

Голод П. І.

ВИДАТНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ФІЗИКИ ХХ СТОЛІТТЯ (до сторіччя відкриття атомного ядра)



Сто років тому група науковців з Манчестерського університету під керівництвом Ернеста Резерфорда завершила серію експериментів, які сформували наші нинішні уявлення про будову атома. Було доведено існування атомного ядра – позитивно зарядженої серцевини атома, у якій зосереджена майже вся маса і яка займає крихітну, всього одну мільярдну, частку його об'єму.

Учасниками цих експериментів, окрім Резерфорда, були: молодий німецький фізик Ганс Гейгер (1882–1945) та зовсім юний студент з Нової Зеландії Ернест Марсден (1889–1970). Суть експериментів полягала в дослідженні розсіювання альфа-частинок на металічній фользі. Альфа-частинки, джерелом яких був радій, спрямовувалися на отвір у непроникному екрані і так формували вузький пучок. Далі цей пучок спрямовувався на металеву (золоту)

фольгу. Оскільки позитивно заряджені альфа-частинки взаємодіяли з атомами фольги, траєкторії їхнього руху дещо викривлялися. Розсіяні частинки спостерігалися у вигляді свічення на екрані із сульфїду цинку. За відсутності металеві фольги на реєструвальному екрані отримувалося чітке зображення щілини. Якщо пучок перетинав тонку фольгу, то зображення трохи було розмите і розширене, що свідчило про розсіювання.

Перші експерименти показали, що альфа-частинки мало відхиляються від початкового напрямку – не більше одного-двох градусів. У цьому не було нічого дивного з погляду тогочасних уявлень про атом. Високоенергетичні альфа-частинки, пролітаючи поблизу атома, слабо з ним взаємодіють, оскільки він електронейтральний. Якщо зіткнення буде лобовим, то картина розсіювання залежатиме від внутрішньої будови

[669]

LXXIX. *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.* By Professor E. RUTHERFORD, F.R.S., University of Manchester*.

§ 1. It is well known that the α and β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the β than for the α particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden † on the scattering of α rays indicate that some of the α particles must suffer a deflexion of more than a right angle at a single encounter. They found, for example, that a small fraction of the incident α particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of 90° in passing through a layer of gold-foil about 0.0004 cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1.6 millimetres of air. Geiger ‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles traversing a gold-foil of this thickness was about $0^\circ.87$. A simple calculation based on the theory of probability shows that the chance of an α particle being deflected through 90° is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution of the α particles for various angles of large deflexion does not follow the probability law to be expected if such large deflexions are made up of a large number of small deviations. It seems reasonable to suppose that the deflexion through a large angle is due to a single atomic encounter, for the chance of a second encounter of a kind to produce a large deflexion must in most cases be exceedingly small. A simple calculation shows that the atom must be a seat of an intense electric field in order to produce such a large deflexion at a single encounter.

Recently Sir J. J. Thomson § has put forward a theory to

* Communicated by the Author. A brief account of this paper was communicated to the Manchester Literary and Philosophical Society in February, 1911.

† Proc. Roy. Soc. lxxxii. p. 495 (1909).

‡ Proc. Roy. Soc. lxxxiii. p. 492 (1910).

§ Camb. Lit. & Phil. Soc. xv. pt. 5 (1910).

670

Prof. E. Rutherford on the

explain the scattering of electrified particles in passing through small thicknesses of matter. The atom is supposed to consist of a number N of negatively charged corpuscles, accompanied by an equal quantity of positive electricity uniformly distributed throughout a sphere. The deflexion of a negatively electrified particle in passing through the atom is ascribed to two causes—(1) the repulsion of the corpuscles distributed through the atom, and (2) the attraction of the positive electricity in the atom. The deflexion of the particle in passing through the atom is supposed to be small, while the average deflexion after a large number m of encounters was taken as $\sqrt{m} \cdot \theta$, where θ is the average deflexion due to a single atom. It was shown that the number N of the electrons within the atom could be deduced from observations of the scattering of electrified particles. The accuracy of this theory of compound scattering was examined experimentally by Crowther* in a later paper. His results apparently confirmed the main conclusions of the theory, and he deduced, on the assumption that the positive electricity was continuous, that the number of electrons in an atom was about three times its atomic weight.

The theory of Sir J. J. Thomson is based on the assumption that the scattering due to a single atomic encounter is small, and the particular structure assumed for the atom does not admit of a very large deflexion of an α particle in traversing a single atom, unless it be supposed that the diameter of the sphere of positive electricity is minute compared with the diameter of the sphere of influence of the atom.

Since the α and β particles traverse the atom, it should be possible from a close study of the nature of the deflexion to form some idea of the constitution of the atom to produce the effects observed. In fact, the scattering of high-speed charged particles by the atoms of matter is one of the most promising methods of attack of this problem. The development of the scintillation method of counting single α particles affords unusual advantages of investigation, and the researches of H. Geiger by this method have already added much to our knowledge of the scattering of α rays by matter.

§ 2. We shall first examine theoretically the single encounters † with an atom of simple structure, which is able to

* Crowther, Proc. Roy. Soc. lxxxiv. p. 226 (1910).

† The deviation of a particle through a considerable angle from an encounter with a single atom will in this paper be called "single" scattering. The deviation of a particle resulting from a multitude of small deviations will be termed "compound" scattering.

Рис. 1. Результати досліджень Е. Резерфорда (див.: [3])

атома. Якщо взяти за основу модель Дж. Дж. Томсона, тобто вважати атом позитивно зарядженою кулькою (радіусом приблизно 10^{-10} м), то електростатичний потенціал біля поверхні такої кульки буде меншим за кінетичну енергію альфа-частинки. Тому альфа-частинки пронизуватимуть такий атом наскрізь, зазнаючи незначного розсіювання. (Вплив атома у цьому випадку подібний до дії розсіювальної лінзи на пучок світла.)

Одночасно з Томсоною моделлю атома кілька відомих вчених запропонували так звану планетарну модель. За десять років до Резерфорда, у 1901 р., Жан Перен опублікував статтю з пророчою назвою «Нуклеарно-планетарна будова атома», де стверджував, що електрони обертаються по еліптичним орбітам навколо позитивно зарядженого ядра, подібно до планет навколо Сонця. Схожу гіпотезу висловив і відомий японський фізик Нагаока. Йому уявлявся атом не у вигляді сонячної системи, а як Сатурн: якщо кільця замінити негативно зарядженими електронами, а притягувальний центр — позитивно зарядженою частин-

кою. Проте ці, на перший погляд правдоподібні моделі, не витримували серйозної критики. На відміну від незаряджених небесних тіл, які взаємодіють відповідно до закону Всесвітнього тяжіння, система заряджених рухомих тіл не може бути стійкою; рухаючись по колових чи еліптичних орбітах, заряджені частинки випромінюватимуть світло і втрачатимуть кінетичну енергію. За дуже короткий час такі заряджені частинки (електрони) падатимуть на притягувальний центр.

Очевидно, Резерфорд знав про ці гіпотези. Та й стаття Нагаоки була передрукована у 1904 р. у «Philosophical Magazine», а за публікаціями у цьому журналі вчений уважно стежив. Важко сьогодні відновити думки і мотиви дій Резерфорда. Але у 1909 р. у нього виникла ідея перевірити, чи можуть альфа-частинки при розсіюванні на металевій фользі відхилитися на великі кути. Це мали перевірити Гейгер і Марсден. Ось як згадує перебіг подій сам Резерфорд:

«...Якось Гейгер заглянув до мене і запитав: «Чи не здається Вам, що молодий Марсден

produce large deflexions of an α particle, and then compare the deductions from the theory with the experimental data available.

Consider an atom which contains a charge $\pm Ne$ at its centre surrounded by a sphere of electrification containing a charge $\mp Ne$ supposed uniformly distributed throughout a sphere of radius R . e is the fundamental unit of charge, which in this paper is taken as 4.65×10^{-10} E.S. unit. We shall suppose that for distances less than 10^{-12} cm. the central charge and also the charge on the α particle may be supposed to be concentrated at a point. It will be shown that the main deductions from the theory are independent of whether the central charge is supposed to be positive or negative. For convenience, the sign will be assumed to be positive. The question of the stability of the atom proposed need not be considered at this stage, for this will obviously depend upon the minute structure of the atom, and on the motion of the constituent charged parts.

In order to form some idea of the forces required to deflect an α particle through a large angle, consider an atom containing a positive charge Ne at its centre, and surrounded by a distribution of negative electricity Ne uniformly distributed within a sphere of radius R . The electric force X and the potential V at a distance r from the centre of an atom for a point inside the atom, are given by

$$X = Ne \left(\frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3} \right),$$

$$V = Ne \left(\frac{1}{r} - \frac{3}{2R} + \frac{r^2}{2R^3} \right).$$

Suppose an α particle of mass m and velocity u and charge E shot directly towards the centre of the atom. It will be brought to rest at a distance b from the centre given by

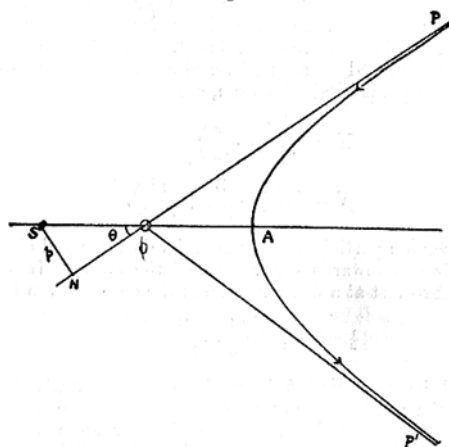
$$\frac{1}{2} mu^2 = NeE \left(\frac{1}{b} - \frac{3}{2R} + \frac{b^2}{2R^3} \right).$$

It will be seen that b is an important quantity in later calculations. Assuming that the central charge is $100e$, it can be calculated that the value of b for an α particle of velocity 2.09×10^9 cms. per second is about 3.4×10^{-12} cm. In this calculation b is supposed to be very small compared with R . Since R is supposed to be of the order of the radius of the atom, viz. 10^{-8} cm., it is obvious that the α particle before being turned back penetrates so close to

the central charge, that the field due to the uniform distribution of negative electricity may be neglected. In general, a simple calculation shows that for all deflexions greater than a degree, we may without sensible error suppose the deflexion due to the field of the central charge alone. Possible single deviations due to the negative electricity, if distributed in the form of corpuscles, are not taken into account at this stage of the theory. It will be shown later that its effect is in general small compared with that due to the central field.

Consider the passage of a positive electrified particle close to the centre of an atom. Supposing that the velocity of the particle is not appreciably changed by its passage through the atom, the path of the particle under the influence of a repulsive force varying inversely as the square of the distance will be an hyperbola with the centre of the atom S as the external focus. Suppose the particle to enter the atom in the direction PO (fig. 1), and that the direction of motion

Fig. 1.



on escaping the atom is OP' . OP and OP' make equal angles with the line SA , where A is the apse of the hyperbola. $p = SN$ = perpendicular distance from centre on direction of initial motion of particle.

Продовження рис. 1

повинен розпочати самостійні дослідження?” Я згодився з цим і сказав: “Давайте запропонуємо йому поспостерігати – чи не розсіюються які небуть альфа-частинки на великі кути?” Зізнаюся, я тоді не надто вірив, що з цього що-небудь вийде; адже ми знали, що альфа-частинки – це достатньо масивний мікрооб’єкт, який швидко рухається і має величезний запас енергії. Якщо відхилення на великі кути уявити собі як ефект нагромадження малих відхилень у великій послідовності актів розсіювання, то ймовірність розсіювання назад нехтовно мала.

...Через два дні після нашої розмови Гейгер убіг до мого кабінету сильно збуджений і закричав: “Нам вдалося зареєструвати декілька альфа-частинок, які розсіюються назад!..”» [1, с. 169–170].

Отже, як зазначав сам Резерфорд, пояснити відхилення на великі кути через нагромадження малих відхилень внаслідок багатократного розсіювання було неможливо. Таке могло статися лише у результаті одноразового зіткнення.

В експериментах Гейгера і Марсдена швидкість альфа-частинки складала $2,09 \times 10^7$ м/с, а відношення маси до заряду приблизно 2×10^{-8} кг/Кл. (Обидві величини були виміряні методом Дж. Дж. Томсона – по відхиленню в електричних та магнітних полях.) Заряд гіпотетичного ядра Резерфорд звичайно не знав, але природно було допустити його Z -кратним елементарного заряду електрона. Виміри Міллікена давали величину $1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

На основі цих даних неважко було обрахувати відстань мінімального зближення. Вона складала $3 \times Z \times 10^{-16}$ м. Це фантастично мала відстань. Навіть якщо атомна частина (ядро) має заряд декількасот одиниць електричного заряду, то її розміри не можуть перевищувати 10^{-13} м.

Розсіювання назад свідчить не тільки про те, що в центрі атома у малому об’ємі зосереджено позитивний заряд, а й про те, що маса цього малого об’єму перевищує масу альфа-частинки. Електрон майже у 8000 разів легший альфа-частинки, тому їхній вплив на зворотне розсіювання можна не брати до уваги.

Про результати цих досліджень Е. Резерфорд доповів 7 березня 1911 року на засіданні Філософського товариства в Манчестері [2], а згодом опублікував статтю в журналі “Philosophical Magazine” (див. рис. 1 на с. 4–5) [3].

Припустивши, що в центрі атома перебуває точковий позитивний заряд, а його носій має велику масу, Резерфорд отримав формулу для ефективного перерізу розсіювання на даний кут. Сьогодні ця формула, отримана в рамках класичної механіки, вивчається студентами-фізиками в усьому світі. Її справедливості надійно підтвердили Гейгер і Марсден, перерахувавши мільйони спалахів на сульфід-цинковому екрані. Подібні формули для інших взаємодій нині становлять основу фізики

високих енергій. Замість альфа-частинок у сьогоdnішніх експериментах використовують протонні або електронні пучки. Їх розганяють до величезних енергій у надпотужних прискорювачах. Однак суть і основна ідея експерименту Резерфорда залишилася без суттєвих змін.

Два великих досягнення фізики – відкриття електрона Дж. Дж. Томсона, вчителем Резерфорда, і відкриття ядра самим Резерфордом з його колегами, Гейгером і Марсденом, започаткували нову фізику – фізику мікросвіту.

Сьогодні озираючись на грандіозний шлях довжиною у століття, що його пройшла фізика, віддаємо шану тим, хто були першими: Томсон, Планк, Резерфорд...

1. Вайнберг С. Открытие субатомных частиц / Пер. с англ. А. Н. Кондрашовой ; под ред. Е. М. Лейкина. – М. : Мир, 1986. – 276 с.
2. Rutherford E. The Scattering of the a- and b-Rays and the Structure of the Atom // Proceeding of the Manchester Literary and Philosophical Society. – 1911. – I. IV, 55. – P. 18–29.
3. Rutherford E. The Scattering of a- and b-Particles by Matter and the Structure of the Atom // Philosophical Magazine. – 1911. – S. 6. – P. 669–688.