

**Закрученные фотоны и электроны**  
**как новые инструменты**  
**исследований**

**в физике атомов, ядер и**  
**элементарных частиц**

**Валерий СЕРБО**

*Новосибирский государственный университет*



Vortex in water

## План:

1. Введение
2. Закрученные частицы
3. Фотовозбуждение атомов, фотоэффект и радиационная рекомбинация с участием закрученных фотонов и электронов
4. Комptonовское рассеяние закрученных фотонов
5. Рассеяние релятивистских закрученных электронов на атомах
6. Излучение Вавилова-Черенкова закрученными электронами
7. Заключение

Этот доклад основан на работах, выполненных совместно с коллегами из университетов **Гайдельберга, Йены, Миссури, Льежа, Вашингтона, Лисабона и Петербурга:**

- [1] H. M. Scholz-Marggraf, S. Fritzsche, V. G. Serbo, A. Afanasev, A. Surzhykov. Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms. [Physical Review A 90 \(2014\) 013425](#)
- [2] A. Surzhykov, D. Seipt, V.G. Serbo, S. Fritzsche. Interaction of twisted light with many–electron atoms and ions. [Physical Review A 91 \(2015\) 013403](#)
- [3] A.A. Peshkov, V.G. Serbo, S. Fritzsche, A. Surzhykov. Absorption of twisted light by mesoscopic atomic target, [Sub. to Physics Scripta](#)
- [4] O. Matula, A.G. Hayrapetyan, V.G. Serbo, A. Surzhykov, S. Fritzsche. Atomic ionization of hydrogen-like ions by twisted photons: angular distribution of emitted electrons, [J. of Physics B 46 \(2013\) 205002](#)
- [5] O. Matula, A.G. Hayrapetyan, V.G. Serbo, A. Surzhykov, S. Fritzsche. “Radiative capture of twisted electrons by bare ions”. [New J. of Physics 16 \(2014\) 053024](#)

[6] U.D. Jentschura, V.G. Serbo “Generation of High–Energy Photons with Large Orbital Angular Momentum by Compton Backscattering”.

Physical Review Letters 106 (2011) 013001

[7] U.D. Jentschura, V.G. Serbo “Compton Upconversion of Twisted Photons: Backscattering of Particles with Non-Planar Wave Functions”.

European Physical Journal C 71 (2011) 1571

[8] I.P. Ivanov, V.G. Serbo “Scattering of twisted particles: extension to wave packets and orbital helicity”,

Physical Review A 84 (2011) 033804

[9] V.G. Serbo, I. Ivanov, S. Fritzsche, D. Seipt, A. Surzhykov “Scattering of twisted relativistic electrons by atoms”, Physical Review A 92 (2015) 012705

[10] I.P. Ivanov<sup>1</sup>, V.G. Serbo, V.A. Zaytsev. Quantum calculation of the Vavilov-Cherenkov radiation by twisted electrons.

ArXiv:1602.05099

# 1. ВВЕДЕНИЕ

В оптике хорошо известны **два** типа волн: плоские волны и сферические волны.

**Плоская волна** — это стационарное состояние с определённой энергией  $\omega$ , импульсом  $\mathbf{k}$  и спиральностью  $\lambda$ .

**Реализация** → **лазерная вспышка.**

**Сферическая волна** — это стационарное состояние с определённой энергией  $\omega$ , полным моментом импульса  $J$ , проекцией полного момента импульса  $J_z = m$  и чётностью  $P$ .

**Реализация** → **излучение при атомных и ядерных переходах**

**(здесь и далее  $\hbar = 1$  and  $c = 1$ )**

Гораздо менее известны  
цилиндрические или бесселевы волны.

Бесселева волна — это стационарное состояние  
с определённой энергией  $\omega$ ,  
продольным импульсом  $k_z$ ,  
проекцией полного момента импульса  $J_z = m$   
и спиральностью  $\lambda$ .

Конечно, такие состояния должны обладать  
**ОРБИТАЛЬНЫМ МОМЕНТОМ ИМПУЛЬСА (ОМИ)**.

Коротко такие состояния называются

**“ЗАКРУЧЕННЫЕ ФОТОНЫ  
(TWISTED PHOTONS)”**.

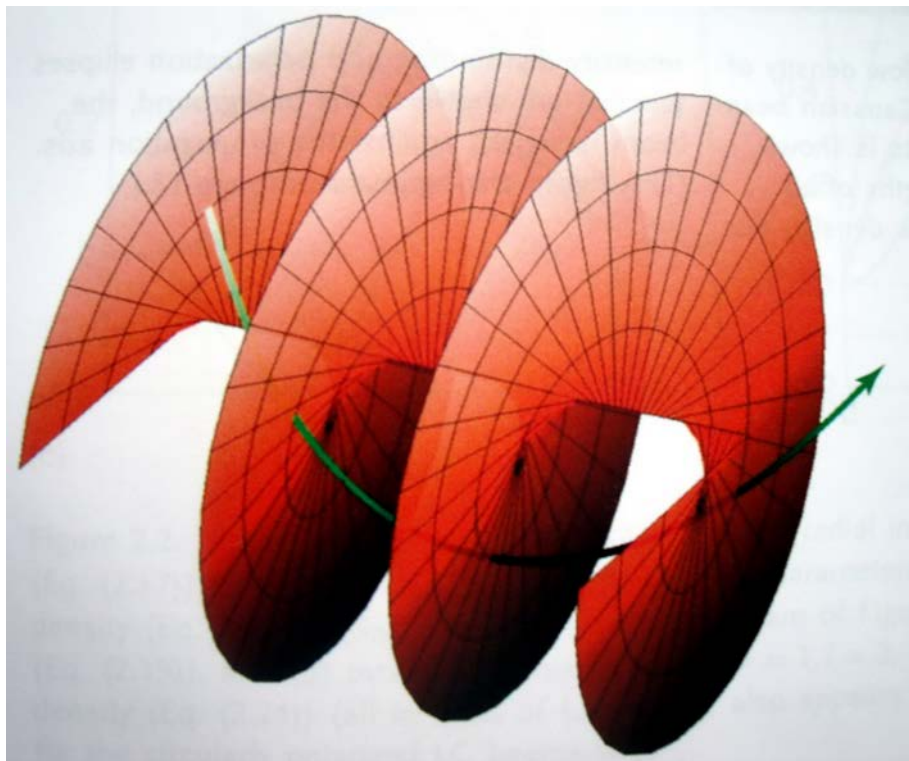
**В лазерной оптике в последние двадцать лет с ними связано одно из интересных направлений исследований.**

Экспериментально реализованы состояния с проекцией момента импульса вплоть до  $m = 200$

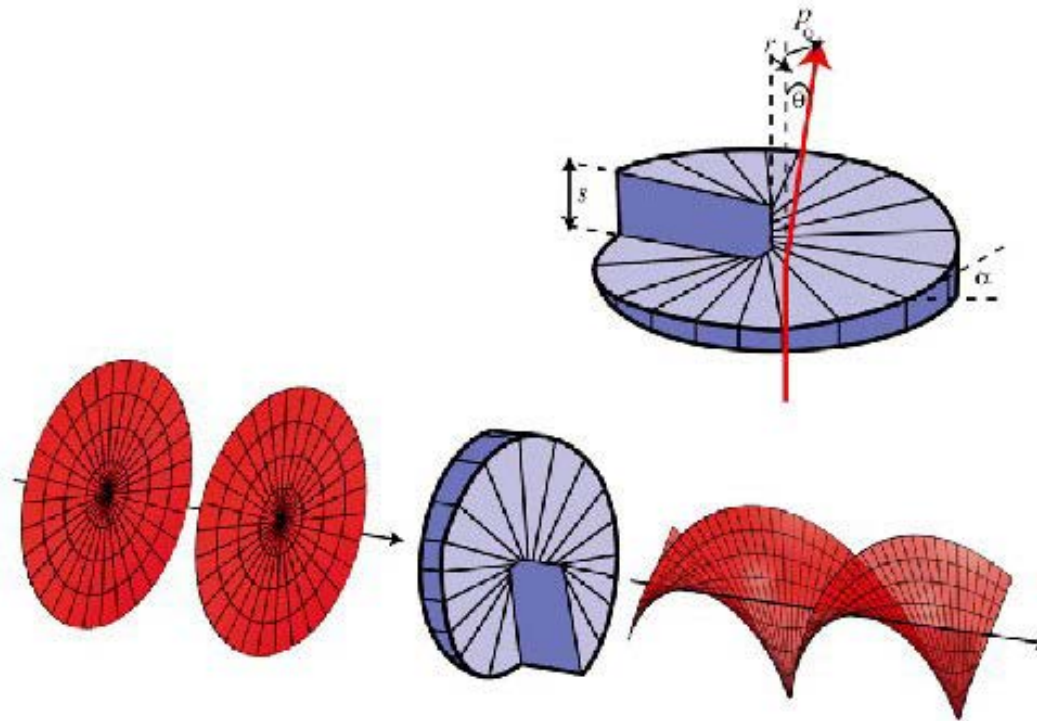
J. E. Curtis, B. A. Koss, and D. G. Gries, Opt. Commun. **207**, 169 (2002).

Волновой фронт таких состояний **вращается вокруг оси распространения**, а вектор Пойнтинга выглядит как **штопор**:



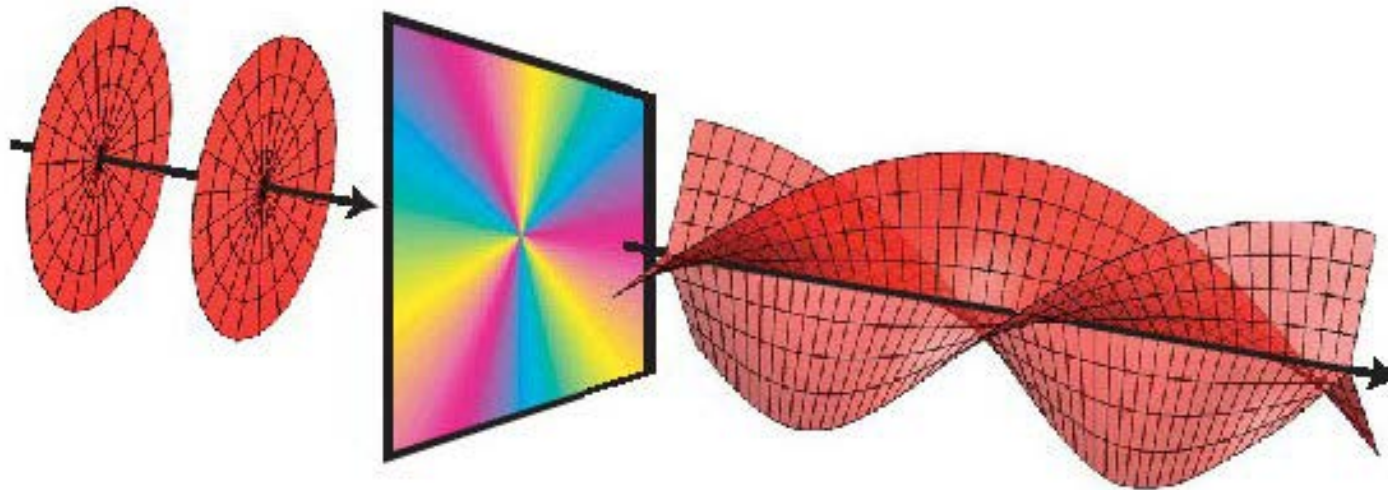


Такие фотоны могут быть произведены из обычного плосковолнового лазерного пучка при использовании **спиральной фазовой пластинки**:



A spiral phase plate can generate a helically phased beam from a Gaussian. In this case  $\ell = 0 \rightarrow \ell = 2$ .

или **компьютерно рассчитанной голограммы:**



A helical phase profile  $\exp(i\ell\phi)$  converts a Gaussian laser beam into a helical mode whose wave fronts resemble an  $\ell$ -fold corkscrew. In this case  $\ell = 3$ .



**Российская академия наук Сибирское отделение  
Институт автоматики и электрометрии**

**Лаборатория дифракционной оптики**

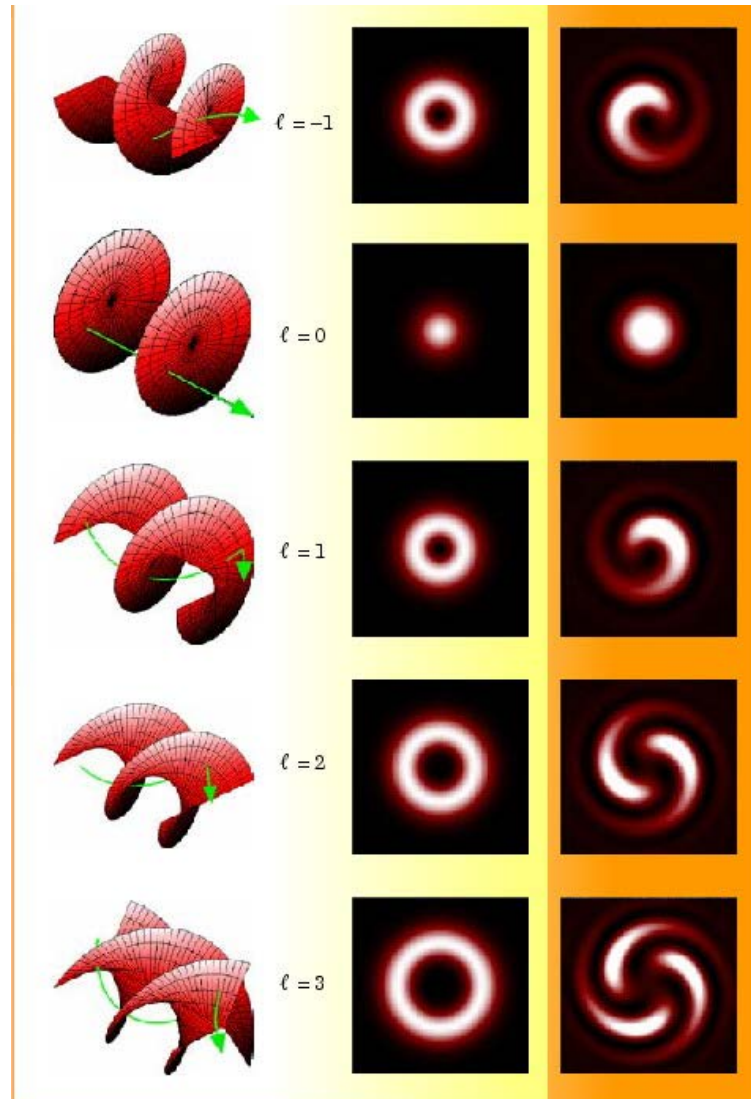


***ПОЛЕЩУК***  
***Александр Григорьевич***

**Доктор технических наук  
Заведующий лабораторией**

630090, Новосибирск  
пр. Академика Коптюга, 1,  
<http://www.diffraction.ru>

Тел.: (383) 3333-091  
Факс: (383) 3333-863  
E-mail: [poleshchuk@iae.nsk.su](mailto:poleshchuk@iae.nsk.su)



**Некоторые примеры приложений таких фотонов:**

См. недавнюю книгу

**Twisted photons**

(Applications of light with orbital angular momentum)

edd. by J. P. Torres and L. Torner

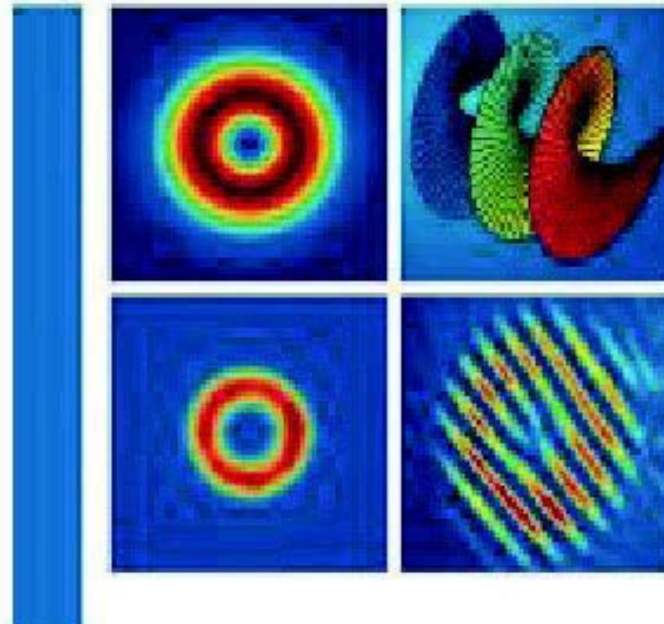
(Wiley-VCH Weinheim, Germany 2011)

Edited by  
Juan P. Torres and Luis Torner

WILEY-VCH

# Twisted Photons

Applications of Light with  
Orbital Angular Momentum



- [1.] **Micro-machines** — it was demonstrated that micron-sized Teflon and calcite “particles” start to rotate after absorbing twisted photons
- [2.] **Astrophysics** — the observation of orbital angular momentum of light scattered by rotating black holes could be very instructive
- [3.] **Rotating atoms with light** — rotating Bose-Einstein condensates
- [4.] **Spiral phase contrast microscopy**
- [5.] **Optical torques in liquid crystals**
- [6.] **Quantum information** — quantum features in high-dimensional Hilbert spaces



До недавнего времени в зоологическом саду лазерной физики закрученные фотоны представляли собой достаточно редкостный экземпляр. Все эксперименты ограничивались областью **энергий видимого света  $\sim 1$  эВ.**

**Положение дел изменяется прямо на глазах.**

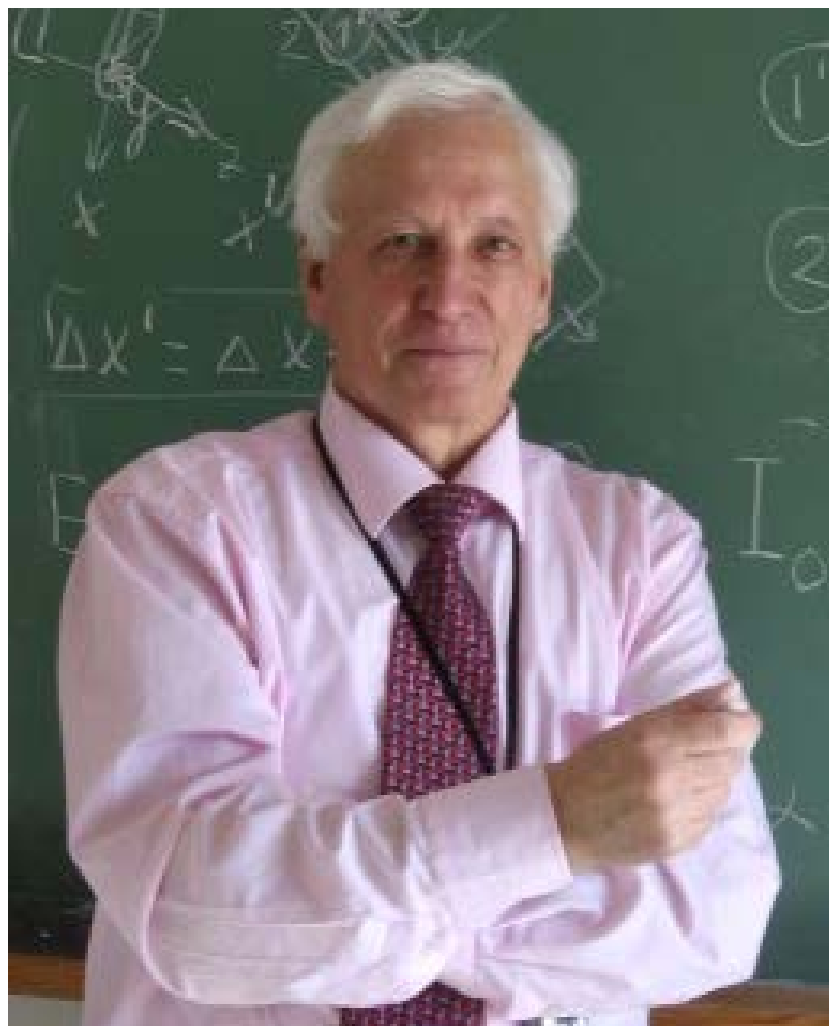
Недавно был проведён эксперимент,  
J. Bahrtdt, K. Holldack, P. Kuske, R. Müller, M. Scheer, P. Schmid  
Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 034801  
в котором закрученный свет **с энергией фотонов 99 эВ** был генерирован на спиральном ондуляторе синхротронного источника BESSY II (Берлин).

А в ИЯФ им. Будкера (Новосибирск) в настоящее время проводятся эксперименты с закрученными фотонами в терагерцовой области (**длина волны 140 мкм**), **используя лазер на свободных электронах**

**V.A. Knyazev et al. Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 163901**

С закрученными фотонами были проведены классические опыты **Юнга** (дифракция на двух щелях) и **Френеля** (дифракция на экране в форме полуплоскости),

а также были проведены опыты по генерации **поверхностных плазмонов**



Б.А. Князев

В работах [6,7,8] мы показали, что возможно конвертировать закрученные фотоны из области лазерных энергий

порядка 1 эВ

в область высоких энергий до

нескольких ГэВ,

используя

## **ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ**

лазерных фотонов на ультррелятивистских электронах.

**Кроме того,** недавно несколько групп сообщили об успешном генерировании

**ЗАКРУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ,**  
сначала используя фазовые пластинки,

M. Uchida and A. Tonomura, Nature **464**, 737 (2010)

а затем с помощью компьютерно рассчитанных голограмм

J. Verbeeck, H. Tian, P. Schlattschneider, Nature **467**, 301 (2010);

B. J. McMorran et al, Science **331**, 192 (2011)

**В различных экспериментах генерировались пучки электронов с кинетической энергией до 300 кэВ и квантовым числом  $J_z = m$  до  $m = 3000$ .**

В принципе, с такими пучками закрученных электронов можно манипулировать как с обычными пучками, и недавно было достигнуто **замечательное фокусирование закрученного электронного пучка** до размеров в фокальной плоскости

**меньше чем  $1.2 \cdot 10^{-8}$  см = 0.12 нм в диаметре**

— см. работу:

**“Atomic scale electron vortices for nanoresearch”**

Verbeeck, Schattschneider, Lazar, Stöger-Pollach, Löffler, Steiger-Thirsfeld, Van Tendeloo, Appl. Phys. Lett. **99**, 203109 (2011)

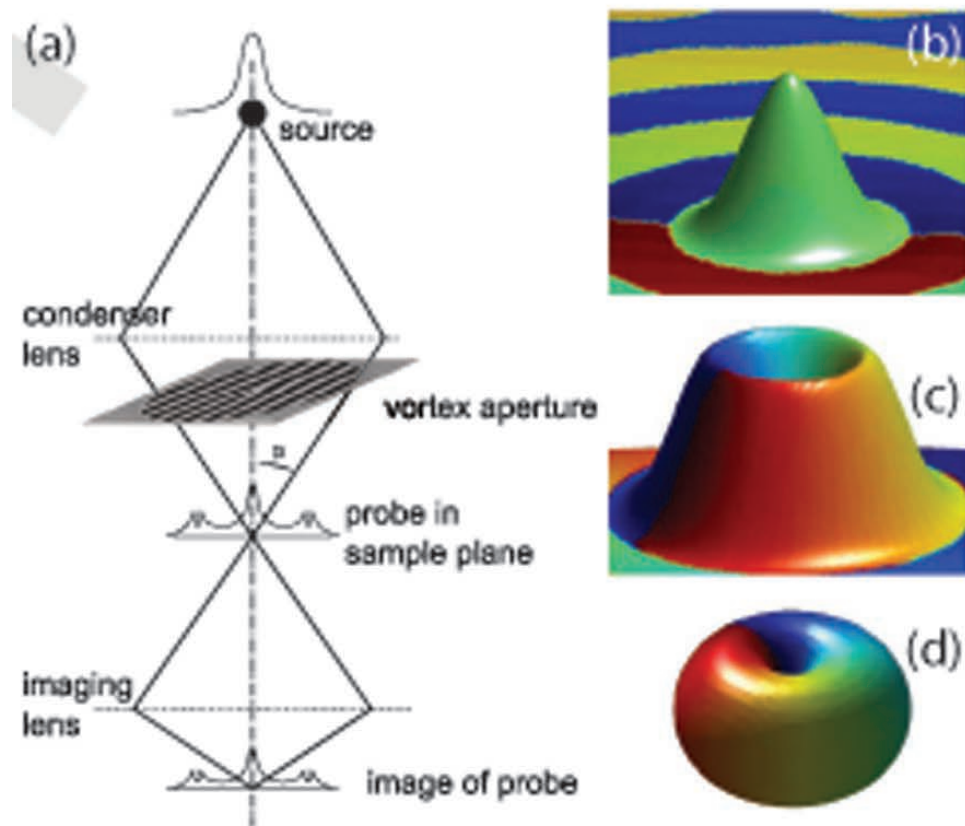


FIG. 1. (Color online) (a) Sketch of the setup to create focused vortex probes in a transmission electron microscope. The probe is formed in the sample plane and can be used to perform atomic resolution experiments in that plane. The probe is magnified for observation by the imaging system. The convergence angle  $\alpha$  can be adjusted which allows to tune the size of the vortex. (b), (c) Artist impression of the intensity distribution for a conventional airy disc and a vortex beam with the same opening angle. (d) Sketch of the surface of a  $2p_1$  orbital in nitrogen containing 80% of the electron density. The image is approximately to scale with (b), (c) for our experimental setting of  $\alpha=21.4$  mrad. Color coding indicates the phase distribution from 0 (blue) to  $2\pi$  (red). Note the big similarity in both phase

Ожидается, что если эти электроны инжектировать в линейный ускоритель, то **их энергия может быть повышена до области МэВ или ГэВ**. Такие закрученные электроны могли бы быть использованы для опытов по глубоко неупругому рассеянию на протонах для изучения внутренней структуры протона, используя дополнительную степень свободы — закрученность электрона.

**В настоящее время как раз эксперимент такого рода с закрученными электронами до 50 МэВ обсуждается в Jefferson Lab (USA)** – see report “Twisted Electrons at JLab” by D. Dutta at Mini-Workshop on twisted particles (George Washington University, Washington DC, August 2014).





VS-dean-Dutta (Washington DC, August 2014)

## 2. ЗАКРУЧЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

**Обычное плосковолновое состояние** скалярной частицы с массой  $m_e$  имеет определённый 3-импульс  $\mathbf{k}$  и энергию  $\omega = \mathbf{k}^2/(2m_e)$ , а его волновая функция имеет хорошо известный вид

$$\Psi_{\mathbf{k}}(t, \mathbf{r}) = e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}. \quad (1)$$

**Закрученная скалярная частица** имеет определённый:

**продольный** импульс  $k_z$ ,

**модуль поперечного** импульса  $\kappa$ ,

**энергию**  $\omega = (\kappa^2 + k_z^2)/(2m_e)$

и проекцию  $m$  **орбитального момента импульса** на ось  $z$ ,

так что её волновая функция удовлетворяет уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{p}^2}{2m_e} \Psi_{\ell m k_z}(\mathbf{r}) &= \omega \Psi_{\ell m k_z}(\mathbf{r}), \quad \hat{p} = -i\nabla \\ \hat{p}_z \Psi_{\ell m k_z}(\mathbf{r}) &= k_z \Psi_{\ell m k_z}(\mathbf{r}), \quad \hat{p}_z = -i\frac{\partial}{\partial z}, \\ \hat{L}_z \Psi_{\ell m k_z}(\mathbf{r}) &= m \Psi_{\ell m k_z}(\mathbf{r}), \quad \hat{L}_z = -i\frac{\partial}{\partial \varphi_r}. \end{aligned}$$

Волновая функция в цилиндрических координатах  $r_{\perp}$ ,  $\varphi_r$ ,  $z$  имеет вид:

$$\Psi_{\kappa m k_z}(r_{\perp}, \varphi_r, z, t) = e^{-i(\omega t - k_z z)} \psi_{\kappa m}(r_{\perp}, \varphi_r),$$

$$\psi_{\kappa m}(r_{\perp}, \varphi_r) = \frac{e^{im\varphi_r}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\kappa} J_m(\kappa r_{\perp}), \quad (2)$$

где  $J_m(x)$  — **функция Бесселя**.

Функция  $\psi_{\kappa m}(r_{\perp}, \varphi)$  может быть представлена в виде суперпозиции плоских волн в  $xy$  плоскости,

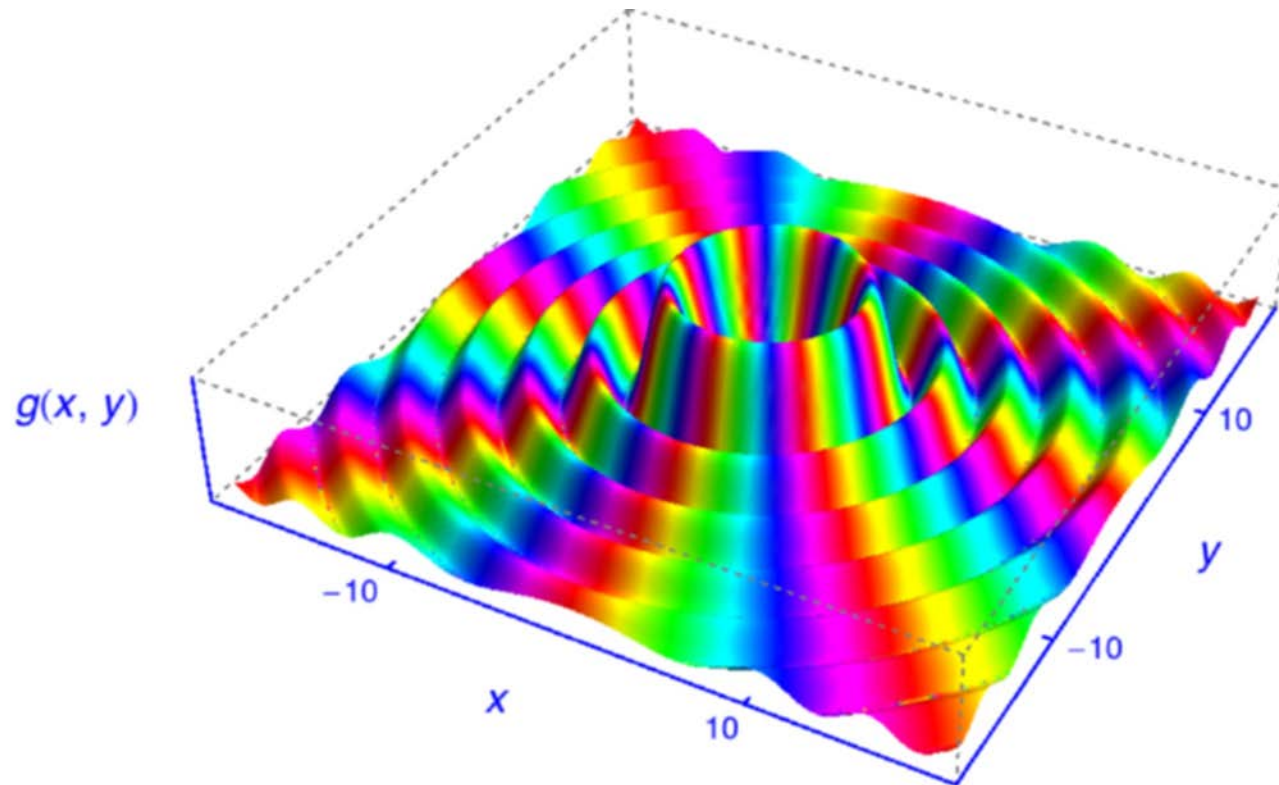
$$\psi_{\kappa m}(r_{\perp}, \varphi) = \int a_{\kappa m}(\mathbf{k}_{\perp}) e^{i\mathbf{k}_{\perp} \mathbf{r}_{\perp}} \frac{d^2 k_{\perp}}{(2\pi)^2}, \quad (3)$$

причём фурье амплитуда  $a_{\kappa m}(\mathbf{k}_{\perp})$  оказывается **сконцентрирована на окружности**  $k_{\perp} \equiv |\mathbf{k}_{\perp}| = \kappa$ :

$$a_{\varkappa m}(\mathbf{k}_{\perp}) = (-i)^m e^{im\varphi_k} \sqrt{\frac{2\pi}{k_{\perp}}} \delta(k_{\perp} - \varkappa). \quad (4)$$

Таким образом, функция  $\Psi_{\varkappa m k_z}(r_{\perp}, \varphi_r, z, t)$  есть суперпозиция плоских волн с определённым продольным импульсом  $k_z$ , модулем поперечного импульса  $\varkappa$ , энергией  $\omega = (\varkappa^2 + k_z^2)/(2m_e)$  и с различными направлениями вектора  $\mathbf{k}_{\perp}$ , задаваемыми азимутальным углом  $\varphi_k$ .

Более сложные волновые функция закрученного фотона (векторный потенциал) и электрона (релятивистский биспинор) могут быть получены как естественное обобщение волновой функции для скалярной частицы.



The vector potential  $\mathcal{A}_{\kappa m k_z \lambda}^{\mu}$  of the twisted photon is presented as  $g(x, y) = |\mathcal{A}_{\kappa m k_z \lambda}^{\mu}(0, x, y, 0)|^2$ , which is a function of  $x$  and  $y$ . The parameters are  $\mu = 2$  ( $y$  component),  $m = 5$ ,  $\kappa = 1$ ,  $k_z = \sqrt{24}$  and  $\Lambda = 1$ . From paper [6].

### 3. Фотовозбуждение атомов, фотоэффект и радиационная рекомбинация с участием закрученных фотонов и электронов

*Только фотовозбуждение атомов:* В работах

A. Picón et al. Optical Express 18 (2010) 3660

A. Afanasev, C. Carlson, A. Mukherjee. Phys. Rev. A 88 (2013) 033841  
and arXiv:1401.1227

и наших работах [1,2,3] рассмотрено

**фотовозбуждение атомов закрученными фотонами.**

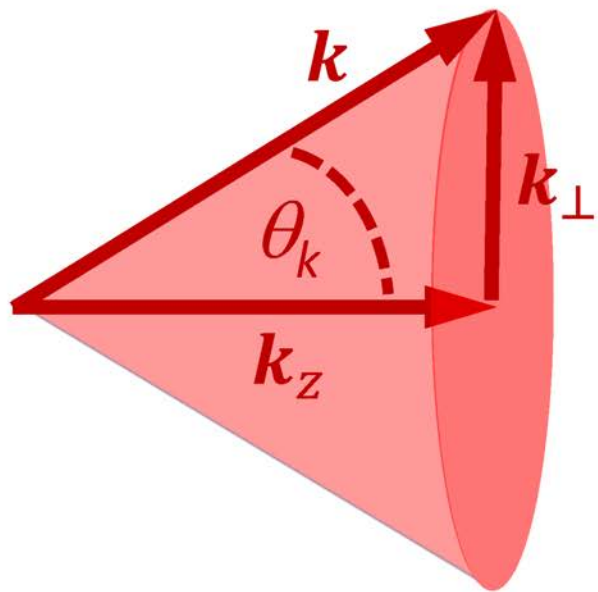
**Авторы отметили несколько уникальных особенностей, связанных с наличием у налетающего фотона орбитального момента импульса.**



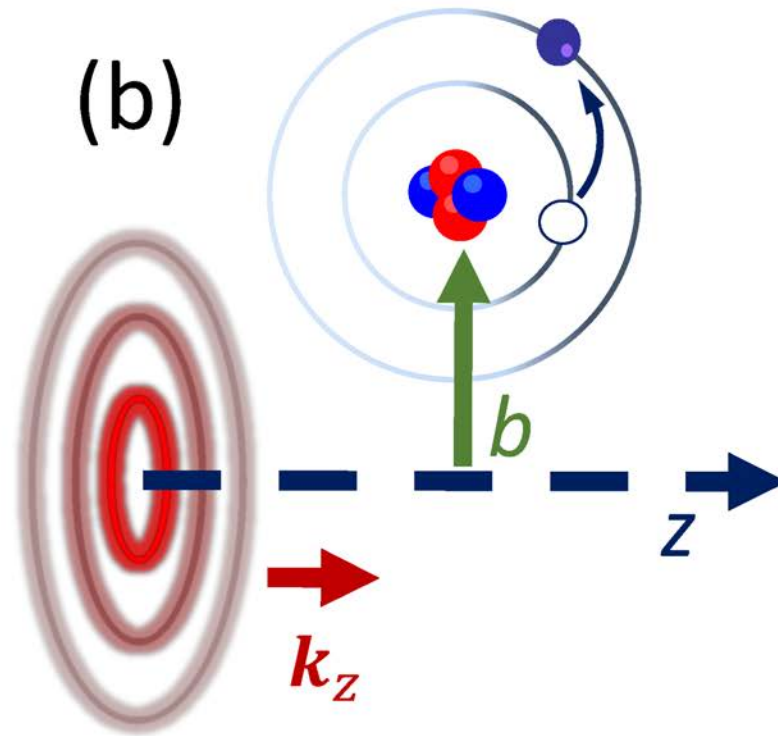
Surzhykov-Fritzsche-VS (Jena)



(a)



(b)



В нашей работе [1] представлены расчёты возбуждения водородоподобных атомов закрученным светом. Мы рассмотрели два сценария, в которых **бесселева волна** сталкивается или

- 1) с **хорошо локализованным атомом** или
- 2) со **случайно распределёнными атомами**.

Детальные расчёты проведены именно для второго, экспериментально более легко реализуемого случая **макроскопически большой мишени**.

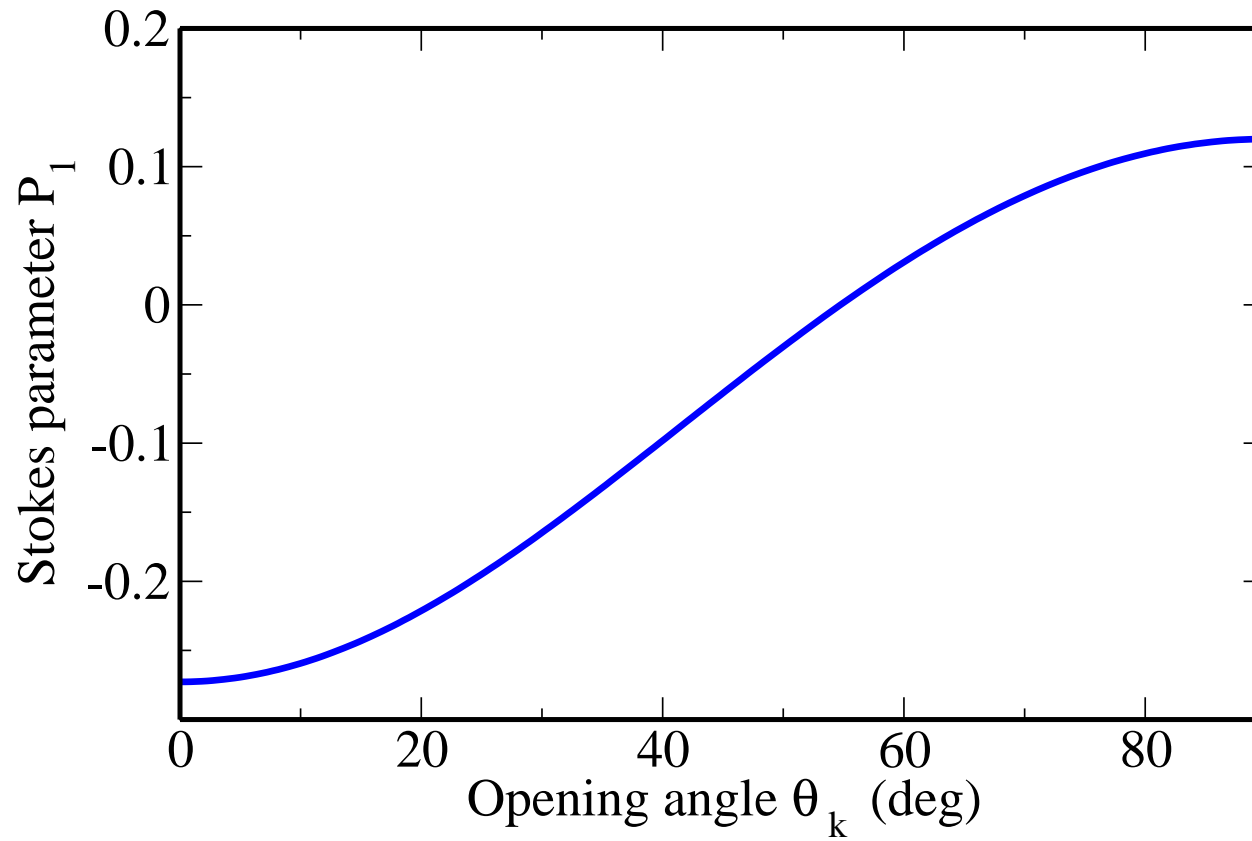
Расчёты для переходов  $1s \rightarrow 2p$  и  $2p \rightarrow 3d$  ясно показывают, что **населённость подуровней возбуждённых атомов после поглощения закрученных фотонов значительно отличается от случая возбуждения обычными фотонами**.

Рассмотрим, например, случай, когда происходит послесвечение (флуоресценция) возбуждённого атома в направлении, перпендикулярном к оси соударения. **Линейная поляризация** такого фотона характеризуется **параметром Стокса**

$$P_1 = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp}),$$

где  $I_{\parallel}$  or  $I_{\perp}$  — интенсивность света, линейно поляризованного параллельно или перпендикулярно плоскости реакции.

На рис. представлен этот параметр для фотонов линии  **$\alpha$ -Лайман**, испущенных после  $1s \rightarrow 2p$  возбуждения нейтрального атома водорода закрученным светом, в зависимости от угла  $\theta_k = \arctg(\kappa/k_z)$ .



В параксиальном режиме, когда  $\theta_k \lesssim 5^\circ$ , и ситуация близка к стандартной, этот параметр **отрицателен**. С ростом угла  $\theta_k$  параметр  $P_1(\theta_k)$  изменяется **качественно**, становясь **положительным** при  $\theta_k > 58^\circ$ .

**Такое изменение параметра  $P_1$  в зависимости от  $\theta_k$  может быть относительно легко наблюдаться экспериментально и обеспечит получение ценной информации о взаимодействии закрученных фотонов с атомами.**

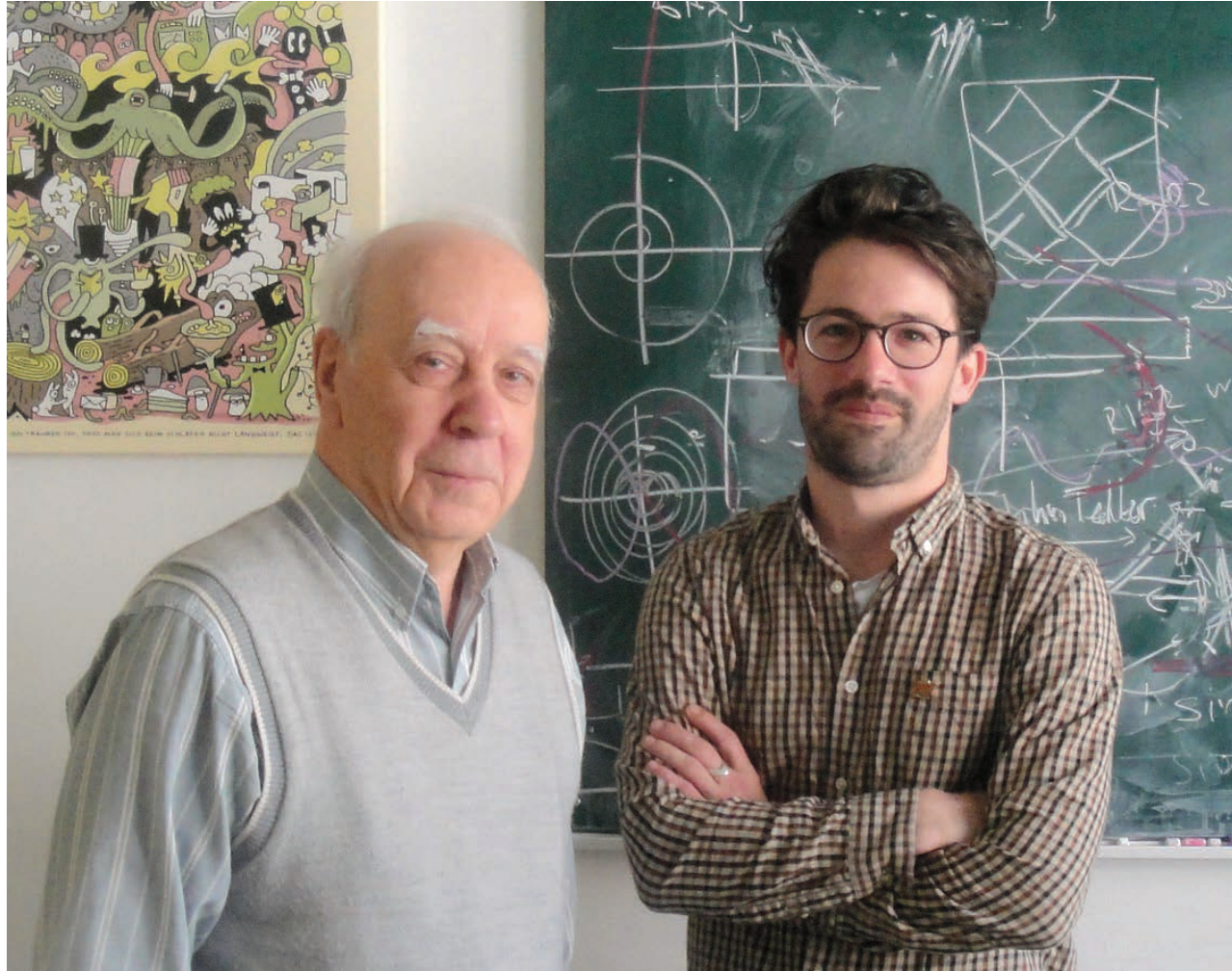
В нашей работе [3] представлены аналогичные расчёты возбуждения водородоподобных атомов закрученным светом на **локализованной мишени, реализуемой в атомных и ионных ловушках**. Мы показали, что вероятности возбуждения и поляризация флуоресцентных фотонов заметно изменяются в зависимости от **прицельного параметра между осью бесселева пучка и центром мишени**.

В настоящее время такие опыты проводятся, например, в Майнце в группе Christian Schmiegelow:

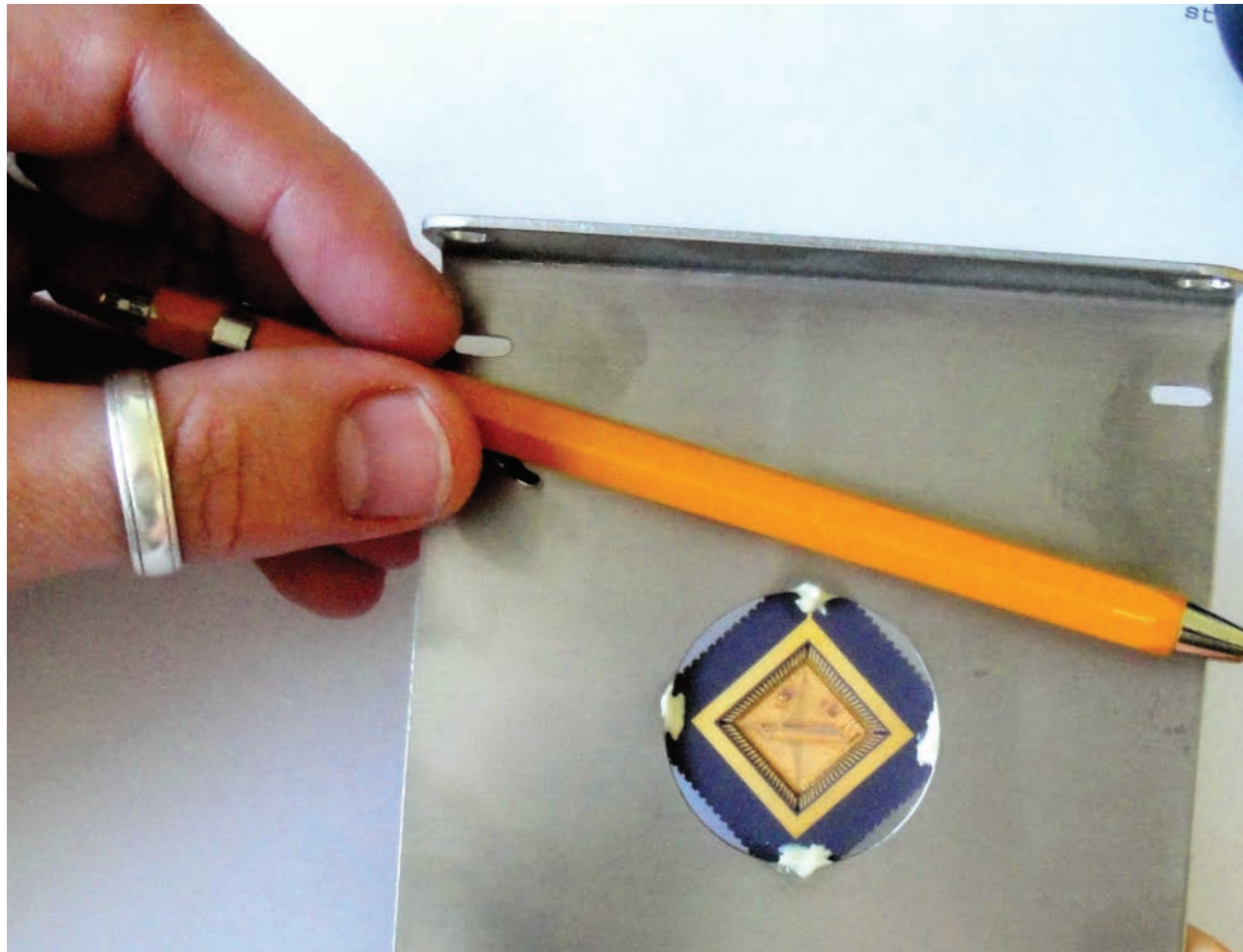
**C.T. Schmiegelow, J. Schulz, Kaufmann, T. Ruster, U.G. Poschinger, F. Schmidt-Kaler.**

**Excitation of an Atomic Transition with a Vortex Laser Beam,**

**2015 ArXiv: 1511.07206**



VS-Schmiegelow (Mainz)



Ion trap (Mainz)



В этом эксперименте единственный ион  $^{40}\text{Ca}^+$ , захваченный в ионную ловушку, был локализован в центре лазерной беселевой волны. Удалось наблюдать квадрупольный переход, запрещённый для плоскостного лазерного пучка:

**“... we observe strongly modified selection rules, accounting for both the photon spin and the vorticity of the field. In particular, we show that an atom can absorb two quanta of angular momentum from a single photon even when rotational symmetry is conserved”**

## 4. Комptonовское рассеяние закрученных фотонов [6,7,8]

### Стандартный случай

Рассмотрим так называемое обратное комptonовское рассеяние плосковолновых лазерных фотонов на ультррелятивистских электронах.

Этот процесс является **хорошо известным, апробированным методом** получения фотонов высокой энергии. Он успешно используется в десятках лабораториях для различных приложений и исследований в фундаментальной физике.

Например, в ИЯФ на установке РОКК-2М с энергией электронов 5 ГэВ получали фотоны **с энергией до 0.5 ГэВ** для опытов **с фото-ядерными процессами** и для экспериментов по нелинейной КЭД, включая опыты по **расщеплению фотона и по дельбрюкковскому рассеянию**.

Рассмотрим лобовое соударение начальных пучков. **Конечный фотон движется почти в том же направлении, что и начальный электрон с типичным углом рассеяния  $\sim 1/\gamma_e \ll 1$ .**

**Комптовское рассеяние с закрученными фотонами  
в начальном и конечном состояниях**

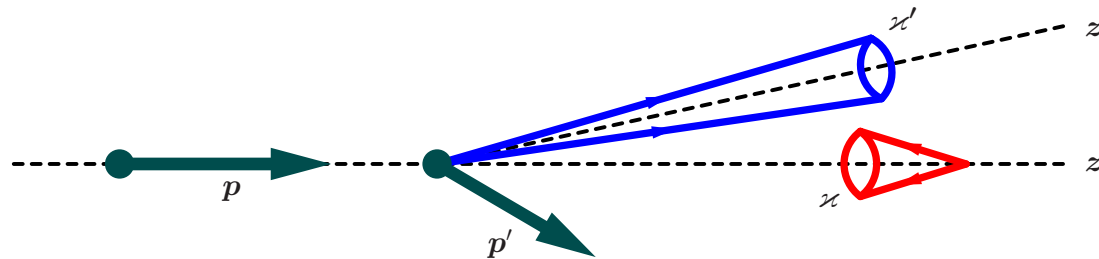
Эта задача подробно рассмотрена в наших работах [6,7,8]



VS-Jentschura (Heidelberg)



Игорь Иванов (Лисабон)



Начальное (red) и конечное (blue) состояния закрученных фотонов для обратного комптоновского рассеяния.

**Угол между  $z$  и  $z'$  обозначается ниже как  $\langle \theta_\gamma \rangle$**

Детальное рассмотрение показывает, что распределение по конечным проекциям  $m'$  **концентрируется вблизи начального значения  $m$** :

$$|m' - m| \lesssim 4 \langle \theta_\gamma \rangle \frac{\omega}{\sigma}.$$

Правая часть этого неравенства **мала** для достаточно малых углов рассеяния  $\langle \theta_\gamma \rangle$ .

Таким образом, закрученность  
конечного фотона  $m'$   
оказывается близка  
к закрученности начального фотона  $m$

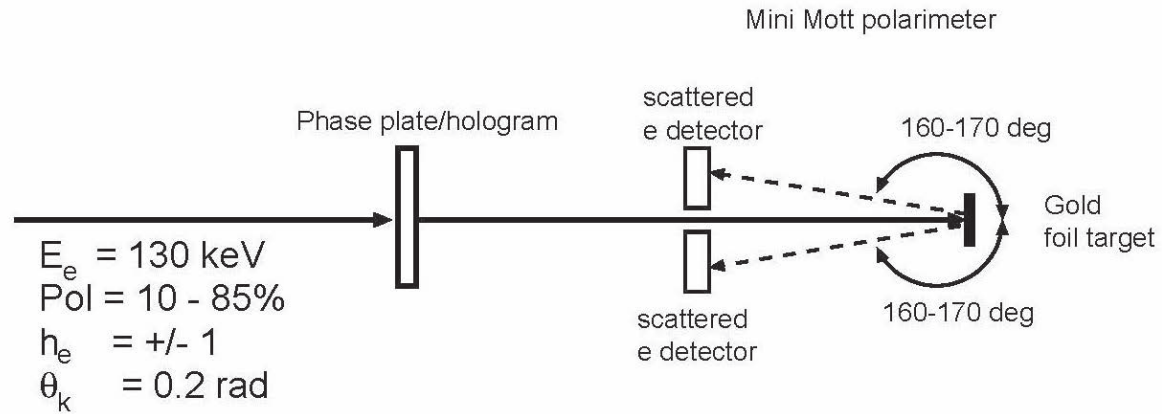


## 5. Рассеяние релятивистских закрученных электронов на атомах

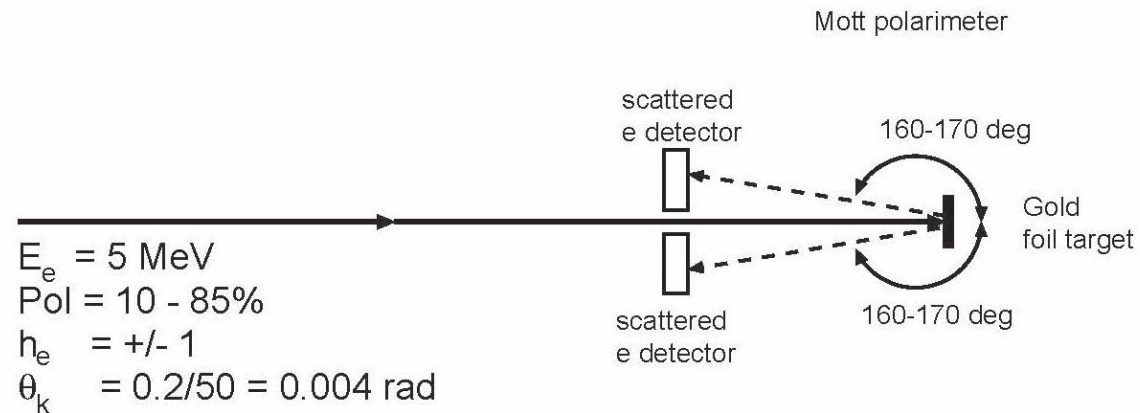
В работе [9] мы рассмотрели **рассеяние релятивистского закрученного электрона на потенциале Юкавы** и получили **аналитическое выражение для сечения, усреднённого по прицельным параметрам**.

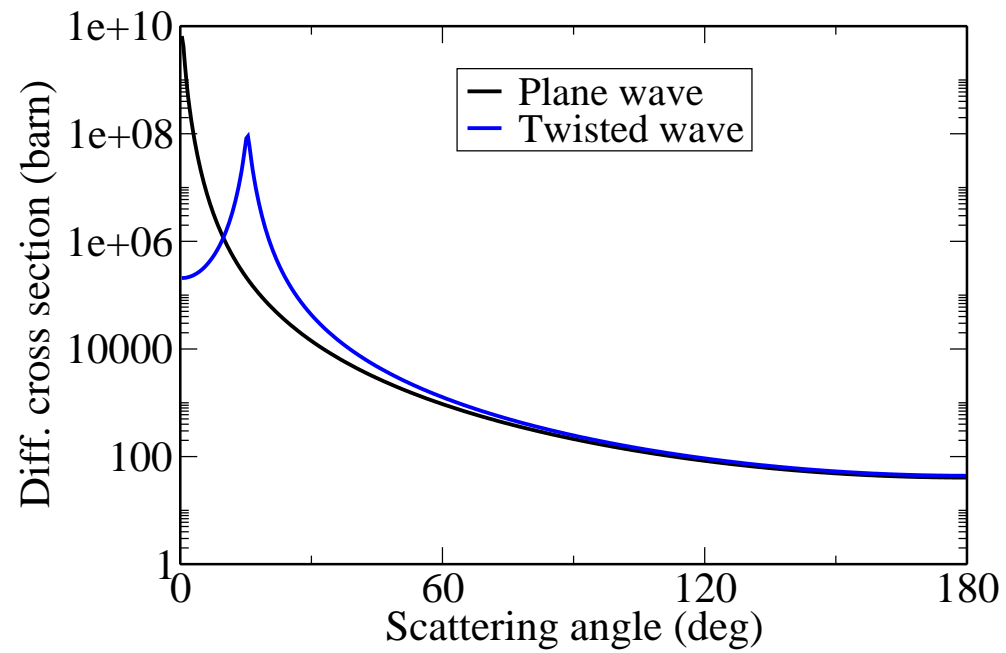
А так как потенциал для реального атома в хорошем приближении описывается суперпозицией потенциалов Юкавы, то нам удалось численно рассчитать соответствующее сечение. График углового распределения конечных электронов представлен на рис. **для параметров первого этапа обсуждаемого эксперимента в Jefferson Lab**.

## First stage



## Second stage





Рассеяние закрученных электронов (130 кэВ,  $\theta_p = 15^\circ$ ) на атомах Fe

## 6. Излучение Вавилова-Черенкова закрученными электронами

Излучение Вавилова-Черенкова было открыто в 1934 году и вскоре получило объяснение в работе Тамма и Франка в 1937 г.

Квантовый расчёт излучения В-Ч был дан В.Л. Гинзбургом в 1940 г.

Свойства излучение В-Ч хорошо известны:

1) фотон излучается **по поверхности конуса** с полярным углом  $\theta_0 \approx \arccos[c/(vn)]$ ;

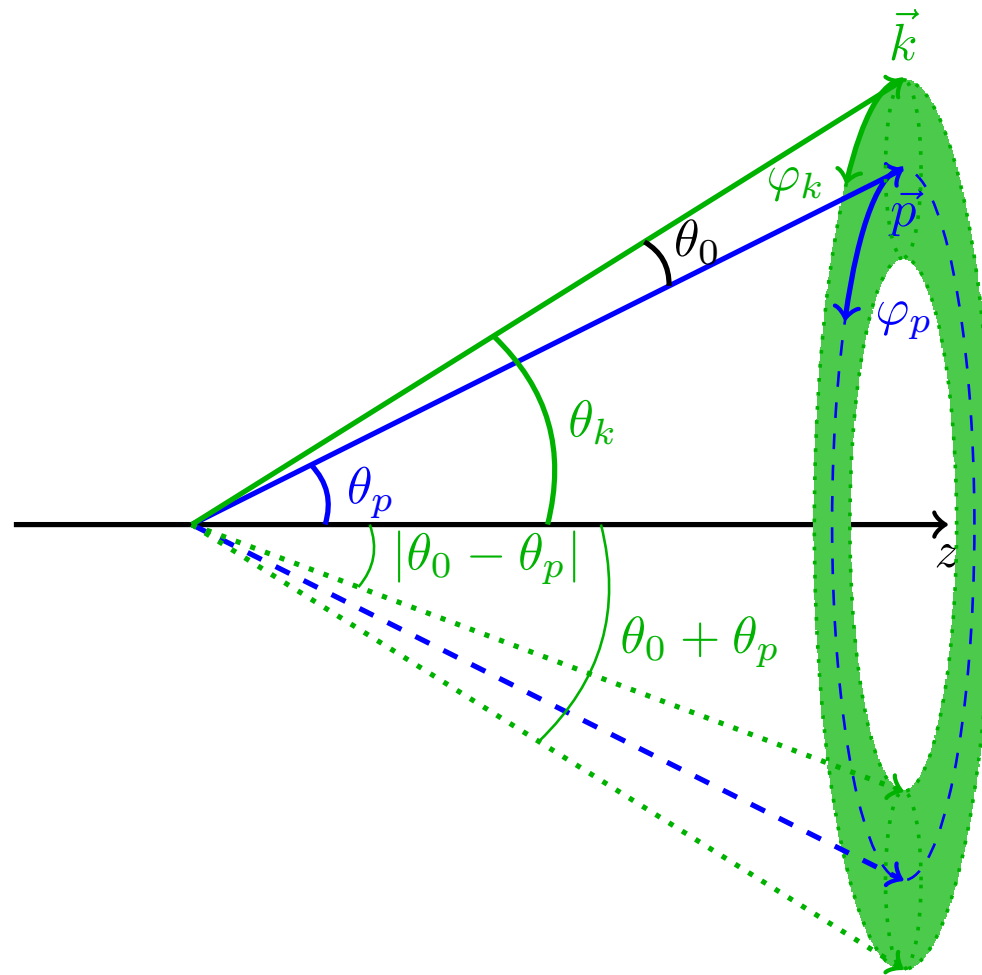
2) излучение имеет линейную поляризацию **в плоскости рассеяния**;

3) если поляризация фотонов не детектируется, то их распределение обладает **азимутальной симметрией**.

В работе [10] мы детально рассмотрели излучение В-Ч, производимое **закрученным электроном с конечным углом**  $\theta_p$ .

В этом случае:

1) фотоны излучаются не по поверхности конуса, а **в интервале полярных углов** от  $|\theta_0 - \theta_p|$  до  $\theta_0 + \theta_p$  с сингулярными максимумами интенсивности на краях интервала;



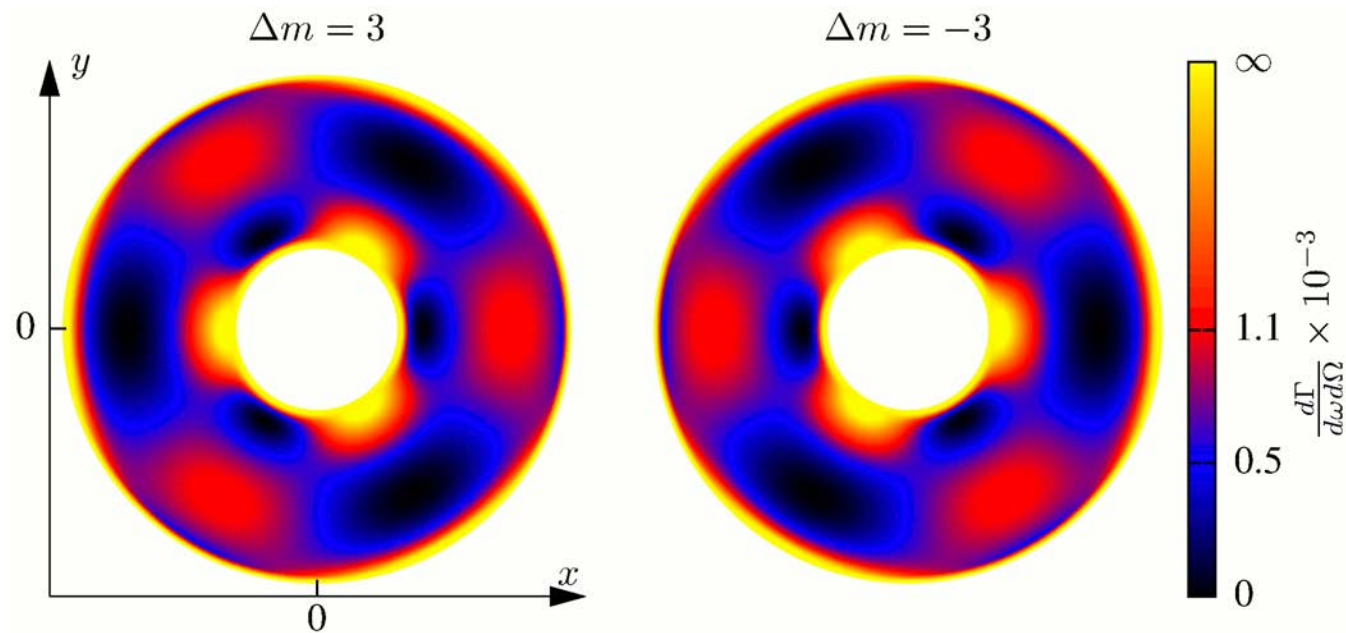
Геометрия излучения В-Ч закрученным электроном

2) эти фотоны могут иметь линейную поляризацию **не только в плоскости рассеяния, но и ортогональную этой плоскости;**

3) кроме того, в излучении закрученным электроном возникает **азимутальная асимметрия даже для случая, когда поляризация фотонов не детектируется.** Эта асимметрия зависит от квантовых чисел закрученного электрона.

Обнаруженные свойства излучения могут оказаться полезными **для диагностики закрученных электронов.**





Спектрально-угловое распределение фотонов для  $\theta_p = \theta_0/2$ . Начальное состояние электрона – суперпозиция двух состояний с  $\Delta m = m_2 - m_1 = \pm 3$ .

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главная цель моего доклада — продемонстрировать,  
что **ЗАКРУЧЕННЫЕ ФОТОНЫ И ЭЛЕКТРОНЫ**  
могут быть реально использованы как  
**НОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
в физике атомов, ядер и элементарных частиц

**Закрученные частицы дают  
нам новую степень свободы  
ОРБИТАЛЬНЫЙ МОМЕНТ  
ИМПУЛЬСА**

**И ПОТОМУ МОГУТ ДОСТАВИТЬ ЦЕННУЮ  
дополнительную информацию  
о фундаментальных  
взаимодействиях фотонов и  
электронов с веществом**

**Спасибо за внимание!**

