

High-order multiphoton Thomson scattering

Nature Photonics (26 JUNE 2017).

doi:10.1038/nphoton.2017.100

Electron–photon scattering, or Thomson scattering, is one of the most fundamental mechanisms in electrodynamics, underlying laboratory and astrophysical sources of high-energy X-rays. After a century of studies, it is only recently that sufficiently high electromagnetic field strengths have been available to experimentally study the nonlinear regime of Thomson scattering in the laboratory. Making use of a high-power laser and a laser-driven electron accelerator, we made the first measurements of high-order multiphoton scattering, in which more than 500 near-infrared laser photons were scattered by a single electron into a single X-ray photon. Both the electron motion and the scattered photons were found to depend nonlinearly on field strength. The observed angular distribution of scattered X-rays permits independent measurement of absolute intensity, *in situ*, during interactions of ultra-intense laser light with free electrons. Furthermore, the experiment's potential to generate attosecond-duration hard X-ray pulses can enable the study of ultrafast nuclear dynamics.

Em nossa **seção de resultados de destaque da semana**, assinalo o retorno ao **Espalhamento Delbrück**: este artigo publicado na PRL do último dia 17 MAIO 2017 aponta para um especial procedimento para se ter uma medida precisa do espalhamento fóton-fóton, isolando-o com independência de outros processos, o que, do ponto de vista experimental, é tarefa altamente não-trivial. O paper q merece a atenção da semana segue abaixo:

"Possible precise measurement of Delbrück scattering using polarized photon beams"

J. K.Koga e T. Hayakawa ;

Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 204801 – 17 May 2017.

Em nossa **seção de resultados de destaque da semana**, assinalo e anexo o PDF de um interessante paper publicado pela **Nature-Physics** no dia 1-ro MAI. Trata-se do mais **recente limite na interação axion-fóton** estabelecido pelo CERN Axion Solar Telescope (a chamada **CAST Collaboration** do CERN). O modelo teórico é justamente aquele que trabalhamos em nossa aula do curso de EM do dia 5 MAIO 2017. Em nossa aula do dia 12, próxima 6'a-f,

estaremos continuando com este modelo e trarei a discussão deste artigo:

"New CAST limit on the axion-photon interaction",

CAST Collaboration

*publicado em **DOI: 10.1038/NPHYS4109.***

Fica como sugestão de tema para Essay do curso e há questões de pesquisa que, caso haja interesse, podemos desenvolver a partir deste paper. Vou levá-las em nossa próxima aula do curso de EM.

Photonic QHE e níveis de Landau para fótons.

Na nossa agendinha científica, deixo, aqui anexado, um interessantíssimo trabalho publicado na **Nature do dia 8 JUN 2016:**

níveis de Landau para fótons que protagonizam um efeito do tipo Hall Quântico, evidenciando, através da fotônica, um comportamento sempre mais próximo da matéria.

DOI: 10.1038/nature17943.

Surpresa? Não! Basta retornarmos a um paper q havia sido objeto de discussão em cursos nossos anteriores ("Eletromagnetismo" e "A Eletrodinâmica de Partículas Neutras"): a possibilidade do fóton desenvolver quiralidade ao ser sujeito a uma força de Lorentz (mesmo sendo eletricamente neutro):

"Effective magnetic fields for stationary light"

Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 033903.

(Este trabalho recente da Nature pode ser objeto de um Essay de final de curso. Se houver alguém interessado, podemos discutir o projeto.)

03 ABR 2016: Fótons com vida-média de 2.5 ms.

Em nossa agendinha científica, deixo a VCs (**aqui anexado!**) o interessante PRL do dia 29 MAR passado, em q se relata a **produção de fótons com vida média já na faixa dos milisegundos**; mais exatamente, chegou-se a **2.5 ms**, contra os **210 ps** e os **100 μ s** de experimentos anteriores. Este é um super-resultado para experimentos que visam estudar propriedades

magnéticas fundamentais dos fótons, como o seu paramagnetismo, por exemplo; a isto, se acrescenta a importância nos estudos da Informação Quântica.

Para a nossa **agendinha científica**, assinalo:

a **Nature/Physics do dia 31 AGO 2016** publicou um interessante resultado experimental sobre a detecção de um **regime não-linear** para o espalhamento Compton em laboratório, com lasers (não foi evidência em evento astrofísico!) Em nossa aula de QEDbSM da última 6'a-f, 11 SET, em discussões que surgiram, conversamos um bom tempo sobre aspectos de não-linearidade em conexão com primeiros princípios da interação eletromagnética e a eventual produção de fótons massivos. Não há qualquer princípio mais básico que proíba não-linearidade em cenário Abelian.

Aliás, se pensarmos em 5 dimensões, a Eletrodinâmica é, por essência, não-linear. Conseguimos manter a interação eletromagnética (sem alterar o seu carácter Abelian) linear até 4D; a partir daí, a não-linearidade se torna um "must". É necessário, então, se desnaturalizar a associação entre Abelianidade e linearidade!

Anexo a este mail o PDF do paper da Nature com o experimento:

"Anomalous non-linear X-ray Compton scattering"

Nature - Physics, 31 AGO 2016.

doi: 10.1038/NPHYS3452

O trabalho está no mood de nossos cursos de EM e de QEDbSM. Pode ser tema para um interessante Essay de final de curso.

Ainda neste cenário, havia comentado na aula do curso de QEDbSM sobre um paper muito estimulante, publicado em 2013 na PRL (anexo-o aqui também!), onde se questiona a estabilidade de um fóton massivo e se busca um limite superior para a sua meia-vida. É um aspecto que passa também pela consideração de possíveis efeitos não-lineares. Um outro tema de ricas matizes para um Essay.

Na nossa agendinha de resultados relevantes, um trabalho que não assinalo mês de Maio passado: um segundo round de **observação de monopolos magnéticos em um meio dominado por um campo quântico**; desta vez, um **Condensado de Bose - Einstein (BEC) de spin-1**.

Os autores descrevem e realizam um experimento onde fica evidenciada a formação de uma configuração de monopolomagnético. O round anterior, em 2010, foi a formação e detecção de monopolos em sistemas de spin ice e, em 2013, a detecção de correntes destes monopolos também nos spin ices.

O presente resultado é um elemento a mais em nossa lista de avanços no fronte eletromagnético, que vêm sendo viabilizados através de medidas sempre mais precisas em Física de Partículas e com as novas formas de estados da matéria condensada.

"Observation of isolated monopoles in a quantum field"

M. W. Ray et al.

Science 348 (2015) 544,

01 MAY 2015.

A nossa comunicaçãozinha científica da semana nos traz de volta ao **Physical Review Letters**, Edição do dia **23 JUN 2015**.

O paper

"Electron-Phonon interactions, metal-insulators transitions, and holographic massive gravity",

M. Baggioli and M. Pujolàs

Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 251601

mostra a existência de uma dualidade holográfica entre materiais (realidade!) e a gravidade massiva (virtualidade!), associando o potencial dos **grávitons** à dinâmica de **fônons** que se ligam a **elétrons** para formar os conhecidos modos coletivos conhecidos como **pólarons**, sendo estes **pólarons** os responsáveis pela indução da transição metal-isolante.

No contexto de nossas discussões eletromagnéticas, assinalo a VCs o interessante trabalho desta semana: a construção, em laboratório, de **wormholes magnéticos**, resultado que se buscava desde 2007, com a proposição teórica inicialmente publicada no

Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 183901.

O paper, cujo PDF está **aqui anexado**, é o artigo

"A Magnetic Wormhole"

publicado nos

**Scientific Reports 5 (2015) 12488
doi: 10.1038/srep12488.**

Mais uma vez, como em tantos outros trabalhos citados, temos no cenário eletromagnético a realização de idéias de uma Física mais fundamental; no presente caso, a Relatividade Geral e dimensões extra. Deixo-o também como um bom tema para um possível Essay de final de curso e um estímulo a um atual objeto de pesquisa.

A nossa comunicaçãozinha científica da semana nos traz de volta ao **Physical Review Letters**, Edição do dia **19 JUN 2015**, e o resultado não poderia ser mais puro-ingrediente: a **força eletrostática**. Em tempos de LHC, Planck e WMAP, a força eletrostática ainda nos tem muito a revelar. O paper

**"Accurate extraction of the electrostatic force by a voltage-pulse force spectroscopy",
E. Inami and Y. Sugimoto
Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 246102**

propõe um método experimental para se mensurar, sem a interferência de outras forças e com notável precisão, a força eletrostática entre estruturas carregadas. Este resultado pode trazer uma significativa contribuição para uma análise microscópica mais refinada das forças de atrito, problema ainda muito aberto e longe de ser trivial. Por outro lado, esta refinada técnica pode nos ajudar

a ter medidas de precisão para efeitos da interação de spin combinados com a dependência na distância para o caso de portadores de carga não-convencionais, questão de vasto interesse em todas as áreas da Física meso- e microscópica.

Na nossa agendinha de resultados relevantes, chamo a atenção para o **Physical Review Letters do dia 11 JUN 2015**. Um paper bastante relevante:

"Emergent space-time supersymmetry in 3-dimensional Weyl semimetals and 2-dimensional Dirac semimetals",

S. - K. Jian et al.

Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 237001.

O trabalho revela a existência de uma estrutura supersimétrica nestes novos materiais, recentemente previstos e construídos:

os chamados **semimetais de Weyl e semimetais de Dirac**.

Os semimetais caracterizam-se, de modo genérico, pela inexistência de um gap de energia entre as bandas de valência e condução (os estados no topo da banda de valência misturam-se aos estados na base da banda de condução), de tal forma que a

densidade de estados na superfície de Fermi é considerada desprezível. Isto não é novo. A novidade está nos chamados semimetais de Dirac e de Weyl.

A **Science de 21 FEV 2014** publicou o trabalho

"Discovery of a 3-dimensional topological Dirac semimetal Na₃Bi"

Z. K. Liu et al.

Science 343 (2014) 864

Semimetais topológicos de Dirac 3D são estados topológicos da matéria que correspondem a um grafeno 3D - 3D no sentido espacial - com férmions tipo-Dirac no bulk, isto é, férmions com relação de dispersão linear em 3D espaciais, diferentemente dos férmions de Dirac do grafeno ou da superfície dos isolantes topológicos, que são, estes sim, férmions tipo-Dirac planares.

Semimetais de Dirac 2D são materiais planares da categoria semimetal com férmions de Dirac planares caracterizados por uma relação de dispersão também linear.

Mais recentemente, no dia **16 FEV 2015**, os arXivs apresentaram o paper

"Discovery of the Weyl semimetal Ta As",

H. M. Weng et al.

arXiv: 1502.04684 [cond-mat . mtrl - sci]

(ainda não o encontrei em forma publicada!).

Os semimetais topológicos de Weyl 3D são também materiais como uma espécie de grafeno com 3 dimensões espaciais, mas que quebram a simetria de reversão temporal ou a chamada simetria de inversão de cristais. Os elétrons dos semimetais de Weyl comportam-se como férmions de Weyl, não os férmions de Weyl no sentido da quiralidade em dimensões pares, mas com respeito a uma espécie de quiralidade que os autores descrevem no artigo.

O Efeito Breit – Wheeler 80 anos depois:

A photon–photon collider in a vacuum hohlraum

Nature Photonics 8 (18 MAY 2014).

doi:10.1038/nphoton.2014.95

The ability to create matter from light is amongst the most striking predictions of quantum electrodynamics. Experimental signatures of this have been reported in the scattering of ultra-relativistic electron beams with laser beams^{1, 2}, intense laser–plasma interactions³ and laser-driven solid target scattering⁴. However, all such routes involve massive particles. The simplest mechanism by which pure light can be transformed into matter, Breit–Wheeler pair production ($\gamma\gamma' \rightarrow e^+e^-$)⁵, has never been observed in the laboratory. Here, we present the design of a new class of photon–photon collider in which a gamma-ray beam is fired into the high-temperature radiation field of a laser-heated hohlraum. Matching experimental parameters to current-generation facilities, Monte Carlo simulations suggest that this scheme is capable of producing of the order of 10^5 Breit–Wheeler pairs in a single shot. This would provide the first realization of a pure photon–photon collider, representing the advent of a new type of high-energy physics experiment.

Para a nossa agendinha de importantes resultados recentes, assinalo o paper,

"Magnetic Monopoles: Quenching the fire in spin ice"

H.-B. Braun

Nature Physics 10 (19 JAN 2014) 88.

O resultado de grande relevo é a possibilidade de se reforçar a produção abundante de monopolos e, através de um campo magnético, estes estabelecerão uma corrente (magnética!). Mais um grande passo na Teoria do Magnetismo e a materialização de mais uma das antecipações (matemáticas!) do Vovô Dirac.

Seguindo a nossa tradição dos mails dominicais em períodos de cursos, segue a agendinha de importantes resultados:

destaco o anúncio da **observação de monopólos magnéticos tipo-Dirac** (não os monopólos magnéticos tipo-partícula muito massiva, os monopólos de 't Hooft - Polyakov!) em campos magnéticos sintetizados a partir de condensados de Bose-Einstein. Estes monopólos são os primeiros a serem detectados em um ambiente criado por

genuínos campos quânticos. O resultado encontra-se reportado na Nature do dia 30 JAN passado:

"Observation of Dirac Monopoles in a Synthetic Magnetic Field"

M. W. Ray et al.

Nature 505 (30 JAN 2014) 657.

As configurações de monopólo magnético detectadas anteriormente, em 2009, nos sistemas chamados gelos de spin não apresentam esta particularidade, isto é, de aparecerem em um ambiente determinado por campos quânticos.

Um outro destaque:

aproveito a ocasião para anunciar a VCs q o resultado da mais recente medida do **momento de dipólo elétrico do elétron**, q levou à exclusão de uma série de modelos de Física além do Modelo-Padrão, foi aceito pela Science e publicado no último dia 17 JAN. Havíamos citado este trabalho em um de nossos mails do mês de NOV 2013, quando o paper havia sido veiculado através dos arXivs, ainda em forma de preprint:

"Order of Magnitude Smaller Limit on the Electric Dipole Moment of the Electron"

Science 343 (17 JAN 2014) 269.

Na agenda de resultados da semana, cito como muito significativo o anúncio da medida mais atual e precisa para o **MOMENTO DE DIPOLO ELÉTRICO (EDM)** do **ELÉTRON**, medida que **melhora por um fator 12** o resultado de 2011, ainda vigente no PDG.

O EDM do elétron, designado por d_e , é apenas conhecido através de limites superiores, e o status atual é como segue abaixo:

d_e previsto pelo Modelo-Padrão $< 10^{-39} e \cdot \text{cm}$,

d_e no PDG (medida de 2011) $< 10.5 \times 10^{-28} e \cdot \text{cm}$,

d_e atual (medida de 2013) $< 8.7 \times 10^{-29} e \cdot \text{cm}$.

Esta nova medida foi realizada pela colaboração ACME e o resultado encontra-se no paper que anexo ao final desta mensagem:

arXiv: [1310.7534](https://arxiv.org/abs/1310.7534) [phys.atom-ph].

Modelos e teorias além do Modelo-Padrão tocam fortemente no EDM do elétron, prevendo valores

muito maiores do que o valor calculado pelo Modelo-Padrão. Modelos supersimétricos, por exemplo, chegam a prever

$$d_e < 10^{-30} e \cdot \text{cm} \text{ (SUSY);}$$

portanto, 9 ordens de grandeza acima do que prevê o Modelo-Padrão, mas, ainda assim, abaixo do upper bound de 2013. Entretanto, este resultado recente coloca na barra de ferramentas uma série de modelos que pretendem descrever física além do Modelo-Padrão, para os quais d_e chega a ser na faixa dos $10^{-26} e \cdot \text{cm}$

O EDM do elétron, seja no Modelo-Padrão que nas demais extensões, aparece como efeito radiativo (efeito de teoria quântica de campos), a partir de correções de 1-loop e corresponde a um efeito que viola a simetria CP. A sua medida fornece, então, um bom vínculo para a física com violação de CP. Na prática, um EDM não-trivial reflete uma assimetria na distribuição da carga do elétron em torno de seu spin. Tudo que o Vovô Dirac já dizia em 1931. Em 1982, no ICTP, ele deixou bem claro que o elétron deveria, algum dia, vir a se mostrar composto. E ele tinha os candidatos a partículas estruturantes do elétron: os singletons, aos quais chegou em 1963.

Eis mais uma questão de grande atualidade para a área de Campos, Partículas e Interações Fundamentais!

Um belo paper para colocar bem a questão da importância e do cálculo do EDM do elétron:

"The electric dipole moment of the electron",

**Rev.Mod.Phys. 63 (1991) 313-340 e Erratum:
ibid. 64 (1992) 633,**

Werner Bernreuther et al.

Esta semana não fica no vazio de um comunicado de impacto para a Física:

**uma versão do Efeito Hall Quântico (QHE)
realizado com LUZ, e não com elétrons.**

De novo, como apresentamos há algumas semanas atrás com os nós de luz, é a matéria topologicamente organizada que está em clara evidência: dos cristais líquidos aos sistemas magnéticos e ao QHE, a Topologia tem-se mostrado crucial para a descrição e compreensão dos sistemas muito especiais.

No trabalho

"Imaging Topological Edge States in Silicon Photonics",

publicado na

Nature Photonics, versão on-line do dia **20 OUT 2013**,

M. Hafezi et al. mostram como construir estados topológicos de borda para fótons em sistemas 2-dimensionais, chegando, assim, a uma versão fotônica do QHE.

É um outro grande resultado na direção da engenharia da luz e, mais uma vez seguindo o famoso artigo do Vovô Dirac de 1939 sobre a relação entre Matemática e Física, este trabalho abre as portas para que a Topologia possa levar a previsões de novos desdobramentos da matéria topológica em sistemas fotônicos. É a Matemática, menos do que uma simples linguagem e mais como uma sonda de investigação.

Na agendinha científica, chamo a atenção para um paper muitíssimo significativo:

"Tying Knots in Light Fields",

publicado no dia **10 OUT 2013** na

Phys. Rev. Lett. .

Os autores constróem uma **nova classe** de soluções analíticas de **campo nulo** para as equações de Maxwell no vácuo. [Acrescento aqui que a atribuição **soluções de campo nulo** refere-se àquelas soluções não-triviais em que os invariantes relativísticos

$$(\mathbf{E}^2 - c^2 \mathbf{B}^2) \text{ e } (\mathbf{E} \cdot \mathbf{B})$$

são ambos **nulos**, como ocorre com as ondas eletromagnéticas livres que se propagam no vácuo.]

O aspecto relevante das soluções que encontram é que as linhas de campos de **E** e **B** formam laços com nós, com topologia não-trivial, como vórtices. Estas soluções são construídas utilizando-se polinômios complexos sobre a esfera S^3 , o que traz para a Física novas aplicações de um campo bem abstrato da Maths, a **Topologia Algébrica**.

No link abaixo, as belas figuras com as linhas de campo aqui mencionadas:

http://www.nature.com/nphys/journal/v6/n2/fig_tab/nphys1504_F1.html

Esta questão já havia sido objeto de um paper da **Nature** de 17 JAN 2010:

"Isolated optical vortex knots"

Nature Physics 6 (2010) 118.

O presente artigo do PRL apresenta novas soluções não descritas no trabalho da Nature de 2010. Tais soluções não são meras ilustrações de caráter matemático; podem ser realizadas experimentalmente, através de hologramas que direcionam o fluxo da luz, como explicam os autores em seu artigo.

Esta forte aliança entre uma matemática abstrata (a Topologia Algébrica), a Teoria Eletromagnética de Maxwell e Ótica Experimental abre uma nova direção no campo da fotônica, com muitas vertentes de aplicações imediatas.

É muito gratificante se constatar que a Eletrodinâmica Clássica pode ainda nos revelar tantos novos desafios, no âmbito dos quais uma matemática mais abstrata desempenha papel crucial.

A teoria física está aí; são as "sondas da matemática" a permitir novas explorações e detecções. Neste sentido, chamo a atenção de VCs para aquele famoso paper do Prof. Dirac de 1939, onde explora as relações de afinidade eletiva entre a Matemática e a Física. Para aqueles que ainda não o leram, anexo aqui o PDF desta obra-prima da Literatura Diraqueana.

A Matemática, longe de ser apenas a linguagem da Física, pode se tornar um poderoso instrumento de investigação, revelando aspectos e fenômenos novos (como estes vórtices óticos). Foi exatamente assim que o Prof. Dirac chegou à existência da anti-matéria, antecipando a descoberta experimental da mesma.

A bela e luminosa notícia da semana: **Nature** do dia 25 SET 2013:

"Attractive photons in a quantum non-linear medium"

publicado on-line na **Nature/Letters do dia 25 SET 2013.**

É o trabalho experimental de um grupo do **Harvard-MIT Centre for Ultracold Atoms**, que mostra a possibilidade de formação de estados ligados de

puros fótons. A idéia é produzir um meio com átomos de Rydberg, no qual a luz se comporta como formada de fótons massivos e a não-linearidade que o meio estabelece favorece a atração entre os fótons, que se ligam em estados de 2 fótons. A interação que aglutina os fótons é mediada pelos átomos do meio. Pode-se, assim, falar de um **novo estado - nunca produzido antes - da matéria**. É uma notícia muitíssimo importante para a Física e que deverá nos levar à abertura de novos caminhos na compreensão da relação radiação - matéria.

O resultado interessante a ser reportado esta semana decorre do paper da Nature de ABR 2010, quando defeitos do tipo monopólios magnéticos foram detectados em gelos de spin artificiais:

Nature Physics 6 (10 APR 2010) 359.

No artigo desta semana, relata-se, pela 1ª vez, sobre a formação de nano-cristais de cargas magnéticas em gelos de spin. O resultado merece especial destaque e a referência é dada abaixo:

Nature 500 (29 AUG 2013) 553.