

Да измериш нещо, което е (почти) нула¹

Чад Орцел

Когато повечето от нас мислят за изследванията извън рамките на Стандартния модел – доминиращата парадигма във физиката на частиците – първото нещо, което идва наум вероятно е гигантският ускорител на ЦЕРН, Големият адронен колайдер (ЛНС). Вътре в 27-километровия му тунел протоните ще се блъскат със скорости, стигащи 99,9999991% от скоростта на светлината. Детектори с размерите на жилищни сгради ще генерират терабайти от данни, които физиците трябва да пресеят, за да открият неуловимите следи на нови видове частици.

Същевременно обаче има и друг тип изследвания, които водят към нова физика, този път в лабораториите по атомна физика. С помощта на апарати, които по размер не надминават няколко метра и при енергии, трилиони пъти по-малки от тези в ЛНС, тези опити търсят също нови частици, но чрез измерване на електричния диполен момент (ЕДМ) на електрона.

Логиката, на която се опират тези експерименти е, че според основния вариант на Стандартен модел, е забранено съществуването на измерим ЕДМ на електрона. Следователно, ако се открие малък, но все пак краен ЕДМ, това би било указание, че Стандартният модел се нуждае от усъвършенстване, като по такъв начин се отвори вратата за навлизане на нов клас от “виртуални частици”. От експериментална гледна точка задачата не е лесна: как да измерите нещо, което е почти, но не съвсем нула? Въпреки това, търсенията на ЕДМ може да се окажат нашият най-добър шанс за откриване на една нова физика, докато ЛНС достига пълната си мощност, а вероятно даже и след това.

Правила и изключения

Най-познатият пример за дипол е магнитът. Ако поставите обикновен пръчковиден магнит, например стрелка на компас, в магнитно поле, неговите северен и южен полюс се ориентират по полето. По същия начин един електричен дипол може да бъде създаден чрез поставяне на два равни по големина и с противоположни знаци заряди близо един до друг. Електричният диполен момент d_e на тази проста система е равен на големината на заряда q , умножена с разстоянието r между зарядите, т.е. $d_e = qr$. Както магнитния дипол, и един електричен дипол има посока (както r , така и d_e са вектори), и, поставен в електрично поле, ще се стреми да се ориентира по полето. Единицата за d_e на фундаменталните частици е $e \cdot \text{cm}$, където e е зарядът на електрона ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

Още от двадесетте години на миналия век физиците знаят, че благодарение на неговия “спин” (неговия вътрешен ъглов момент), електронът се държи като магнитен дипол. (Електронът не се върти в буквалния смисъл на думата, но аналогията с въртящо се заредено кълбо е полезна.) Като фундаментална частица обаче, електронът *не* би трябвало да има постоянен *електричен* диполен момент – поне според най-простия вариант на Стандартния модел. Липсата на ЕДМ на електрона е следствие от “симетрията по отношение на обръщане на времето”, един фундаментален физичен

¹ От страницата на Physics World, 1. декември, 2009 г.. Авторът е атомен физик, който работи в Union College в Schenectady, New York, US.

принцип, според който физичните взаимодействия не трябва да се променят, ако посоката на течение на времето са обърне.

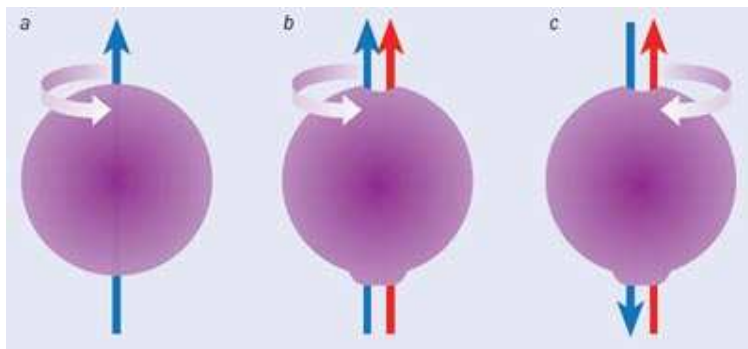


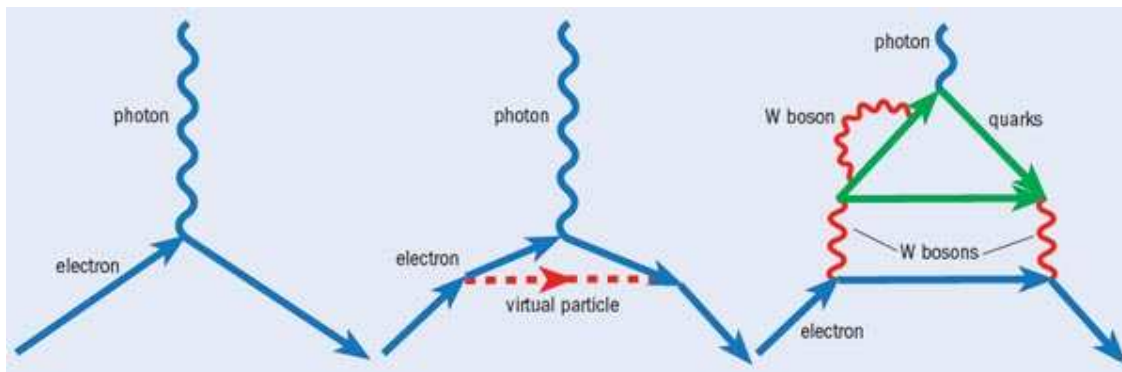
Fig. 1: Нарушаване на симетрията по отношение на обръщане на времето в случай, че електронът притежава ЕДМ

За да разберем защо наличието на постоянен ЕДМ на електрона би нарушило симетрията по отношение на обръщане на времето, ще използваме представата за електрона като малко, въртящо се заредено кълбо. Въртящият се заряд действа подобно на малък кръгов ток и създава магнитен диполен момент, насочен по оста на въртене (синята стрелка на фиг. 1,а). За да създадем ЕДМ, ние трябва да нарушим малко сферичната симетрия на разпределението на зарядите, при което се получава електричен диполен момент, насочен също по оста на въртене (червената стрелка на фиг. 1,б). Когато обърнем посоката на времето, ние обръщаме спина на кълбото и следователно – посоката на магнитния дипол. При това обаче разпределението на заряда не се променя, така че електричният дипол запазва посоката си. Следователно, когато времето тече от минало към бъдеще, двата дипола са еднопосочни, но когато сменим посоката на времето от бъдеще към минало, техните посоки стават противоположни (фиг. 1,с). Това очевидно нарушава симетрията по отношение на обръщане посоката на времето и следователно изключва възможността за наличие на постоянен ЕДМ на електрона (а, всъщност, и на всяка друга стабилна частица) в рамките на основния Стандартен модел.

Както при всяко правило обаче, има изключения и за симетрията по отношение на обръщане на времето. Някои по-сложни версии на Стандартния модел *допускат* нарушаване на тази симетрия, стига едновременно с това да съществува асиметрия и по отношение поведението на частиците, когато знаците на зарядите им се сменят на противоположните и когато се сменят местата на “ляво” и “дясно”. Това е известно като нарушаване на зарядово–четностната (CP) симетрия. Ние знаем, че съществува нарушение на CP-симетрията, защото наблюдаваме огромна асиметрия между вещество и антивещество във видимата Вселена: например ние наблюдаваме далеч повече електрони отколкото позитрони, така че един свят, в който техните заряди са разменени би изглеждал съвсем различно. Логично е, следователно, да съществува също така нарушаване на симетрията по отношение на обръщане на времето, а това би позволило електронът да притежава някакъв, макар и нищожно малък, постоянен електричен диполен момент.

Но колко малък може да бъде този момент? Големината на електронния ЕДМ може да се пресметне чрез разглеждане кратковременните взаимодействия между електрона и “виртуалните частици”, които се раждат от енергията на вакуума и

изчезват преди да бъдат наблюдавани пряко (фиг. 2). Някои от тези взаимодействия с виртуални частици нарушават симетрията по отношение на обръщане на времето и Стандартният модел предсказва, че ЕДМ на електрона не надминава 10^{-39} e.cm. Това е твърде малко, за да може да се измери днес. Повечето теории, които излизат извън рамките на Стандартния модел, обаче, допускат съществуването на нов тип частици, които по-лесно нарушават симетрията по отношение на обръщането на времето. Тези теории предсказват наличие на ЕДМ на електрона, с много порядъци по-голям от горепосочения – от 10^{-25} до 10^{-30} e.cm. Това вече е достатъчно голяма величина, за да можем да се надяваме да я регистрираме в прецизни измервания и по такъв начин да изключим някои класове от обобщения на Стандартния модел.



Фиг. 2: Файнманови диаграми за взаимодействие на електрон с електромагнитно поле

В търсене на ЕДМ

Как бихме могли да измерим ненулевия ЕДМ на електрона, ако той съществува? Отново е полезно да сравним поведението на електрона с това на магнитен дипол. Според квантовата механика, спинът на електрона има две дискретни състояния – “нагоре” и “надолу”. Тъй като енергията на един дипол зависи от ориентацията му по отношение на полето, енергиите на тези две спинови състояния в магнитно поле малко се различават: енергията на електрон, чиито спин е по-посока на магнитното поле, е малко по-малка от енергията на електрон, ориентиран противоположно на полето. Тази разлика води до малки промени на енергетичните нива на електрона в един атом, отмествайки енергията на някои атомни състояния и предизвиквайки разцепване на някои единични нива, превръщайки ги в две различаващи се състояния.

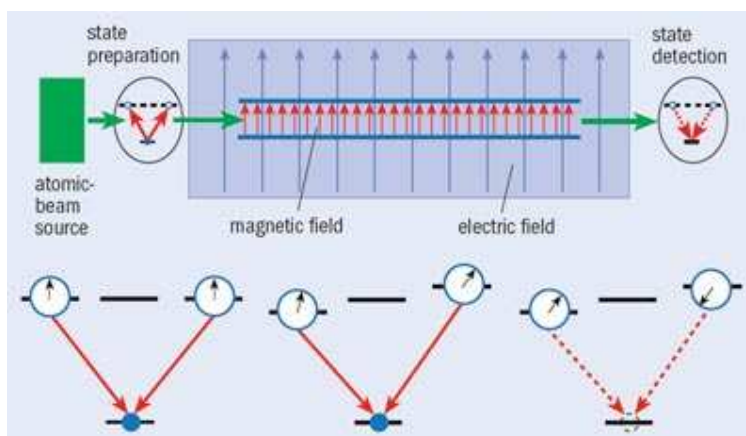
По подобен начин, когато е поставен в електрично поле, един електрон с малък ЕДМ ще има малко по-ниска енергия, когато диполът е еднопосочен с полето, отколкото когато диполът и полето са с противоположни посоки. За всяка приемлива стойност на електронния ЕДМ обаче ефектът от взаимодействието на дипола с полето ще бъде нищожно малък в сравнение с ефекта от взаимодействие на заряда на електрона с полето. Така например ако пуснем един свободен електрон в електрично поле, той просто ще се втурне към положителния полюс, който създава полето.

Ключът към заобикаляне на този проблем е да използваме електрони, които са вътре в атомите или молекулите. Подобни системи са електрически неутрални и следователно не започват да се движат, когато ги поставим в електрично поле. Благодарение на наличието на ЕДМ обаче техните енергетични нива ще се отместят. За да наблюдаваме това отместване в лабораторията, на електрона в атома трябва да му

действаме с електрично поле, чиито интензитет е повече от 10^6 V/cm. Не е лесно да се създадат такива полета, защото когато поставим атома във външно електрично поле, електроните във вътрешността му реагират, като се отместват по отношение на ядрото така, че вътре в атома компенсират голямата част от полето. Релятивистичните ефекти обаче пречат на пълната компенсация и в много тежките атоми, където електроните се движат със скорости, близки до скоростта на светлината, може да се стигне дори до усилване на приложеното поле.

Поради тази причина най-точните до днес измервания на електронния ЕДМ използват талиеви атоми. Талият, чиято атомна маса е 205, има коефициент на усилване 585, т.е. полето, което действа на един електрон във вътрешността му, има интензитет, 585 пъти по-голям от този на полето, създадено в лабораторията. В една серия опити в началото на настоящето десетилетие група учени от Университета на Калифорния, Беркли, насочиха сноп талиеви атоми в магнитно поле. Наличието на това поле задава едно предпочетено направление за спина на електроните, а по този начин – и за електронния ЕДМ (който би трябвало да е еднопосочен със спина). След това те прилагат електрично поле с интензитет до $1,23 \cdot 10^5$ V/cm, насочено по същата ос и търсят признаци за отместване на енергетичните нива на атомите, което би могло да се дължи на ЕДМ.

За да увеличи максимално чувствителността към предизвикани от ЕДМ отмествания, групата в Беркли използва една интерферометрична техника, подобно на използваната в атомните часовници и включваща квантово-механично взаимодействие между две нива в един и същ атом (фиг. 3). Учените търсят отместване на интерференчната картина, което да зависи от приложеното електрично поле и повтарят опита при многобройни комбинации от електрични и магнитни полета. Сравнявайки 44 съвкупности от данни, всяка състояща се от измервания при 128 различни условия, те намират, че електронният ЕДМ, ако съществува, трябва да бъде по-малък от $1,6 \cdot 10^{-27}$ e.cm.



Фиг. 3: Интерферометрично регистриране на отместване на нивата, предизвикано от ЕДМ

От атоми към молекули

Този резултат бе достатъчен за отхвърляне на едно от обобщенията на Стандартния модел (наречено от един бивш член на групата в Беркли “наивна суперсиметрия”), което предсказваше по-големи стойности за ЕДМ. Експериментът в

Беркли обаче достигна допустимата граница за търсене на ЕДМ в атомите. Три фактора ограничават чувствителността на опитите: фонът, дължащ се на разсеяни магнитни или електрични полета; времето за взаимодействие на атомите в електрично поле; и големината на отместването на енергетичните нива.

На първо място групата в Беркли взе извънредни мерки за ограничаване влиянията на фона. Чувствителността на експериментите бе такава, че апаратурата регистрираше електрични полета, създадени от влаковете на метрото, минаващи на почти два километра разстояние. Ето защо голямата част от експерименталните данни трябваше да се събира нощем между 1 и 5 часа, когато метрото е затворено. Те използват също успоредни снопове от натриеви атоми в качеството на “ко-магнитометри”, за да елиминират други източници на влияние; много по-леките натриеви атоми не са чувствителни към наличието на ЕДМ, но биха реагирали, ако се намесват разсеяни магнитни полета.

Що се отнася до другите две ограничения, времето за взаимодействие в опитите се определяше от скоростта на атомния сноп, която се определяше от работната температура от 920 K на техния източник на талиеви атоми и не можеше да се промени лесно. По такъв начин за повишаване чувствителността на експеримента остана само надеждата за увеличаване на свързаното с ЕДМ отместване на енергетичните нива. Това би изисквало или значително по-силни електрични полета, или система с по-голям коефициент на усилване на полето. За нещастие, прилагането на по-силни полета представлява значително техническо предизвикателство, а талият притежава близък до максималния коефициент на усилване на полето – поне що се касае до атоми.

Съществено увеличение на коефициента на усилване на полето e възможно, но в молекулни системи – по специално в полярни молекули, състоящи се от един тежък и един лек атом. Приложеното ефективно поле в експеримента в Беркли, с отчитане на коефициента на усилване за талия, бе около $72 \cdot 10^6$ V/cm, а в полярните молекули полето може да достигне до $20 \cdot 10^9$ V/cm – почти 300 пъти по-силно. Следователно, използването на молекули вместо атоми, би могло да увеличи чувствителността на опитите със същия множител, поне до 10^{-30} e.cm. В резултат на това понастоящем се наблюдава експлозия от интерес към полярните молекули, като различни изследователски групи в Импириъл Колидж в Лондон, както и в американските университети в Йейл, Мичиган, Оклахома и Колорадо започват изследвания за търсене на електронния ЕДМ.

Един от настоящите лидери в тези усилия е групата на Е. Хиндс в Импириъл Колидж, която използва молекули на итербиев флуорид и използва апаратура за снопа, подобна на тази при експериментите в Беркли. Сноп от тези молекули преминава през област със силно електрично поле (13 kV/cm) и чрез интерференция на квантовите състояния се търси минимално отместване на енергетичните нива, предизвикано от ЕДМ на електрона. Резултатите от техните първи измервания са публикувани през 2002 г. и имат чувствителност $0,2 \cdot 10^{-26}$ e.cm, която е малко по-лоша от тази в Беркли. След едно наскоро направено усъвършенстване обаче те очакват да достигнат в края на 2009 г. чувствителност поне $5 \cdot 10^{-28}$ e.cm, а през 2010 г. – подобряването ѝ поне три пъти.

Друг обещаващ съперник е експериментът на Д. Де Мил в университета в Йейл. Тамошната група използва различна техника за държане на молекули на оловен оксид в стъклена капсула, вместо да ги насочва като сноп през апаратурата. Въпреки че

капсулата трябва да се поддържа при около 973 К (значително техническо предизвикателство), тази техника позволява на изследователите да удължат времето на взаимодействие на молекулите с електричното поле в сравнение с опитите, които използват снопове молекули. Колективът очаква да достигне и даже да надмине чувствителността на опитите в Беркли в началото на 2010.

Между другото, в ход са и друг тип търсения. Колектив, ръководен от С. Ламорьо от Йейл и Л. Хънтър от Амхърст Колидж опитват да регистрират ЕДМ в магнитни твърди тела, вместо в разреждени молекулни газове. В техния подход се използват магнитни полета с цел да се ориентират еднопосочно спиновете на всички електрони (а същевременно и техните ЕДМ) в един образец от гадолиниев железен гранат и тогава да се измери общият диполен момент на целия образец. Преимущество на този метод е, че плътността на електроните в едно твърдо тяло е много по-голяма, отколкото в газ, така че чувствителността към наличие на ЕДМ би трябвало да бъде по-висока, отколкото в атомните или в молекулните експерименти.

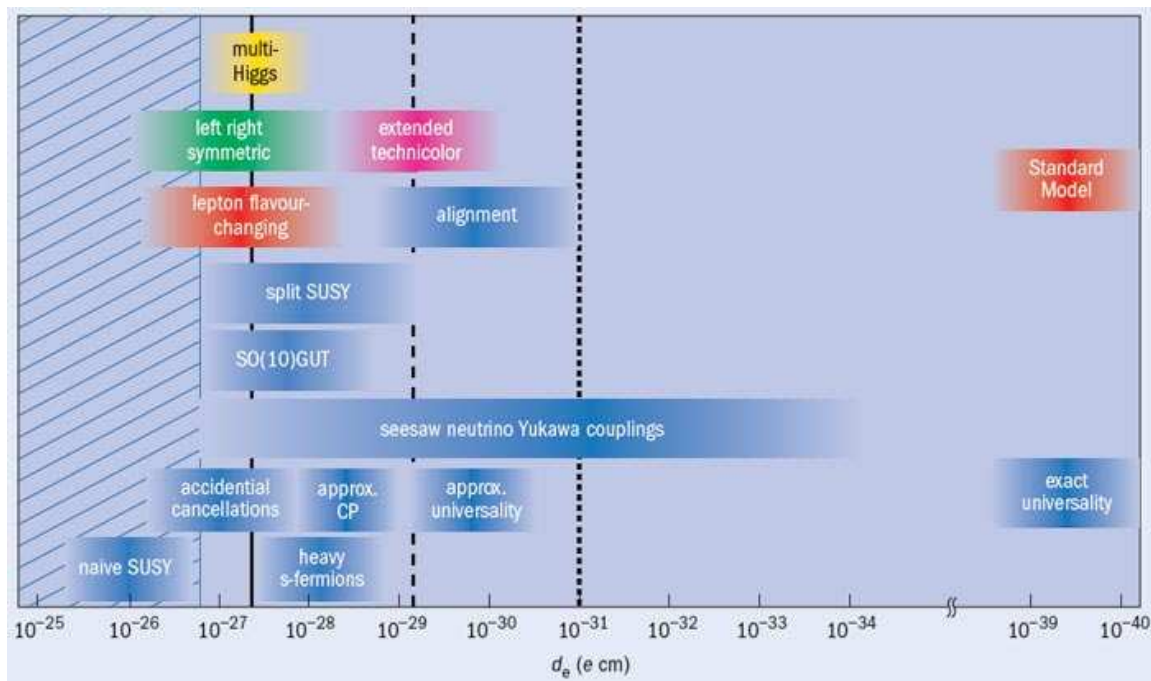
Да предположим, че нито един от тези опити не измери ненулев ЕДМ – след това какво? На молекулния фронт следващото голямо усъвършенстване ще дойде от удължаване на времето, през което молекулите взаимодействат с електричното поле. Това може да се постигне чрез използване на студени молекули, които се движат по-бавно, отколкото при стайна температура. Групата на Д. Вайс в Пенсилванския държавен университет вече използва този подход в един използващ атоми експеримент. При него охладени с лазер цезиеви атоми се задържат до няколко минути, което води до проектна чувствителност 200 пъти по-добра от тази на Берклевския експеримент с талиеви атоми.

Групите в Импириъл колидж и в Йейл очакват подобен напредък, тъй като те започват работа по опити с охладени молекули. Първата планира предварително да охлади молекули от итербиев флуорид, като преди постъпването им в снопа ги постави в контакт с хелиеви пари с температура 4 К. Йейлската група също изследва един буферен източник на изстуден газ, но изследователите и техните сътрудници от Харвард планират да превключат към друга молекула, ториев монооксид, чиито коефициент на усилване на полето е по-голям, отколкото на оловния оксид, както е по-голяма и перспективата за постигане по-продължителни времена на взаимодействие.

Трудни времена ли очакват теоретиците?

От теоретична гледна точка съществуват няколко начина за намаляване на предсказваната големина на ЕДМ на електрона. Така например определени ефекти от нарушената симетрия биха могли отчасти да го унищожат. Въпреки това, огромното мнозинство от обобщения на Стандартния модел предсказват наличие на ЕДМ в рамките на няколко порядъка на днешните експериментални граници (фиг. 4). Следователно, ако някой от тези модели е коректен, и ако опитите със студени молекули, които се готвят в момента, постигнат своите възможности, в близкото бъдеще би трябвало да бъде измерен един ненулев ЕДМ. Такъв резултат би осигурил решителна информация относно нарушаването на симетрията във Вселената, което би помогнало да обясним защо всичко, което наблюдаваме е направено от вещество, а не от антивещество. От друга страна, ако предлаганите експерименти не открият ненулев ЕДМ от порядъка на 10^{-32} e.cm, животът наистина би стана много труден за специалистите по теория на частиците. Един нулев резултат би отхвърлил почти всички

съществуващи теоретични подходи и би затруднил обяснението на съдържанието на видимата Вселена в рамките на днешните теоретични схеми.



Фиг. 4: Предсказания за големината на ЕДМ в различните модели, обобщаващи Стандартния модел

За повечето теоретични сценарии експериментите на ускорители и търсенето на ЕДМ се допълват взаимно. Ускорителите, например, могат да родят и регистрират нови видове частици, което изследванията за ЕДМ не може да направи, но от друга страна, ускорителят ЛНС не може да измерва свойствата на частиците да нарушават симетрията. Чувствителността на двата метода също е подобна: ако съществуват нови частици в областта от енергии, достижими на ЛНС, то също така ще съществува и електронен ЕДМ в областта на следващото поколение изследвания за ЕДМ. Ние вероятно ще се нуждаем от комбиниране на резултатите от двата вида измервания, за да обясним напълно Вселената, в която живеем.

Съществува обаче вероятност дължащото се на нови частици нарушение на симетрията да бъде голямо и да не се компенсира от други ефекти. Ако случаят е именно такъв, а ЕДМ е от порядъка или по-малък от 10^{-29} e.cm, тогава която и да е от новите частици би трябвало да има по-голяма маса, отколкото ЛНС или който и да е друг ускорител би могъл да регистрира. В този случай опитите по търсене на ЕДМ на електрона биха били единствената ни надежда да научим нещо за физиката отвъд Стандартния модел

Накратко за електричния диполен момент на електрона:

- Електричният диполен момент d_e на две заредени с противоположни заряди частици е равен на големината на заряда, q , умножен с разстоянието r между зарядите, т.е. $d_e = qr$.
- Според основната версия на Стандартния модел във физиката на частиците електронът не може да има постоянен електричен диполен момент (ЕДМ),

защото това би нарушило симетрията по отношение обръщане на посоката на времето, симетрия, според която физичните взаимодействия трябва да изглеждат еднакво в случай, че времето тече обратно.

- По-сложните варианти на Стандартния модел допускат съществуването на ЕДМ на електрона, но предсказват, че той е твърде малък, за да бъде измерен в лабораториите. Следователно, ако експериментите открият ненулев ЕДМ, това би било указание за съществуване на нова физика, излизаща извън рамките на Стандартния модел. Няколко експериментални групи понастоящем търсят ЕДМ в атомни или в молекулни системи. Резултатите от тези прецизни измервания вече отхвърлиха едно от предлаганите обобщения на Стандартния модел, а едно ново поколение опити със студени атоми или молекули ще представлява тест за останалите.

Повече за електричния диполен момент на електрона:

Bickman S. et al. 2009 Preparation and detection of states with simultaneous spin alignment and selectable molecular orientation in PbO *Phys. Rev. A* **80** 023418

Hudson J. J. et al. 2002 Measurement of the electron electric dipole moment using YbF molecules *Phys. Rev. Lett.* **89** 023003

Regan B. C. et al. 2002 New limit on the electron electric dipole moment *Phys. Rev. Lett.* **88** 071805

Vutha A. C. et al. 2009 Search for the electric dipole moment of the electron with thorium monoxide *arXiv*: 0908.2412v1