Pr. Lione DUVILLARET Kapteos CEO

+33 (0) 632 25 37 06 e-mail: lionel.duv I aret@kapteos.com

# Review of PhD thesis of štëpán Kunc

In its PhD thesis entitled "Study of the Magnetically Induced QED Birefringence Of the Vacuum in the experiment OSQAR", štëpán Kunc describes and develops the Vacuum Magnetic Birefringence (VMB) experiment that has been carried out at Technical University of Liberec and also at CERN in Geneva in SM18 facility. Its manuscript is divided in 6 sections.

In the first one, Štëpán Kunc introduces the framework and highlights the main three experiments involved in VMB research.

In the second section, Štëpán Kunc gives the theoretical background predicting the existence of VMB. He recalls first the principle of light polarization and introduces the Jones matrix formalism which is of key importance when dealing with the polarization of light and its manipulation through classical optical elements like wave plates, polarizers... When describing non-linear optical effects, it is important not to forget the Pockels effect which is the equivalent of the

Faraday effect when dealing with electric field instead of magnetic field. Later, when giving the normalized CottonMouton coefficients for different common gases, it appears that even a very small presence of oxygen could prevent in measuring expected VMB due to its very high value. The section goes on with the VMB theory and the expected value of both VMB and vacuum magnetic dichroism according to the particles involved.

Section 3 is devoted to OSQAR experiment at CERN with the implementation of a "classical" ellipsometer configuration for the measurement of VMB. Calculations are well described and noise consideration is well done also.

However, as the signal is directly proportional to the laser power whereas:  Johnson and photodiode dark noises are independent of the laser power,  shot noise is proportional to the square root of the laser power,  laser RIN is proportional to the laser power, it can be deduced that the signal to noise ratio can be increased up to a ceiling value (in the limit of ultra high optical powers) given only by the laser RIN. Consequently, in a theoretical point of view, the main limiting factor is the laser RIN. It is unfortunate that this analysis has not been done as the choice of the laser source is of key importance as it will give the signal to noise ratio (SNR) ceiling value! In the experimental setup, a non-polarizing beam splitter (NPBS) has been used. Does this NPBS has been characterized in terms of polarization artifacts on the transmitted and reflected laser beams as NPBS quite often present important defects. Later in the section, a complete characterization of the electro-optic modulator (EOM) is presented with nice results and the related calculations. A paragraph is devoted to the amplitude noise. As mentioned, vibrations and temperature variations are considered as at the origin of this noise. The EOM with its plane-parallel faces is for sure a good noise source with any vibration or temperature variation. A BGO or BSO EOM with faces at Brewster angle would have mainly overcome this problem. In the measurements curves presented in Fig. 12, appears clearly the problem of working at very low modulation frequency with the presence of a very strong l/f noise contribution. This key point is pointed out in the following sections where improvements are proposed. The differential measurement between a reference arm and a "signal" arm is very efficient as presented at the end of section 3. However, due to the huge laser RIN, a dephasing of only 0.25 mrad can be measured. This limit is directly linked to the choice of the laser source. With a high grade laser diode @ 1550 nm and working with a modulation frequency of 10 kHz or more, dephasing of prad are routinely measured with commercial electro-optic probes working with only a few mW of laser power.

Section 4 is devoted to improvements with a analysis of the contributions of the different noise sources. I do not completely agree with the conclusion of § 4.2 concerning that the limiting factor is the shot noise. Indeed, the shot noise is the quantum noise limit under which it is almost impossible to fall. However, the SNR being given by the ratio of the signal to noise, it is obviously capped by the laser RIN, whatever be the shot noise. It is the reason why, in my opinion, the key parameter is the laser RIN and the more determinant parameter to increase the sensitivity of the experiment. Another key parameter is the modulation frequency that should be at least a few kHz to overcome the l/f noise. As mentioned page 70, rotating the laser polarization using rotating wave plates can lead to much higher modulation frequencies rather than rotating the magnet, even if there are some drawbacks as clearly stated by Štëpán Kunc. The section goes on with a discussion of using Fabry-Pérot cavities to dramatically increase the signal, but also potentially artifacts due to residual mirror birefringence. How would these artifacts increase with the cavity parameters?

Last section before conclusion concerns an heterodyne setup with a very nice proposal in § 5.3 to overcome the artifacts generated by rotating wave plates. As clearly presented, such a configuration permits to get artifacts giving rise to frequency components at w +/- 2 f whereas the signal gives rise to frequency components at w +/- f. Such proposal permit to deal with the main imperfections of the used optical elements.

In conclusion, this thesis presents an important experimental work and is well written, A good, understandable and educational introduction to the main results of QCD for the origin of VMB is given. Some nice results have been carried out and are close to the state of the art as depicted in Fig. 17. The only minor criticism touches upon the laser RIN that has not been taken as the main and key parameter of such experiment. It would have possibly lead to the choice of a best suited laser. Anyway, this work combining a lot of different difficult techniques (e.g. stabilization technique of first and second harmonic, optical cavities, ) is well done, documented and described. It has led to several publications and communications in high rank scientific journals and conferences. Moreover, a very nice proposal is given in the last section demonstrating a deep knowledge and analysis of the subject by the candidate.

For all these reasons, this thesis corresponds to the general requirements for defending a PhD degree and therefore I recommend to confer a PhD degree to Štëpán Kunc after a successful PhD defense.

Sainte-Hélène du Lac, Tuesday 9th of January 2018



Pr. Lionel DUVILLARET

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

„Study of the Magnetically Induced QED Birefringence Of The Vacuum in Experiment

OSQUAR“

Disertant: Ing. Štěpán Kunc

Oponent: Doc. Ing. Ladislav Pína, DrSc,

 ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Disertační práce je věnována výzkumu v oblasti kvantové elektrodynamiky se zaměřením na problematiku chování vakua za přítomnosti magnetického pole. Konkrétně se jedná o pohyb lineárně polarizovaného světla silným příčným magnetickým polem ve vakuu a změnu polarizačního stavu světla z lineárního na eliptický podobně, jako v anizotropním krystalu. Práce je součástí projektu OSQUAR v jehož rámci je magnetický dvojlom vakua zkoumán.

Práce je členěna spolu s úvodem a zavěrem do šesti kapitol, které zahrnují přehled a rozbor současného stavu dané problematiky, hlavní cíle práce, popis provedených výpočtů a experimentů, zpracování naměřených dat a výsledky s diskuzí, závěry a návrhy pro další výzkum a vývoj.

V podstatě se jedná o čtyři hlavní části. V úvodu je detailní přehled všech dosavadních prací a experimentů zabývajících se magnetickým dvojlomem vakua. Druhá kapitola obsahuje relevantní teoretický základ. Ve třetí kapitole je popsán experiment OSQAR. Zvláštní pozornost je věnována problematice šumu, experimentálnímu uspořádání a měření Cotton-Moutonova jevu v dusíkové atmosféře. Čtvrtá kapitola je věnována možnostem zlepšení VMB experimentů s cílem zvýšeni citlivosti. Zvláštní pozornost je věnována optickým rezonátorům a magnetům. V páté kapitole je popsáno heterodynní uspořádání experimentu pro případ statického magnetického pole.

Práce dále obsahuje seznamy použitých zkratek a symbolů, obrázků, referencí a vlastních publikací.

Souhrnem práce popisuje princip metod, současnou úroveň řešené problematiky, dosažené výsledky a plánovanou další práci. Práce je dobře strukturovaná a srozumitelná včetně popisu provedených experimentů a zpracování získaných experimentálních dat. Je dokumentováno množství a značný rozsah práce na přípravě i vlastním provedení experimentů na pracovištích v Liberci a v CERNu.

Obsah předložené disertační práce se zakládá na původních projektech a experimentech, na kterých se disertant podílel rozhodující měrou. Zejména se jedná o zásadní podíl na přípravě a realizaci experimentu OSQAR v CERNu. Výsledky disertace přispívají k rozvoji vědeckého poznání v dané disciplíně. Zmínil bych např. originální návrh autora na nové uspořádání expermentu OSQAR sliující zvýšení citlivosti měření.

Vědecká úroveň je dokumentována publikacemi autora v mezinárodních časopisech.

Rozsah, obsah i forma jsou na dobré úrovni. S vyjímkou českého abstraktu je napsána v jazyce anglickém. Jazyková úroveň je velmi dobrá jak gramaticky, tak formulačně. Členění je logické a práce obsahuje potřebné rešeršní, teoretické a experimentální části, zhodnocení výsledků, použitou literaturu a další požadované formální náležitosti.

K formální stránce předložené práce ani drobným překlepům v textu nemám připomínky, které by byly podstatného charakteru.

K doktorandovi mám několik poznámek a dotazů, které mohou být zodpovězeny v rámci obhajoby:

1. Strana 9 - 11, seznam použitých symbolů. Komentář - seznam je zbytečně rozsáhlý a obsahuje symboly, které jsou použité dvakrát, nebo symboly běžně použivané s jiným významem.
2. Mohl byste blíže vysvětlit proč je symbol ve vztahu pro energii fotonu na str. 32 použit jako kruhová frekvence a současně je na str. 11 definován jako energie fotonu?

Nepřesnosti v použití a f jsou i na dalších místech textu (např. str. 32 a 93).

1. Proč ve Fig. 3 jsou osy P a ne x,y, jako na Fig.2.?
2. Jak je definována vlna na str. 56? (… 0.001 waves).
3. V Tab. I. Na str. 20 srovnáváte experimenty PVLAS a OSQAR. Jakou šanci dáváte tomu, že OSQAR dosáhne rozlišení PVLAS?

Doktorand prokázal odpovídající znalosti v daném oboru a zvolil vhodné metody řešení, které úspěšně použil při práci na projektu. Stanovených cílů bylo dosaženo. Práce obsahuje dostatečné množství původních výsledků týkajících se aktuální problematiky.

Souhrnem lze konstatovat, že doktorand prokázal předpoklady k samostatné tvůrčí práci a že předložená práce obsahuje nové výsledky v oboru. Práci navrhuji přijmout k obhajobě a doporučuji udělění akademického titulu PhD.



Ladislav Pína

V Praze dne 06.01.2018