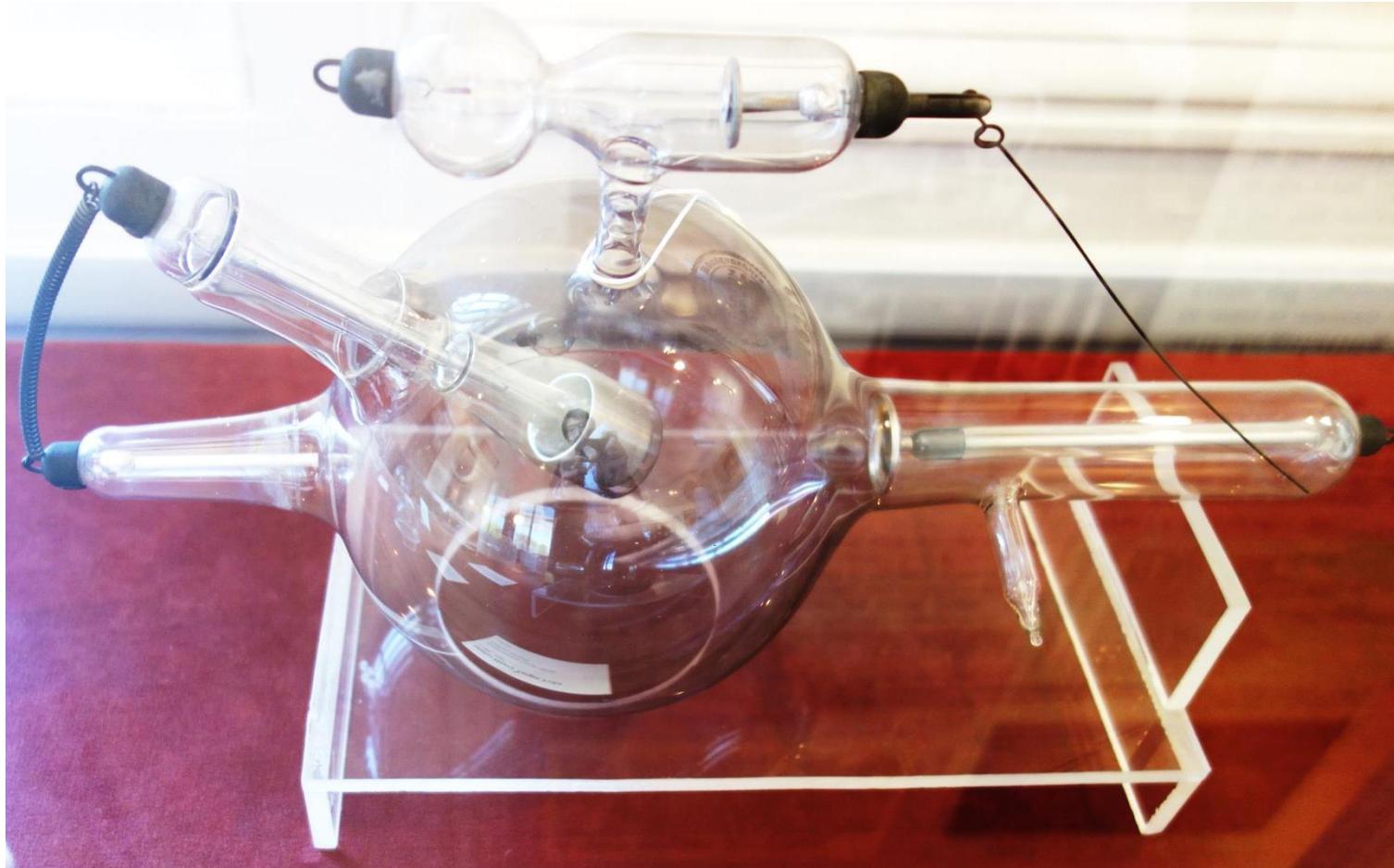


放射光実験用X線検出器

初井宇記・工藤統吾
理化学研究所

X線発生方法：黎明期

Müller Heavy Target Tube ca 1890-1911



Museum Dedicated to Surgical Science, Chicago

electron



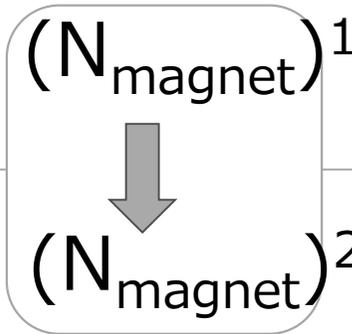
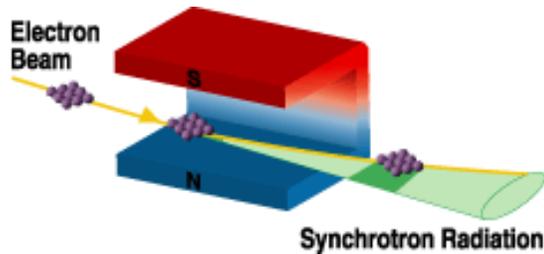
Atomic Nuclei



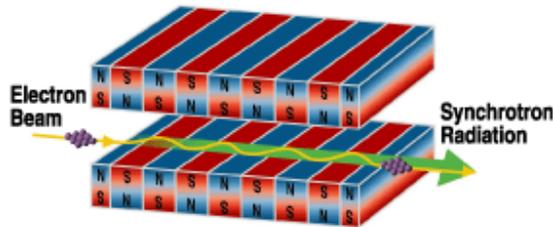
Brilliance (photons/sec/mm²/mrad²/0.1% B.W.)

ca. 1990 10^7

ca. 1960s 10^8



Late 70's/early 70's 10^{12}
 1982: Photon Factory 10^{17}



1994: ESRF
 1996: APS
 1997: SPring-8 10^{21}



SPring-8

- のべ～10,000名/年
- 日本の出版論文の約1%に貢献
- 民間の研究開発でも活用されている
 - 9万円/hour

世界の放射光施設

運転中
建設中
計画中
究極リング提案

東北放射光施設



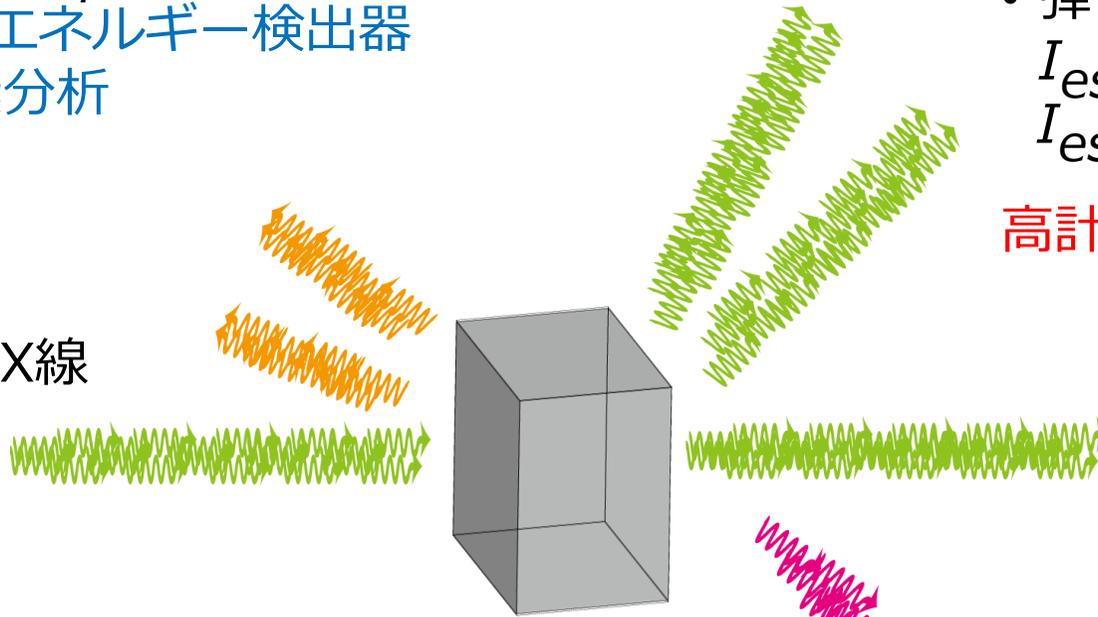
Courtesy of Prof. Hama (Tohoku Univ.)

- X線蛍光

$$I_F \propto A$$

X線エネルギー検出器
元素分析

入射 X線



- 弾性散乱

$$I_{es} \propto q^{-4} \text{ (uniform material)}$$

$$I_{es} \propto E_{ph}^{-2}$$

高計数率検出器

- 透過

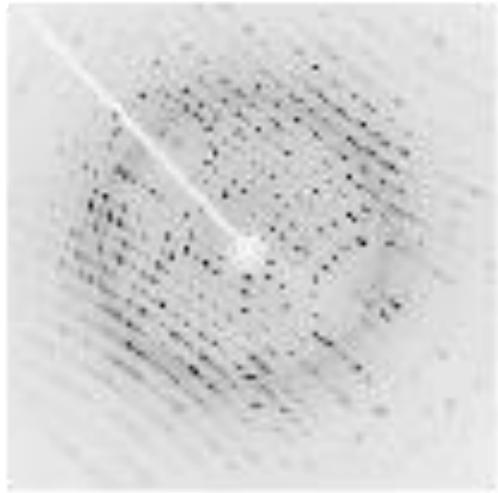
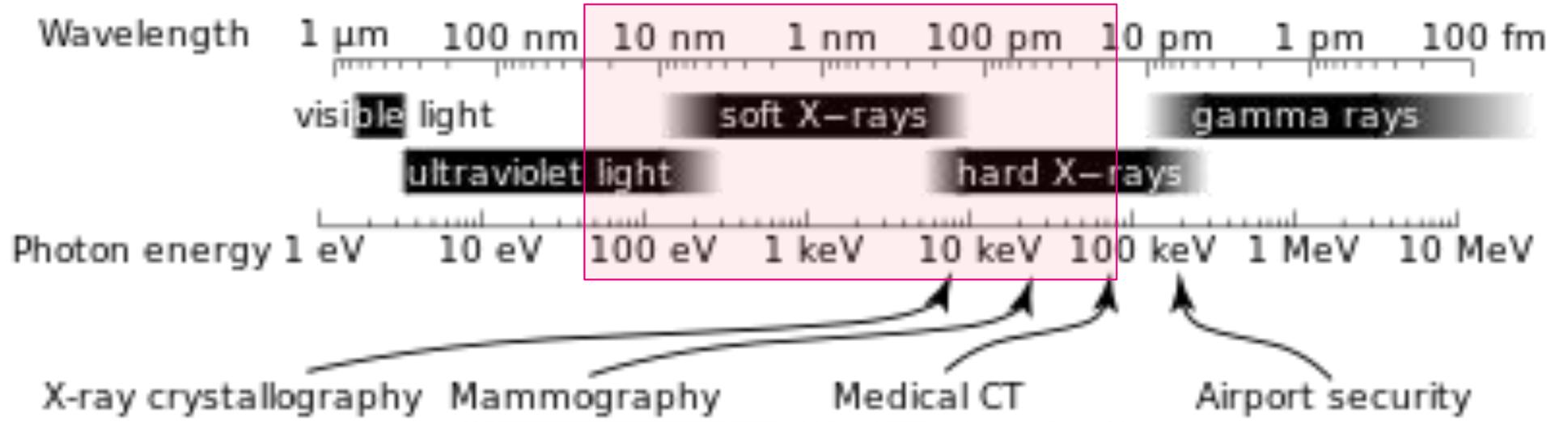
$$A = -\log(I/I_0)$$

高計数率検出器

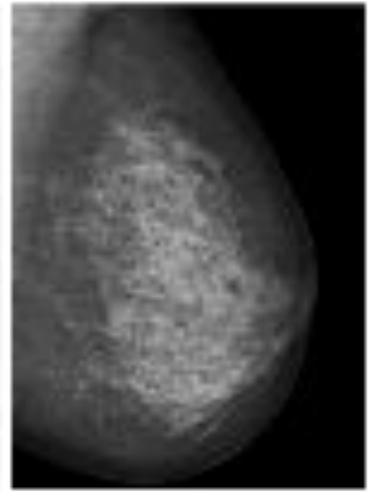
- コンプトン散乱

散乱ベクトル
光子エネルギー検出

放射光施設で利用されているX線



X線回折による
原子構造の決定

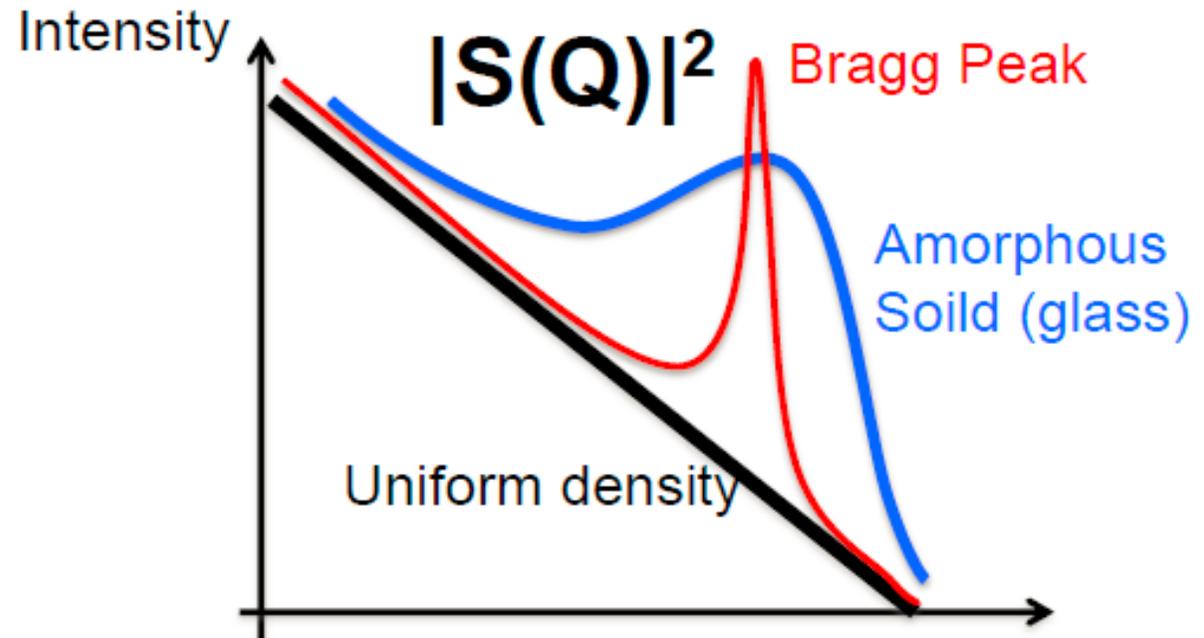
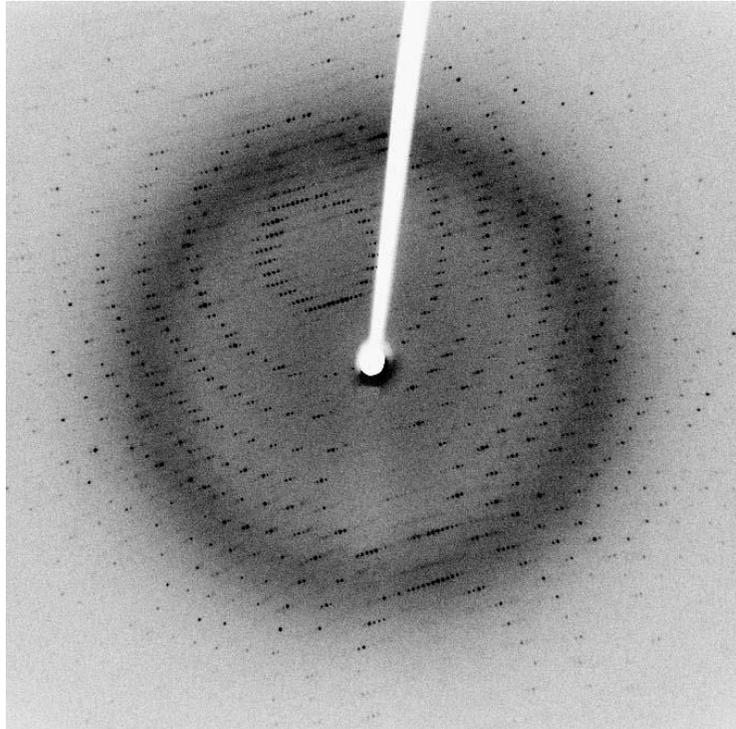


透過像によるCT撮像



from wikipedia

X線回折



散乱強度 \propto 散乱角⁻⁴

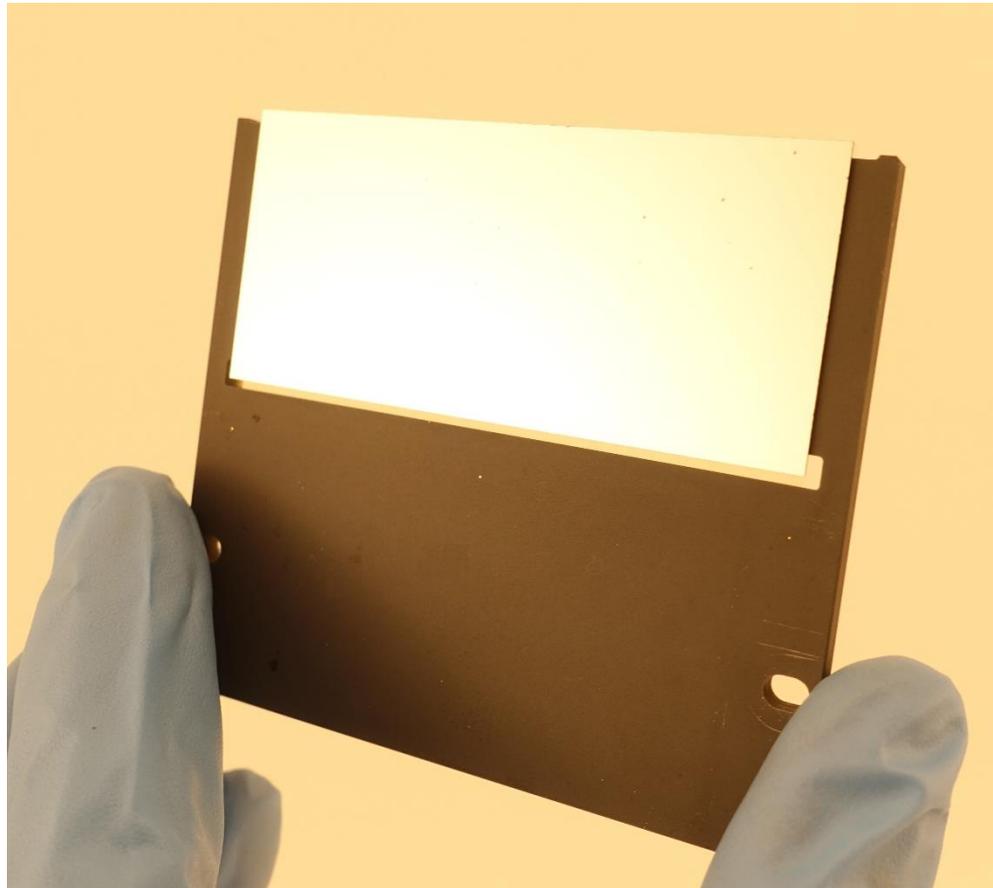
本質的に高いダイナミックレンジが必要な実験 (>O(6))

放射光による高強度X線と高ダイナミックレンジ検出器が重要

SOPHIAS Sensor

T. Hatsui et.al., Proceedings of International Image Sensor Workshop, (2013) Art. Num. 3.05

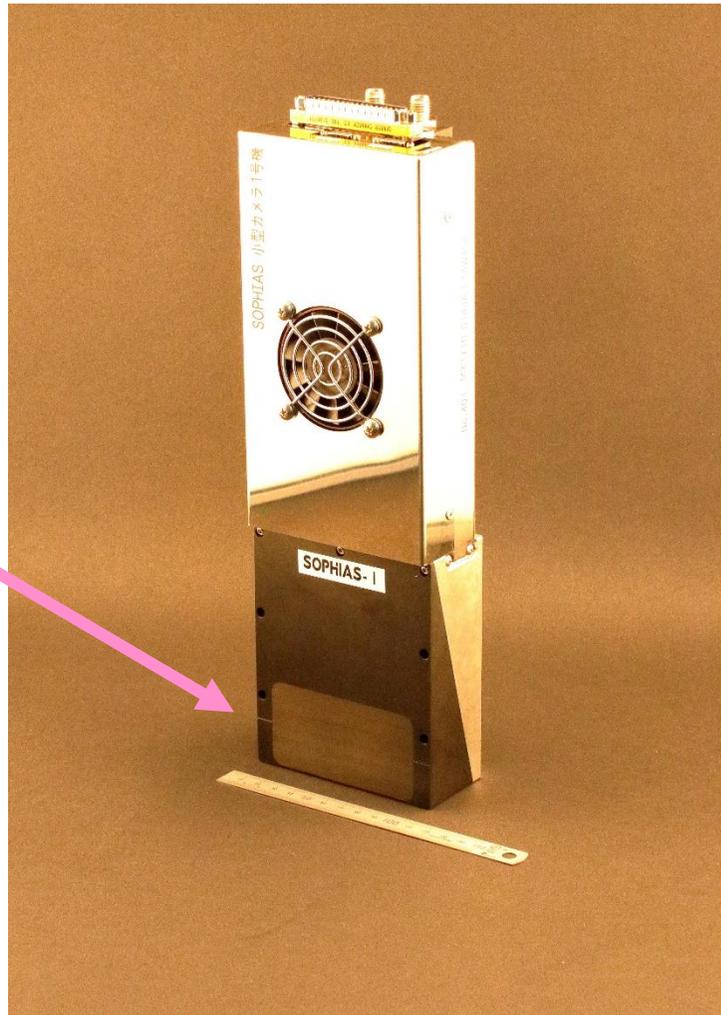
Ping Grid Array Package
(Silicon nitride)



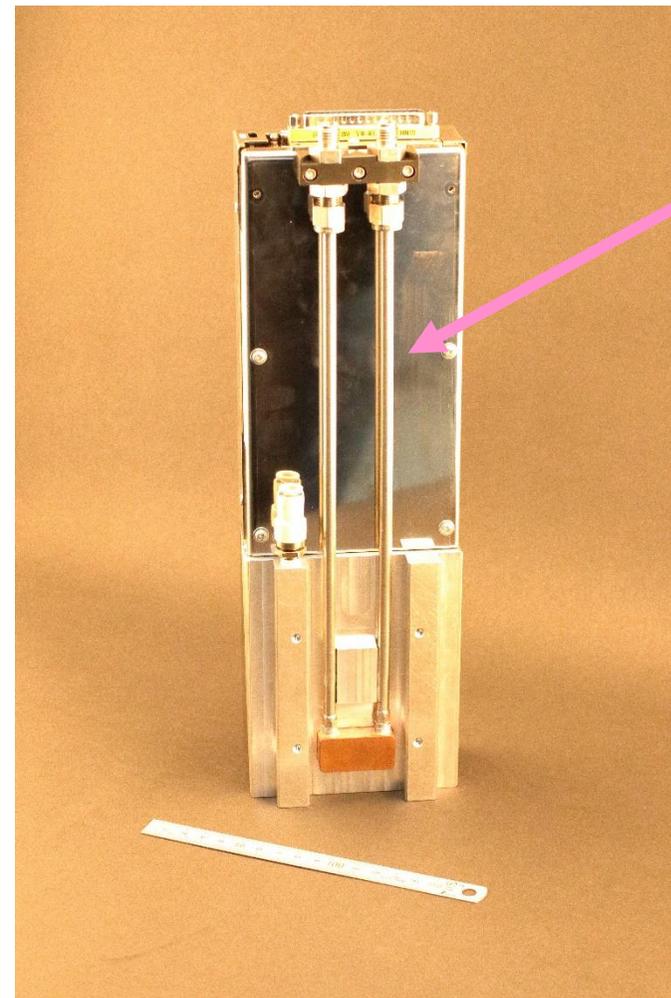
Major Feature

- Peak signal 18.7 Me-/pixel
- Noise 160 e-
- Imaging Area: 64.77 x 26.73 mm²

Largest Sensor chip as monolithic active pixel sensor (MAPS) for radiation detection.



Sensor



Water Tubing

Cooling by a thermoelectric cooler with water circulation
 Sensor operation at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

X線画像検出器のトップ研究開発グループ Paul Scherrer InstituteのJungfrau検出器との比較

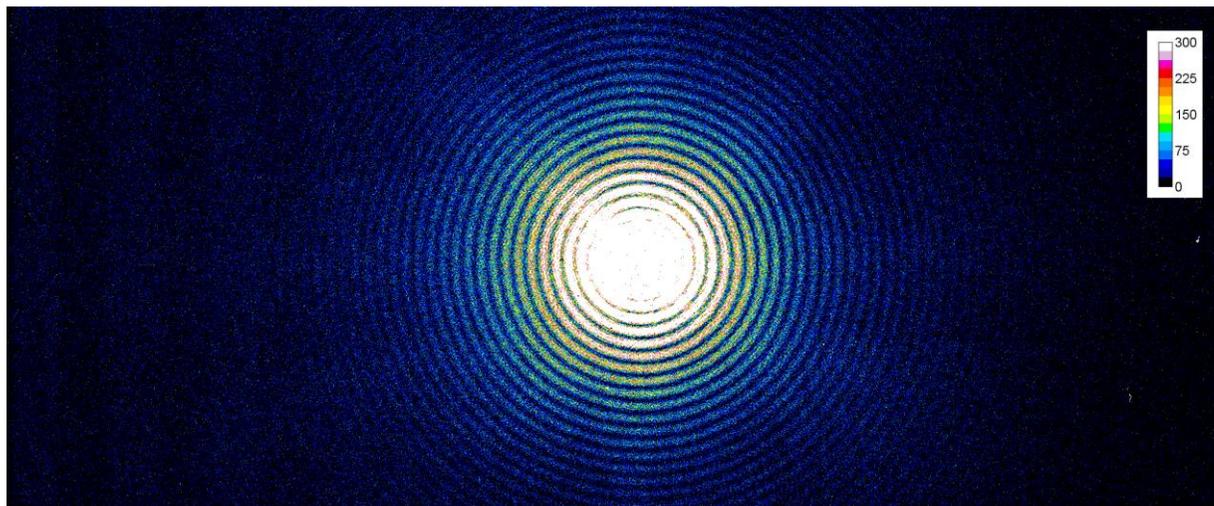
	Jungfrau (2017)	SOPHIAS (2015)	単位	コメント
利用開始	2017	2015	年	
単一光子検出	可能	可能		hv=6 keV
Frame rate	100	60	Hz	XFEL施設の周波数に合致すること
消費電力	20-30	0.5	μW	
画素サイズ	75	30	μm ²	
画素数	0.5	1.9	Mpixels	
最大計数光子数 @hv=6 keV	20,700	11,400	photons	
FoM1	3.67	12.6	Photons/1 μm ²	最大計数光子数密度 hv=6 keV
消費電力	20-30	0.5	μW/pixel	
消費密度	0.41-0.61	0.056	W/cm ²	
FoM2	69-104	1368	Photons/nW	最大計数光子*フレーム レート/電力 hv=6 keV

x4
→

x10倍以上
→

SOPHIAS-L: 低ノイズバージョン

高橋幸生（東北大学）らとの共同研究



SOPHIAS-Lによる ピンホールの回折画像 1000枚積算
算 各ショットにつき<25 DNをDiscriminationにて信号量0として積算
(各ショットBG引きあり)

- 2.5 keVの1光子検出まで可能となった。
- 硫黄原子を含む高分子材料の動的構造解析に利用する予定
 - 従来のCCD検出器に比べ100倍以上の高スループット化

XFEL facility, SACLA (Since 2012-)

8 GeV 700 m long

SR facility, SPring-8 (Since 1997-)

8 GeV circumference 1.5 km



SOPHIAS (2007-2018)

- 50チップの製造, 95 Mpixels, 0.09 m²

SOPHIAS-L (2017-2019)

- SPring-8 IIの高度化 (2020年代半ば)

SPring-8-II Conceptual Design Report (2014)

100~1000倍のX線光子束が得られる予定

- Next Gen. Detectors

放射光実験の硬X線画像検出器 (> 7 keV)

1980年代

雨宮 慶幸ら
富士フィルム



1990年代

米国・欧州



2000～2010年代

欧州

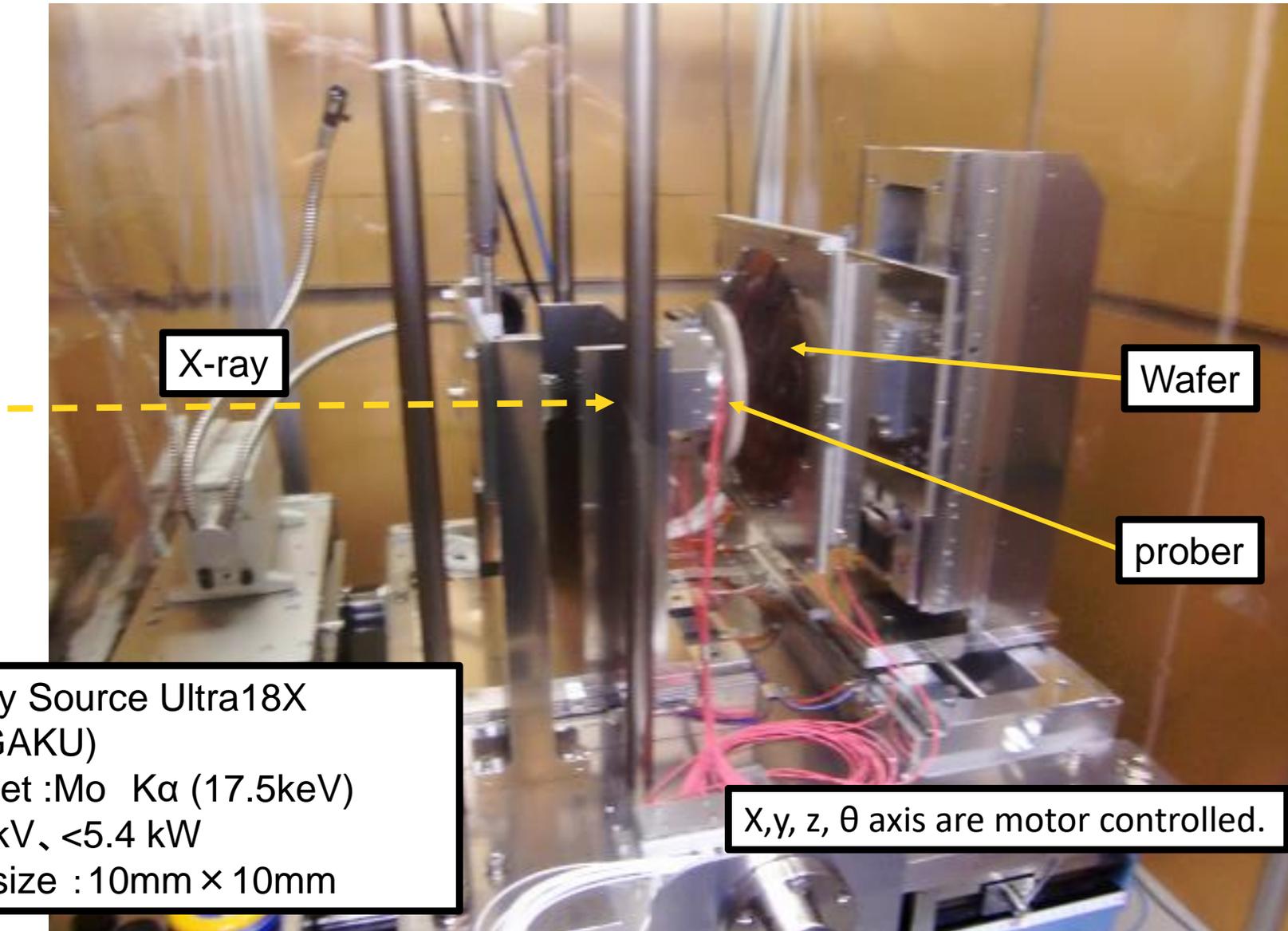


	イメージング プレート	間接検出 積分型CCD	直接検出 計数型ハイブリッド
DR	5桁	4桁	6桁、～1 Mcps
ノイズ	～3光子	～1光子	～0.1光子
速度	～1/(10 min)	10 Hz	100 Hz
X線エネルギー	不可	不可	不可
X線照射耐性	あり(交換)	一定程度あり	～0.3 MGy

放射光：地上で最も強いX線源

センサも高いレベルのX線耐性が必要 (SOPHIASは10～100 Gyにとどまる)

Designed by Hyogo Univ. Developed by Hyogo Univ. and RIKEN.



X-ray Source Ultra18X
(RIGAKU)
Target :Mo K α (17.5keV)
<60kV、<5.4 kW
Slit size : 10mm \times 10mm

X,y, z, θ axis are motor controlled.

- 放射光
 - 真空中の電子を利用したX線発生メカニズムを利用。世界中で建設
- 利用
 - 多様な実験がある。重要な実験に回折実験がある。
- 検出器に対する要求
 - 回折角度が大きくなると、回折強度が急激に減少
- SOPHIAS
 - 微小な画素で高ダイナミックレンジを実現
 - 低ノイズ版のSOPHIAS-Lも順調に稼働
- 今後
 - SPring-8のアップグレードを予定している。
 - 更なる高度な検出器が求められている。
 - 回折
 - 蛍光X線検出用（X線エネルギー検出）
 - コンプトン散乱用（光子エネルギー＋ベクトル）
 - 透過X線用（deep sub-micron空間分解能、広い視野）

謝辞

- 理研・JASRIのチームメンバー、および関係者の皆様



- 松本崇博、松田祐二¹、寺西信一²
 - 1) 現 株式会社 ミスト
 - 2) 現兵庫県立大学
- 香村芳樹、高橋直、佐野睦、糸賀俊朗、田尻寛男（理研）
- 日本技術センター
- A-R-Tec
- ラピスセミコンダクタ
- 京セラ
- 新井康夫、倉知 郁生（KEK）

ご清聴ありがとうございました。