

Базові відомості про масу та густину

Розуміння властивостей "маси" і "густини" є корисним у багатьох галузях науки та промисловості. У даній статті коротко описуються основні відомості про масу та густину, а також методи їх визначення та метрологічне підґрунтя.

Що таке маса?

Ісаак Ньютон дав таке визначення маси: «*Міра кількості матерії, яка має одночасно й відповідну густину, й відповідний обсяг*» ^[1], визначивши масу через густину та «обсяг», де останнє означає об'єм. Щоб з'ясувати, що таке маса, потрібно знати, як атоми, з яких складається речовина, здобувають масу. Атоми мають крихітне ядро та електронну оболонку в 100 000 разів більшу, ніж саме ядро. Ядро містить більш ніж 99% атомної маси і складається з протонів та нейтронів. Протони та нейтрони, в свою чергу, складаються з кварків та глюонів, які вважаються елементарними частинками (рис. 1). Глюони є квантами так званої "сильної ядерної взаємодії", яка утримує разом протони і нейтрони й, відповідно, ядро.

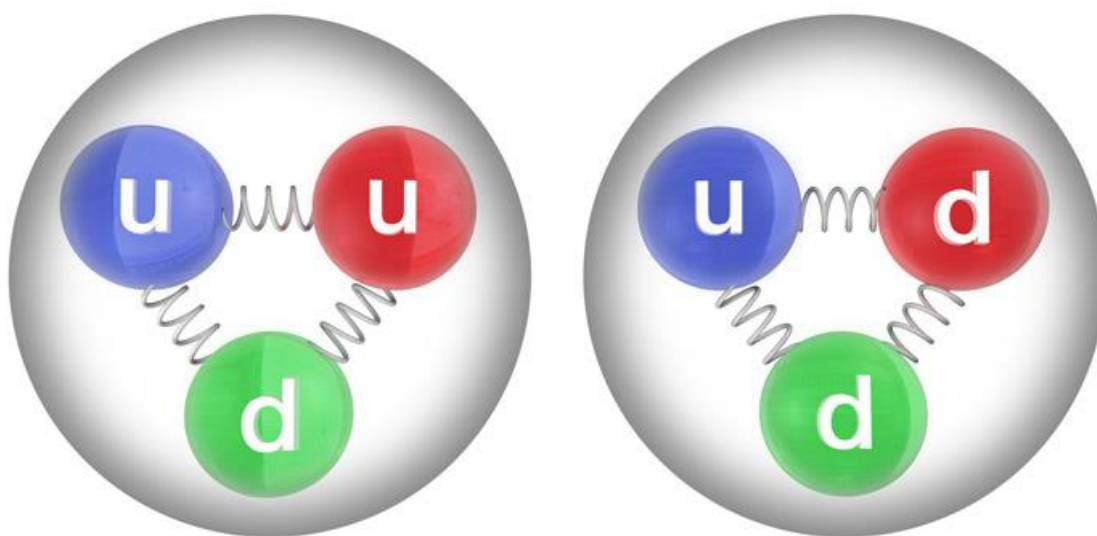


Рисунок 1. Протон (ліворуч) і нейтрон (праворуч) містять верхні кварки (u) та нижні кварки (d), і утримуються разом завдяки глюонам (пружинки). Джерело: commons.wikimedia.org/wiki/Quark

Маса елементарних частинок

Маса елементарних частинок залежить від їх ступеня взаємодії з полем Хіггса. Постулюється, що воно заповнює весь простір. Квант поля Хіггса - це бозон Хіггса, задетектований на CERN в Женеві у 2012 році ^[2]. Частинки, які не взаємодіють з полем Хіггса, не мають маси і рухаються зі швидкістю світла, як, наприклад, фотон.

Проте, лише невеликий відсоток маси атомного ядра можна віднести до механізму взаємодії з полем Хіггса. Більша частина маси ядра походить від енергії зв'язку сильної ядерної взаємодії. Як енергія зв'язку відноситься до маси ядра, можна пояснити найвидатнішим законом фізики: $E = m \cdot c^2$ Альберта Ейнштейна. Він показує, що енергія **E** та маса **m**, є по суті, те саме.

Маса атомних ядер



Рисунок 2. На картинці ліворуч зображено, як на шальки терезів з обох боків покладено палиці та гумові кільця так, що вони знаходяться в рівновазі; На картинці праворуч зображено, як розтягнення гумового кільця і його одягнення на палицю збільшило його енергію. Таким чином, збільшилась його маса і вага, і тому терези нахилились. І хоча цей ефект занадто малий, щоб спостерігати його на терезах, він все рівно існує.

Щоб зрозуміти, як це стосується питання про те, звідки виникає більша частина маси атомного ядра, див. рис. 2. У цьому ілюстрованому прикладі палицю та гумове кільце кладуть на шальки терезів. Палиці та гумові кільця беруть з однаковою масою, тому їх вага є однаковою. Це призводить до того, що терези будуть перебувати в рівновазі. Якщо одне з гумових кілець розтягнути, натягнути на палицю і покласти на одну з шальок, тоді як на іншій шальці палиця та резинове кільце залишиться лежати окремо, баланс (принаймні, в принципі) не збережеться.

Натягнуте гумове кільце отримує додаткову енергію E і, згідно із законом Ейнштейна, це збільшує масу на величину $\Delta m = E/c^2$. Отже, маса розтягнутого гумового кільця збільшується, а терези показують різницю у вазі, принаймні, в принципі. Оскільки енергія E ділиться на c^2 , тобто на швидкість світла в квадраті, зміна маси є надто малою, щоб стати помітною на реальних терезах.

Яким чином різні ефекти впливають на масу атомного ядра

На масу атомного ядра впливають наступні ефекти:

1. Сильна взаємодія всередині ядра: завдяки тому, що компоненти ядра заряджені позитивно, електростатична сила прагне розірвати ядро. Сильна ядерна взаємодія діє проти електростатичної сили і зв'язує ядро. У сильній взаємодії міститься величезна кількість енергії зв'язку, яка робить основний внесок у масу ядра.
2. Кінетична енергія, що випливає з принципу невизначеності Гайзенберга ^[3]: елементарні частинки в ядрі не можуть «сидіти» спокійно, вони повинні рухатися зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Ця кінетична енергія призводить до відповідного збільшення маси і вибуху ядра, якщо їй не протидіяти сильною ядерною взаємодією. Це збільшує енергію зв'язків сильної ядерної взаємодії та її масовий внесок.
3. Механізм Хіггса, який описано вище. По суті, цей механізм сприяє зменшенню маси ядра.

Як визначають масу?

Маса визначається вагами. Ваги використовують силу тяжіння, яку створює гравітаційне поле Землі. Ваги вимірюють силу, і ця сила на Землі не така, як, наприклад, на Місяці, тоді як маса не залежить від того, де вона вимірюється. Сила, виміряна вагами, називається вагою. Поки такі вимірювання не проводяться у вакуумній камері, вони визначають вагу зразка в повітрі. Вага в повітрі зазвичай має трохи менші значення, ніж вага у вакуумі, тому що зразок "плаває" в повітрі, тобто існує ефект плавучості. Він може бути виправлений, якщо потрібно.

Переведення ваги в масу

Використовуючи ваги, зображені на рисунку 2, вага може бути переведена в масу наступним чином:

1. Вага зразка на одній шальці збалансовується калібрувальними вантажами відомої маси на іншій шальці, так що коромисло розташовується горизонтально.
2. Тепер маса зразка узгоджується з масою калібрувальних вантажів, не враховуючи невеликі ефекти плавучості у повітрі, якими, як правило, нехтують.
3. Таким чином визначається маса зразка.

Сучасні електронні ваги мають більшу точність, але працюють за тим самим принципом. Для визначення маси необхідно використовувати відповідні одиниці вимірювання та калібрувальні вантажі, які можна порівняти з міжнародним стандартом маси. Відповідно до СІ – Міжнародної системи одиниць (International System of Units), одиниця вимірювання маси – кілограм [кг]. Поточний міжнародний стандарт маси виходить з прототипу – оригінального еталонного кілограму, розташованого у Парижі, Франція. Це циліндр, виконаний з сплаву платини та іридію (рис. 3).



Рисунок 3. Копія оригінального еталону кілограма. Джерело: de.wikipedia.org/wiki/Kilogramm

Проте, були проблеми з довгостроковою стійкістю значення маси оригінального еталонного кілограма. Тому протягом десятиліть дослідники працюють над тим, щоб знайти найкращий масовий стандарт, який буде виходити лише з основних фізичних властивостей. Ці зусилля, здається, були успішними і очікується, що оригінальний еталон кілограма буде замінено новим стандартом маси на 26-ій Генеральній конференції з питань мір і ваг в листопаді 2018 року ^[4].

Що таке густина?

Густина, тобто питома маса – це маса зразка поділена на його об'єм. Одиниці вимірювання густини в СІ – кілограм поділений на кубічний метр $[\text{кг}/\text{м}^3]$. Як згадувалося вище, Ньютон використовував густину, як одну з визначальних властивостей маси. Хоча багато хто вважає, що визначення Ньютона є циклічним, варто зазначити, що один із нових стандартів, запропонованих для заміни оригінального еталону кілограма, по суті, базується на густині куль, зроблених з монокристалу кремнію-28 ^[5].

Як вимірюють густину?

Густина зразка визначається шляхом вимірювання маси і об'єму. Про вимірювання маси, дивіться вище. Вимірювання об'єму можна звести до вимірювання довжини, використовуючи метр як одиницю вимірювання. Метр означається як відстань, яку проходить у вакуумі світло за трохи більше, ніж одну третину наносекунди, тому швидкість світла та час визначають величину метра.

Вимірювання густини твердих тіл

Точне визначення об'єму твердого тіла – це виснажлива процедура. Як правило, зразок поміщають в пікнометр відомого об'єму. Об'єм зразка визначається з об'єму рідини або газу, який він займає в пікнометрі. Визначення маси та об'єму, як правило, здійснюється окремо, а потім з них обчислюється густина.

Вимірювання густини рідин



Рисунок 4. Попереду U-трубка окремо та коливальний датчик густини з U-трубкою позаду. U-трубка наповнена досліджуваним зразком і коливається з власною частотою. Густину зразка отримують з цього значення.

Густина рідини є важливим фізичним параметром, який може бути використаний для розрахунку концентрації, та який має багато інших практичних застосувань.

Визначення густини рідин проводиться наступними методами:

- Метод гідростатичного зважування або гідрометр: тіло відомого об'єму занурюється у зразок, визначається різниця у вазі, яка виникає через силу Архімеда. Сила, яка виштовхує тіло з рідини пропорційна до густини рідини і легко може бути переведена в останню. Для досягнення високоточних вимірювань важливо точно контролювати і компенсувати зміни температури, поверхневого натягу та інші ефекти.
- Пікнометр: колба (пíkнометр) відомого об'єму заповнюється досліджуваною рідиною. Визначається різниця у вазі між наповненим та порожнім пікнометром. З цього та виміряного пікнометром об'єму розраховується густина.
- Густиномір з осцилюючою U-трубкою: завдяки своїй швидкості та точності це прилад, який найчастіше застосовується для вимірювання густини. Необхідний для дослідження об'єм зразка є набагато меншим, ніж для двох вищезазначених методів. Внутрішній об'єм U-трубки визначає об'єм вимірюваного зразка. Вона заповнюється зразком і, користуючись електронікою, встановлюється на коливання на власній частоті зразка. Власна

частота коливання залежить від маси зразка і автоматично перераховується приладом в густину зразка. На рисунку 4 показано приклад коливального сенсора для вимірювання густини U-трубкою.

Підсумки

У статті подаються базові відомості про масу та густину. Спочатку пояснюється звідки береться маса на рівні атомного ядра. Далі описуються методи визначення маси та густини та їх метрологічне підґрунтя. В кінці наведено прогноз, щодо того, як найближчим часом зміниться метрологічна основа цих вимірювань.

Посилання

1. [en.wikisource.org/wiki/Page:Newton%27s_Principia_\(1846\).djvu/79](http://en.wikisource.org/wiki/Page:Newton%27s_Principia_(1846).djvu/79)
2. www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/englert-lecture.pdf
3. en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle
4. en.wikipedia.org/wiki/General_Conference_on_Weights_and_Measures
5. www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/broschueren/intern_einheitensystem/Info_Sheet_The_New_SI_V2.pdf

Данна стаття є перекладом на українську мову оригінальної [статті](#):

<https://wiki.anton-paar.com/en/on-the-fundamentals-of-mass-and-density/>

Переклад Донау ЛАБ УКРАЇНА <http://dlu.com.ua> - ексклюзивного дистриб'ютора продукції Anton Paar GmbH в Україні та Молдові



Ексклюзивний дистриб'ютор Anton Paar GmbH в Україні та Молдові

Донау Лаб Україна
вул. Стратегічне шосе, 16,
оф. 301
03028
www.dlu.com.ua

Телефон +38 (044) 229 15 31
Факс +38 (044) 229 15 30
e-mail sale@dlu.com.ua