

Resumo simplificado (Press Release)

A física de partículas é uma busca pela resposta de um dos questionamentos mais antigos da humanidade: “do que somos feitos?”. A ideia de que há um conjunto de blocos que se combinam de várias maneiras para constituir tudo que nos cerca data ainda da Grécia antiga, mas a descrição destes blocos evoluiu tremendamente, desde as primeiras propostas de átomos indivisíveis, até a física de partículas moderna, que explica o mundo em termos de quarks (as partículas que formam os prótons e nêutrons), léptons (como o elétron) e bósons (como o fóton). O Modelo Padrão da física de partículas, nossa descrição atual do mundo em termos dessas partículas elementares, é provavelmente um dos maiores feitos da física moderna. Avançamos muito nas últimas décadas, muitas perguntas foram respondidas e novas foram feitas.

A investigação dos constituintes da matéria é ao mesmo tempo sofisticada e rudimentar. De certa forma, é semelhante a jogar um computador contra a parede e, pelas peças que caem no chão, tentar descobrir como ele funciona. A diferença é que no mundo microscópico as peças que sobram nem sempre são peças que estavam lá em primeiro lugar. No meio das grandes engenhosidades que a humanidade desenvolveu para estudar a si mesma – afinal, no fundo, somos um punhado de átomos tentando entender outro – estão os aceleradores de partículas. Com o advento do RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*, desde 2000) e do LHC (o *Large Hadron Collider*, que começou a operar em 2008) a nossa busca por respostas entrou em uma nova era: as energias disponíveis para colidir partículas umas contra as outras e entendê-las melhor se tornaram suficientes para que novas formas de matéria possam se formar e ser estudadas nos colisores.

Dentre esses avanços, foi descoberto que colisões de altíssimas energias de grandes núcleos (íons pesados) parecem formar, durante um breve momento logo após a colisão, um estado extremo da matéria, formado não pelos prótons e nêutrons que estamos acostumados, mas por uma sopa dos quarks e glúons que formam essas partículas. Esse estado da matéria é conhecido como o Plasma de Quarks e Glúons (QGP, do inglês *Quark Gluon Plasma*). Ao que tudo indica, esse plasma também estava presente no Universo em seus momentos iniciais de vida, durante os primeiros microssegundos após o Big Bang. Os dados coletados ao longo dos últimos anos, contudo, levantam um dilema interessante: o QGP que se forma na colisão

de íons pesados é extremamente denso e desequilibrado, mas parece ser capaz de redistribuir energia rapidamente, competindo com sua rápida expansão e formando praticamente *uma gota de um líquido* – talvez a gota mais quente e menos viscosa que a humanidade já presenciou. Entender como essa matéria fantástica produzida na colisão rapidamente se equilibra e forma um fluido tem sido um dos objetivos centrais da comunidade de íons pesados por um bom tempo. Embora uma descrição completa ainda não esteja disponível, um progresso significativo tem acontecido. São anos e anos de estudo dedicados a menos de 10^{-23} segundos.

Esta tese se destina justamente a estudar os instantes iniciais após uma colisão de íons pesados, com foco no chamado problema da termalização. Como estes núcleos se comportam de sua colisão até se tornarem um fluido (atingindo o chamado regime hidrodinâmico), e como a temperatura se comporta conforme isso acontece? Sabemos hoje que a matéria nuclear passa por diferentes etapas durante a colisão, que são descritas de maneiras diferentes. Em altas energias, o número de glúons dentro dos prótons e nêutrons cresce muito, e os núcleos sofrem contração por causa de efeitos relativísticos. Logo antes e logo após a colisão, podemos pensar nos núcleos como panquecas formadas principalmente por glúons, que carregam carga de cor – esse estado da matéria é conhecido como um condensado de vidro de cor (CGC, do inglês *color glass condensate*). Essas panquecas se atravessam e interagem, formando um emaranhado que rapidamente expande e agora pode ser descrito por quarks e glúons praticamente soltos, mas que interagem fortemente em função da alta densidade. O comportamento desses quarks e glúons soltos, conhecidos coletivamente como *pártons*, é descrito pela teoria cinética.

A partir daí, glúons de grande energia emitem mais e mais glúons de energia menor, que interagem entre si e formam um banho térmico: o sistema pode ser pensado como um conjunto de poucos pártons de grande energia (que ainda carregam a maior parte da energia do sistema), viajando por uma piscina de um grande número de pártons de menor energia. Esses poucos glúons mais energéticos vão perdendo energia conforme viajam pelo meio, depositando essa energia no meio e fazendo ele aquecer, até que todo o sistema se torne um fluido quente. Nesta tese, foi proposta uma abordagem analítica para descrever como esses glúons mais energéticos perdem energia durante sua viagem pelo meio, com o objetivo de entender melhor este processo. Para isso, mostramos que é importante levar em conta como o meio aquece durante a sua expansão. A Fig. A a seguir apresenta como a distribuição dos glúons mais energéticos se comporta conforme ela viaja por diferentes meios, conforme o tempo passa. A linha azul cheia representa um glúon viajando por um meio estático (que não expande e não esquenta). A linha verde representa o glúon viajando por um meio que expande, mas sem ser aquecido de maneira significativa (o que na realidade faria o meio esfriar conforme expande). O ponto chave é que, em um meio que é aquecido durante a expansão (linha pontilhada laranja), a distribuição “morre” mais rapidamente: nossa análise confirma que o aquecimento do meio torna o processo de redistribuição de energia mais rápido.

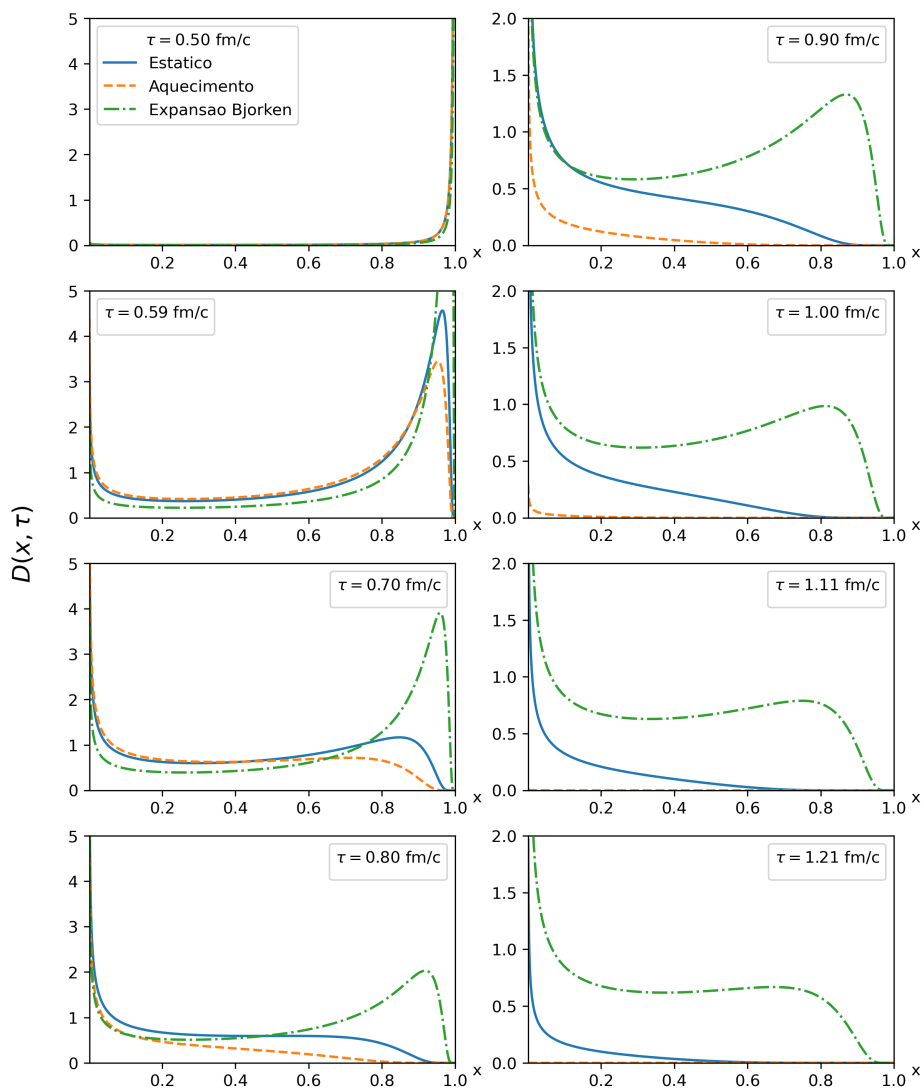


Fig. A: Distribuição de glúons hard em vários instantes de tempo τ (fm/c), considerando meios com diferentes características. A distribuição está inicialmente acumulada em $x = 1$ e se propaga para $x \rightarrow 0$ conforme é amortecida. Em um meio com expansão longitudinal uniforme (expansão de Bjorken) a evolução é mais lenta que em um meio estático. Contudo, considerando também que o meio é aquecido pela energia depositada nele conforme ele expande, a evolução se torna mais rápida do que em um meio estático.

No modelo simplificado que apresentamos, também foi possível estimar como ocorre a produção de entropia durante a colisão – que não só é enorme como é incrivelmente rápida: a maior parte da entropia é produzida logo durante os instantes iniciais da colisão, antes do início do regime hidrodinâmico. O comportamento líquido do QGP então se mantém durante um tempo, conforme o plasma expande e esfria, até que a densidade de energia fica tão pequena que o fluido se desfaz em um gás de hádrons (conjuntos de quarks e glúons), que colidem algumas vezes entre si e depois viajam livremente até os detectores.

Explicar como um sistema praticamente equilibrado de quarks e glúons se forma tão rapidamente, a partir do estado inicial fora do equilíbrio formado na colisão, tem sido um dos temas centrais da comunidade de íons pesados nos últimos tempos. Um progresso tremendo aconteceu nos últimos anos, e agora extensas e custosas simulações computacionais estão disponíveis para descrever as diferentes etapas da evolução. Uma descrição completa e realista de toda essa evolução, contudo, ainda está em aberto, mas esperamos que nosso trabalho nos deixe um pouco mais perto desse objetivo.