



(Foto: CERN. Reprodução)

O Detector ALICE (A Large Heavy-Ion Experiment) no Large Hadron Collider (LHC). Apesar de todos os avanços no entendimento acerca da estrutura da matéria, ainda há muitas questões em aberto.

Física de Partículas no século XXI

Entendimento sobre estrutura básica do Universo avançou significativamente nos últimos anos, mas ainda existem muitas perguntas e desafios para solucionar

* Alexandre Suaide

Resumo

A física de partículas estuda a estrutura microscópica do Universo. Seus constituintes básicos e como esses constituintes interagem entre si, as leis físicas mais fundamentais, resultando em todas as estruturas que observamos na Natureza. Nos últimos 100 anos, tivemos um avanço considerável no entendimento acerca da estrutura básica do Universo. Contudo, ainda temos muitas perguntas e desafios para serem solucionados, o que torna essa área da física básica uma das mais excitantes e desafiadoras que existem.

Palavras-chave: Física; Partículas elementares; Estrutura da matéria; Modelo padrão; Quarks; Matéria e energia escura.

Talvez as perguntas mais recorrentes na história da humanidade, desde a antiguidade até os dias atuais, estejam relacionadas às nossas origens e ao nosso futuro. De onde viemos? Para onde vamos? Do que somos feitos? Esses questionamentos podem ser abordados em diferentes aspectos a depender da área em que se desenvolvem. Áreas como a biologia, química, filosofia, e tantas outras abordam aspectos particulares dessas perguntas. A física certamente tem o seu papel nesse empreendimento em entender nosso passado e prever nosso futuro. Faz isso com diversos olhares. Em um momento, olhando o grande e distante, com as suas observações sobre o Universo, sua origem, evolução e destino. Em outro, com foco no muito pequeno, tentando desvendar as estruturas mais fundamentais que compõem tudo o que observamos ao nosso redor. Não só do que são feitas essas estruturas, quais são os seus componentes, mas também como elas interagem umas com as outras em seus detalhes, de modo a entender a origem de tudo que compõe o Universo, na expectativa que esse conhecimento permitirá vislumbrar nosso destino.

A ideia de que somos feitos de estruturas menores, invisíveis, não é nova. Anaxágoras e Empédocles, na Grécia antiga, já imaginavam que tudo a nossa volta era composto de diferentes combinações e ordenamentos de partículas invisíveis. Demócrito argumenta que o Universo consiste em espaço vazio com um número quase infinito de partículas invisíveis e indivisíveis. Não estavam muito distantes

das concepções modernas, mas faltavam a eles métodos e ferramentas. Foram quase 2.500 anos até que fôssemos capazes de entender a natureza microscópica da matéria. Só em 1897, com o trabalho de Thompson sobre raios catódicos [1], que descobrimos a primeira partícula elementar. Após isso, houve um avanço rápido, com a descoberta do núcleo atômico por Rutherford [2], em 1910. Pouco tempo depois, em 1927, Rutherford expressa, perante à *Royal Society of London*, que é imperativo acelerar e colidir partículas para progredir na ciência acerca da estrutura fundamental da matéria. Até hoje aceleradores de partículas constituem a mais importante ferramenta nesse processo. Atualmente, aceleradores como o *Large Hadron Collider* (LHC) no CERN, na Suíça, permitem uma investigação profunda da estrutura da matéria e as forças fundamentais que estabelecem as regras para o funcionamento do Universo.

Nesses últimos 100 anos, um enorme progresso foi feito e o nosso conhecimento sobre a estrutura fundamental da matéria e como o Universo funciona estão consolidados em duas grandes teorias na física: o Modelo Padrão da Física de Partículas e a Teoria da Relatividade.

O Modelo Padrão da Física de Partículas é a teoria que descreve as partículas elementares (Figura 1), como elas estão relacionadas entre si e como interagem umas com as outras, através de três interações fundamentais (interações forte, fraca e eletromagnética). Uma quarta interação fundamental, a gravitacional, é descrita pela

“Nesses últimos 100 anos um enorme progresso foi feito e o nosso conhecimento sobre a estrutura fundamental da matéria e como o Universo funciona estão consolidados em duas grandes teorias na física: o Modelo Padrão da Física de Partículas e a Teoria da Relatividade.”

Teoria da Relatividade e a incorporação dessa no Modelo Padrão é um dos grandes desafios atuais da física.

O Modelo Padrão é o resultado de diversas descobertas e desenvolvimentos teóricos nesses últimos 100 anos. O avanço na tecnologia de aceleradores de partículas, principalmente durante as décadas de 1950 e 1960, fomentou a descoberta de centenas de partículas com características similares as do próton e nêutron, fazendo com que cientistas imaginassem que essas partículas devessem ter alguma estrutura interna mais fundamental.

No final da década de 1960, descobrimos que, de fato, essas partículas são constituídas de outras, que hoje chamamos de *quarks*. Nas décadas seguintes vários experimentos foram realizados e hoje conhecemos a existência de seis *quarks* diferentes (e seus respectivos *antiquarks*). Nesse mesmo período, desde a descoberta do elétron no final do século XIX, descobrimos outra classe de partículas elementares, os léptons (e elétron é um deles). Hoje também conhecemos a existência de seis diferentes

léptons, também com seus respectivos antiléptons. *Quarks* e léptons são as partículas elementares de matéria. Toda a matéria conhecida no Universo é formada pela combinação deles. *Quarks* estão sujeitos a todas interações fundamentais, enquanto léptons não são capazes de sentir a interação forte. Cada uma dessas descobertas constituiu um importante marco na física de partículas e na ciência em geral e foi, na sua maioria, realizada nos mais elaborados experimentos de física básica para a época. Junto aos *quarks* e léptons, adiciona-se ao Modelo Padrão quatro bósons de calibre, responsáveis por intermediarem as interações fundamentais. O fóton, responsável pela interação eletromagnética; o glúon, pela interação forte; e os bósons Z e W, pela interação fraca. Completando o Modelo Padrão há também o bóson de Higgs, a última peça descoberta

nesse quebra-cabeça, em 2012, no Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadron Collider* – LHC) [4,5], responsável pelo mecanismo que faz com que essas partículas fundamentais possuam massa.

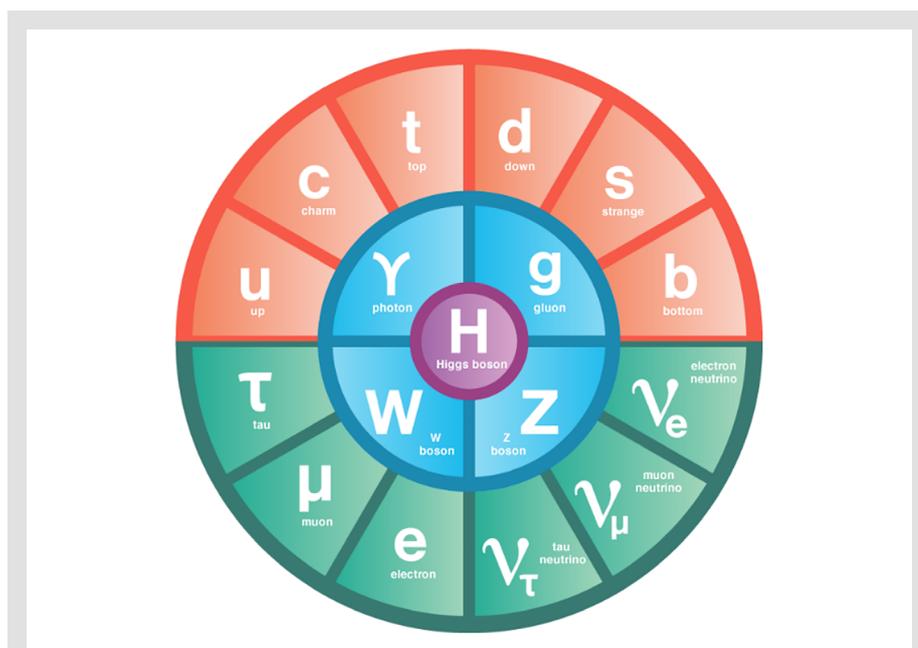
Apesar de todo o avanço nas pesquisas relacionadas às estruturas mais elementares da matéria, e de todo o sucesso do Modelo Padrão em explicar os fenômenos microscópicos, há muito a ser explorado e compreendido. Nossa busca pelo entendimento das nossas origens e destino ainda conta com questões fundamentais a serem respondidas. Essas questões constituem os grandes desafios para as próximas décadas e motivam a criação dos mais sofisticados experimentos científicos da humanidade.

Do ponto de vista das interações fortes, a Cromodinâmica Quântica (QCD) é a formulação teórica para descrevê-la. Desenvolvida

nos anos de 1970, a QCD tem sido objeto de intenso estudo desde então. A interação entre os *quarks* ocorre através dos glúons, que também interagem entre si. A QCD tem se mostrado bastante competente na descrição de uma ampla variedade de fenômenos físicos, desde as propriedades mais básicas de núcleos encontrados na natureza até situações em condições extremas, como a dinâmica dentro de estrelas de nêutrons ou colisões entre partículas elementares, sejam na atmosfera (raios cósmicos) ou em grandes aceleradores de partículas.

Dois aspectos intrigantes que emergem da QCD são a liberdade assintótica (a interação entre *quarks* diminui com a distância entre eles) e o confinamento (é impossível observar partículas que interagem fortemente, *quarks* e glúons, livres na natureza). O entendimento das razões que fazem o confinamento uma propriedade fundamental da interação forte é um dos principais problemas em aberto na QCD e há um esforço intenso em buscar respostas para ele.

Uma forma de estudar a propriedade de confinamento é criar um ambiente no qual *quarks* e glúons possam se mover em distâncias maiores que o tamanho do próton, como se estivessem desconfinados. Isso pode ser obtido em colisões entre íons-pesados (normalmente ouro ou chumbo), em altíssimas energias. Essas colisões podem criar regiões no espaço nas quais a temperatura pode atingir valores extremos, da ordem de 10^{12} K. Nessas situações, ocorre uma transição de fase da matéria para um estado chamado de



(Fonte: Symmetry Magazine. Reprodução)

Figura 1. Partículas que compõem o Modelo Padrão [3]. Em laranja, estão representados os *quarks*. Em verde, os léptons. Em azul, os bósons de calibre e, ao centro, o bóson de Higgs.

Plasma de *Quarks* e Glúons (QGP) (Figura 2). A observação e caracterização desse plasma, além de ter importância para o entendimento detalhado das interações fortes, também é muito importante do ponto de vista cosmológico. Acredita-se que o Universo estava em um estado semelhante a este, poucos momentos após o Big Bang. Neste caso, a observação e investigação desse estado da matéria permite compreender com maior detalhe a evolução do Universo primordial, a sua expansão e formação dos primeiros prótons e nêutrons. A investigação experimental da existência e caracterização desse estado da matéria é o foco de grandes aceleradores, como o RHIC (*Relativistic Heavy-Ion Collider*), nos Estados Unidos, e o LHC. Futuros desenvolvimentos nesses dois equipamentos, bem como a construção de uma nova geração de aceleradores, permitirão um estudo detalhado desse estado da matéria, definindo caminhos para entender em detalhes as propriedades das interações fortes.

Do ponto de vista das interações eletromagnéticas e fracas, a descoberta do bóson de Higgs trouxe informações importantes sobre o mecanismo de quebra de simetria que leva à origem das massas das partículas elementares. Pouco tempo depois, tivemos várias medidas sobre o acoplamento do bóson de Higgs com bósons *W* e *Z* e também com *quarks* e léptons mais pesados. Recentemente esses estudos foram expandidos para *quarks charm* e *bottom* [6]. Essas medidas são importantes, porque a magnitude desse acoplamento está relacionada

à massa de cada uma dessas partículas. Contudo, ainda há muito a ser explorado.

Uma das questões fundamentais em aberto é o problema da hierarquia. Nesse caso, a questão é porque a força gravitacional é exageradamente menos intensa do que a força fraca, cerca de 10^{24} vezes menos intensa. Mais tecnicamente, qual é a razão pela qual a massa do bóson de Higgs, cerca de 125 GeV, como medida no LHC, é muito menor do que a massa de Planck, cerca de 10^{19} GeV? Essa diferença levou a comunidade a imaginar a existência de uma nova física, não descrita pelo Modelo Padrão. Uma eventual explicação para isso está baseada

na ideia de supersimetria. Nessa hipótese, para cada partícula existente no Modelo Padrão, há outra partícula supersimétrica associada. Por exemplo, para o elétron existiria o seletron. Essas partículas compartilhariam semelhanças nas suas propriedades quânticas. A existência dessas partículas supersimétricas ajudaria a resolver o problema de hierarquia porque elas seriam responsáveis por milagrosamente cancelarem termos que contribuiriam para uma maior massa do bóson de Higgs e outros observáveis [7]. Contudo, até o momento, mesmo no LHC, não há nenhuma evidência experimental de que essas partículas existam.

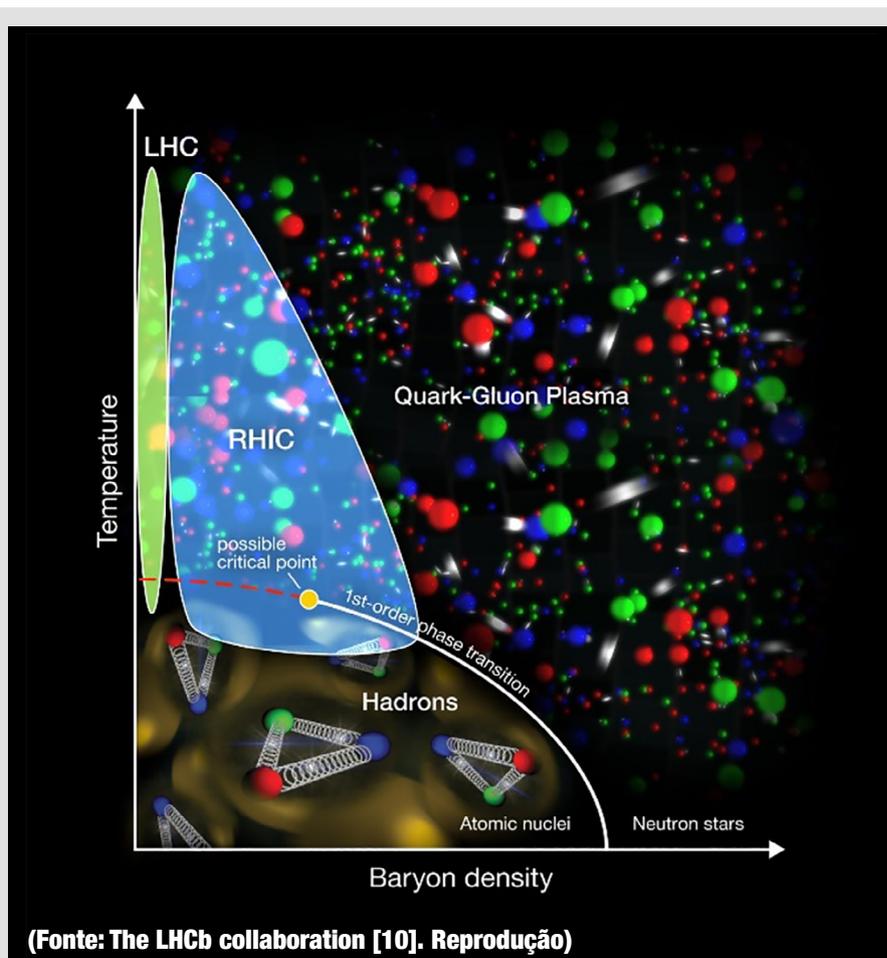


Figura 2. Diagrama de fases da matéria nuclear. Em altas temperaturas, acontece uma transição de fase para um estado chamado plasma de quarks e glúons, que é foco intenso de pesquisa em aceleradores como o RHIC e LHC.

Outras teorias em física poderiam ajudar na resolução desse problema, como a existência de dimensões extras, que poderiam explicar porque a gravidade é tão pouco intensa se comparada à interação fraca. Também há modelos, como a existência de mais de um bóson de Higgs [8], que podem ser caminhos alternativos para explicar essa questão da hierarquia. Certamente, muitas dessas hipóteses serão testadas nos próximos anos e décadas com o advento do HL-LHC (*High-Luminosity LHC*) e outros aceleradores.

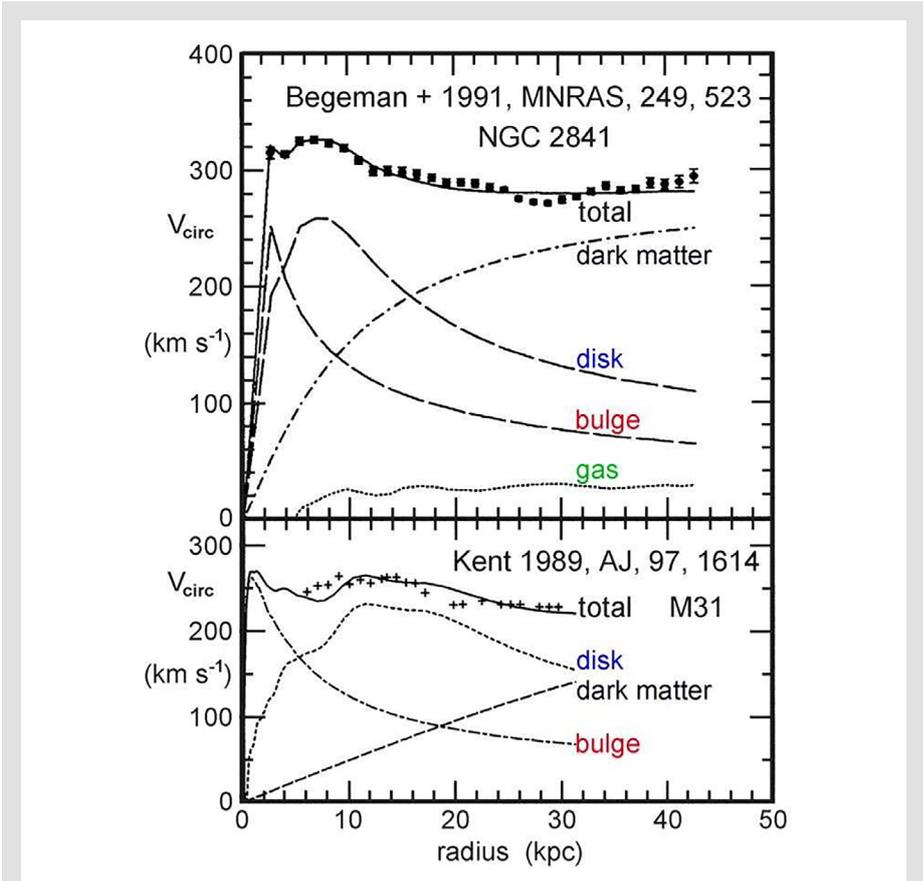
A questão da hierarquia é apenas uma dentre muitas questões que ainda fazem cientistas quebrarem a cabeça em busca de explicações e evidências. Muitas delas têm impacto direto em questões cosmológicas, que remetem às origens do Universo, e são investigadas tanto em experimentos de física de partículas quanto em experimentos em cosmologia.

Uma pergunta intrigante é porque o nosso Universo é predominantemente formado de matéria. A origem do Universo em um evento como o Big Bang sugere que deveríamos ter iguais quantidades de matéria e antimatéria, já que elas são produzidas em pares. Contudo, todas as nossas observações cosmológicas mostram o contrário. Vivemos em um Universo de matéria. Essa questão tem impacto direto no nosso entendimento das interações fundamentais da Natureza já que, em um universo com igual quantidade de matéria e antimatéria, eventualmente, haveria a completa aniquilação dessas partículas restando

apenas energia. O que observamos é que uma pequena porção de matéria, perto de uma parte em um bilhão, conseguiu sobreviver a esse processo de aniquilação, resultando no que observamos atualmente. Desde os anos de 1950 e 1960 [9], diversos experimentos em física de partículas foram capazes de estabelecer que as leis da física não se aplicam igualmente à matéria em relação à antimatéria. Ainda não sabemos as razões para isso ser desse jeito. Nos últimos anos, o experimento LHCb, localizado no LHC, vem produzindo evidências [10] que fornecem caminhos para que algum dia possamos responder a essa questão e, quem sabe,

entender melhor as razões que nos levaram a viver em um Universo predominantemente formado por matéria.

Apesar de todo o avanço no entendimento da estrutura da matéria, as partículas listadas no Modelo Padrão correspondem a uma pequena fração da composição do Universo. Uma série de observações sugere a existência de duas componentes desconhecidas na composição do Universo: matéria e energia escura. Medidas de velocidades de rotação de galáxias (Figura 3) indicam a existência de mais gravidade do que aquela calculada a partir da quantidade de matéria conhecida, sugerindo alguma forma desconhecida



(Fonte: KORMENDY, J.; BENDER, R. (2011) [12]. Reprodução)

Figura 3. Velocidades de rotação para duas galáxias. Essas curvas são evidência de que é necessária a existência de mais gravidade do que aquela obtida a partir de matéria ordinária, indicando a existência de algum tipo de matéria não conhecida, que chamamos de matéria escura.

de matéria, que denominamos matéria escura.

Da mesma forma, várias observações, incluindo as evidências para a aceleração da expansão do Universo [11], indicam a necessidade de assumir a existência de uma nova forma de energia, também desconhecida, que normalmente chamamos de energia escura. De modo geral, para explicar as observações cosmológicas, precisamos de um Universo cuja composição seja formada por aproximadamente 68% de energia escura e 27% de matéria escura. Isso faz com que a matéria comum, aquela descrita pelo Modelo Padrão, corresponda a apenas, aproximadamente, 5% da composição do Universo. O que são matéria e energia escura constitui uma grande questão, tanto do ponto de vista da estrutura microscópica quanto macroscópica, do Universo.

A busca pelo entendimento do que é matéria escura está facilmente mais relacionada às pesquisas em física de partículas por conta da ideia de que esse excesso de gravidade pode estar ligado a algum tipo de partícula elementar ainda não observada. Nesse contexto, são muitos os experimentos que buscam pela observação de algum tipo de partícula que possa explicar as observações cosmológicas. Em um primeiro momento, pensou-se que neutrinos poderiam estar relacionados à matéria escura, já que são muito abundantes no Universo e interagem muito pouco com qualquer outra coisa. Assim, podemos dizer que cerca de 10^{15} neutrinos atravessam nossos corpos a cada segundo e não sentimos absolutamente nada. Contudo, nas últimas décadas,

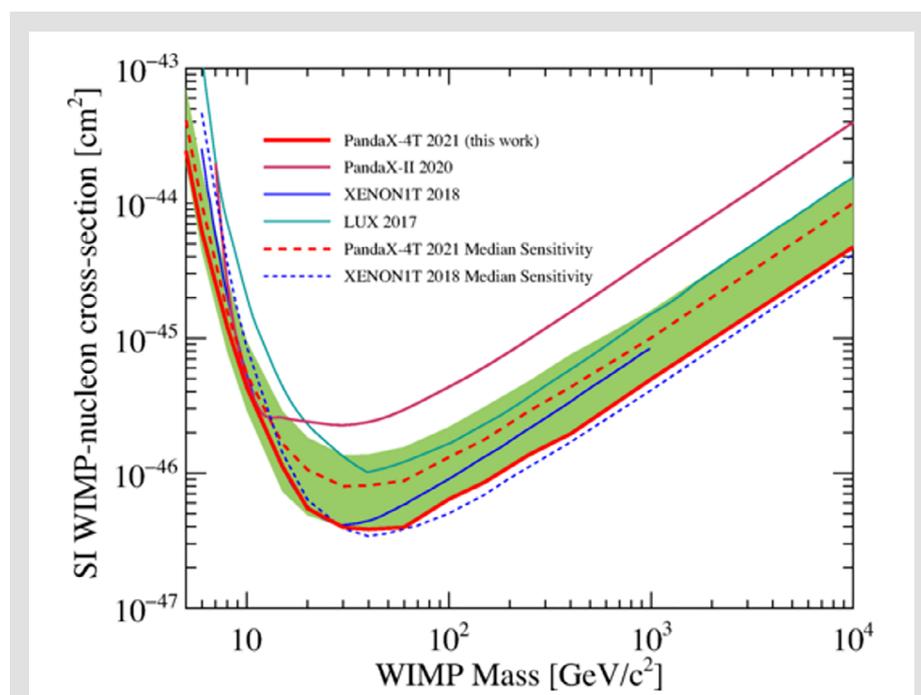
houve um avanço significativo nas pesquisas relacionadas a neutrinos e as estimativas atuais para as suas massas não são capazes de explicar a quantidade de matéria escura observada. Assim, essa ideia foi descartada.

Um dos candidatos favoritos para matéria escura são os WIMP's (*Weakly Interacting Massive Particle*). Essas partículas seriam bastante massivas, perto de 100 vezes ou mais a massa do próton, e interagiriam muito pouco com a luz ou outras partículas conhecidas, sendo boas candidatas a compor a matéria escura. Há um esforço muito grande em detectar WIMP's em uma série de experimentos espalhados pelo planeta. Muitos deles visam à observação dessas partículas a partir da medida dos resíduos de sua aniquilação em galáxias, ou aglomerados de galáxias, mas há também tentativas da medida direta dessas partículas

“A nossa busca pelo entendimento das nossas origens com base nas leis mais fundamentais da natureza ainda está longe de encontrar um desfecho.”

a partir de colisões de WIMP's que chegam ao planeta com outros núcleos em laboratórios. Um terceiro conjunto de experimentos busca pela eventual produção de WIMP's em aceleradores de partículas, que possam ser resultado das colisões entre núcleos em altas energias, como no LHC. O que sabemos é que, sejam quais forem essas partículas, a interação entre elas e a matéria ordinária é extremamente baixa (Figura 4) e a sua observação constitui um grande desafio científico para os próximos anos.

Apesar de todos os avanços no nosso entendimento acerca



(Fonte: MENG, Y.; WANG, Z.; TAO, Y.; ABDUKERIM, A.; BO, Z.; CHEN, W. et al. (2021) [13]. Reprodução)

Figura 4. Limites superiores na interação entre WIMP's e matéria ordinária em função da massa esperada dessas partículas [13].

“A principal característica do ser humano é sua curiosidade, sua busca pelo entendimento do ambiente em que vive. Limitar essa curiosidade a apenas aquilo que tem retorno imediato para a sociedade é privá-la de encontrar caminhos no desconhecido.”

da estrutura da matéria, vimos que ainda há muitas questões em aberto que motivam cientistas a proporem novas ideias e novos experimentos que serão explorados nas próximas décadas. A nossa busca pelo entendimento das nossas origens com base nas leis mais fundamentais da natureza continua longe de encontrar um desfecho. Por que a natureza é desse jeito? Podemos simplificar a resposta com base no princípio antrópico, alegando que o Universo desse modo permitiu, dentre muitos que já existiram ou existam, a presença de seres humanos para observá-lo. Que essas leis físicas dessa forma são essenciais para a existência da nossa vida por conta do acaso. Mas por que é assim? Isso faz com que a física de partículas seja uma área rica e vibrante, atraindo não apenas o engajamento de muitos cientistas, mas também despertando a curiosidade e imaginação da população em geral.

Mesmo assim, há muito debate sobre a necessidade em investimento em ciência básica visando “apenas” satisfazer nossa curiosidade sobre como a natureza funciona. A ideia de que pesquisa científica deve ser algo apenas útil é limitadora. A principal característica do ser

humano é sua curiosidade, sua busca pelo entendimento do ambiente em que vive. Limitar essa curiosidade a apenas aquilo que tem retorno imediato para a sociedade é privá-la de encontrar caminhos no desconhecido. Apesar de não ser o foco dessa área, a pesquisa em física de partículas trouxe mudanças significativas para a humanidade que não poderiam ser previstas. Podemos nos lembrar do desenvolvimento de telas sensíveis ao toque [14] ou o desenvolvimento da WEB [15] como dois exemplos de como a sociedade mudou nas últimas décadas por conta da física de partículas. Há uma anedota em física que gostamos de citar, sobre a imprevisibilidade a longo prazo do impacto na sociedade por conta da ciência básica. Uma vez, Michael Faraday foi questionado por William Gladstone, primeiro-ministro do Reino Unido no final do século XIX, sobre as pesquisas “inúteis” que ele fazia sobre eletricidade. Faraday respondeu que “existe a possibilidade de um dia você vir a cobrar impostos sobre isso”.

* **Alexandre Suaide é professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) e realiza pesquisas na área de colisões com núcleos pesados em energias relativísticas. Esses estudos são realizados através do experimento STAR no RHIC (Relativistic Heavy-Ion Collider), no Laboratório Nacional de Brookhaven (EUA), e do experimento ALICE no LHC (Large Hadron Collider), em CERN (Suíça).**

Referências

1. THOMSON, J. J. Cathode Rays. *Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 44, 1897.
2. RUTHERFORD, E. The scattering of α and β particles and the structure of the atom. *Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 21, 1911.
3. RIESELMANN, K. The Standard Model of particle physics. *Symmetry Magazine Dimensions of Particle Physics*, 2015.
4. ATLAS COLLABORATION. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, v. 716, n. 1, 2012.
5. CMS COLLABORATION. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, v. 716, n. 1, 2012.
6. ATLAS COLLABORATION. A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, v. 812, 2021.
7. KRIPPENDORF, S.; QUEVEDO, F.; SCHLOTTERER, O. Cambridge Lectures on Supersymmetry and Extra Dimensions. *ArXiv: High Energy Physics – Theory*, v. 1, 2010.
8. ARKANI-HAMED N.; COHEN A. G.; GEORGI H. Electroweak symmetry breaking from dimensional deconstruction. *Physics Letters B*, v. 513, n. 1-2, 2001.
9. WU, C. S.; AMBLER, E.; HAYWARD, R. W.; HOPPES, D. D.; HUDSON, R. P. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay. *Physical Review*, v. 105, n. 4, 1957.
10. THE LHCb COLLABORATION. Measurement of matter-antimatter differences in beauty baryon decays. *Nature Physics*, v. 13, 2017.
11. PEEBLES, P. J. E.; RATRA, B. The cosmological constant and dark energy. *Reviews of Modern Physics*, v. 75, n. 2, 2003.
12. KORMENDY, J.; BENDER, R. Supermassive black holes do not correlate with dark matter

- haloes of galaxies. *Nature*, v. 469, 2011.
13. MENG, Y.; WANG, Z.; TAO, Y.; ABDUKERIM, A.; BO, Z.; CHEN, W. et al. Dark Matter Search Results from the PandaX-4T Commissioning Run. *Physical Review Letters*, v. 127, 2021.
14. STUMPE, B.; SUTTON, C. The first capacitive touch screens at CERN. *CERN Courier*, 31 Mar. 2010.
15. CERN. The birth of the Web. Disponível em: <https://home.web.cern.ch/science/computing/birth-web>. Acesso em: 25 ago 2023.