

«УФН», 1977, т. 123, с. 181; Vilenky S. M., Petcov S. T., Massive neutrinos and neutrino oscillations, «Rev. Mod. Phys.», 1987, в. 59, р. 671. Г. Т. Зацепин, А. Ю. Смирнов.

НЕЙТРОН (n) (от лат. neuter — ни тот, ни другой) — элементарная частица с нулевым электрич. зарядом и массой, незначительно большей массы протона. Наряду с протоном под общим назв. нуклон входит в состав атомных ядер. n имеет спин $1/2$ и, следовательно, подчиняется *Ферми — Дирака статистике* (является фермионом). Принадлежит к семейству *адронов*; обладает *барионным числом* $B = 1$, т. е. входит в группу *барионов*.

Открыт в 1932 Дж. Чедвиком (J. Chadwick), показавшим, что жесткое проникающее излучение, возникающее при бомбардировке ядер бериллия α -частицами, состоит из электрически нейтральных частиц с массой, примерно равной протонной. В 1932 Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг (W. Heisenberg) выдвинули гипотезу о том, что атомные ядра состоят из протонов и n . В отличие от заряж. частиц, n легко проникает в ядра при любой энергии и с большой вероятностью вызывает *ядерные реакции захвата* (n, γ), (n, α), (n, p), если баланс энергии в реакции положительный. Вероятность экзотермич. ядерной реакции увеличивается при замедлении n , обратно пропорц. его скорости. Увеличение вероятности реакций захвата n при их замедлении в водородосодержащих средах было обнаружено Э. Ферми (E. Fermi) с сотрудниками в 1934. Способность n вызывать деление тяжёлых ядер, открытая О. Ганом (O. Hahn) и Ф. Штрассманом (F. Strassman) в 1938 (см. *Деление ядер*), послужила основой для создания ядерного оружия и ядерной энергетики. Свообразие взаимодействия с веществом медленных n , имеющих де-бройлевскую длину волны порядка атомных расстояний (резонансные эффекты, дифракция и т. д.), служит основой широкого использования нейтронных пучков в физике твёрдого тела. (Классификацию n по энергиям — быстрые, медленные, тепловые, холодные, ультрахолодные — см. в ст. *Нейтронная физика*.)

В свободном состоянии n нестабилен — испытывает β -распад; $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$; его время жизни $\tau_n = 898(14)$ с, граничная энергия спектра электронов 782 кэВ (см. *Бета-распад нейтрона*). В связанном состоянии в составе стабильных ядер n стабилен (по эксперим. оценкам, его время жизни превышает 10^{32} лет). По астр. оценкам, 15% видимого вещества Вселенной представлено n , входящими в состав ядер ${}^4\text{He}$. n является осн. компонентой *нейтронных звезд*. Свободные n в природе образуются в ядерных реакциях, вызываемых α -частицами радиоактивного распада, *космическими лучами* и в результате спонтанного либо вынужденного деления тяжёлых ядер. Искусств. источниками n служат *ядерные реакторы*, *ядерные взрывы*, ускорители протонов (на ср. энергии) и электронов с мишенями из тяжёлых элементов. Источниками монохроматичных пучков n с энергией 14 МэВ являются низкоэнергетич. ускорители дейтронов с тритиевой или литиевой мишенью, а в будущем интенсивными источниками таких n могут оказаться термоядерные установки УТС. (См. *Нейтронные источники*.)

Основные характеристики n .

Масса n . $m_n = 939,5731(27)$ МэВ/ $c^2 = 1,008664967(34)$ ат. ед. массы $\approx 1,675 \cdot 10^{-24}$ г. Разность масс n и протона измерена с наиб. точностью из энергетич. баланса реакции захвата n протоном: $n + p \rightarrow d + \gamma$ (энергия γ -кванта $\mathcal{E}_\gamma = 2,22$ МэВ), $m_n - m_p = 1,293323(16)$ МэВ/ c^2 .

Электрический заряд n . $Q_n = 0$. Наиболее точные прямые измерения Q_n выполнены по отклонению пучков холодных либо ультрахолодных n в электростатич. поле: $Q_n \leq 3 \cdot 10^{-21} e$ (e — заряд электрона). Косв. данные по электр. нейтральности макроскопич. кол-ва газа дают $Q_n \leq 2 \cdot 10^{-22} e$.

Спин n . $J = 1/2$ был определён из прямых опытов по расщеплению пучка n в неоднородном магн. поле

на две компоненты [в общем случае число компонент равно $(2J + 1)$].

Внутренняя чётность n . положительная. **Изотопический спин $I = 1/2$,** при этом проекция изотопич. спина n , $I_3 = -1/2$. В рамках $SU(3)$ -симметрии n входит в октет барионов (см. *Унитарная симметрия*).

Магнитный момент n . Несмотря на электро-нейтральность n , его магн. момент существенно отличен от нуля: $\mu_n = -1,91304184(88)\mu_N$, где $\mu_N = eh/2m_p c$ — ядерный магнетон (m_p — масса протона); знак магн. момента определяется относительно направления его спина. Сопоставление магн. моментов протона ($\mu_p = 2,7928456$) и n позволило высказать гипотезу о роли π -мезонного окружения (шубы) «голого» нуклона в формировании структуры нуклона. Соотношение μ_p и μ_n ($\mu_p/\mu_n \approx -3/2$) может быть объяснено в рамках представлений о кварковой структуре нуклонов (см. ниже). Наиб. точно μ_n измерен сравнением с μ_p методом *ядерного магнитного резонанса* на пучке холодных n .

Электрический дипольный момент n . Динамический, т. е. индуцированный, дипольный момент n может возникать в сильном электрич. поле, напр. при рассеянии n на тяжёлом ядре, либо при рассеянии γ -квантов на дейтроне. Изменение энергии частицы в электрич. поле определяется соотношением $\Delta \mathcal{E} = -(\alpha_0/2) \cdot E^2$, где α_0 — поляризуемость частицы, E — напряжённость поля. Эксперименты дают оценки $\alpha_0 \leq 10^{-42}$ см³ (принята система единиц, в к-рой $\hbar = c = 1$).

Статич. электрич. дипольный момент (ЭДМ) элементарной частицы должен быть тождественно равен нулю, если взаимодействия, к-рые она испытывает, инвариантны относительно *обращения времени* (T -инвариантны). ЭДМ отличен от нуля, если T -инвариантность нарушена, что, согласно *теореме СРТ* (т.е. инвариантности относительно совместного произведения *зарядового сопряжения, пространственной инверсии и обращения времени*), эквивалентно нарушению CP -инвариантности. Хотя нарушение CP -инвариантности было обнаружено ещё в 1964 в распаде K_L^0 -мезона, до сих пор CP -инвариантные эффекты для др. частиц (или систем) не наблюдались. В совр. объединённых калибровочных теориях элементарных частиц нарушение T (или CP)-инвариантности может иметь место в *электрослабом взаимодействии*, хотя величина эффекта крайне мала. Разл. модели нарушения CP -инвариантности предсказывают величину ЭДМ n на уровне $(10^{-24} - 10^{-32}) e \cdot \text{см}$. Из-за своей электр. нейтральности n — весьма удобный объект для поисков CP -инвариантности. Наб. чувствительный и надёжный метод — метод ЯМР с электр. полем, наложенным на магн. поле. Изменение направления электр. поля при сохранении всех остальных характеристик резонансного спектрометра ЯМР вызывает смещение частоты ЯМР на величину $\Delta\nu = -4dE$, где d — ЭДМ. Для $d \sim 10^{-25} e \cdot \text{см}$ $\Delta\nu \sim 10^{-6}$ Гц. Используя метод удержания ультрахолодных n в ЯМР-спектрометре, удалось достичь такой чувствительности. Полученное наиб. точное ограничение на ЭДМ n : $d_n \leq 2 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см}$.

Структура n .

n , наряду с протоном принадлежит к легчайшим барионам. По совр. представлениям, он состоит из трёх легчайших валентных *кварков* (двух d -кварков и одного u -кварка) трёх цветов, образующих бесцветную комбинацию. Кроме валентных кварков и связывающих их *глюонов* нуклон содержит «море» виртуальных пар кварк — антикварк, в т. ч. тяжёлых (странных, очарованных и т. д.). Квантовые числа n , целиком определяются набором валентных кварков, а пространств. структура — динамикой взаимодействия кварков и глюонов. Особенностью этого взаимодействия является рост эфф. константы взаимодействия (*эффективного*