

Почему масса протона такая, как измеряется экспериментально – оценка по КХД динамике.

19 ноября 2018, Physics APS: André Walker-Loud, Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

Почти вся масса известной материи содержится в протонах и нейтронах-частицах, составляющих ядра атомов. Но как протоны и нейтроны приобретают свою массу? Каждая из этих частиц, или "нуклонов", состоит из плотной, вспенивающейся массы других частиц: кварков, которые имеют массу, и глюонов, у которых ее нет. Однако кварковые массы составляют всего лишь 1% от массы протона или нейтрона, причем основная масса протона происходит исключительно из движения и удержания кварков и глюонов. И-Бо Ян из Мичиганского Государственного Университета, Ист-Лансинг, и его коллеги впервые количественно оценили четыре отдельных вклада в массу протона с расчетом на основе квантовой хромодинамики (КХД), фундаментальной теории сильного взаимодействия в ядре и краеугольным камнем стандартной модели физики частиц [1]. Хотя это четырехчастное разложение известно уже более 20 лет [2], понимание его физиками было только качественным.

Кварки, которые составляют Протон и нейтрон, являются фундаментальными частицами, которые получают свои массы через механизм Хиггса. Тот же механизм не объясняет массу протона, который состоит из двух кварков *up* (2.4 MeV/c² каждый) и один кварк *down* (5.0 MeV/c²) [3]. Очевидно, что сумма этих трех масс значительно меньше фактической массы протона, 938,27 MeV/c².

Теперь квантовая механика говорит нам, что существует также масса (или, эквивалентно, энергия), связанная с удержанием кварков в протоне, диаметр которого составляет около 10-15 м. Используя аргумент принципа неопределенности, ограниченное положение частиц переводится в большой импульс и должно добавить около 300 MeV/c² - в правом шаровом парке масса протона все еще слишком мала. (Аналогичные рассуждения применимы к нейтронной, состоящей из двух кварков и кварк.)

Фактически, точные стандартные модельные предсказания массы протона и нейтрона существовали в течение десятилетия [4]. При низких энергиях, характерных для ядра, эти массы могут быть предсказаны только по трем параметрам: общий масштаб масс, который динамически генерируется в КХД, и параметры кварков *up* и *down*. Протонная и нейтронная массы известны гораздо точнее из эксперимента, чем когда-либо будет возможно из предсказаний Стандартной модели. Тем не менее, физики хотели бы понять, как массы возникают из КХД, во многом так же, как они могут предсказать спектр водорода из квантовой теории.

Именно это Ян и его коллеги и сделали, впервые определив различные вклады в массу протонов, которые возникают из кварковой и глюонной динамики [1]. Исследователи полагаются на мощный метод, известный как решетчатая КХД, который помещает кварки на узлах (сайтах) решетки и глюонов на связях между ними. Это строгое представление КХД может быть реализовано численно, и это единственный метод, основанный на КХД, который может делать количественные прогнозы на масштабах длины, сопоставимых с Протоном или больше. (На этих весах, взаимодействия между кварками и глюонами настолько сильны, они не могут быть обработаны с диаграммами Фейнмана и других "возмущений" методами.) Однако решетчатое КХД является дорогостоящим методом. Дискретизация создает ошибки, и их удаление влечет за собой взятие интервала решетки a до нуля. Этот шаг достигается на практике путем выполнения множественных вычислений на различных значениях a , на высокой численной цене которая вычисляет по масштабу как a^{-6} . Тем не менее, решетчатые КХД значительно повзрослели в последние годы, что позволяет наиболее точно определять кварковые массы [5] и многие свойства легких и тяжелых мезонов [3], которые состоят из кварка и антикварка.

Трехкварковая частица, подобная нуклону, экспоненциально сложнее для решетчатой КХД, и успешные вычисления со всеми источниками неопределенности редки. В своей работе Ян и коллаборационисты преодолевают некоторые сложности, используя новые вычислительные методы, которые они, наряду с другими, разработали [6-8]. Эти достижения позволили им рассчитать вклад в массу протона из четырех источников [2], известных как кварковый конденсат (~ 9%), энергия кварка (~ 32%), в *gluonic* силовом поле энергии (~ 37%), и аномальный глюонный вклад (~23%) (рис. 1). Наименьший вклад, кварковый конденсат, представляет собой смесь кварков *up* и *down* и "море" виртуальных странных кварков, и это единственный, который исчез бы, если бы кварковые массы были равны нулю. Остальные три термина связаны с динамикой кварков и глюонов и их удержанием внутри протона. Энергия кварка и сила глюонного поля приравниваются к кинетической энергии ограниченных кварков и ограниченных глюонов соответственно. Аномальный термин - чисто квантовый эффект. Он связан с масштабом массы КХД и состоит из вкладов от конденсатов всех вкусов кварка, включая странные, Шарм, дно, и верхние кварки. Расчеты Яна и его коллег показывают, что если бы масса кварка была равна нулю, то Протон все равно имел бы более 90% от его экспериментальной массы. Другими словами, почти вся известная масса во Вселенной происходит из динамики кварков и глюонов.

Физики давно хотели понять возникновение массы нуклона в терминах стандартной модели, и выводы Янга и его коллег являются важным вкладом в достижение этой цели. Их работа и другие подобные работы также означают новую эру, в которой наше понимание нуклонов все больше формируется количественными предсказаниями, основанными на решеточных КХД. Только в этом году исследователи использовали решеточные КХД для определения аксиального заряда нуклонов-вездесущей величины в ядерной физике-с беспрецедентной точностью 1% [9]. Решеточные КХД в сочетании с мощными аналитическими методами упрощения расчетов КХД приведут к лучшему пониманию подструктуры нуклона [10], которая исследуется на различных коллайдерах по всему миру и станет одним из фокусов предлагаемой машины под названием электронно-ионный коллайдер. В конечном счете, есть надежда, что решетчатая КХД может быть применена к ядру (множественным нуклонам). Ядра используются в качестве детекторов в нескольких экспериментальных поисках физики за пределами Стандартной модели, такой как темная материя, постоянный электрический дипольный момент и безнейтринный двойной бета-распад. Интерпретация этих экспериментов потребует количественного понимания ядерной физики, основанного на стандартной модели. Такого рода сложная проблема все чаще возникает в области решетчатого КХД благодаря наличию почти экзаскальских компьютеров, Sierra и Summit, которые сейчас подключаются к сети и в 10-15 раз мощнее, чем даже те, которые используются Yang и сотрудниками.

Dissecting the Mass of the Proton –

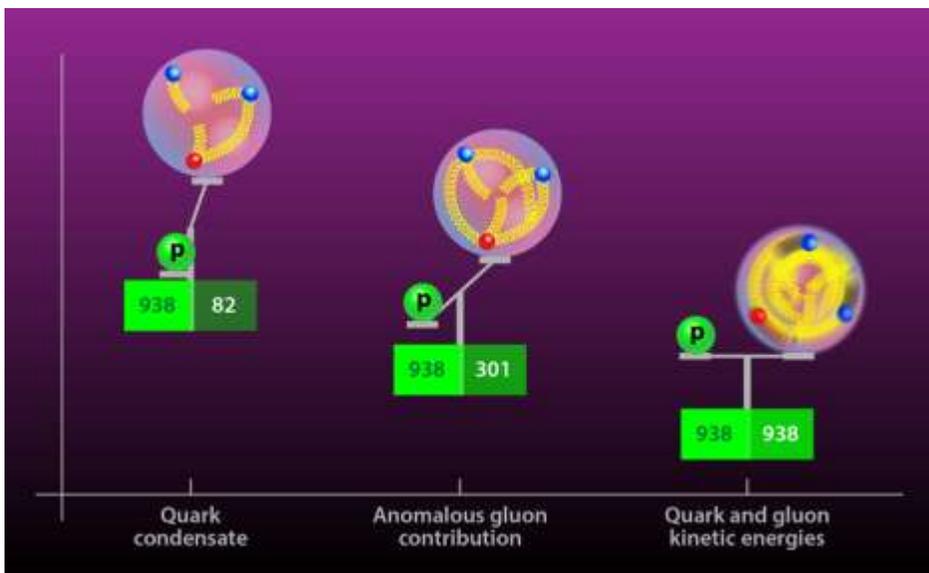


Figure 1: The proton is comprised of two up quarks and one down quark, but the sum of these quark masses is a mere 1% of the proton mass. Using lattice QCD, Yang and colleagues determined the relative contributions of the four sources of the proton mass [1]. (The cumulative contributions in MeV/c² are shown on the dark green rectangles.)

Nearly all the mass of known matter is contained within protons and neutrons—the particles that make up the nuclei of atoms. But how do the protons and neutrons acquire their mass? Each of these particles, or “nucleons,” is composed of a dense, frothing mess of other particles: quarks, which have mass, and gluons, which do not. Yet the quark masses only add up to a mere 1% of a proton or neutron’s mass, with the bulk of the proton mass coming purely from the motion and confinement of quarks and gluons. Yi-Bo Yang of Michigan State University, East Lansing, and colleagues have now quantified, for the first time, four separate contributions to the proton’s mass with a calculation based on quantum chromodynamics (QCD), the fundamental theory of the strong interaction in the nucleus and a cornerstone of the standard model of particle physics [1]. While this four-part decomposition has been known for more than 20 years [2], physicists’ understanding of it has been only qualitative.

The quarks that make up the proton and neutron are fundamental particles, which get their masses through the Higgs mechanism. The same mechanism doesn’t explain the mass of the proton, which is comprised of two up quarks (2.4MeV/c each) and one down quark (5.0MeV/c) [3]. Clearly, the sum of these three masses falls far short of the actual proton mass, 938.27MeV/c. Now, quantum mechanics tells us there is also mass (or equivalently, energy) associated with the confinement of the quarks into the proton, whose diameter is about 10–15m. Using an uncertainty principle argument, the confined position of the particles translates into a large momentum and should add about 300MeV/c — in the right ballpark of the proton mass but still too small. (Similar arguments apply to the neutron, which is comprised of two down quarks and an up quark.)

In fact, accurate standard model predictions of both the proton and neutron mass have existed for a decade [4]. At the low energies relevant to a nucleus, these masses can be predicted from just three parameters: an overall mass scale, which is dynamically generated in QCD, and the up and down quark parameters. The proton and neutron masses are known much more precisely from experiment

than will ever be possible from standard model predictions. However, physicists would like to understand how the masses emerge from QCD, much the same way they can predict the spectrum of hydrogen from quantum theory.

Yang and colleagues have done just this, determining for the first time the various contributions to the proton mass that arise from quark and gluon dynamics [1]. The researchers rely on a powerful method known as lattice QCD, which places quarks on the sites of a lattice and gluons on the links between them. This rigorous representation of QCD can be implemented numerically, and it is the only QCD-based method that can make quantitative predictions on length scales comparable to the proton or larger. (At these scales, the interactions between quarks and gluons are so strong, they cannot be handled with Feynman diagrams and other “perturbative” methods.) However, lattice QCD is an expensive technique. The discretization creates errors, and to remove them entails taking the lattice spacing, a , to zero. This step is achieved in practice by performing multiple calculations at different values of a , at a high numerical cost that scales as a^{-6} . Nevertheless, lattice QCD has matured significantly in recent years, allowing for the most precise determination of the quark masses [5] and many properties of light and heavy mesons [3], which are comprised of a quark and an antiquark.

A three-quark particle like the nucleon is exponentially more complicated for lattice QCD, and successful calculations, with all sources of uncertainty controlled, have been rare. In their work, Yang and collaborators overcome some of the complications by using new computational methods that they, along with others, developed [6–8]. These advances enabled them to compute the contribution to the proton mass from four sources [2] known as the quark condensate ($\sim 9\%$), the quark energy ($\sim 32\%$), the gluonic field strength energy ($\sim 37\%$), and the anomalous gluonic contribution ($\sim 23\%$) (Fig. 1). The smallest contribution, the quark condensate, is a mixture of the up and down quarks and a “sea” of virtual strange quarks, and it is the only one that would vanish if the quark masses were zero. The other three terms are all related to the dynamics of the quarks and gluons and their confinement within the proton. The quark energy and gluonic field strength equate to the kinetic energy of the confined quarks and confined gluons, respectively. The anomalous term is a purely quantum effect. It is associated with the QCD mass scale and consists of contributions from condensates of all quark flavors, including the strange, charm, bottom, and top quarks. The calculation by Yang and colleagues shows that, if the up, down, and strange quark masses were all zero, the proton would still have more than 90% of its experimental mass. In other words, nearly all the known mass in the Universe comes from the dynamics of quarks and gluons.

Physicists have long wanted to understand the emergence of the nucleon mass in terms of the standard model, and the findings from Yang and co-workers are an important contribution to that goal. Their work and other works like it also signify a new era, in which our understanding of nucleons is increasingly shaped by quantitative predictions based on lattice QCD. Just this year, researchers used lattice QCD to determine the nucleon axial charge, a ubiquitous quantity in nuclear physics, with an unprecedented 1% precision [9]. Lattice QCD, coupled with powerful analytic methods for simplifying QCD calculations, will lead to a better understanding of the substructure of the nucleon [10], which is being explored at various colliders around the world and would be one focus of a proposed machine called the Electron-Ion Collider. Ultimately, the hope is that lattice QCD can be applied to a nucleus (multiple nucleons). Nuclei are used as detectors in several experimental searches for beyond-standard-model physics, such as dark matter, a permanent electric dipole moment, and neutrinoless double-beta decay. Interpreting these experiments will require a quantitative understanding of nuclear physics that is rooted in the standard model. This sort of complex problem is increasingly in the realm of lattice QCD thanks to the availability of the near-exascale computers, Sierra and Summit, which are coming online now and are 10 to 15 times more powerful than even those used by Yang and co-workers.

This research is published in *Physical Review Letters* see below .

References

1. Y.-B. Yang, J. Liang, Y.-J. Bi, Y. Chen, T. Draper, K.-F. Liu, and Z. Liu, “Proton mass decomposition from the QCD energy momentum tensor,” *Phys. Rev. Lett.* **121**, 212001 (2018).
2. X.-D. Ji, “QCD analysis of the mass structure of the nucleon,” *Phys. Rev. Lett.* **74**, 1071 (1995).
3. S. Aoki *et al.*, “Review of lattice results concerning low-energy particle physics,” *Eur. Phys. J. C* **77**, 112 (2017); Quarks do not have a mass in the sense that the electron does. But a mass parameter for the quarks can still be rigorously defined with a specified renormalization scheme and scale. The masses quoted by Aoki *et al.* are in the so-called $\overline{\text{MS}}$ scheme at a scale of 2 GeV.
4. S. Durr *et al.*, “Ab initio determination of light hadron masses,” *Science* **322**, 1224 (2008).
5. A. Bazavov *et al.*, “Up-, down-, strange-, charm-, and bottom-quark masses from four-flavor lattice QCD,” *Phys. Rev. D* **98**, 054517 (2018).
6. K.-F. Liu, J. Liang, and Y.-B. Yang, “Variance reduction and cluster decomposition,” *Phys. Rev. D* **97**, 034507 (2018).
7. Y.-B. Yang, M. Gong, J. Liang, H.-W. Lin, K.-F. Liu, D. Pefkou, and P. Shanahan, “Nonperturbatively renormalized glue momentum fraction at the physical pion mass from lattice QCD,” *Phys. Rev. D* **98**, 074506 (2018).
8. Y.-B. Yang, R. Sufian, A. Alexandru, T. Draper, M.J. Glatzmaier, K.-F. Liu, and Y. Zhao, “Glue spin and helicity in the proton from lattice QCD,” *Phys. Rev. Lett.* **118**, 102001 (2017).
9. C. C. Chang *et al.*, “A per-cent-level determination of the nucleon axial coupling from quantum chromodynamics,” *Nature* **558**, 91 (2018).
10. H.-W. Lin *et al.*, “Parton distributions and lattice QCD calculations: A community white paper,” *Prog. Part. Nucl. Phys.* **100**, 107 (2018).