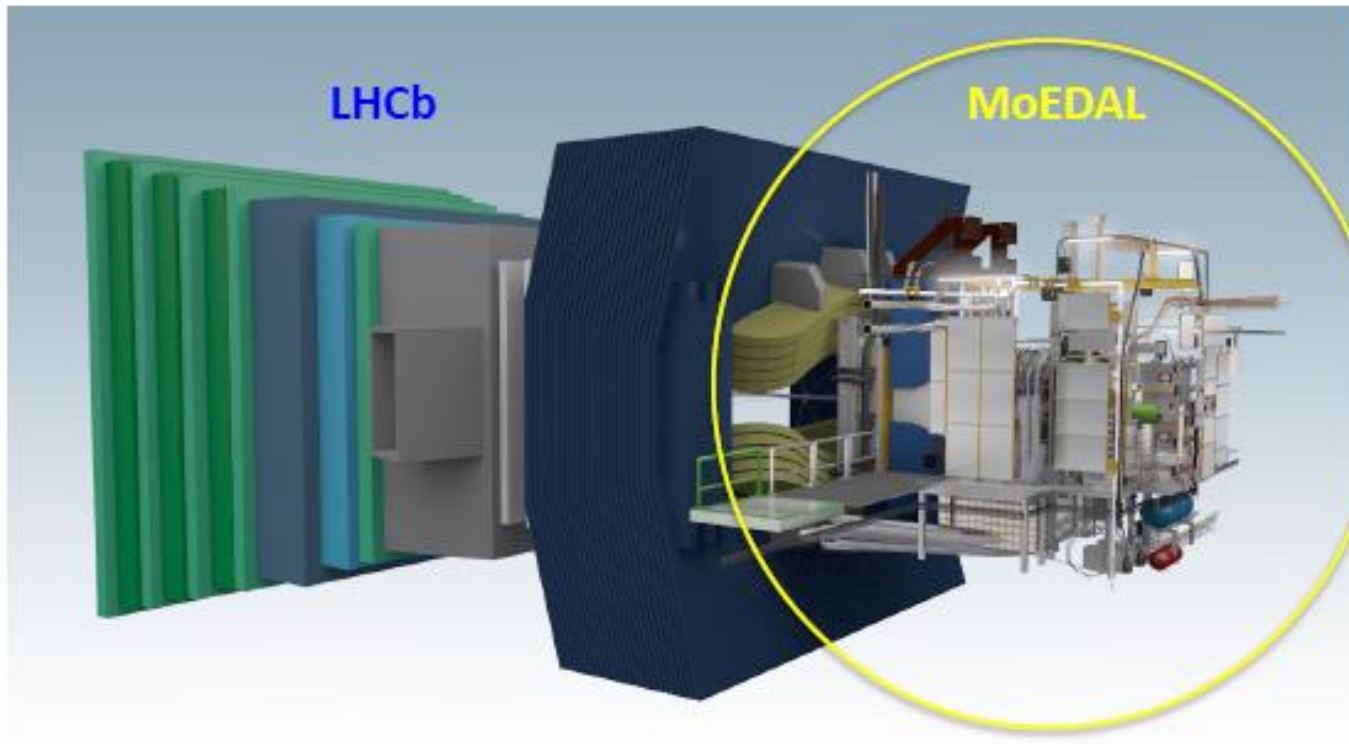


Drell-Yan lower mass limits [GeV]		
	$g = 1g_D$	$g = 2g_D$
spin-0	1850	1725
spin $\frac{1}{2}$	2370	2125





Эксперимент MoEDAL

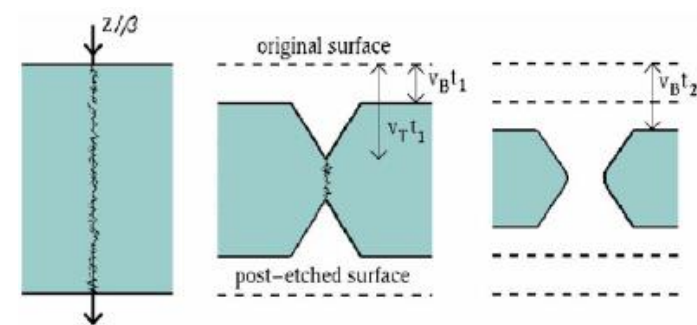


DETECTOR SYSTEMS

- ① Low-threshold NTD (LT-NTD) array
 - $z/\beta > \sim 5-10$
- ② Very High Charge Catcher NTD (HCC-NTD) array
 - $z/\beta > \sim 50$
- ③ TimePix radiation background monitor
- ④ Monopole Trapping detector (MMT)

Эксперимент в основном использует пассивные детекторы:

- Нет никаких триггеров
- Нет почти никакой считывающей электроники



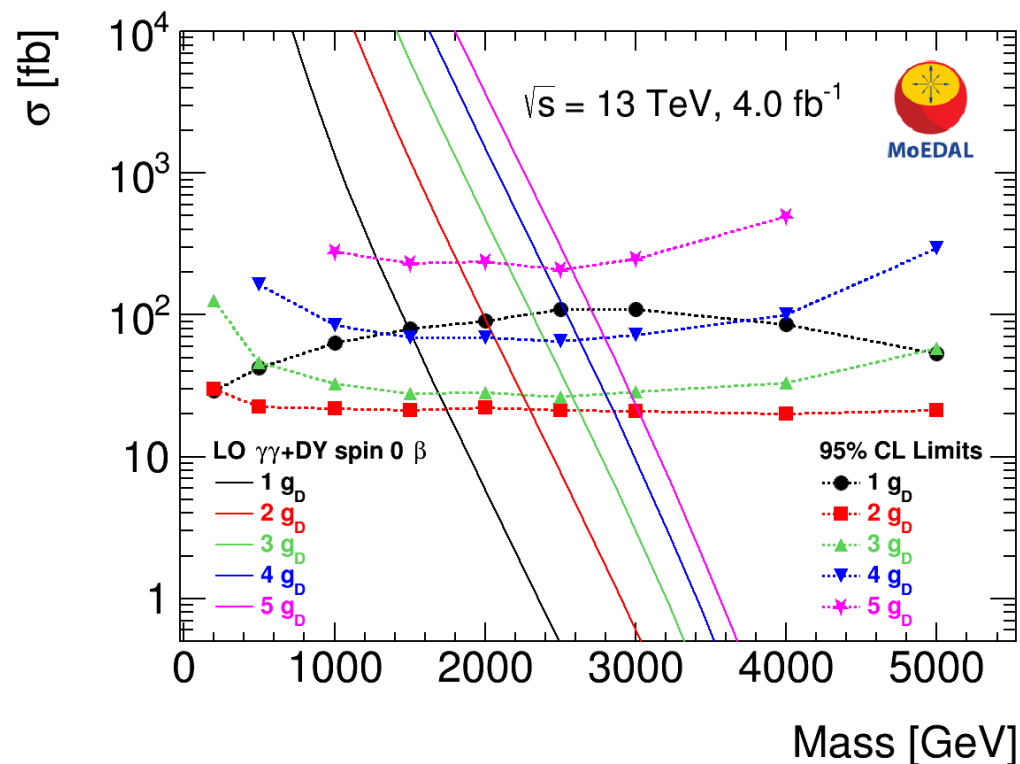


MoEDAL - результаты



- В анализе данных рассматриваются оба процесса рождения MM:
 - Дрелл-Ян и фотонное слияние (Photon Fusion)
 - Рождение частиц со спином $S=1$ рассматривается в дополнении к стандартным $S=0, 1/2$

Process / coupling	Spin	Magnetic charge [g_D]				
		1	2	3	4	5
95% CL mass limits [GeV]						
DY	0	790	1150	1210	1130	–
DY	1/2	1320	1730	1770	1640	–
DY	1	1400	1840	1950	1910	1800
DY β -dep.	0	670	1010	1080	1040	900
DY β -dep.	1/2	1050	1450	1530	1450	–
DY β -dep.	1	1220	1680	1790	1780	1710
DY+ $\gamma\gamma$	0	2190	2930	3120	3090	–
DY+ $\gamma\gamma$	1/2	2420	3180	3360	3340	–
DY+ $\gamma\gamma$	1	2920	3620	3750	3740	–
DY+ $\gamma\gamma$ β -dep.	0	1500	2300	2590	2640	–
DY+ $\gamma\gamma$ β -dep.	1/2	1760	2610	2870	2940	2900
DY+ $\gamma\gamma$ β -dep.	1	2120	3010	3270	3300	3270



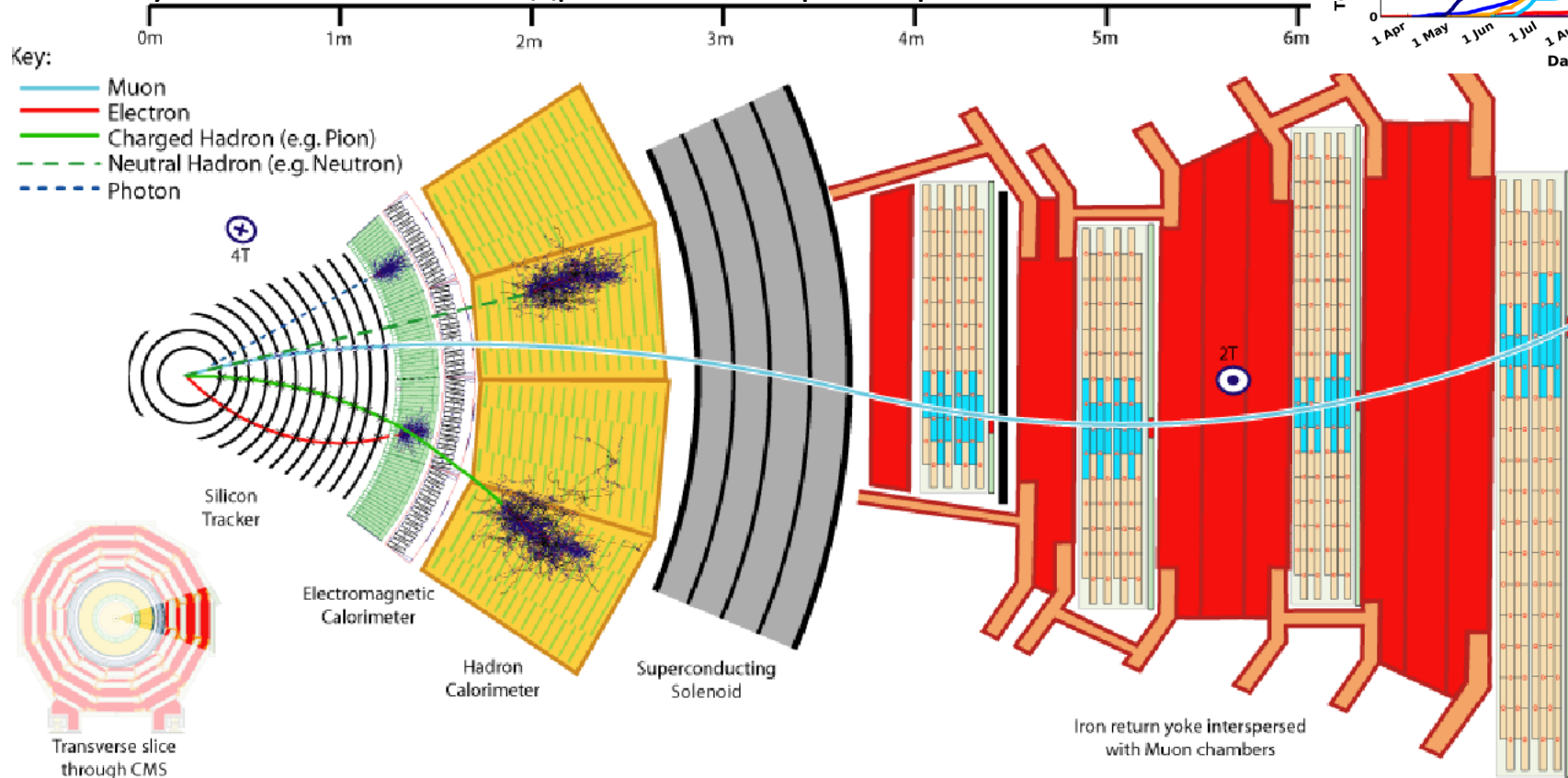
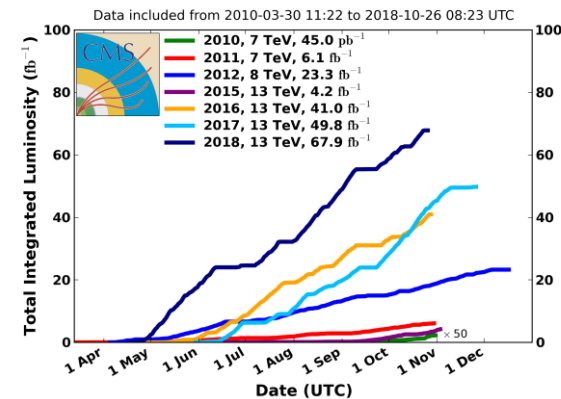


Поиски монополей в CMS



- Еще один детектор общего назначения на БАК.
- Для поисков магнитных монополей используются данные внутреннего трекера и электромагнитного калориметра
- Трек характеризующийся большими ионизационными потерями и изгибом в плоскости r-z
- Узкий сигнал в электромагнитном калориметре
- Отсутствие сигналов в адронном калориметре

CMS Integrated Luminosity Delivered, pp



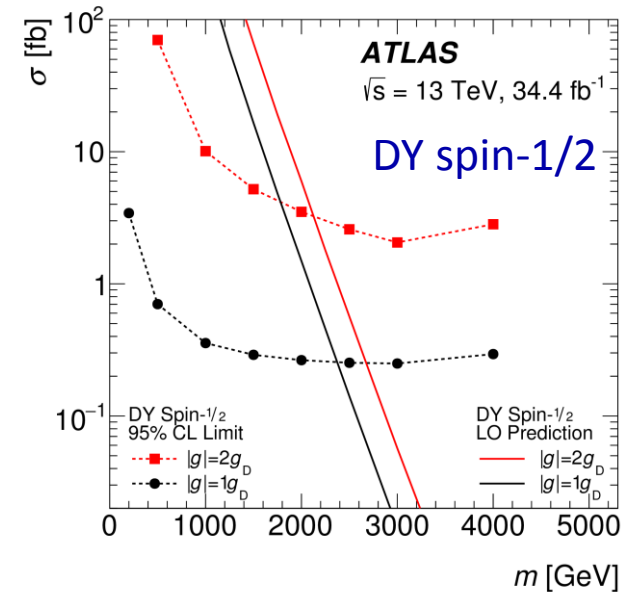
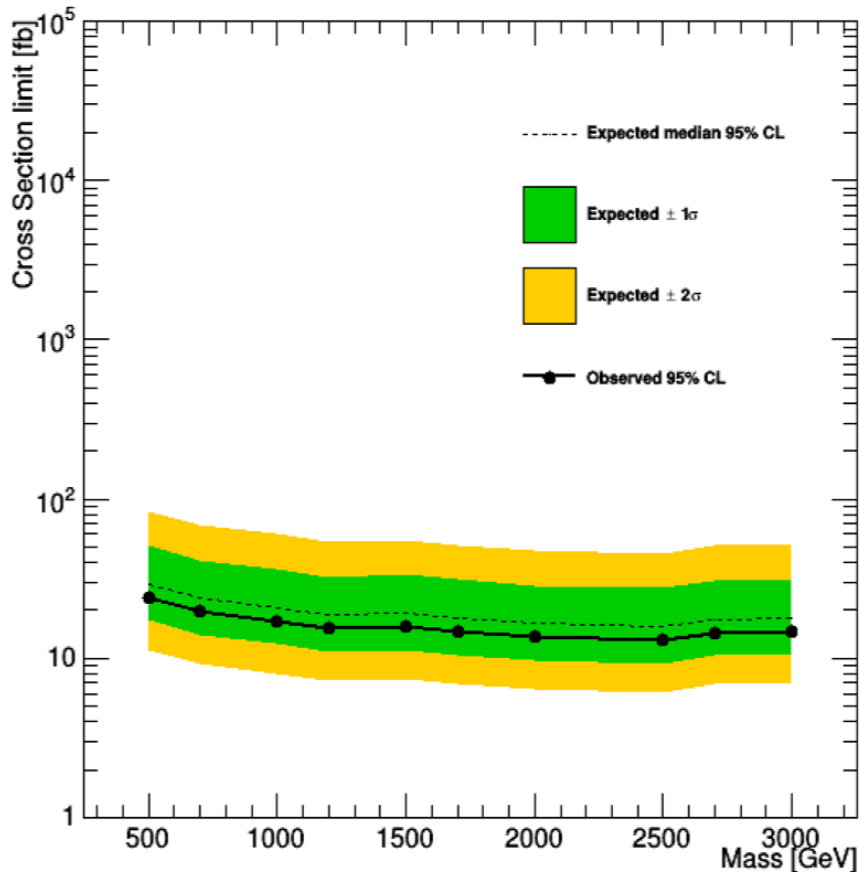
D. Bortone, CERN, February 2004



CMS результаты



- Проведен анализ данных детектора **CMS** соответствующие 33 fb^{-1} при энергиях 13 TeV.
- Событий, которые можно отнести к магнитным монополям обнаружено не было.



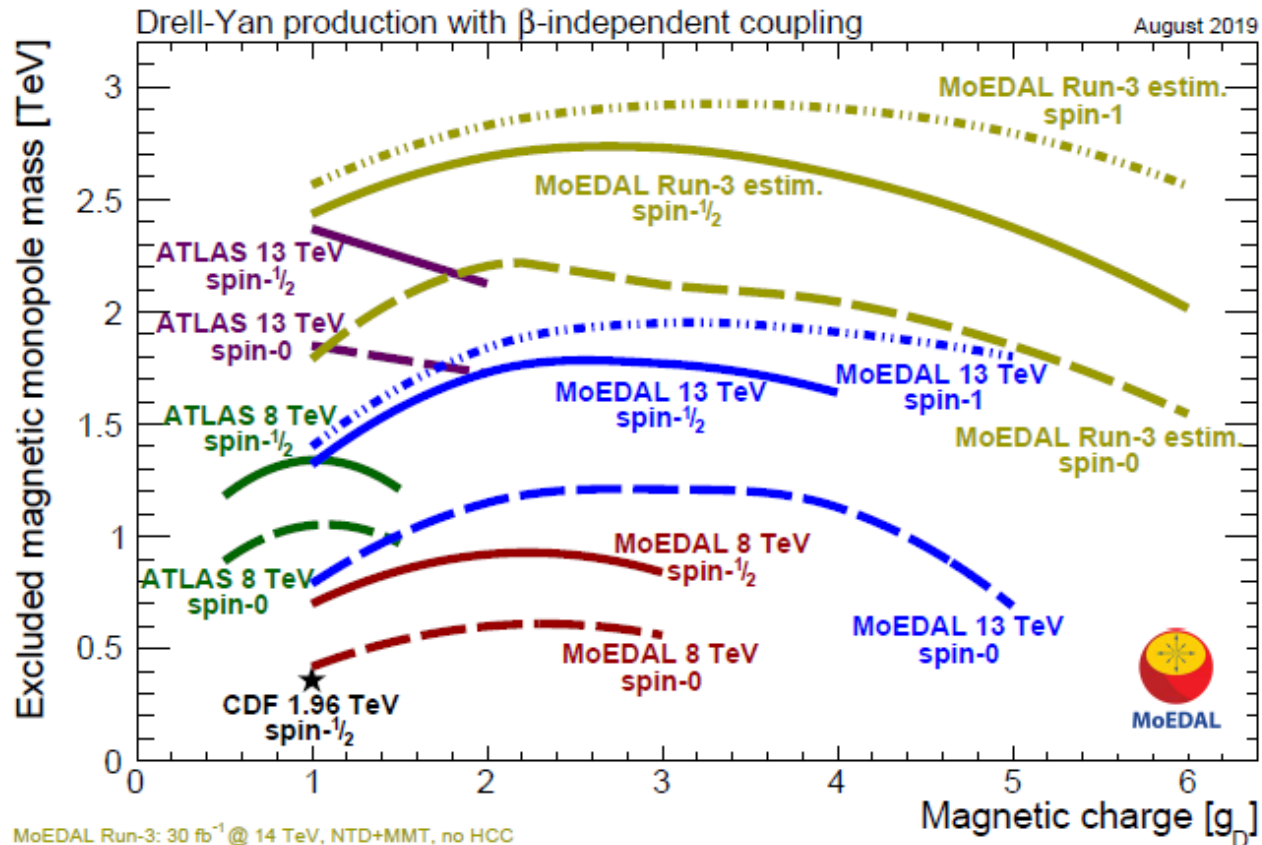
- видно, что результат **CMS** 4-5 раз менее чувствительный, что в основном связано с отсутствием соответствующего триггера.
- Эксперимент **MoEDAL** дает схожие результаты по пределам на рождение магнитных монополей с $g = 1.0 g_D$, но способен получить результаты для более высоких магнитных зарядов.



Заключение



- На данный момент лучшие результаты по поиску магнитных монополей и частиц с $|z| > 1$ были получены на LHC в pp соударениях



- Пределы на сечение рождения магнитного монополя были установлены
- Ограничения на массы также были получены



BackUp





Поиски монополей в космических лучах

Космологические монополи имеют массу $\sim 10^{16}$ GeV и взаимодействуют с галактиками либо гравитационно, либо за счет магнитных полей. В зависимости от массы одно из взаимодействий доминирует. Под воздействие галактического магнитного поля монополю может разогнаться до скоростей $\beta = 10^{-3}$ и будет оставлять достаточно слабый ионизационный след. Т.о. ионизационные эксперименты ориентированы на поиски более легких монополей и только индукционные эксперименты могут регистрировать монополи любой массы и любой скорости.

- **MACRO(Gran Sasso)** – оптимизирован для регистрации ММ в широкой области $4 \times 10^{-5} < \beta < 1$. Используется комбинированная техника регистрации: жидкие сцинтилляторы для медленных монополей, газовые трубки и NTD пленки. Ни одного события зарегистрировано не было, был поставлен верхний предел на поток монополей с зарядом $|g| = 1g_D$ $1.4 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$.
- **RICE(южный полюс)** – имеет возможность регистрировать релятивистские монополи $\gamma \geq 10^7$ и массой $\leq 10^8$ GeV за счет черенковского излучения во льду. Не зарегистрировало событий, поставлен верхний предел при $\gamma \geq 10^8$ $10^{-18} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
- **ANITA-II** – изучение черенковского излучения во льду с помощью радиоантенн на воздушных шарах. Установлен верхний предел для $|g| = g_D$ при $\gamma \geq 10^{10}$ $10^{-19} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$.

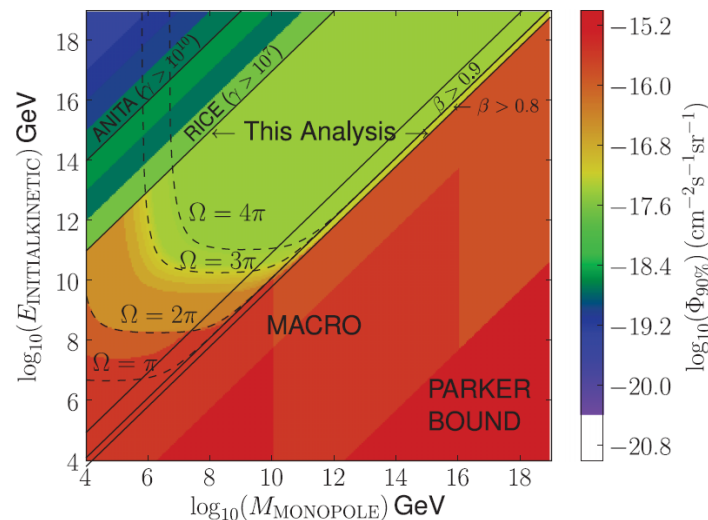


Результаты поисков



Поиски монополей в космических лучах

- **ANTARES(средиземное море 2475м)** – работает на основе регистрации черенковского излучения. Чувствителен к монополям с массой $m \leq 10^8$ GeV, прошедших через землю и потерявших большую часть энергии. Наблюдалось одно событие, которое можно отнести к фоновым. Поставлен предел на поток космических монополей $1.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ с магнитным зарядом $|g| = g_D$ и скоростями $\beta > 0.625$
- **ICE CUBE (южный полюс)** – эксперимент чувствителен для регистрации релятивистских монополей с $\beta \geq 0.51$, которые проходят через лед со скоростями ниже порога черенковского излучения, но оставляют достаточно сильный след от излученных δ – электронов . Поставлен верхний предел на поток $1.55 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$





Результаты поисков

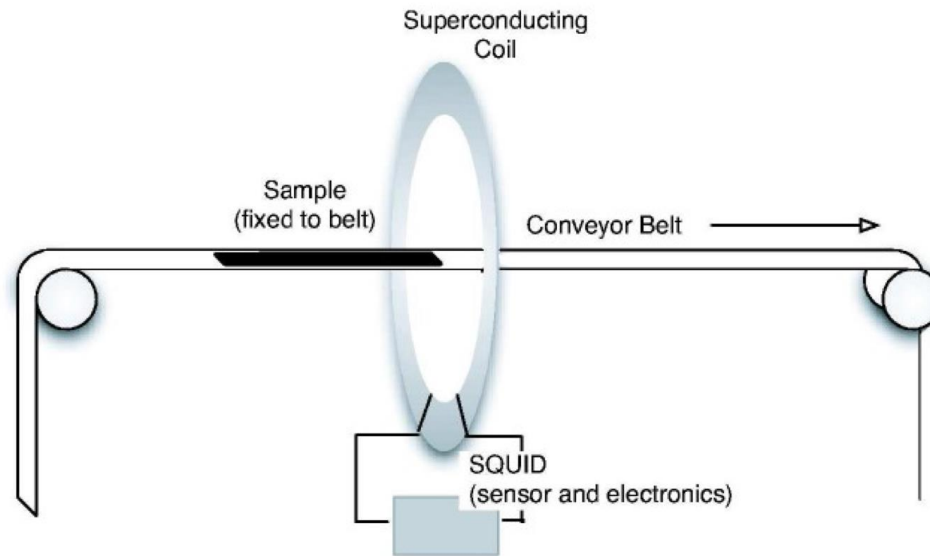


Поиски монополей в остановившихся в веществе

В основном используется индукционная техника и пока ни одного подтверждения существования магнитных монополей не обнаружено.

Получены верхние пределы на:

- Плотность магнитного заряда монополей $2.0 \times 10^{-7} \text{ g}^{-1}$ для $|g| > 0.6g_D$ и масс 10^{14} – 10^{17} GeV
- $6.9 \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}$ для зарядов $|g| > g_D/3$ и произвольных масс
- $9.8 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1}$ для зарядов $|g| \geq 1.0g_D$ и произвольных масс





Результаты поисков



Поиски магнитных монополей на коллайдерах

Рождение магнитных монополей на коллайдерных экспериментах ограничивается энергией пучков, таким образом это не связано с поисками GUT монополей.

Непрямые поиски:

- **L3** – занимался поисками распада $Z \rightarrow \gamma\gamma$, сильно подавленного в стандартной модели. Существование магнитного монополя взаимодействующего с Z-бозоном должно существенно увеличить сечение данного процесса. Наблюдения на уровне фона. Поставлены пределы $BR(Z \rightarrow \gamma\gamma) < 0.8 \times 10^{-5}$, $M_m > 520 \text{ GeV}$
- **D0** – производились поиски двух фотонов с большой поперечной энергией в упругом и неупругом соударении. Событий соответствующих монополям найдено не было были установлены пределы на массы 610, 870 и 1580 GeV для частиц со спином 0, 1/2 и 1 соответственно и $|g| = 1.0g_D$.

Прямые поиски:

- e^+e^- (LEP - $\sqrt{s} = 91.1 \text{ GeV}$) - **MODAL(1992)** использовал NTD пленки вокруг точки взаимодействия. Установил верхний предел на парное рождение монополей $< 70 \text{ pb}$. **OPAL** – почти 4л покрытие, установил ограничение на сечение $< 0.3 \text{ pb}$ при $M_m < 45 \text{ GeV}$, $|g| = g_D$ и $|g| = 2.0g_D$
- e^+e^- (LEP2 $\sqrt{s} = 206.3 \text{ GeV}$) – **OPAL** использовал трековые детекторы для детектирования и улучшил предыдущие результаты. Установлен предел на сечение парного рождения $< 0.05 \text{ pb}$ для монополей с $|g| = 1.0g_D$ и массами 45–102 GeV



Результаты поисков



Поиски магнитных монополей рожденных на коллайдерах

- **H1 (HERA e^+p коллайдер $\sqrt{s} = 300$ GeV)** – использовалась индукционная техника при поисках остановившихся монополей в ускорительном тракте. Установлены пределы на сечения – от 0.06 pb до 2 pb для масс 5–140 GeV и зарядов 0.1–6.0 g_D
- **D0, CDF (Tevatron $\sqrt{s} = 1.8$ TeV)** – изучались части ускорительного тракта D0 и части переднего спектрометра CDF. Установлены верхние пределы на сечение парного рождения 0.6, 0.2, 0.07 и 0.2 pb для зарядов 1.0, 2.0, 3.0 и 60 g_D , соответственно. Из этих пределов были получены ограничения на массы 265, 355, 410 и 375 GeV
- **ATLAS (LHC $\sqrt{s} = 7-8$ TeV)** – были объединены данные с трекера и калориметра для идентификации частиц с высокими ионизационными потерями и массами 200–1500 GeV. Ни одного монопольного события не было зарегистрировано. Установлен предел на сечение рождения для магнитных монополей < 2 fb с магнитным зарядом $|g| = 1.0g_D$ и массами 200–1500 GeV. Установлено ограничение на массу монополя в процессе Дрелл-Ян рождения $M_m > 862$ GeV.