

Неутронът – история и научноизследователски приложения

Петър А. ГЕОРГИЕВ

Департамент по химия, Университет на Милано,
Милано, 20133, Италия

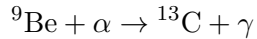
Абстракт. Откритието на една от основните съставни части на атомното ядро е предшествано от важни исторически предпоставки като откритието на електрона, протона, представянето на атомния модел на Ръдърфорд и няколко експериментални опита, които на практика наблюдават ефекти на появата му без да го идентифицират. В настоящата работа се прави ретроспективен преглед на събитията и фактите, свързани с откритието на тази фундаментална частица, и се проследява развитието на някои, днес приети за основни, научноизследователски техники, базирани на използването на неутрона като микроскопична проба на материята. Високоенергетични приложения, в които основната роля на неутрона е предизвикването на реакции на ядрено делене и производство на радиоизотопи, остават изцяло извън фокуса на статията.

АТОМНО ЯДРО, НЕУТРОН, РАЗСЕЙВАНЕ, ДИФРАКЦИЯ, СПЕКТРОСКОПИЯ

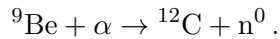
Исторически предпоставки и откритие. Понятието “атом”, означаващо най-малката неделима част на материята, е познато още от трудовете на Демокрит, датиращи от около 400 г. п.н.е. Трябвало е да изминат повече от 2 хилядолетия до откритието на най-малката тогава, отрицателно заредена частица на атома – електронът, от британския физик Дж. Томсън през 1897 г., който провежда експеримент, много подобен на упражнение, популярно в днешните учебни лаборатории по физика като определяне на специфичния заряд на електрона с електродно-лъчева тръба. За идентификацията на “катодните лъчи” – именно като електрони – и определянето на специфичния им заряд – 2000 пъти по-голям от този на най-лекия познат дотогава йон – водородния, той получава нобеловата награда за физика през 1906 г. Томсън предлага и модел на атома, в който отрицателно заредените електрони се движат в положително заредена среда, с която заедно формират неутрален атом. Няколко години по-късно, през 1911 г., в известния си експеримент с разсейване на α -частици от златни атоми, Ръдърфорд доказва, че атомът се състои от положително заредена част – ядро, около което са разположени електро-

ните [1]. Името *протон* на най-малката положително заредена съставна част на атомното ядро дава също той през юни 1920 г. в своята известна Бейкърова лекция пред британското кралско дружество [2], в която предполага и съществуването на подобна неутрална частица, която нарича *неутрон*. Така или иначе оригиналният модел на Ръдърфорд за атома, състоящ се от положително заредено ядро и отрицателно заредени електрони около него, остава в сила до 1932 г., когато съществуването на неутронът е доказано експериментално от асистента на Ръдърфорд, Джеймс Чадуик. Събитието е предшествано от опитите на Боте и Бекер през 1930 [3], които бомбардират берилиево фолио с α -частици от радиоактивен източник полоний (Po). Регистрираното от тях силно проникващо лъчение, емитирано от бомбардирания берилий, е погрешно идентифицирано като гама (γ). Малка стъпка напред, отново с погрешен извод, правят И. Кюри и Фр. Жюлио през 1931-32 г. [4]. Подобно на опита на Боте и Бекер те също бомбардират берилий с α -частици, като на пътя на резултантното ново лъчение, зад берилия, поставят блок от парафин. Оказва се, че “ γ -лъчите”, емитирани от берилия, са толкова високоенергетични, че избиват протони с изненадващо дълъг пробег – до 26 cm във въздух, което съответства на енергии на γ -квантите до 50 MeV. Малко повече светлина по въпроса хвърля Уебстер [5], който с помощта на Гайгер-Мюлеров брояч и йонизационна камера измерва интензитетите на лъчението от бомбардирани с α -частици берилий и бор, а също и неговата прониквателна способност. Познавайки в детайли работата на Ръдърфорд и запознат с неговата хипотеза за съществуването на неутрална частица с предполагаема маса, равна на водородния йон, Чадуик съобразява, че това ново лъчение най-вероятно се състои именно от неутрони. Той провежда отново опитите с бомбардиране на берилий с α -частици в усъвършенствана опитна установка, в която има възможност да измерва пробега на избитите от парафина протони чрез брояч, поставен в газова камера на различни разстояния от парафина, което му дава възможност да изчислява сравнително точно техните енергии. В допълнение Чадуик излага на лъчението от берилий и други елементи като литий, въглерод, азот. Избитите частици се оказват отново йонизиращи, но с много малък пробег във въздух – до няколко милиметра. Облъчването на газове като водород, азот, хелий, аргон сочи, че неизвестното лъчение взаимодейства с атомните ядра и предизвиква атомен откат, като отново енергията на бомбардиращите γ -кванти би трябвало да бъде изключително голяма – до 90 MeV в случай на азот например. Всички резултати, изброени по-горе, дават основание на Чадуик да предположи, че наблюдаваното ново лъчение се състои от частици с нулев електри-

чен заряд и маса, подобна на масата на водородния ион, т.е. на протона, а именно *неутрони*. Така, предположената от Кюри и Жюлио реакция на α -захват в берилиевото ядро



би следвало да бъде заменена с



Работата си и изводите от нея Чадуик публикува в две статии [6,7], които се смятат за доказателство за съществуването и експерименталното наблюдаване на неутрона, за което той получава Нобеловата награда за физика през 1935 г.

Физически характеристики . Съществуването на елементарна частица с нулев електричен заряд и маса, равна на масата на протона, извън атомното ядро достатъчно дълго време, за да бъде използвана, се оказва от изключителна практическа и фундаментална важност за съвременните научни изследвания, фокусирани върху характеризация на свойствата на материята, наблюдаване и доказване на природни закони и теории в областта на физиката и химията. Всичко това се дължи на специфичните физични свойства на неутрона, които са изредени по-долу и сравнени с аналогичните свойства на рентгеновите лъчи, които също са широкоизползвани в различни физикохимични методи за харктеризация свойствата на материята и, за разлика от неутроните, могат да бъдат произведени във всяка университетска или друга научна лаборатория, което ги прави и по-популярни и добре познати сред научната общност. Както се вижда по-долу от сравнителното представяне на свойствата на неутрона и рентгеновите лъчи, благодарение на масата на неутрона съответните енергии на инцидентните неутрони с дължини на вълната, сравними с междуатомните разстояния и други характеристични разстояния или атомни и молекулни трептения, са много по-ниски от съответните енергии на рентеновите лъчи. Наред с изключително голямата си прониквателна способност това е и едно от главните свойства на неутроните, което ги прави толкова подходящи за изучаване на материални обекти на микроскопично ниво.

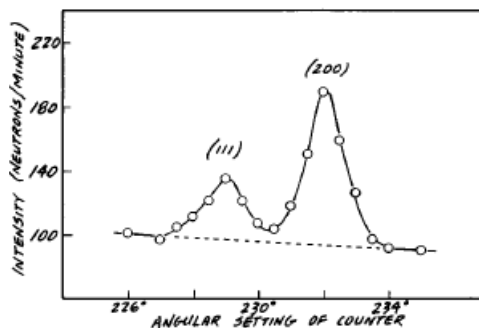
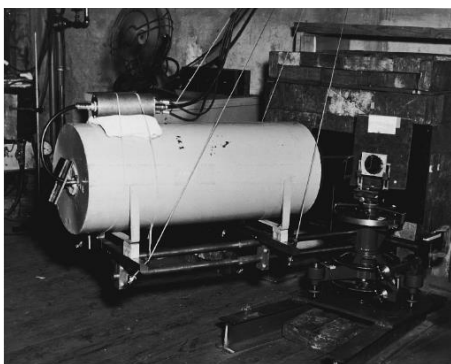
Друга отличаваща особеност е наличието на магнитен момент с големина около 1.9 ядрени магнетона. Макар и сравнително малък (ядреният магнетон е 1836 пъти по-малък от електронния магнетон на Бор), наличието на този магнитен момент е другото голямо предимство на неутрона като проба пред рентгеновите лъчи. За разлика от познатия

атомно-специфичен рентгенов разсейващ форм-фактор при неутроните имаме пространствено изотропна ядрена разсеваща амплитуда, която е специфична характеристика на всяко атомно ядро. За разлика от фотоните извън атомното ядро неутроните имат крайно време на живот. Средната му стойност е около 15 минути. Продуктите на разпад на неутрона са протон, електрон и неутрино. За тези няколко минути живот, извън “черупката” си – атомното ядро, тази неутрална частица дава почти всичката ни налична днес информация за съществуващия магнитен порядък в заобикалящата ни материя, точните кристалографски позиции на водородните атоми в подредените структури, фононните дисперсионни зависимости познати само на теория в пред-неутронната ера и още едно необхватно количество информация за заобикалящия ни органичен и неорганичен свят, което не би могло да бъде описано в един кратка статия. Не е случайно, че равитието на научноизследователските неутрони методи заслужи още една Нобелова награда по физика – тази на Клифърд Шул и Бъртрам Брукхаус през 1994 г.

Неутрон	Фотон
n^0 , ел. заряд 0 C	γ , ел. заряд 0 C
$m_n = 1.67495E-27$ kg	$m_{ph} = 0$ kg
спин $I=1/2$, $\mu_n = -1.913 \mu_N$	спин=1, $\mu_{ph} = 0$
разсейван от атомните ядра и от електронният магнитен момент!	от електронните обвивки почти пренебрежимо разсеване от магн. мом.
$E_n [meV] = 81.89/\lambda_n^2 [\text{\AA}]$, $\sim 0.1 \div 1000 meV$, $30 \div 0.3 \text{\AA}$	$E_{ph} [keV] = 12.398/\lambda_{ph}^2 [\text{\AA}]$, $1.5 \text{\AA} - 8.3 keV$
b – разсеваща амплитуда	$f(Q)$ – ъглово зависим формфактор, вкл. f' , f''
$F_{hkl} = \sum_i b_i e^{2\pi i(hx_i + ky_i + lz_i)}$	$F_{hkl} = \sum_i f_i(Q) e^{2\pi i(hx_i + ky_i + lz_i)}$

РАЗВИТИЕ НА НЕУТРОННИ МЕТОДИ И ИНСТРУМЕНТАРИУМ

С откритието на верижната ядрена реакция от Ото Хан, нейното теоретично обяснение от Лиза Майтнер и благодарение на Ферми – нейното възможно контролирано поддържане, по време на и след Втората световна война започва развитието на първите ядрени реактори. Тогава стават възможни и първите експериментални опити със снопове от неутрони. Така през 1946 г. на първия ядрен реактор в Оук Ридж, Тенеси, САЩ, Уолан и Сойер построяват първия неутронен дифрактометър и е измерена първата неутронна дифрактограма от прахов образец NaCl (Фиг. 1).



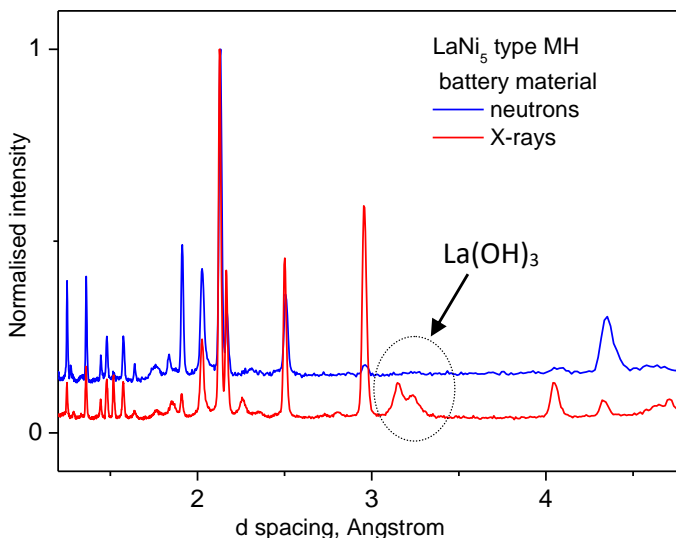
Фиг. 1. Неутронният дифрактометър на Уолан, инсталиран на реактора в Оук Ридж, Тенеси, САЩ, 1945-46 г. Първата неутронна дифрактограма (отдясно), измерена от Уолан и Сойер на същия инструмент от прахов образец от NaCl [8].

СЪВРЕМЕННИ НЕУТРОННИ МЕТОДИ

Както вече беше отбелязано, основите на неутронните методи са поставени с първите дифракционни и спектроскопски експерименти през 50-те години на миналия век, които представляват класически примери съответно за еластично и нееластично разсейване на неутрони. В първия случай се измерват брой неутрони, разсеяни в дадена посока, а във втория се измерват и енергиите на налитащите и разсеяните от изследваната проба неутрони, което позволява да се измерва количеството енергия, отдавана или поглъщана от атомите на изследваната проба при взаимодействието им с неутрон. Под покрива на един съвременен център за неутронни изследвания се помещават десетки инструменти, специализирани за монокристална и прахова дифракция, на които могат да се решават кристални структури на нови съединения, да се характеризират

микроструктурни промени в материали при различни физикохимични условия, фазови преходи, както и инструменти, специализирани в измервания при разсейване под малки ъгли за характеризация на макро-структурно ниво, например микро- и мезопори и степен на тяхната запълненост от странични субстанции. Характеристичните размери тук са от 1 до 100 nm приблизително. Рефлектометрия, при която се изследват дебелина и гладкост на тънки слоеве и системи от слоеве, неорганични или органични, на повърхността на твърда подложка или течност.

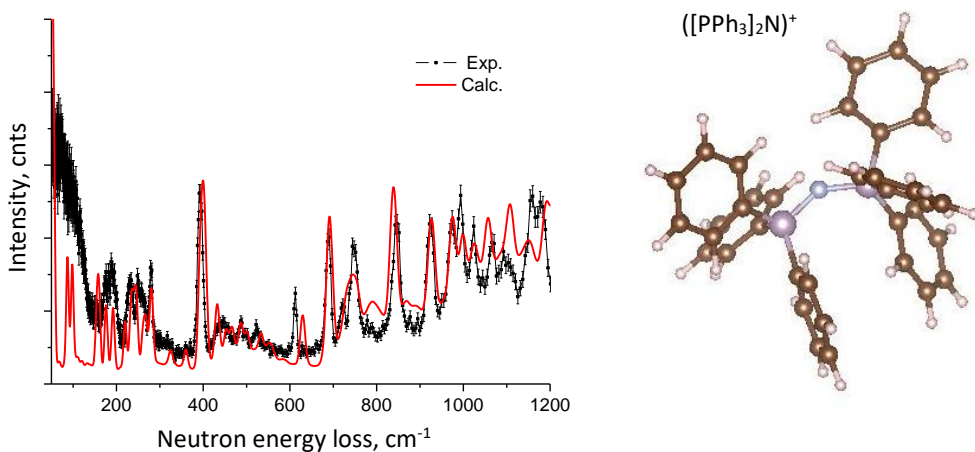
Тук е мястото да се отбележи, че неутронните техники, поради споменатата висока прониквателна способност на неутроните, са чувствителни към целия обем на характеризираната проба за разлика от аналогичните рентгенови методи. Сравнителни неутронна и рентгенова дифрактограми (лабораторен апарат Siemens D5000), снети от настоящия автор, от една и съща проба от един типичен материал – многокомпонентна метална сплав от типа AB_5 (A – La, Nd, Ce, Pr; a B – Ni, Co, Mn, Al) след продължителна употреба в металхидридна акумулаторна батерия, са показани на Фиг. 2. Макар и подобни на пръв поглед с определени различия, основаващи се на различните структурни фактори за неутрони и рентгенови лъчи, се наблюдават и някои специфични за изследва-



Фиг. 2. Примерни неутронна (син цвят) и рентгенова (червен цвят) дифрактограми на сплав $LaNi_5$, използвана продължително време като електроден материал в металхидриден акумулатор. За рентгеновата дифрактограма беше използван комерсиален лабораторен апарат Siemens D5000. Неутронните данни бяха снети на дифрактометър Е9, инсталиран в Хелмхолц Център Берлин, Германия.

ния материал разлики. Поради множеството електрохимични цикли на заряд/разряд в алкална среда по повърхността на металните частици в резултат на корозионни процеси, се отделя известно количество лантанов (плюс всички останали присъстващи редкоземни елементи) хидроксид - $\text{La}(\text{OH})_3$, най-добре видим в областта 3–3.5 Å, (011) и (110) кристалографски направления. Докато неутроните “пробват” еднакво целия обем на частиците, рентеновите лъчи с дължина на вълната 1.54 Å “виждат” само един повърхностен слой с дебелина от порядъка на 1 μm, където е отделено цялото количество хидроксид. В резултат, количественият фазов анализ, проведен на базата на рентгеновата дифрактограма, показва около 5 пъти по-голямо количество кородирал материал в сравнения със съответния неутронен анализ. Една сравнително по-нова неутронографска техника е томографията, при която се изследват обекти с размери над 1 mm, цели машинни и други технически детайли, археологически артефакти. Подобно на медицинските рентгенови снимки, тук изследваните обекти се облъчват с бяло (широк непрекъснат спектър) неутронно лъчение и се регистрира цифров образ за обекта.

Типичен пример за нееластично разсейване на неутрони е показан на Фиг. 3. В левия блок на фигурата се вижда част от неутронен спектър на $[\text{PPh}_3]_2\text{N}^+[\text{HCo}_6(\text{CO})_{15}]$ -сол, доминиран от трептенията на атомите в триметилфосфатния фрагмент. Този частен случай на нееластично неутронно разсейване може да се разглежда като аналог на Раманова спектроскопия без присъщите правила на селекция.



Фиг. 3. Вибрационен спектър (вляво) и молекулна структура на $[\text{PPh}_3]_2\text{N}^+$ йон. Нееластичен спектър, измерен от автора на инструмента TOSCA, ISIS, UK. Червената линия съответства на теоретично изчислен спектър.

КРАТКО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Откритието на една от основните съставни частици на атомното ядро – неутронът, и последващото развитие на многобройни научноинструментални методи и техники за характеризация на жива и нежива материя, в които неутронът е незаменима микроскопична проба с прониквателни способности, по-големи от всяка друга научна проба, и в същото време нискоенергетична и неразрушителна, дава на научната общественост мощен инструментариум за изследване и наблюдение на много широк кръг от природни феномени, действието на природни закони, проверка на съществуващи и създаването на нови теории. В обобщен вид, всичко това се дължи на следните свойства на неутроните и свързания с тях инструментариум:

1. Висока проникваемост в повечето материали и надеждна локализация на атоми и магнитни моменти, включително ориентация и големина;
2. Способност да “различават” атоми със сходни атомни номера, доколкото съответните им сечения и/или разсейващи амплитуди се различават достатъчно;
3. Изключително подходящи за локализация на H (D) атоми и тяхната динамика;
4. Незаменима проба при характеризация на нискоенергетични състояния, слабосвързани състояния, например адсорбирани H, H₂, NH₃, CH₄-CH₃ и др. въглеродороди, ротационни състояния, дифузионни процеси, активност на каталитични центрове;
5. Високата прониквателна способност, допълнително позволява изследваните образци да се поставят при различни физикохимични условия като температура от порядък на mK ÷ 1000 K, налягания от 0 до 10000 atm, магнитни полета рутинно до 6 T, с възможности до 12 T и дори 30 T в съвсем близко бъдеще, в същото време характеризирайки междуатомни разстояния от порядък на 0.1 Å до 100 nm, директен достъп до процеси, протичащи във времеви интервал от порядъка на $10^{-12} \div 10^{-8}$ s.

Литература

- [1] E. Rutherford: *Philosophical Magazine Series* 6 **21** (1911) 669.
- [2] E. Rutherford: Bakerian Lecture “Nuclear constitution of atoms”, Royal Society, 3 June 1911.
- [3] W. Bothe and H. Becker: *Zeitschrift für Physik* **66** (1930) 289.

- [4] I. Curie: *C.R. Acad. Sci. Paris* **193** (1931) 1412; I. Curie and F. Joliot: *C. R. Acad. Sci. Paris* **194** (1932) 273.
- [5] H. C. Webster: *Proc. R. Soc. Lond. A* **136** (1932) 428.
- [6] J. Chadwick: *Nature* **129** (1932) 312.
- [7] J. Chadwick: *Proc. R. Soc. of London A* **136** (1932) 692.
- [8] C. Shull: *Rev. Mod. Phys.* **67** (1995) 753.