

RELATIVITATE ȘI CUANTĂ II

(Continuare din FM 6/2002)

Cum se face, că nucleele, ce conțin mai mulți protoni încărcăți pozitiv își păstrează stabilitatea? Doar protonii se resping reciproc! Evident, există forțe de natură diferită de cea electrică, care "leagă" nucleonii mai strâns, decât îi "dezează" respingerea de natură electrică. Această interacțiune, numită TARE, atrage nucleonii când ei se îndepărtează prea tare și îi respinge din moment ce ei se apropie prea mult unul de altul. Cu alte cuvinte, interacțiunea tare are o rază finită de acțiune, ea fiind practic egală cu 0 în afara nucleului. Această proprietate deosebește esențial interacțiunea tare nucleară de cea gravitațională, și de cea electrică, ambele dintre acestea, având o rază infinită de acțiune. Într-adevăr, din formula scrisă anterior pentru accelerația Newtoniană, rezultă, că ea devine egală cu 0 doar atunci, când distanța dintre corpurile ce gravitează reciproc tinde spre infinit. Același lucru este valabil și pentru electromagnetism. Cum se vede din legea (6a) forța Coulombiană se transformă în 0 doar când distanța dintre sarcini tinde către infinit.

Astfel interacțiunea tare leagă protonii și neutronii într-un "sac" numit NUCLEU ATOMIC. Dimensiunile (raza) nucleului sunt proporționale rădăcinii de ordinul 3 din numărul total de nucleoni. Astfel, raza nucleului de uraniu este de $\sqrt[3]{238} \approx 6$ ori mai mare decât raza nucleului de hidrogen cu un singur proton, care, după cum am menționat anterior, este egală ca ordin de mărime cu 1 F (FERMI) = 10^{-15} m.

Masa neutronului este cu aproximativ 3 mase electronice mai mare decât masa de repaus a electronului egală cu $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg ($\approx 1836 m_e$). S-ar părea, la prima apreciere, că e foarte simplu să calculăm masa unui nucleu întreg, cunoscând numărul de protoni și nucleoni, înmulțind masele particulelor respective cu numărul lor și apoi, efectuând adunarea. În realitate, masa adevărată a nucleului va fi mai mică. Și iată de ce. Pentru a "rupe" sacul și a scoate nucleonii, se aplică o forță, nu mai mică, decât forța tare, ce leagă nucleonii, se efectuează în acest fel un LUCRU MECANIC și se consuma în acest fel o cantitate de ENERGIE, egală cu acest lucru mecanic. Astfel, deficitul de energie a nucleonilor "legați" în nucleu în raport cu nucleonii "eliberați" (sau îndepărtați din nucleu) reprezintă energia de interacțiune sau de legătură a nucleului. Aceasta din urmă este echivalentă DEFICITULUI DE MASĂ, a nucleului întreg în raport cu suma maselor de repaus a tuturor nucleonilor componenți.

Lucrul acesta se stabilește pe cale EXPERIMENTALĂ. Astfel, masa unui nucleu de deuterium (H-2), determinată experimental constituie $3.344 \cdot 10^{-27}$ kg ($\approx 3671 m_e$), fiind cu 4 mase electronice mai mică decât suma maselor protonului și neutronului. Legea, prin care energia totală a unui corp se echivalează cu masa se numește PRINCIPIUL ECHIVALENȚEI masei și energiei, stabilit în cadrul TEORIEI RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE de către Albert Einstein (1879–1955, premiu Nobel în 1921) în 1905. El se formulează în felul următor:

$$(ENERGIA TOTALĂ A UNUI CORP) = (MASA CORPULUI) \cdot (VITEZA LUMINII)^2 \quad (7)$$

$$E = Mc^2 \quad (7a)$$

Cu alte cuvinte masa corpului variază proporțional cu energia totală a lui. Acest efect nu poate fi verificat în cazul vitezelor mici, însă a fost stabilit în acceleraatoare de particule elementare și în raze cosmice. Dacă vom substitui în partea dreaptă a acestei formule energia de legătură a nucleului, atunci m va reprezenta deficitul de masă a acestui nucleu. Formula lui Einstein are un caracter universal. Orice corp în mișcare are energie, pentru că masa este măsura inerției. Astfel, chiar și fotonul, care nu se poate afla în repaus, având masa de repaus egală cu 0, posedă energie: Particulele accelerate până la viteze foarte mari, apropiate de cea a luminii, își măresc de multe ori energia în comparație cu energia lor de repaus, ce corespunde stării de repaus.

Este absolut evident că deficitul de masă apare în orice sistem fizic bazat pe interacțiune, suma maselor tuturor particulelor din care este alcătuită o planetă, de exemplu, Pământul, ori orice alt corp depășește masa întregului corp. În acest caz deficitul de masă corespunde energiei de interacțiune gravitațională.

Mai mult decât atât, dacă vom dispune de un "cântar cosmic", pentru a cântări Pământul, Luna, iar mai apoi aceleași corpuri în interacțiune, ne-am convinge ușor, că același defect de masă are loc și aici. Defectul de masă are loc și la formarea galaxiilor și la legarea atomilor în molecule. Diferă doar forma de interacțiune.

3.4. Interacțiunea slabă nucleară

Am menționat anterior, că masa neutronului este ceva mai mare, decât cea a protonului. Acest "ceva" este suficient pentru ca neutronul, aflat în repaus, să se transforme în proton, eliberând și o cantitate de energie. Aceasta dezintegrare se produce aproximativ în 900 s (15 min). Întrucât neutronul este neutru din punct de vedere electric, iar protonul, încărcat pozitiv, la dezintegrare trebuie cu necesitate să se degajeze o particulă cu sarcină electrică negativă. Această particulă este, evident, electronul. Se întâmplă următorul lucru:

$$n \rightarrow p + e^- + ? \quad (8)$$

Semnul întrebării l-am pus, pentru că energia electronului eliberat este insuficientă pentru a echilibra diferența de masă-energie dintre neutron și proton. Orice mijloc de detectare a radiației nu a permis identificarea ei cu fotonul. Wolfgang Pauli (1900–1958), genial fizician austriac a postulat existența unei noi particule fără masă de repaus în 1931. Întrucât ea s-a dovedit a fi neutră din punct de vedere electric, Enrico Fermi (1901–1954), un alt genial fizician italian a numit-o NEUTRINO, ea fiind detectată cu mult mai târziu. Această particulă fantastică, aproape lipsită de masă de repaus, fizicienii o înseamnă prin litera grecească ν , astfel ca reacția de dezintegrare a neutronilor se va scrie în felul următor: $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ (8a)

Interacțiunea, pe care Fermi a numit-o slabă nucleară, este responsabilă pentru dezintegrarea nucleonilor. Din punct de vedere a interacțiunii tari nucleare neutronul și protonul nu diferă în nici-un fel. Astfel, interacțiunea slabă, la fel ca și cea electromagnetică, deteriorează simetria dintre proton și neutron.

4. SCARA FORTELOR

Să facem o comparație cantitativă a scărilor forțelor de naturi diferite. Vom lua un "atom gravitațional" – sistemul Pământ-Lună, un atom adevărat – cel de hidrogen H, un nucleu de deuteriu H-2.

În primul caz vom dispune de informația din paragraful "Scara maselor". Vom calcula accelerația Lunii în mișcare pe orbita circulară în jurul Pământului. Vom înmulți constanta gravitațională cu masa Pământului, împărțind mai apoi acest produs la pătratul razei orbitei, egale cu

$$384 \cdot 10^6 \text{ m} \quad a = 66.7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(384 \cdot 10^6 \text{ m})^2} = 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2. \quad (9)$$

(Comparați această mărime cu valoarea accelerației căderii libere la suprafața Pământului 9.81 m/s^2). Pentru a obține mărimea forței de atracție dintre Pământ și Lună vom înmulți accelerația calculată la masa Lunii, egale cu $7 \cdot 10^{22} \text{ kg}$.

$$F = 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2 \cdot 7 \cdot 10^{22} \text{ kg} = 1.9 \cdot 10^{20} \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1.9 \cdot 10^{20} \text{ N}. \quad (10)$$

Să calculăm în continuare mărimea forței electromagnetice (coulombiene) dintre proton și electron, ce interacționează în atomul de hidrogen, conform relației (6). Valorile absolute ale sarcinilor electrice a protonului și electronului sunt de $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (fiind diferite ca semn).

iar distanța dintre ei pe cea mai apropiată orbită – $0.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}$

$$\text{Efectuând substituțiile, obținem: } F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{(0.5 \cdot 10^{-8} \text{ m})^2} = 9.216 \cdot 10^{-11} \text{ N}. \quad (11)$$

Mărimea acestei forțe este incomparabil mai mică decât a celei gravitaționale, ce dirijează mișcarea Lunii, în schimb accelerația electronului în raport cu centrul sistemului este de multe ori mai mare

$$a = \frac{(\text{forța})}{(\text{masa})} = \frac{9.2126 \cdot 10^{-11} \text{ N}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 10^{20} \text{ m/s}^2. \quad (12)$$

Rezultatele (9) și (12) demonstrează elocvent deosebirea cantitativă dintre gravitație și electromagnetism, asemănătoare în alte privințe.

Să trecem acum la estimarea numerică a forței tari nucleare – un proton și un neutron, plasați într-un "sac" deutonic H-2 (sau ${}^2\text{H}$). Vom considera că nucleul se descompune atunci când neutronul și protonul se îndepărtează reciproc la distanța egală cu diametrul protonului ($d_p \approx 10^{-15} \text{ m}$). Cunoscând defectul de masă egal pentru acest nucleu cu aproape $4m_e = 3.64 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$, calculăm ușor energia de legătură: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 3.64 \cdot 10^{-30} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

Acum este lesne să calculăm forța nucleară având în vedere că energia de legătură este egală cu lucrul forței nucleare efectuat la formarea nucleului din protonul și neutronul aparte: $F_{nuc.} = \frac{(\text{Lucrul Forței})}{(\text{Raza nucleului})} = \frac{3 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{10^{-15} \text{ m}} = 0.03 \text{ N}$.

Comparați cu forța Coulombiană atomică și cu cea Newtoniană dintre Pământ și Lună! Împărțind apoi aceasta forță la masa nucleului obținem accelerația particulei respective. Substituind aici masa nucleonului aproximativ cu $1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, obținem tot cu aproximație $1.8 \cdot 10^{27} \text{ m/s}^2$. Este ușor să vedem că accelerația obținută este de 10 mld de ori mai mare decât accelerația electronului în atomul de hidrogen.

Folosind raționamente în multe privințe similare celor de mai sus este posibil să estimăm forța și accelerația de natură slabă nucleară, responsabilă pentru dezintegrarea neutronului. Ele vor fi aproximativ egale cu 10^{-8} N și 10^{-22} m/s^2 , ceea ce înțrece de mai mult de 100 de ori forța și accelerația electromagnetică (Coulombiană) în atomul de hidrogen).

Astfel, dacă ar fi să facem o scară a intensităților forțelor, cea mai slabă va fi cea gravitațională (cu excepția manifestărilor acestei forțe la Marea Explozie și în găurile negre), apoi vor urma cele slabă nucleară și electromagnetică, pentru ca, în sfârșit, să terminăm această enumerare cu forța tare nucleară.

Contribuții remarcabile la dezvoltarea teoriei cuantice a forțelor în afară de Max Planck (1858–1947, Premiu Nobel în 1918), Niels Bohr și Albert Einstein aparțin lui Louis De Broglie (1892–1987, Premiu Nobel în 1929) și Werner Heisenberg (1901–1976, Premiu Nobel în 1932).

A. GĂINĂ, doctor fiz. mat., membru al Societății Europene de Astronomie