

# LiteBIRDで使用する光学部材の 陽子線による影響(2)

小松国幹, 石野宏和, 樹林敦子, 山田要介, 喜田洋介, 舟木巧,  
松村知岳<sup>A</sup>, 羽澄昌史<sup>B</sup>, 片山伸彦<sup>C</sup>, 服部香里<sup>C</sup>, 唐津謙一<sup>D</sup>, 中村正吾<sup>E</sup>,  
入江郁也<sup>E</sup>, 藤野琢郎<sup>E</sup>, 山下徹<sup>E</sup>, 堀泰斗<sup>F</sup>, 鈴木有春<sup>F</sup>, Ben Westbrook<sup>F</sup>,  
Oliver Jeong<sup>F</sup>, Ian Shirley<sup>F</sup>, 他 LiteBIRDワーキンググループ

岡山大, JAXA/ISAS<sup>A</sup>, KEK<sup>B</sup>, IPMU<sup>C</sup>, 国立天文台<sup>D</sup>,  
横浜国大<sup>E</sup>, Univ. of California, Berkeley Phys. Dept.<sup>F</sup>

# 導入

- LiteBIRDはCMB偏光の全天精密観測を行うことでインフレーション期に発生した原始重力波の強度を測定し、代表的なインフレーションモデルの検証を目的とした科学衛星。
- 観測期間は太陽・地球のL2軌道で3年間を予定している。
- 観測期間の間、LiteBIRDは宇宙空間を飛び交う宇宙線(主成分は高エネルギー陽子線)によって被曝し、その吸収線量は水換算で約2krad/yearとなる。

# 目的

- 放射線による被曝はLiteBIRDで使用する光学部材の光学的特性を変化させる恐れがあるため、事前にそれらの放射線耐性を検証する必要がある。
- 放射線医学総合研究所(放医研)の重粒子線がん治療装置(HIMAC)を利用して光学部材となる可能性のある物質に対して陽子ビームを照射し、照射前後で光学的特性の比較を行うことで光学部材の放射線耐性を評価する。

# HIMACにおける陽子ビーム照射実験

- HIMACにおいて2015年5月14日に照射実験を行った。
- ビームエネルギーは160MeVで、照射フルエンスは  $1.2 \times 10^{11}$  protons/cm<sup>2</sup>
- ビームはコリメータによって絞られ、その断面は4x4cm<sup>2</sup>
- 照射量は水換算で10krad(観測期間約5年分)



照射実験の様子



<http://www.nirs.go.jp/rd/collaboration/himac/outline.shtml>

HIMAC全体図

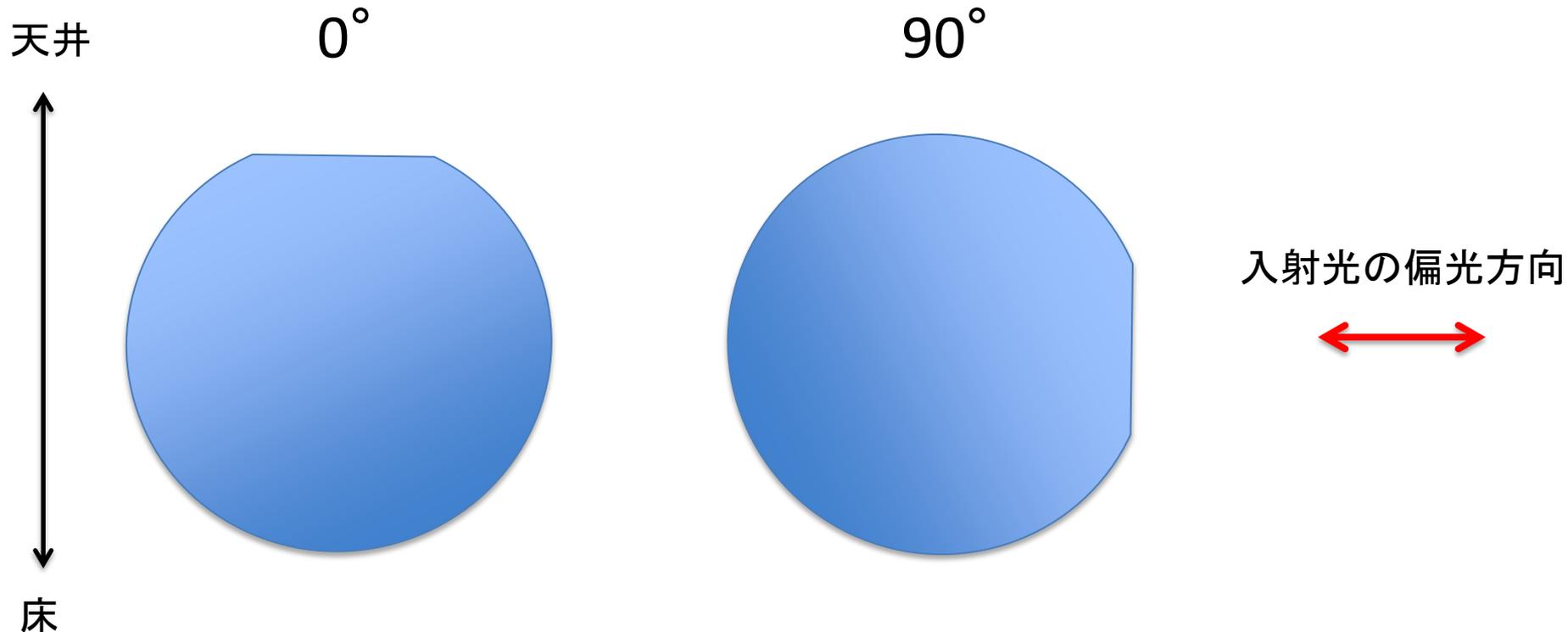
# サンプルリスト

- 以下のサンプルについて照射実験を行い、照射前後の光学的特性の比較を行った。
- アルミナはレンズの、サファイアは複屈折の性質を持つことから半波長板の材質の候補である。
- サファイアについては複屈折の軸に合わせて $0^\circ$  と $90^\circ$  を設定しそれぞれ測定した。

名前	直径[mm]	厚み[mm]
アルミナ99.5%LD	100	$2.093 \pm 0.001$
表面未研磨サファイア(Acut、信光社)	100	$2.538 \pm 0.004$
表面未研磨サファイア(Acut、京セラ)	100	$2.530 \pm 0.001$
表面研磨サファイア(Acut、京セラ)	100	$2.526 \pm 0.002$

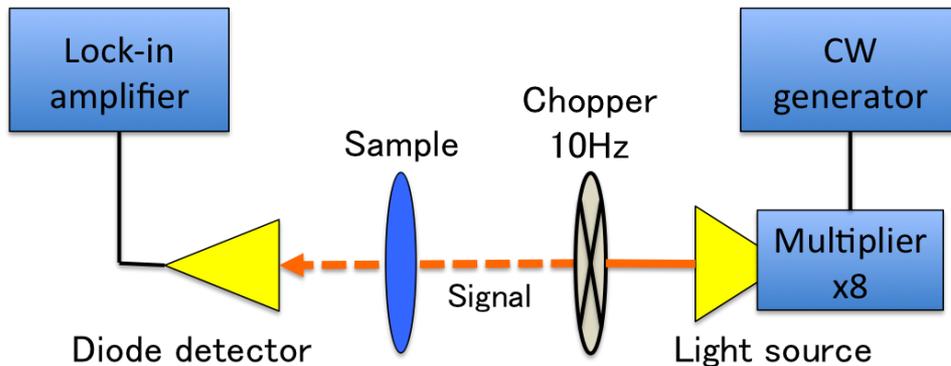
# サファイアの角度について

- a面に沿ってカットされている。
- 画面に垂直方向がc軸(画面に平行な面がc面)および入射光の入射方向



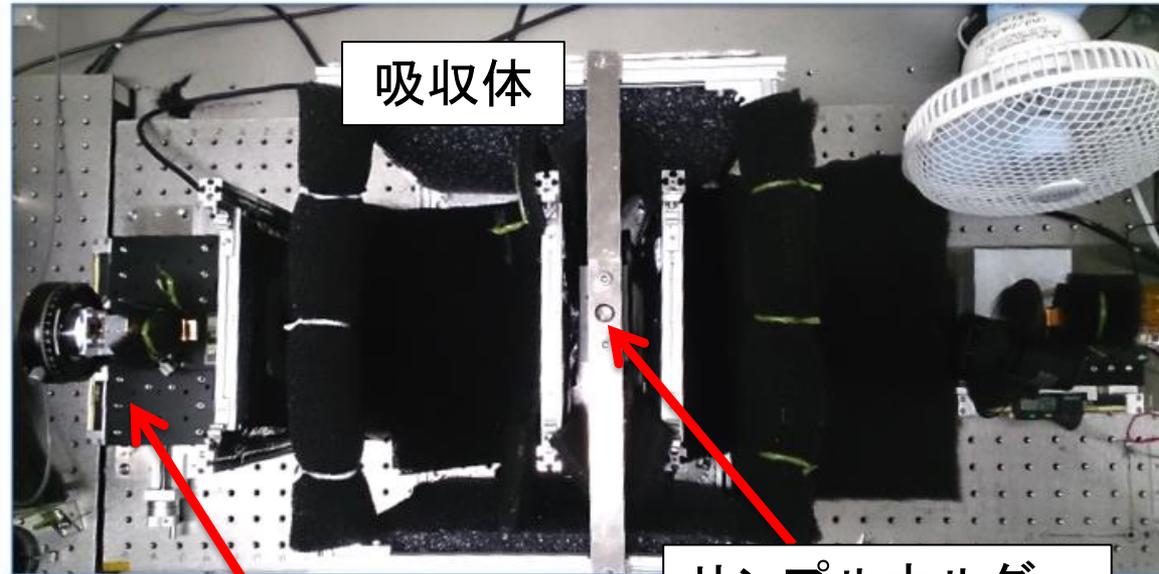
# 照射前後の評価

- 照射前後の光学部材の光学的特性の比較は、照射前後の部材の屈折率の比較によって行う。
- 屈折率測定には宇宙科学研究所(相模原)において松村知岳さん(JAXA/ISAS)によって構築されたミリ波透過率測定システム(概略図と動作は以下)を使用。



光源と検出器間にできる定在波の平均強度を測定する装置で8倍の逡倍器を用いた場合はF-band(90~140GHz)、6倍の逡倍器を用いた場合はW-band(75~100GHz)について測定が可能。

# 光学系部分の画像



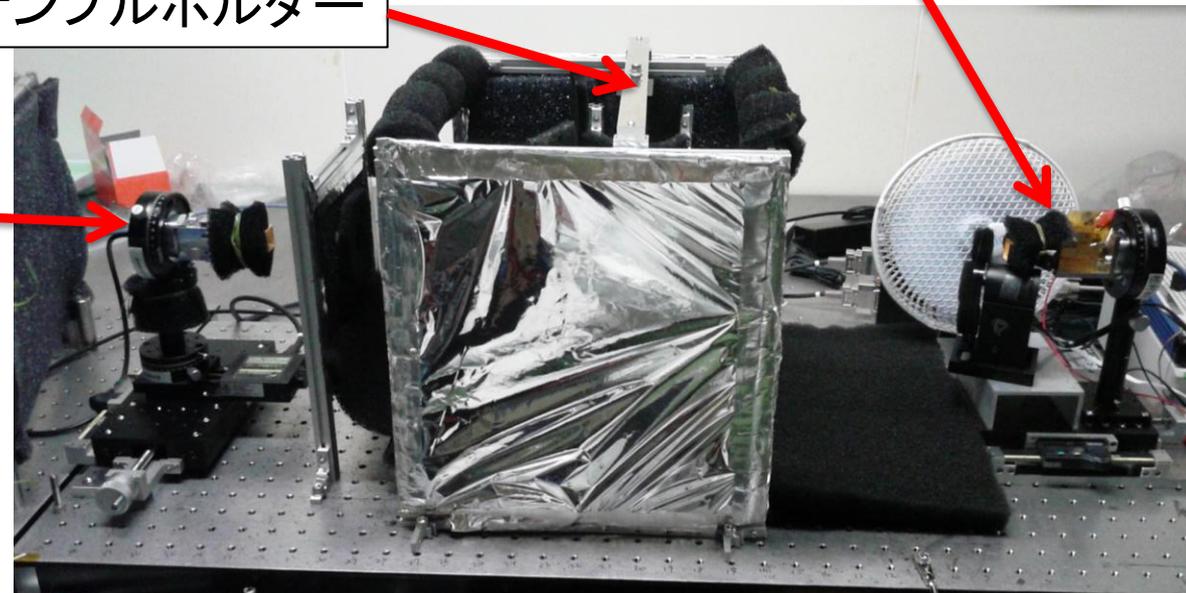
吸収体

←真上からの画像

光源&透倍器

サンプルホルダー

ダイオード  
検出器

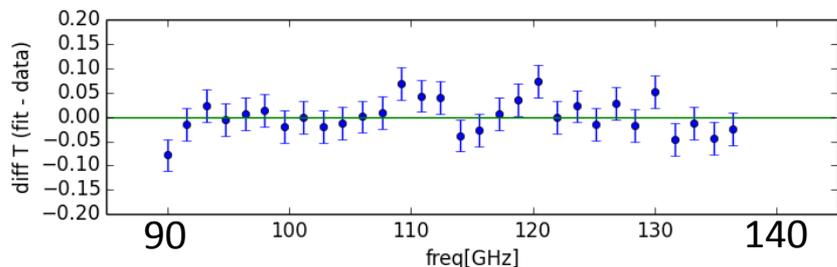
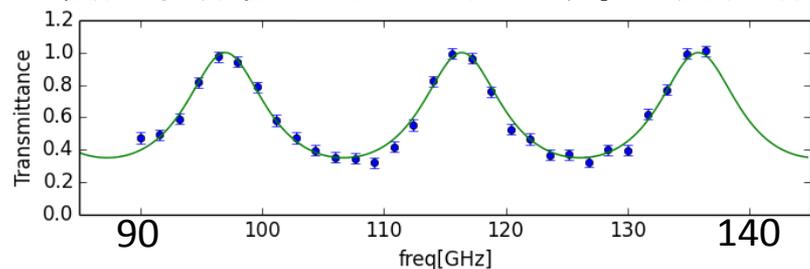


横からの画像→

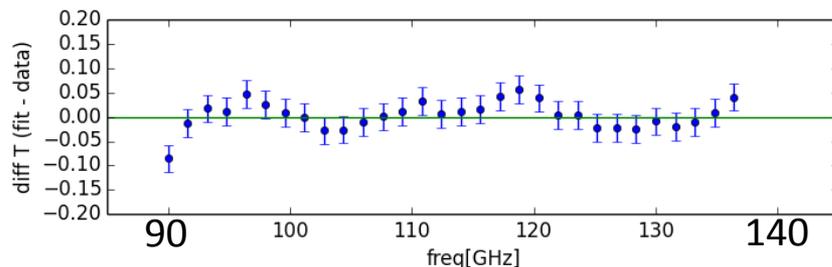
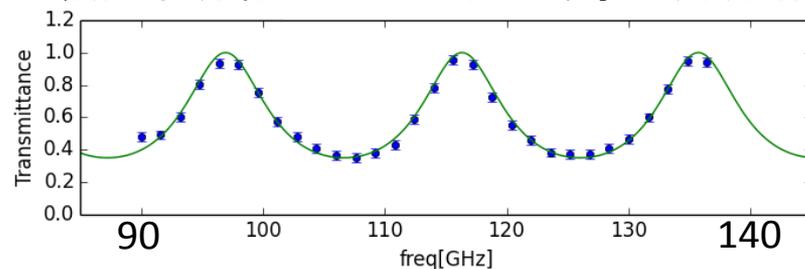
# 解析方法

- ミリ波透過率測定システムを用いて、光源・検出器間にサンプルを入れた場合と入れなかった場合の定在波の平均強度を測定し、その結果からF-bandの各周波数(90~140GHz)におけるサンプルの透過率を得る。
- 得られた透過率の周波数依存性を屈折率でフィット(下図)することでサンプルの屈折率を得る。
- フィットにはpython内のscipy.optimizeに含まれるcurve\_fit(任意の曲線について最小二乗でフィットを行う関数)を用いている。

表面未研磨サファイア(Acut、京セラ)照射前



表面未研磨サファイア(Acut、京セラ)照射後



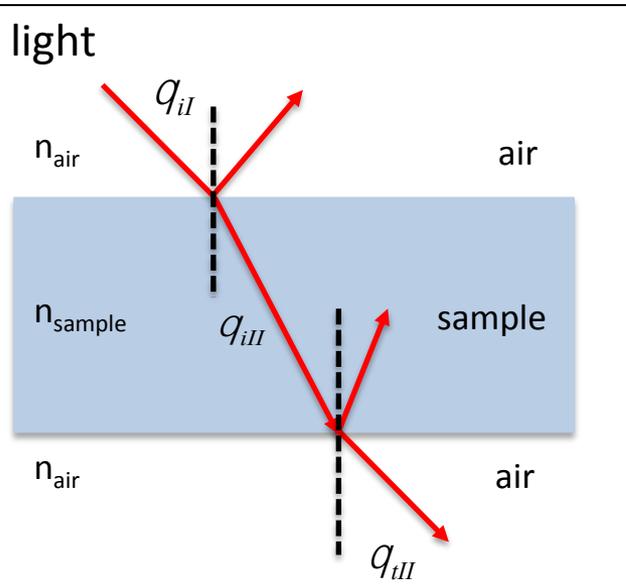
# フィットに用いた式

- フィットに用いた式は以下で、式中の角度に関しては下図。

$$T = \left( \frac{2g_0}{g_0 m_{11} + g_s g_0 m_{12} + m_{21} + g_s m_{22}} \right)^2$$

$$g_0 = \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} n_{air} \cos q_{iI} \quad g_s = \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} n_{air} \cos q_{tII} \quad g_1 = \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} n_{sample} \cos q_{iII} \left( \text{or } \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} \frac{n_{sample}}{\cos q_{iII}} \right)$$

$$m_{11} = m_{22} = \cos k_0 h \quad m_{12} = \frac{i \sin k_0 h}{g_1} \quad m_{21} = g_1 i \sin k_0 h \quad ( ) : \text{電場} E \text{が入射面内の場合}$$



$n_{air}, n_{sample}$ : 空気、サンプルの屈折率

T: 透過率

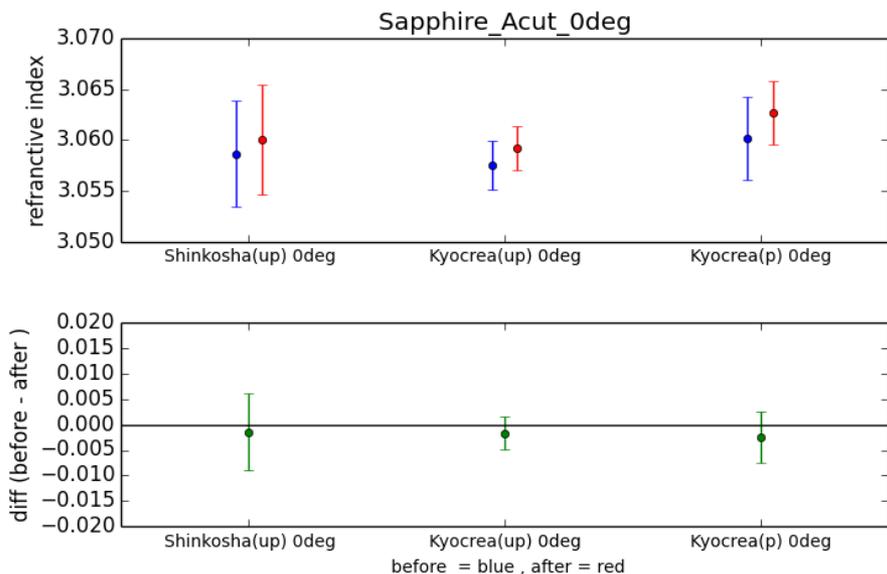
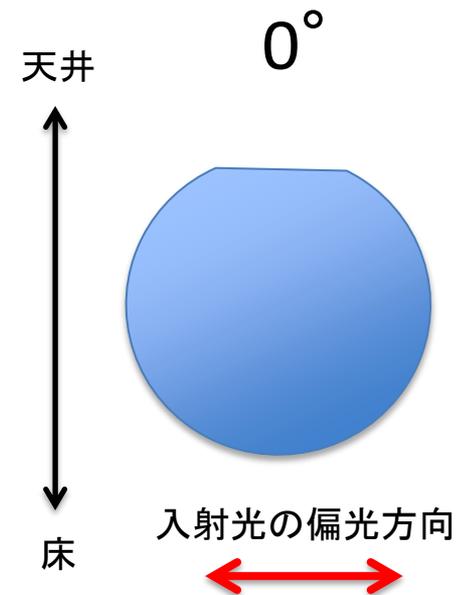
$k_0$ : ミリ波の波数

$h$ : サンプルの光学的厚み

(ヘクト光学 II より)

# 測定結果

サンプル名		表面未研磨 サファイア (Acut、信光社)	表面未研磨 サファイア (Acut、京セラ)	表面研磨 サファイア (Acut、京セラ)
角度 [deg]		0	0	0
照射前	屈折率	3.059	3.058	3.060
	装置による統計誤差	0.002	0.002	0.003
	厚みの測定による系統誤差	0.005	0.001	0.002
	誤差	0.005	0.002	0.004
照射後	屈折率	3.060	3.059	3.063
	装置による統計誤差	0.002	0.002	0.002
	厚みの測定による系統誤差	0.005	0.001	0.002
	誤差	0.005	0.002	0.003

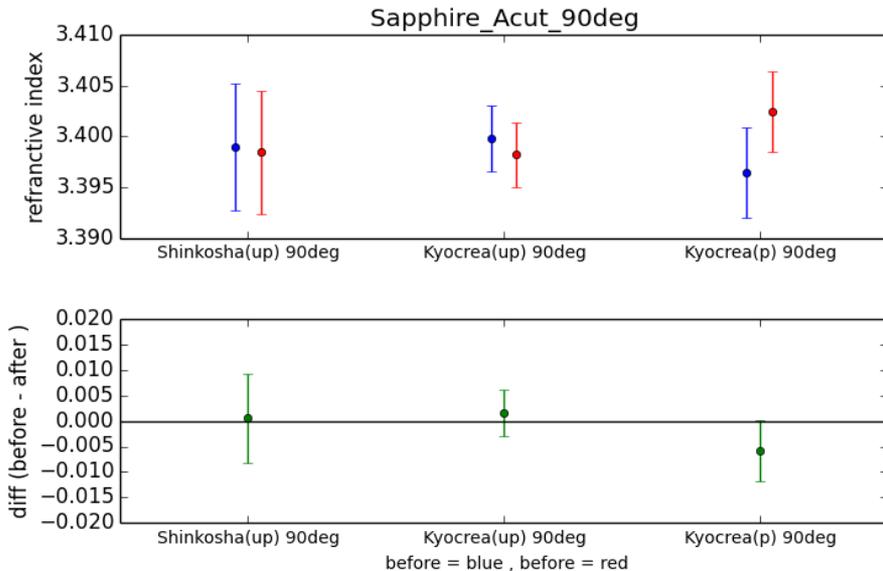
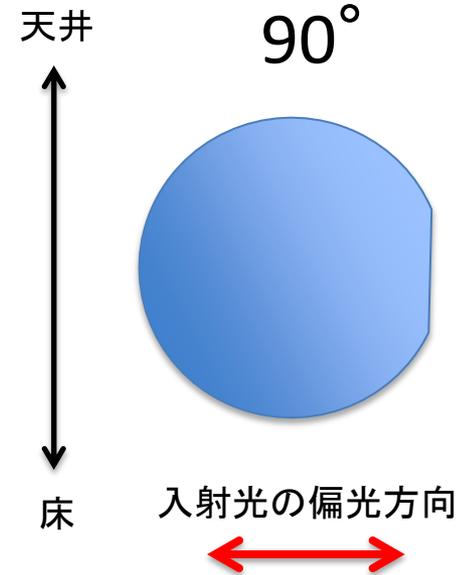


左のグラフについて、上のグラフは照射前後の屈折率、下のグラフは照射前の屈折率から照射後のものを引いたもの

青:照射前  
赤:照射後

照射前後の屈折率は誤差の範囲で一致した。

サンプル名		表面未研磨 サファイア (Acut、信光社)	表面未研磨 サファイア (Acut、京セラ)	表面研磨 サファイア (Acut、京セラ)
角度 [deg]		90	90	90
照射前	屈折率	3.399	3.400	3.396
	装置による統計誤差	0.003	0.003	0.004
	厚みの測定による系統誤差	0.005	0.001	0.003
	誤差	0.006	0.003	0.004
照射後	屈折率	3.398	3.398	3.402
	装置による統計誤差	0.003	0.003	0.003
	厚みの測定による系統誤差	0.005	0.001	0.003
	誤差	0.006	0.003	0.004



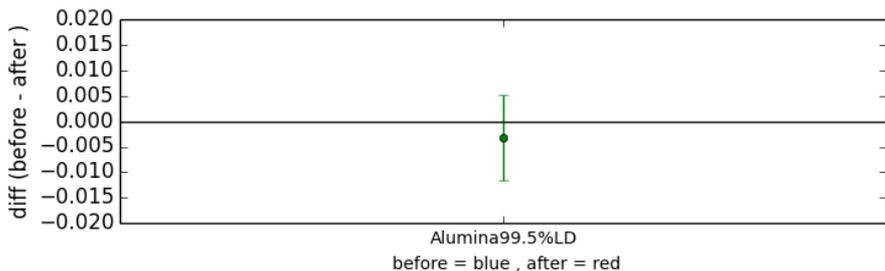
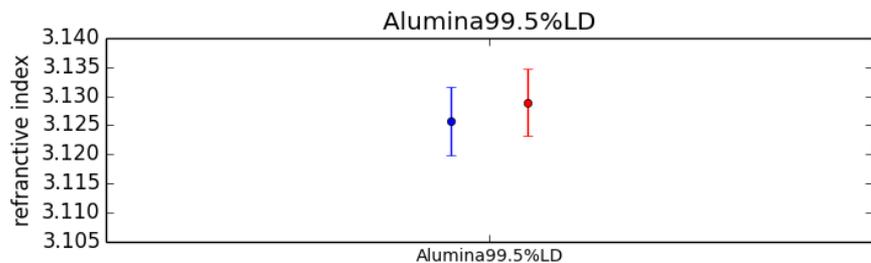
左のグラフについて、上のグラフは照射前後の屈折率、下のグラフは照射前の屈折率から照射後のものを引いたもの

青:照射前

赤:照射後

照射前後の屈折率は誤差の範囲で一致した。

サンプル名		アルミナ99.5%LD
角度 [deg]		-
照射前	屈折率	3.126
	装置による統計誤差	0.006
	厚みの測定による系統誤差	0.001
	誤差	0.006
照射後	屈折率	3.129
	装置による統計誤差	0.006
	厚みの測定による系統誤差	0.001
	誤差	0.006



左のグラフについて、上のグラフは照射前後の屈折率、下のグラフは照射前の屈折率から照射後のものを引いたもの

青:照射前

赤:照射後

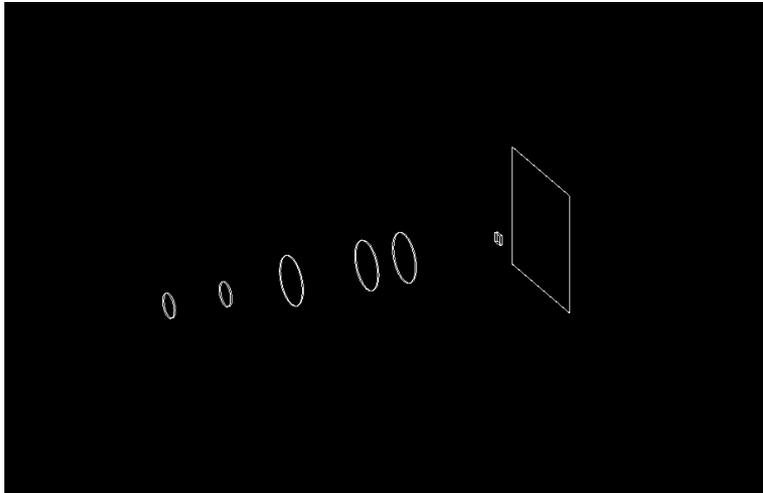
**照射前後の屈折率は誤差の範囲で一致した。**

# まとめ

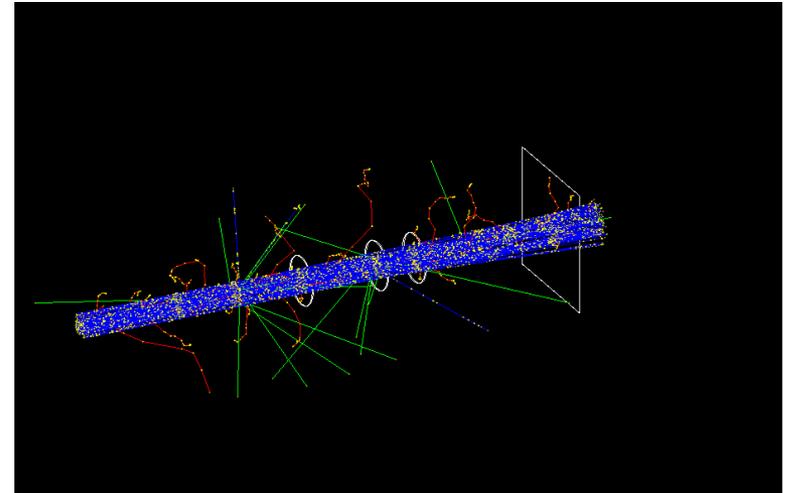
- LiteBIRDで用いられる光学部材(アルミナ、サファイア)に対する放射線耐性試験の2015年5月14日照射分の結果について報告した。
- F-bandの周波数(90~140GHz)において各サンプルの屈折率は照射前後で誤差の範囲で一致した。
- つまり、アルミナ、サファイアに対して水換算で10kradの陽子ビームを照射してもF-bandにおいては影響がない。

# 今後

- 今後W-band(75~110GHz)とF-band(90~140GHz)について測定を続け結果をまとめていく。
- 2015年11月28日に3回目照射実験を行っており結果については現在解析中。
- 2016年7月3日に4回目の照射実験を行う予定。
- Geant4シミュレーションによる個々のサンプルの吸収線量の見積もりも行っていく。



実行前



実行後