

La missione spaziale IXPE

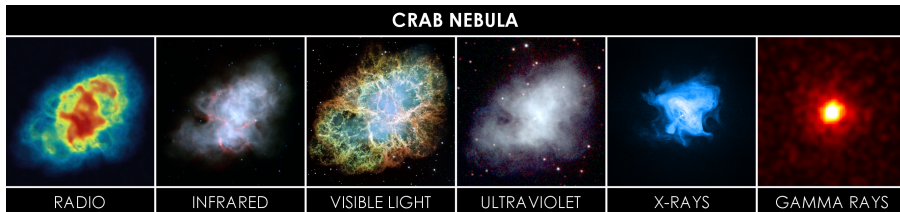
Una nuova finestra osservativa sull'Universo



Niccolò Di Lalla
niccolo.dilalla@pi.infn.it

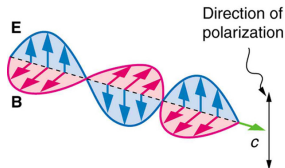
Università e INFN-Pisa

Incontri di Fisica delle Alte Energie 2017



▷ La luce porta quattro tipi di informazione:

- ▷ Direzione;
- ▷ Energia;
- ▷ Tempo;
- ▷ Polarizzazione.



▷ Tecniche osservative ben sviluppate su tutto lo spettro elettromagnetico.

- ▷ **Uniche eccezioni: polarimetria X e gamma.**

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, **220**:L117–L121, 1978 March 15
© 1978. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A PRECISION MEASUREMENT OF THE X-RAY POLARIZATION OF THE CRAB NEBULA WITHOUT PULSAR CONTAMINATION

M. C. WEISSKOPF, E. H. SILVER, H. L. KESTENBAUM, K. S. LONG, AND R. NOVICK

Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University

Received 1977 November 15; accepted 1977 December 22

ABSTRACT

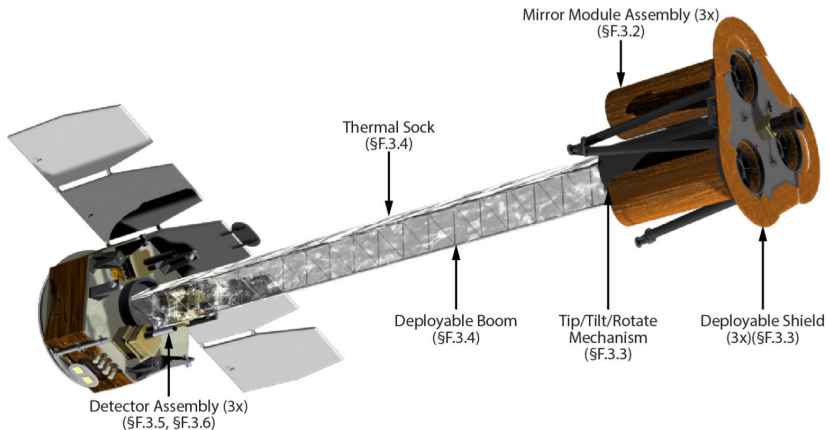
The linear X-ray polarization of the Crab Nebula has been precisely measured at 2.6 keV and 5.2 keV with the OSO 8 graphite crystal polarimeters. The 1.4 ms time resolution of these instruments permitted the removal of any contribution to the polarization from the pulsar. The nebular polarization is $19.2\% \pm 1.0\%$ at a position angle of 156.4 ± 1.4 at 2.6 keV. At 5.2 keV the corresponding results are $19.5\% \pm 2.8\%$ at 152.6 ± 4.0 .

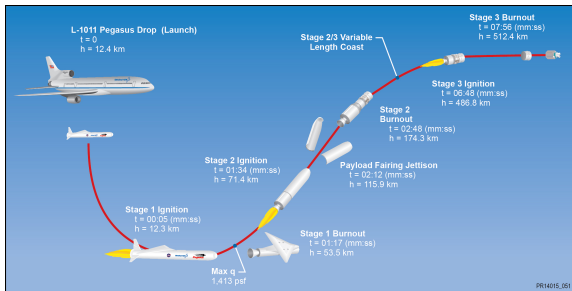
Subject headings: nebulae: Crab Nebula — polarization

- ▷ Un polarimetro X a cristallo lanciato nel 1975 a bordo del satellite OSO-8.
 - ▷ Misura a $\sim 20 \sigma$ mediata su tutta la nebulosa del Granchio;
 - ▷ Ancora la misura di riferimento nella banda dei raggi X soffici.
- ▷ La polarimetria X è ancora largamente sottosviluppata, in confronto alle altre branche dell'astronomia X.
 - ▷ Nessuna missione di polarimetria X negli ultimi 40 anni.

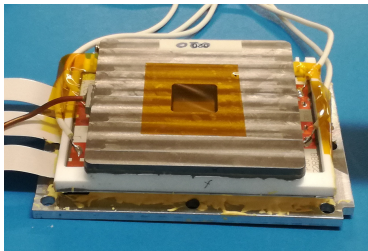
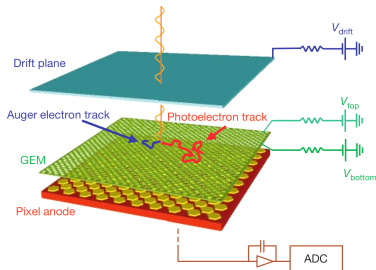
The screenshot shows the NASA website's navigation bar with links for Topics, Missions, Galleries, NASA TV, Follow NASA, Downloads, About, and NASA Audiences. A search bar is located on the right. The main content area features a large image of a black hole with accretion disks, titled "Black Holes". Below the image, the date "Jan. 3, 2017" and "RELEASE 17-002" are displayed. The headline reads "NASA Selects Mission to Study Black Holes, Cosmic X-ray Mysteries". To the right of the headline are social media sharing icons for Facebook, Twitter, Google+, and Pinterest. The text below the headline states: "NASA has selected a science mission that will allow astronomers to explore, for the first time, the hidden details of some of the most extreme and exotic astronomical objects, such as stellar and supermassive black holes, neutron stars and pulsars." A paragraph follows: "Objects such as black holes can heat surrounding gases to more than a million degrees. The high-energy X-ray radiation from this gas can be polarized – vibrating in a particular direction. The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) mission will fly three space telescopes with cameras capable of measuring the polarization of these cosmic X-rays, allowing scientists to answer fundamental questions about these turbulent and extreme environments where gravitational, electric and magnetic fields are at their limits."

- ▷ IXPE acronimo di **Imaging X-ray Polarimetry Explorer**.
- ▷ Recentemente selezionata dalla NASA come prossima missione spaziale del programma SMEX (SMall EXplorer), con lancio previsto a fine 2020 e durata di almeno tre anni.





- ▷ Tre telescopi identici interamente dedicati alla polarimetria X:
 - ▷ Ridondanza totale;
 - ▷ Riduzione di effetti sistematici residui.
- ▷ Budget di massa e potenza (totali): ~ 300 kg, ~ 200 W.
- ▷ Lunghezza focale: 4 m (boom estensibile).
- ▷ Lancio con razzo Pegasus dalla base di Kwajalein:
 - ▷ Orbita circolare con altezza nominale di 540 km e inclinazione di 0° ;
 - ▷ Unico modo di operazione a puntamento.



▷ Componenti di base:

- ▷ Sottile finestra di ingresso di Berillio;
- ▷ Cella di assorbimento riempita di gas (He-DME);
- ▷ Gas Electron Multiplier (GEM) per amplificazione del segnale;
- ▷ Matrice di pixel esagonali per la raccolta delle cariche (ASIC).

▷ Sensibile fino a energia molto bassa (~ 1 keV).

▷ Buona capacità di **imaging** per sorgenti estese.

▷ Risultato di circa 20 anni di attività di R&D eseguita a Pisa sotto la guida di Ronaldo Bellazzini.

letters to nature

An efficient photoelectric X-ray polarimeter for the study of black holes and neutron stars

Enrico Costa*, Paolo Soffitta[†], Romano Bellazzini[†], Alessandro Brez[†], Nicholas Lunz[†] & Gloria Spandre[†]

* Istituto di Astrofisica Spaziale del CNR, Via Fosso del Cavaliere 100, I-00133, Rome, Italy

† Istituto Nazionale di Fisica Nucleare-Sezione di Pisa, Via Livornese 1291, I-56010 San Piero a Grado, Pisa, Italy

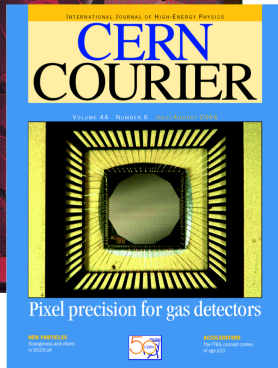
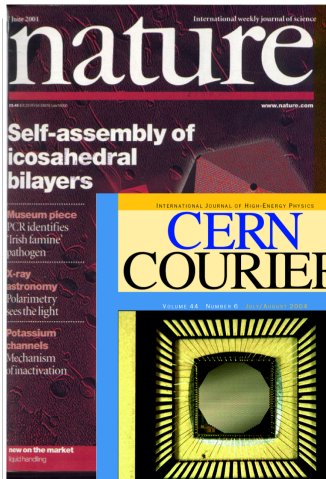
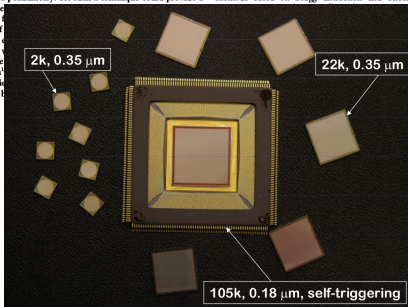
The study of astronomical objects using electromagnetic radiation involves four basic observational approaches: imaging, spectroscopy, photometry (accurate counting of the photons received) and polarimetry (measurement of the polarizations of the observed photons). In contrast to observations at other wavelengths, a lack of sensitivity has prevented X-ray astronomy from making use of polarimetry. Yet such a technique could provide a direct picture of the gravitational fields of black holes and neutron stars, for which polarization measurements have been suggested, crucial to understand the geometry and physics of emitting regions. We can separate synchrotron X-rays from jets^{13,18} from the emission scattered by the disk corona or by a thick torus. The effects of relativistic motions and of the gravitational field of a central black hole have probably been detected by iron line spectroscopy on the Seyfert-1 galaxy MCG-6-30-15 (ref. 15) but this feature is not ubiquitous in active galactic nuclei. Polarimetry of the X-ray continuum provides a more general tool to explore the structure of emitting regions^{16,17}, to track instabilities and to derive direct information on mass and angular momentum¹² of supermassive black holes.

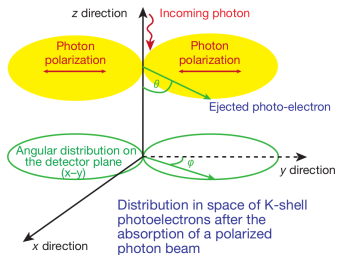
instrument that makes X-ray polarimetry possible. The factor of 100 improvement in sensitivity that we have achieved will allow direct exploration of the most dramatic objects of the X-ray sky.

The main advantage of the proposed polarimeter is its capability of investigating active galactic nuclei (quasars, blazars and Seyfert galaxies) for which polarization measurements have been suggested, crucial to understand the geometry and physics of emitting regions. We can separate synchrotron X-rays from jets^{13,18} from the emission scattered by the disk corona or by a thick torus. The effects of relativistic motions and of the gravitational field of a central black hole have probably been detected by iron line spectroscopy on the Seyfert-1 galaxy MCG-6-30-15 (ref. 15) but this feature is not ubiquitous in active galactic nuclei. Polarimetry of the X-ray continuum provides a more general tool to explore the structure of emitting regions^{16,17}, to track instabilities and to derive direct information on mass and angular momentum¹² of supermassive black holes.

In spite of this wealth of expectations, the important but only positive result until now is the measurement, by the Bragg technique, of the polarization of the Crab nebula^{16,17}. The Stellar X-ray Polarimeter²³ (SXP) represents the state of the art for conventional methods based on Bragg diffraction and Thomson scattering.

angle at one energy²² is non-sensitivity of polarization. The energy which is around that photoelectron

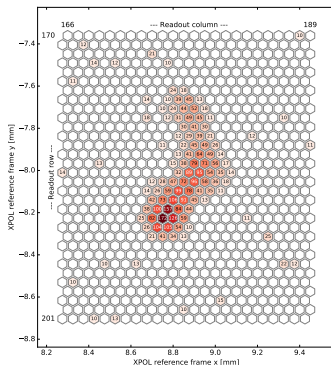




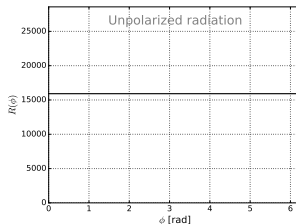
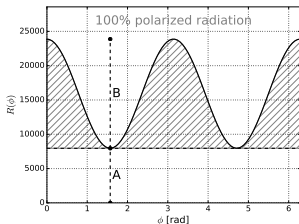
- ▷ Processo di interazione dominante a bassa energia (< 10 keV).
- ▷ Distribuzione di emissione dei fotoelettroni in K-shell modulata al 100% per radiazione polarizzata linearmente:

$$\frac{d\sigma_C^K}{d\Omega} \propto Z^5 E^{-\frac{7}{2}} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 + \beta \cos \theta)^4}$$

- ▷ Necessità di ricostruire la **direzione di emissione del fotoelettrone**.
- ▷ La traccia tipica di un fotoelettrone da 5 keV è $\sim \mu m$ in un solido:
 - ▷ Necessario utilizzare un mezzo gassoso.



- ▷ Capacità di auto-generazione del segnale di trigger.
- ▷ Definizione interna della regione di interesse per la lettura degli eventi.
 - ▷ Dimensione tipica della finestra < 1 k pixels;
 - ▷ Lettura multipla per la sottrazione dei piedistalli evento per evento.
- ▷ Lettura seriale attraverso un ADC esterno.



- ▷ Ogni polarimetro misura la modulazione azimutale attorno all'angolo di polarizzazione ϕ_0 del fascio di fotoni incidente:

$$R(\phi) = A + B \cos^2(\phi - \phi_0)$$

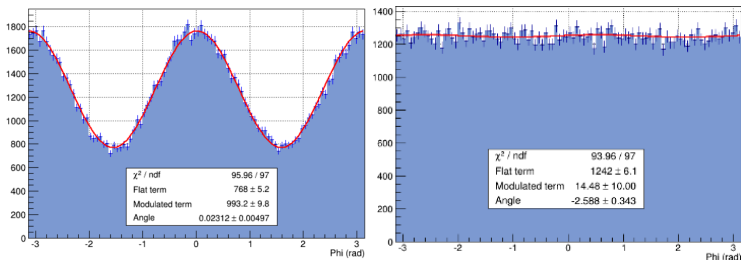
- ▷ **Fattore di modulazione:** risposta alla radiazione 100% polarizzata:

$$\mu = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} = \frac{B}{B + 2A}$$

- ▷ **Minimum Detectable Polarization (MDP)**¹ senza segnale di fondo:

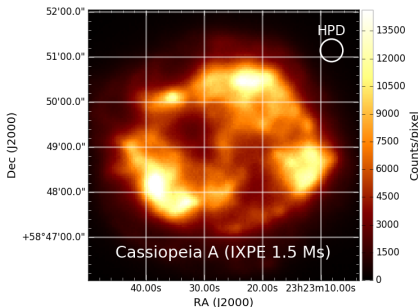
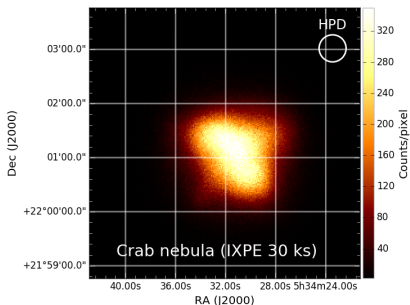
$$\text{MDP} = \frac{4.29}{\mu \sqrt{N}} \quad (99\% \text{CL})$$

¹Sono necessari 184,000 fotoni per raggiungere un MDP di 1% anche per $\mu = 1$!

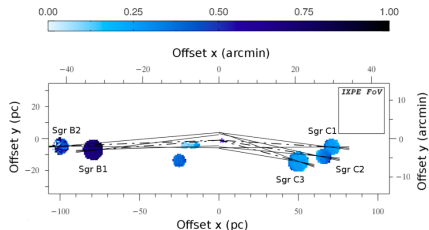
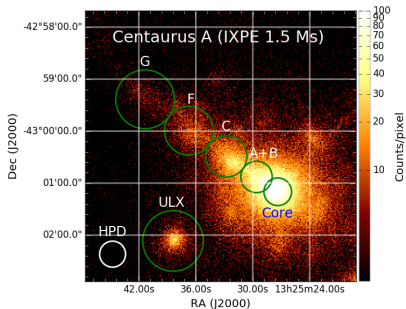


- ▷ **Fattore di modulazione:** 0.2 (0.7) a 2 (8) keV.
 - ▷ Stabilità su \sim 3 anni dimostrata con un rivelatore sigillato;
 - ▷ Modulazione residua per radiazione non polarizzata \sim 0.1%.
- ▷ **Risoluzione spaziale:** \sim 90 μm a 5.9 keV (\ll traccia).
 - ▷ Buona per un telescopio a raggi X con \sim 4 m di lunghezza focale e \sim 20 arcsec di risoluzione angolare.
- ▷ **Risoluzione energetica (FWHM):** \sim 15% a 5.9 keV.
 - ▷ Abbastanza per fare polarimetria spettralmente risolta (in pochi bin di energia), quando la statistica lo permette.
- ▷ **Risoluzione temporale:** \sim μs .
 - ▷ Più che adeguata per le scale di tempo di interesse.

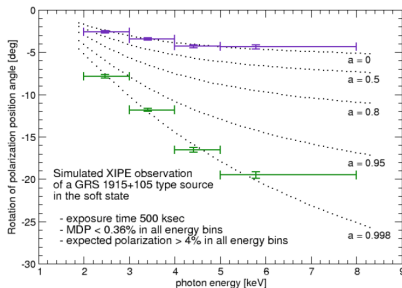
- ▷ La polarimetria X aggiunge **due parametri in più** allo spazio delle fasi dove i modelli sono confrontati con le osservazioni:
 - ▷ **Grado di polarizzazione;**
 - ▷ **Angolo di polarizzazione.**
- ▷ Una significativa polarizzazione nei raggi X è attesa in una varietà di classi di sorgenti astronomiche, **galattiche ed extra-galattiche**:
 - ▷ Processi di accelerazione e di emissione non termica (sincrotrone);
 - ▷ Emissioni o scattering in geometrie asferiche.
- ▷ Informazione diretta sulla **geometria** della sorgente e sulla configurazione del **campo magnetico**.
- ▷ Studio di sistemi sotto condizioni estreme e implicazioni per la fisica fondamentale:
 - ▷ Campi gravitazionali intensi ed effetti di relatività generale;
 - ▷ Campi magnetici intensi ed effetti di QED.



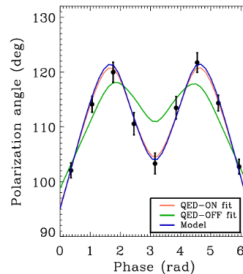
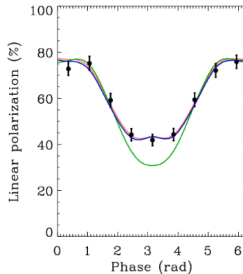
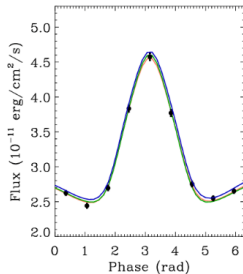
- ▷ **Pulsar wind nebulae**: campo magnetico ordinato, alto grado di polarizzazione atteso (e misurato).
- ▷ Fronti di shock nei **resti di supernova**: candidati per l'accelerazione di raggi cosmici, campi magnetici turbolenti.
- ▷ La polarimetria X permette di studiare direttamente i luoghi di accelerazione degli elettroni.



- ▷ **Blazar e radiogalassie** vicine: studio della struttura dei getti, dei meccanismi di accelerazione e di emissione della radiazione:
 - ▷ Necessarie osservazioni multi-wavelength;
 - ▷ Valido anche per le binarie X galattiche con getto (μ QSO).
- ▷ **Nubi molecolari** al centro della Via Lattea: eco di una passata attività del buco nero supermassiccio (Sagittarius A*)?



- ▷ L'emissione termica del disco di accrescimento può polarizzarsi attraverso scattering Compton nella corona.
- ▷ Tenendo conto degli effetti della relatività generale:
 - ▷ La prossimità del buco nero causa una rotazione dell'angolo di polarizzazione della radiazione emessa dal disco;
 - ▷ Dato che la temperatura del disco diminuisce con il raggio, la rotazione dell'angolo si incrementa con l'energia.
- ▷ Metodo indipendente per misurare lo **spin a del buco nero**.



- ▷ Le magnetar sono stelle di neutroni ultra-magnetizzate con $B \sim 10^{13} - 10^{15} \text{ G}$.
- ▷ In questo regime l'indice di rifrazione del vuoto dipende dall'intensità del campo magnetico:
 - ▷ Polarizzazione del vuoto, predetta da Heisenberg e Euler nel 1936;
 - ▷ La propagazione dei fotoni viene influenzata e, angolo e grado di polarizzazione si modificano.
- ▷ Effetto trascurabile sul flusso, significativo e misurabile sulle variabili polarimetriche.

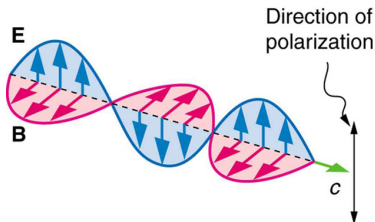
After more than 4 decades, the recent development of the photoelectron tracking gas counter has now enabled a meaningful exploration of X-ray polarimetry within a SMEX envelope.

The physical scales and conditions probed by IXPE require a high-energy polarimetry capability and are not achievable by other current or planned missions.

—Estratto dal comunicato della selezione NASA.

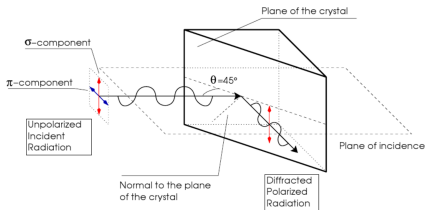
- ▷ IXPE aprirà una nuova finestra osservativa sull'Universo:
 - ▷ Prima missione spaziale interamente dedicata agli studi di polarimetria X;
 - ▷ Misura della polarizzazione di una grande varietà di sorgenti;
 - ▷ Implicazioni per la fisica fondamentale ed astroparticellare;
 - ▷ Possibilità di sorgenti con polarizzazione non attesa?
- ▷ La tecnologia che ha reso possibile la missione è stata sviluppata in Italia, a Pisa.

SLIDE DI BACKUP



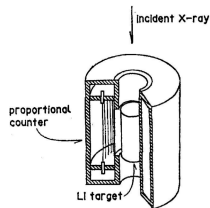
- ▷ EM waves are oscillations of electric and magnetic fields propagating at the speed of light (in vacuum).
 - ▷ Polarization has to do with the orientation of the fields and its complete description is non trivial.
- ▷ \vec{E} , \vec{B} are mutually perpendicular and perpendicular to the direction of propagation \vec{k} , i.e., $(\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{k})$.
- ▷ When the E direction is fixed, the wave is **linearly polarized**.
 - ▷ The orientation of the E field is the **polarization angle**.
 - ▷ The superposition of many different wave trains (of photons), can exhibit an arbitrary **polarization degree** from 0 to 1.
 - ▷ (And linear polarization is all we'll be dealing with today.)

—Bragg diffraction at 45°

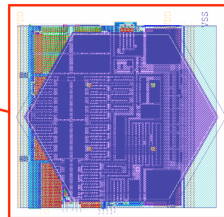
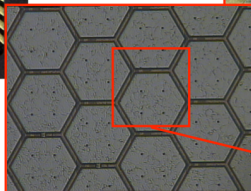
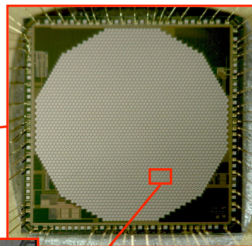
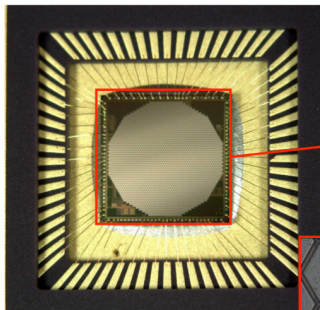


- ✓ Excellent modulation factor.
- ✓ Energy-resolved (discrete harmonics).
- ✗ Limited to low energies.
- ✗ Low efficiency (narrow band-pass).
- ✗ Dispersive (one angle at a time).
- ✗ Needs rotation.

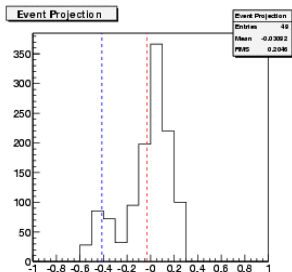
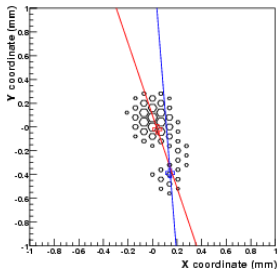
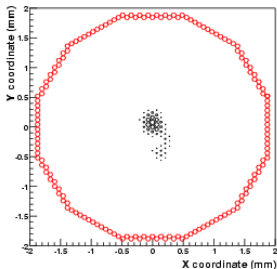
—Thomson scattering around 90°



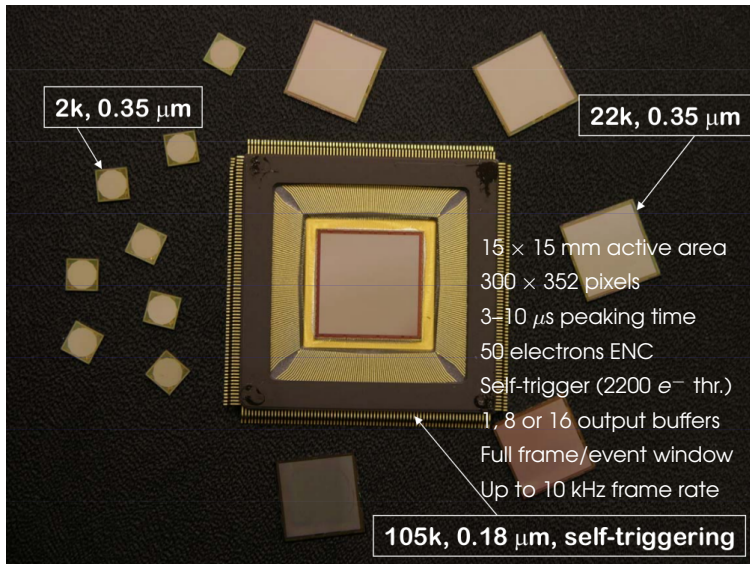
- ✓ Suitable for hard X-rays.
- ✓ Decent efficiency and modulation factor.
- ✓ Decent energy resolution.
- ✗ Limited at low energy.
- ✗ Background can be important.
- ✗ Rotation to reduce systematics.

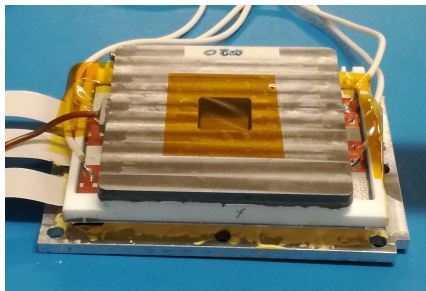
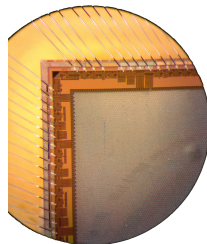
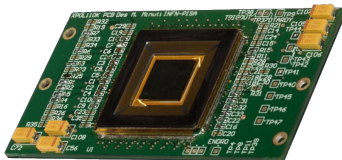
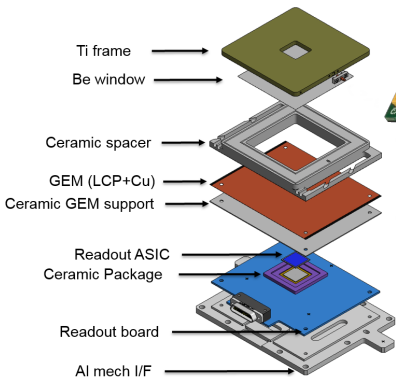


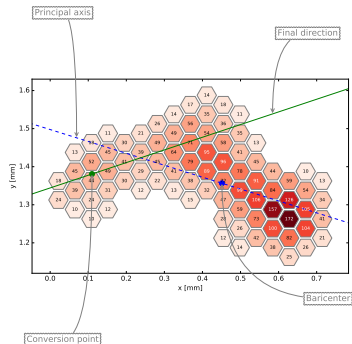
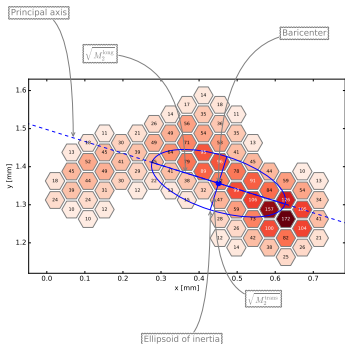
- ▷ 2101 hexagonal pixels.
- ▷ 80 μm pitch.
- ▷ Metal top layer acting as a charge collecting anode.
- ▷ Integrating preamplifier, shaper, S/H, multiplexer.
- ▷ Serial readout via external ADC.



Event Number: 157
Number of Clusters: 1
Cluster Size (largest): 49
Pulse Height: 1197.1
Signal to Noise: 87.0
Baricenter: 0.04 -0.02
Conversion Point: 0.14 -0.39
Phi (iteration 1) 1.8872
Phi (iteration 2) 1.6490
Second Mom Max: 0.0419
Second Mom Min: 0.0077
Shape (ratio of moments): 5.42
Third Mom Max: 8.1e-03







- ▷ Analysis is done event-by-event.
- ▷ Track reconstruction:
 - ▷ First pass: baricenter, basic moments analysis, skewness of the longitudinal projection to identify the Bragg peak.
 - ▷ Second pass: determination of the absorption point and weighted moments analysis for a refined estimate of the direction of emission.
- ▷ Rich morphological information available.

