

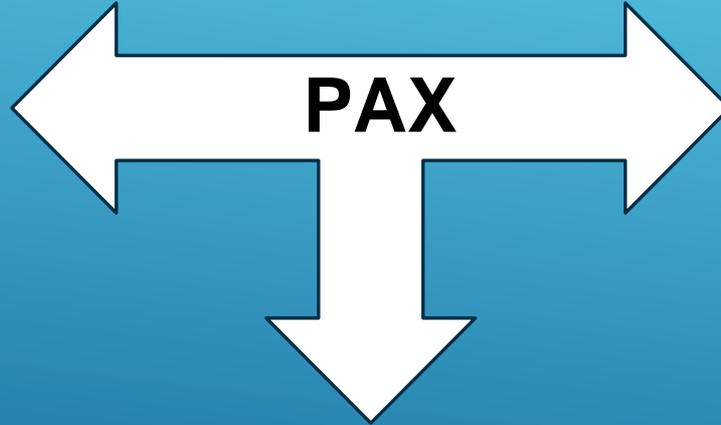
POLARIMETRI PER ASTRONOMIA X (PAX)

Paolo Soffitta, Sergio Fabiani, Fabio Muleri
Gruppo HERTAG @ INAF-IAPS

POLARIMETRI PER ASTRONOMIA X

SPEAR

(P. Soffitta)
Sensitive Polarimetry
Experiments for Astrophysical
Research



MACE

(F. Muleri)
Mini Advanced
Calibration Equipment

SWORDS

(S. Fabiani)
Space Weather pOlaRimetry
DetectorS

Team SPEAR

Nome	Ruolo	FTE	POT
Paolo Soffitta	Coordinatore	0,9	1,5
Fabio Muleri	Scientist	0,3	0,9
Ettore Del Monte	Scientist	0	0,3
Sergio Fabiani		0,3	0,6
Alessandro Di Marco	Scientist	0,3	0,9
Fabio La Monaca	Tecnico	0,3	0,9
Pasqualino Loffredo	Tecnico	0,3	0,9
Alfredo Morbidini	Tecnico	0,3	0
Enrico Costa	Scientist	0	0
Sergio Di Cosimo	Amministrativo	0	0
Alda Rubini	Tecnico Elettronico	0	0

Team SWORDS

Nome	Ruolo	FTE	POT
Sergio Fabiani	Coordinatore	0,6	1,7
Ettore Del Monte	Scientist	0	0,7
Fabio Muleri	Scientist	0,3	0,6
Paolo Soffitta	Scientist	0,3	0,6
Daniele Brienza	PA/QA	0	0,3
Alessandro Di Marco	Scientist	0,3	0,9
Fabio La Monaca	Tecnico	0,3	0,9
Pasqualino Loffredo	Tecnico	0,3	0,9
Enrico Costa	Scientist	0	0
Sergio Di Cosimo	Amministrativo	0	0
Alda Rubini	Tecnico	0	0
TobeHired TD Ricercatore	Scientist		
TobeHired TD	Tecnico		
TobeHired Adr	Scientist		
TobeHired TD Tecnologo	Ingegnere Elettronico		
TobeHired TD Tecnologo	Ingegnere Meccanico		

Team MACE

Fabio Muleri	Coordinatore	0,6	0,9
Alessandro Di Marco	Scientist	0,3	0,3
Paolo Soffitta	Scientist	0,3	0,3
Ettore Del Monte	Scientist	0	0
Mauro Centrone	Tecnico	0,3	0,3
Sergio Fabiani	Scientist	0,3	0,3
Pasqualino Loffredo	Tecnico	0,3	0,3
Fabio La Monaca	Tecnico	0,3	0,3
Alfredo Morbidini	Tecnico	0,6	0
Enrico Costa	Scientist	0	0
Sergio Di Cosimo	Amministrativo	0	0
Alda Rubini	Tecnico Elettronico	0	0

MOTIVAZIONE DELLA SCHEDA PAX

- INFN fermo dal 2007: Dobbiamo riprendere l' R&D per superare le seguenti criticalita' (SPEAR):
 - Tempo morto elevato (1.1 ms), banda energetica stretta
 - Drift di guadagno dovuto all'accumulo di carica sul substrato del piano di moltiplicazione
 - Modulazione spuria a bassa energia che richiede lunghe calibrazioni e il dithering del satellite.
- Fattore di modulazione non ottimale se confrontato con l'andamento della sezione d'urto.
- Efficienze < 20 % limitano le prestazioni polarimetriche che richiedono un gran numero di conteggi
- Design INFN vecchio di 15 anni:

Wide band X-ray polarimetry

NASA

White paper: Henric S. Krawczynski et al. 'Using X-Ray Polarimetry to Probe the Physics of Black Holes and Neutron Stars'

ESA

White paper: P. Soffitta et al. 'A polarized view of the hot and violent universe' (Experimental Astronomy 2021)

- Realizzare misure significative di polarimetria X per il sole (flare solari, SWORDS)
 1. CubeSAT (CUSP)
 2. Al fuoco di un ottica multi-layer (sinergia con la polarimetria X non solare)
- Sviluppare tecniche per la calibrazione a terra e in volo di polarimetri e altri strumenti per la misura di raggi X (MACE)

SENSITIVE POLARIMETRY EXPERIMENTS FOR ASTROPHYSICAL RESEARCH (SPEAR)

Classificazione: R&D, RNS 5

Obiettivo Tecnologico: Sviluppo di nuova strumentazione per la polarimetria X in Astronomia (1) per piano focale 'dead-time/systematic free' ad immagine (2) di grande area (con collimatore o a campo largo) (3) Per raggi X duri (> 8 keV)

Obiettivi Scientifico: (1) Polarimetria di sorgenti brillanti (binarie X, Crab Nebula), (2) polarimetria di sorgenti brillanti con collimatore, Polarimetria di sorgenti da direzioni ed epoche non prevedibili (GRB, Transienti non ricorrenti); (3) Polarimetria delle corone in sorgenti galattiche ed extragalattiche, delle righe di ciclotrone, delle code dure delle magnetars, dei sistemi a riflessione.

Linee di ricerca:

Sviluppo di rivelatori 3-D a lettura di carica come GridPIX con TimePIX3 e tecnologia InGRID in collaborazione con l'Università di Bonn (sinergia con BabyIAXO)

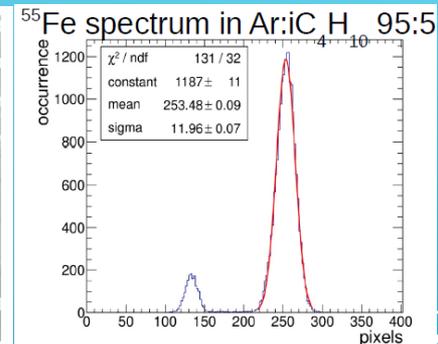
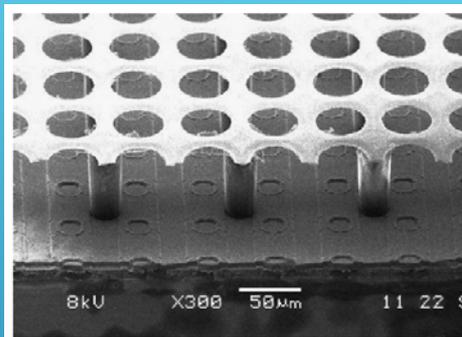
Sviluppo di rivelatori di grande area con tecnologia a lettura ottica derivanti da ricerche di materia oscura direzionale in collaborazione con il GSSI (Initium/Cygnus)

GRIDPIX & TIMEPIX3 (SPEAR)

Timepix3

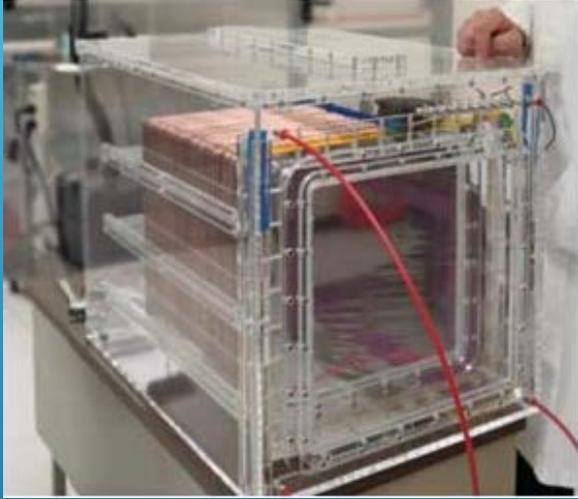
Parameter	Value
Pixel matrix	256 x 256 = 65536 pixels (2x4 superpixels)
Pixel size	55 x 55 μm^2
Technology	CMOS 130 nm
Measurement type	1. Simultaneous 10 bit TOT, 14 + 4 bit ToA 2. Only ToA 3. 10 bit PC & 14 bit integral ToT
Readout type	1. Data Driven (zero-suppression) 2. Frame based (zero-suppression)
Dead time per pixel	ToT + 457 ns (pulse processing + data transfer)
Output bandwidth	40 Mhits/s/cm ² up to 5.12 Gbs (8x640 Mbps)
Maximum Counting rate	Data Driven Up to 40Mhit/cm ² /s with duty cycle of 100 % @5.12 Gbps
TOA precision (resolution)	1.56ns (14 bit register + 4 bit refined)
Front End noise, minimum threshold	60 e_{rms} , 500 e^-
Institutions	CERN, University of Bonn, Nichef (NL)

GridPix

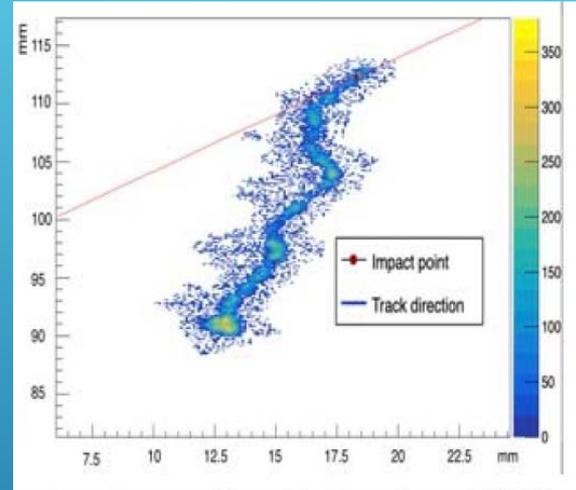


- Already uses TimePIX3 as front-end pixel ASIC. Dead-time issue solved
- Gain of the multiplication stage is more spatially constant.
- Holes of InGRID are aligned with the pixel it might provide a smaller intrinsic spurious modulation.
- Charging is expected to be small (if any).
- Zero suppression on-board & data-driven
- Energy resolution of 11 % at 5.9 keV thanks to the improved uniformity wrt GPD technique

XRAY-CMOS (SPEAR) (WIDE-FIELD, COLLIMATED EXPERIMENT)



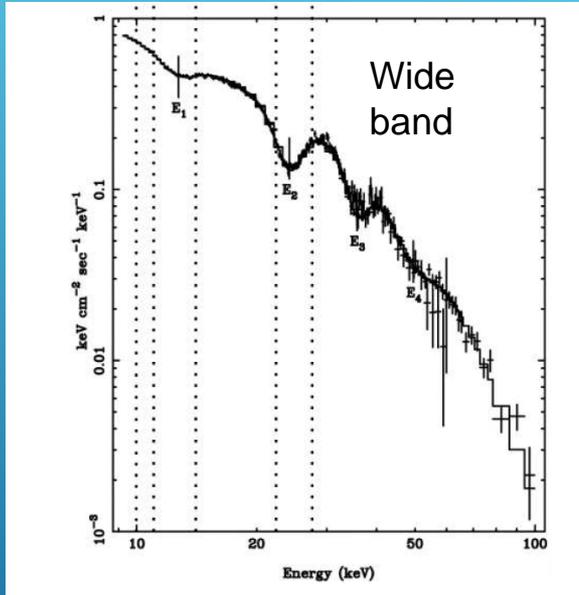
Lime Detector



34 keV photoelectron track

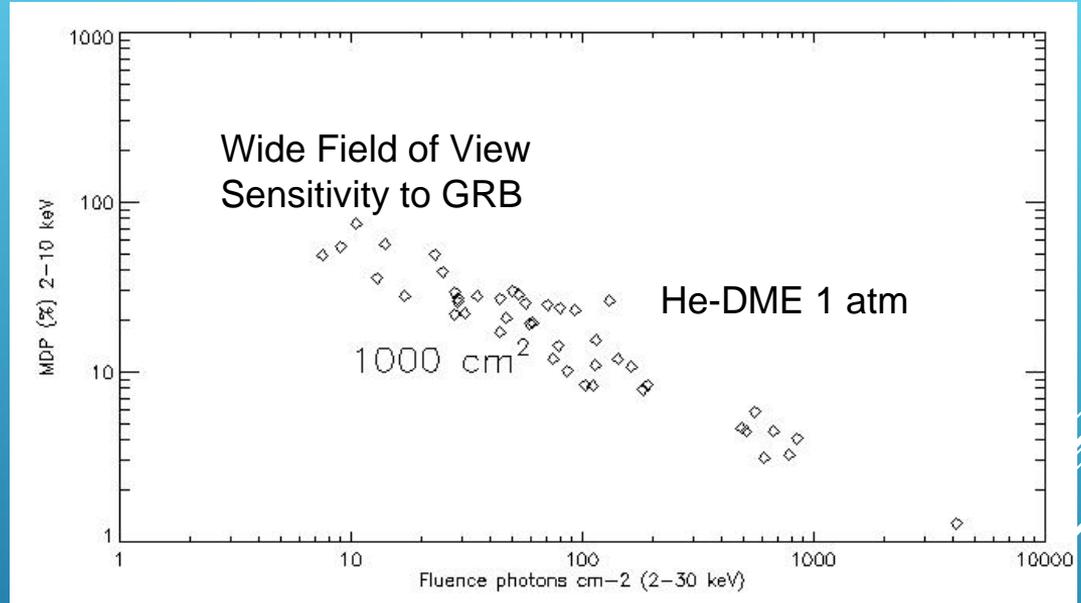
- The goal is develop TPC for Wide-Field X-ray polarimetry, or collimated experiment.
- Readout of the scintillation light emitted during charge multiplication
- A lens ($f=0.95$) and an optical CMOS allow for imaging tracks from a large detector area
- A PMT provides the time-profile of the multiplied charge for 3-D imaging
- The use of electronegative gas could allow for drift region of many cm

UN ESEMPIO DI ASTROFISICA CON (SPEAR)



Quattro righe di Cyclotrone lines
fino a 80 keV (Multilayer mirror)

sinergia con la polarimetria X solare
(NHXM e collaborazione con OAB)



Sensibilita' al campione di GRB di HETE-2 di un polarimetro
fotoelettrico di 4 cm di spessore e 1000 cm² di area.

Lo spessore utile puo' essere aumentato grazie all'utilizzo di
gas elettronegativi come CH₃NO₂ or SF₆

SENSITIVE POLARIMETRY EXPERIMENT FOR ASTROPHYSICAL RESEARCH (SPEAR)

Leadership:

- Entrambe le linee di ricerca raccolgono l'eredità dell'attività passate e recenti:
 - Polarimetria fotoelettrica: 1995 Rivelatori unidimensionali a micro-gap/micro-strip.
2001 Primo rivelatore a pixel multistrato.
2004 Primo ASIC per la lettura di carica.
2006 Primo rivelatore sigillato.
2010 Rivelatore pressurizzato ad Argon. Prop. NHXM (sinergia con OAB)
2014 Selezionato XIPE (ESA), 2015 IXPE (NASA) fase A competitiva.
2017 Selezionato IXPE per volo nel 2021 (13^{ma} proposta di missione).
 - Polarimetria Compton:
Grande heritage spaziale per rivelatori inorganici e organici.
Determinata ad IAPS una soglia in energia interessante.
Caratterizzazione di materiali per scintillatori plastici ed inorganici
(Costa+1995, Fabiani+ 2013 Astropart. Phys. J., PRIN INAF COMPASS 2014
Del Monte , Del Monte+ 2016, SPIE)
Sinergia con CUSP (SWORDS) per applicazione per piano focale
- Team: INAF-IAPS, Gran Sasso Space Science Institute, University of Bonn

SENSITIVE POLARIMETRY EXPERIMENT FOR ASTROPHYSICAL RESEARCH (SPEAR)

Fondi:

Attualmente stiamo utilizzando I fondi ADAM (ASI)

Nel passato siamo stati finanziati con PRIN INAF, INAF Tecno, ASI MAP

Per il futuro abbiamo partecipato ad un PRIN MIUR 2020 (GSSI, INAF-IAPS, INFN-LNF)

PI Elisabetta Baracchini, Deputy PI Paolo Soffitta

Criticita':

Necessita' di un ingegnere meccanico.

Necessita' di un ingegnere elettronico.



SPACE WEATHER POLARIMETRY DETECTORS (SWORDS)

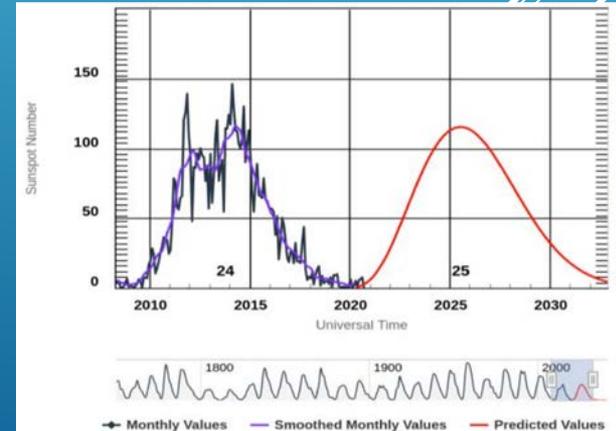
- **Classificazione:** R&D, RNS 5 & RNS 3
- **Obiettivo Tecnologico:** Sviluppo di strumentazione per la misura della polarizzazione lineare dei raggi X duri dei brillamenti solari
- **Obiettivo Scientifico e di servizio:** Trovare una chiara correlazione tra la polarizzazione (grado ed angolo) dei raggi X duri dei brillamenti solari e l'occorrenza di Emissioni di Massa Coronale (CME) ed eventi di Solar Energetic Particles (SEP) per includere la polarimetria dei raggi X nelle reti di forecast di Space Weather come il progetto ASPIS nel PTA ASI (base dati per lo studio dello Space Weather)
- **Linee di ricerca:**
 - nuovi polarimetri ad effetto fotoelettrico (vedi SPEAR (PAX-1)) riempiti con gas ad elevato numero atomico per rivelare i raggi X duri (banda $>10\text{keV}$)
 - nuovi polarimetri a diffusione Compton (banda $>20\text{keV}$)
[proposta CUSP bando ASI 2020 per "Future Missioni di tipo CubeSat"]

SPACE WEATHER POLARIMETRY DETECTORS (SWORDS)

- **Entrambe le linee di ricerca raccolgono l'eredità dell'attività passate e recenti:**
 - **polarimetria fotoelettrica:**
 - studio per l'estensione del polarimetro fotoelettrico Gas Pixel Detector (GPD) verso i raggi X duri con miscele di gas a base di Argon (Fabiani+ 2012, Adv. Sp. Res., Fabiani+ 2012, SPIE)
 - Proposte passate di missioni spaziali: **ADAHeli+** (Berrilli+ 2015, JATIS), **XIPE** [Esa Small 2012] (Fabiani+ Mem. SAIT 2013, Soffitta+ ExpAst2013), SEEPE (Liu, Soffitta, ESA-CAS Small Satellites)
 - Necessità di nuovi rivelatori, tempo morto GPD troppo elevato (brillamenti kcounts/s)
 - **polarimetria Compton:**
 - studi di caratterizzazione di materiali per scintillatori plastici ed inorganici e per set-up di coincidenza tra diffusore e assorbitore (Fabiani+ 2013 Astropart. Phys. J., PRIN INAF COMPASS 2014 Del Monte , Del Monte+ 2016, SPIE)
- **Team:**
 - Coordinatore: Sergio Fabiani
 - TI: Paolo Soffitta (Primo Ric.), Ettore Del Monte (Tecnol.), Fabio Muleri (Ric.),
 - contributo TD da altro progetto: Alessandro di Marco (Ric.), Fabio La Monaca (CTER), Pasqualino Loffredo (CTER), Daniele Brienza (Tecnol.)
 - Quiescenti: Enrico Costa, Alda Rubini, Sergio Di Cosmo

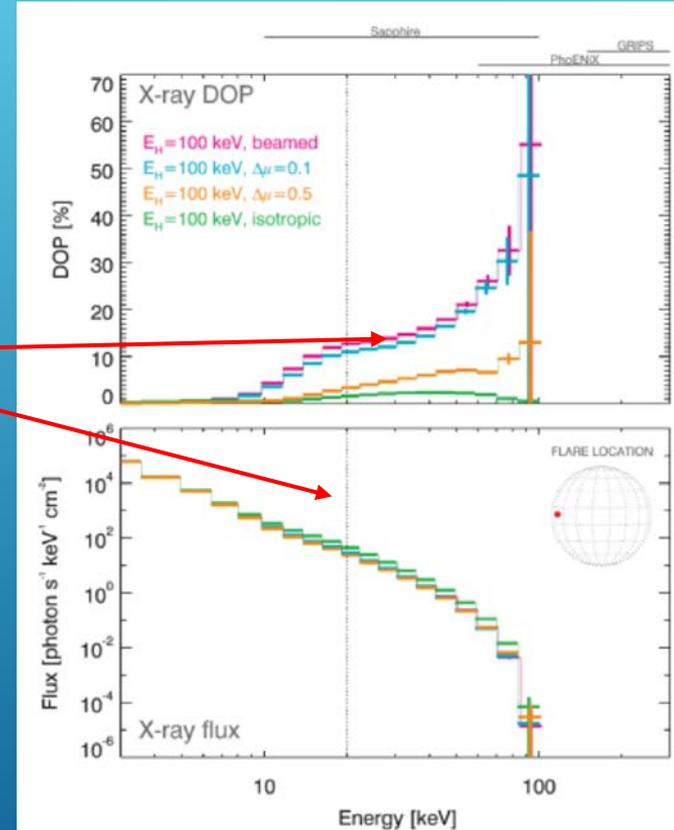
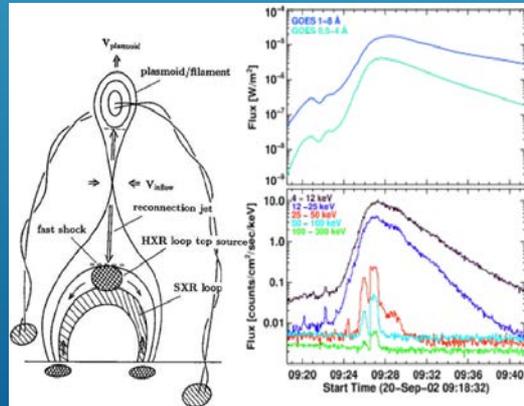
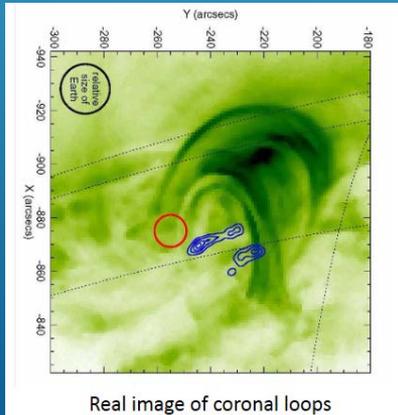
SPACE WEATHER POLARIMETRY DETECTORS (CUSP/SWORDS)

- **CUSP (CubeSat Solar Polarimeter)** propone una costellazione di due CubeSat per il monitoraggio continuativo del Sole e la misura della polarizzazione nella banda 20-100 keV.
- Proposta 6a classificata (prima tra INAF) nella graduatoria di merito (max 20 proposte), in corso congruità.
- Team: **INAF-IAPS** (Prime, polarimetro), **IMT s.r.l.** (bus CubeSat), **SCAI CONNECT s.r.l.** (elettronica Payload), **CIRI-AERO UniBo** (analisi di missione), **Unitus** (Ground Segment)
- Fase A/B (realizzazione prototipo polarimetro e progettazione payload PFM)
 - 15 mesi
 - totale proposta 1.5 M€, 770k€ INAF-IAPS
- Fase C/D (realizzazione 2 modelli da volo, AIV/AIT, calibrazione)
 - 15 Mesi
 - totale proposta 3 M€, 680k€ INAF-IAPS
- Costo del lancio non incluso nel bando

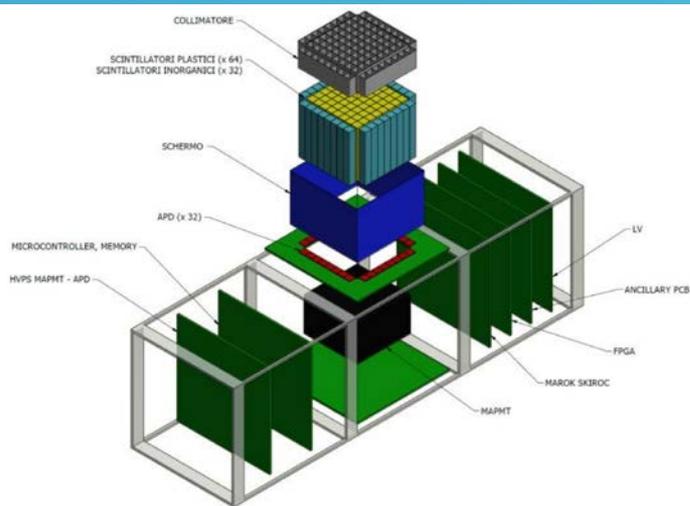


SPACE WEATHER POLARIMETRY DETECTORS (CUSP/SWORDS)

- HXR da elettroni accelerati a seguito di riconnessione magnetica
- Polarizzazione correlata alla direttività delle particelle accelerate
- La polarimetria, anche non risolta spazialmente, consente di distinguere diversi modelli di sorgente (direttività particelle/struttura e turbolenza del campo magnetico), a differenza di altre tecniche osservative

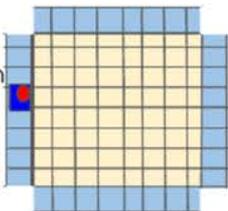


SPACE WEATHER POLARIMETRY DETECTORS (CUSP/SWORDS)

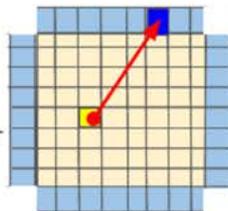


Classe	Id. Brillamento	Parametri	Solo Brillamento	Brillamento + Fondo diffusore	Rate Fondo Diffusore su Totale (%)
M1	20020927-03_34_11-03_36_19	MDP 20-100 keV (%)	33.5	40.8	28.7
		Rate (cts/s)	5.1	7.2	
		Tempo (s)	128.0		
M5.2	20050822-17_01_53-17_06_38	MDP 20-100 keV (%)	5.6	5.7	3.0
		Rate (cts/s)	66.6	68.7	
		Tempo (s)	284.4		
X1.2	20030529-01_00_59-01_04_59	MDP 20-100 keV (%)	2.9	2.9	0.7
		Rate (cts/s)	288.6	290.7	
		Tempo (s)	239.8		
X10	20031029-20_40_15-20_46_06	MDP 20-100 keV (%)	0.5	0.5	0.0
		Rate (cts/s)	5851.4	5853.5	
		Tempo (s)	350.7		

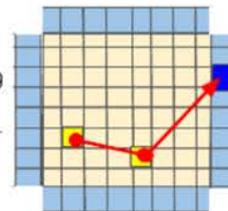
Single absorption event in the absorber



Single scattering event in the plastic scintillator



Double scattering event in the plastic scintillator



 plastic scintillator

 inorganic scintillator

SPACE WEATHER POLARIMETRY DETECTORS (SWORDS)

▪ Leadership

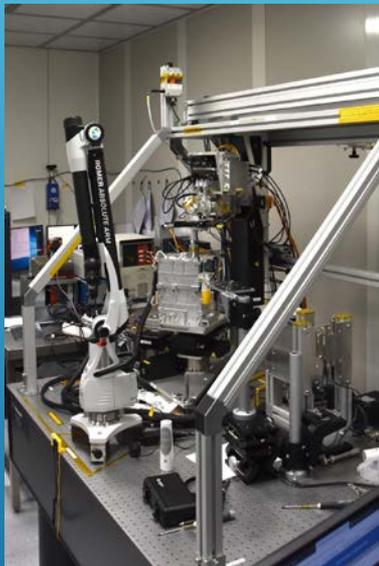
- esperienza pluridecennale sperimentale e di follow-up di missioni spaziali con attività di analisi dati per missioni di astronomia X.
Esempi recenti: SuperAGILE (ASI), IXPE (NASA/ASI, PI della collaborazione Italiana Paolo Soffitta, INAF-IAPS)
- In CUSP INAF-IAPS Prime e PI (Sergio Fabiani)

▪ Criticità

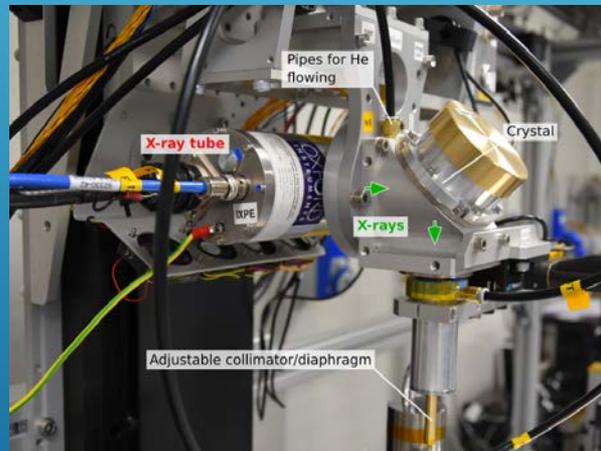
- attività attualmente non supportata da fondi dedicati
- tempi stretti di realizzazione della proposta CUSP
- reperimento di figure professionali per la realizzazione della strumentazione, al momento non disponibili, come:
 - ingegnere elettronico
 - ingegnere meccanico
 - tecnico elettronico
 - figure di scientist per attività di laboratorio e software (ricercatore TD, AdR, dottorato)
- la gravosità dell'impegno richiesto all'amministrazione dell'INAF-IAPS nell'assolvere i compiti di Prime (formalizzazione dei contratti dei subcontraenti, management del progetto) e di ordinaria amministrazione (acquisti di materiale e strumentazione, assunzione del personale a tempo determinato)

MINI ADVANCED CALIBRATION EQUIPMENT (MACE)

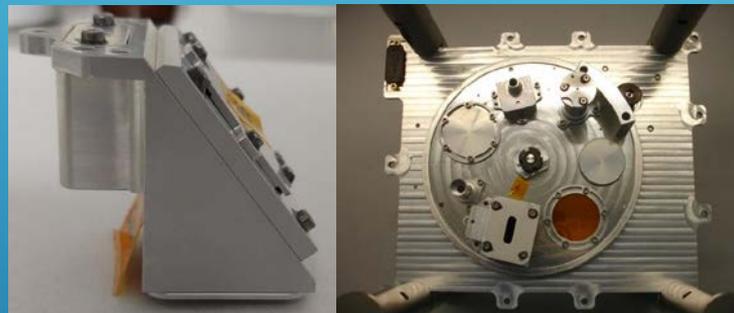
- Le attività prendono spunto dai risultati della missione IXPE
 - Costruzione dell'ICE per la calibrazione a terra
 - Sorgenti polarizzate e non sviluppate in casa
 - Procedure di allineamento dedicate
 - Costruzione delle sorgenti di calibrazione da volo



L'Instrument Calibration Equipment per la calibrazione a terra dei rivelatori di IXPE



Sorgente polarizzata basata sulla diffrazione di Bragg a 45 gradi



La sorgente polarizzata per la calibrazione in volo e le altri componenti della Filter and Calibration Wheel

MINI ADVANCED CALIBRATION EQUIPMENT (MACE)

- **Classificazione:** R&D, RNS 5
- **Obiettivo Tecnologico:** Sviluppare ed utilizzare sorgenti di raggi X con caratteristiche spettrali, temporali e di polarizzazione innovative
- **Obiettivo Scientifico e di servizio:** Supportare lo sviluppo e la calibrazione di strumentazione per l'astrofisica delle alte energie e per altre applicazioni
- **Linee di ricerca:**
 - Utilizzo in altri progetti dell'Instrument Calibration Equipment costruita per la missione IXPE
 - Costruzione di un set-up in vuoto per estendere la calibrazione a bassa energia (per esempio, per il progetto babyIAXO ed in vista di uno studio per polarimetria ad energie piu' basse)
 - Costruzione di sorgenti hard-X polarizzate e non per il progetto CUPS
 - Sviluppo di sorgenti time-tagged per calibratori di volo senza parti mobili
 - Sviluppo di monocromatori di Bragg e di target di fluorescenza compositi

MINI ADVANCED CALIBRATION EQUIPMENT (MACE)

- **Team:**

- Coordinatore: Fabio Muleri [IAPS]
- Personale a tempo indeterminato
 - [IAPS]: Paolo Soffitta (Primo Ric.), Ettore Del Monte (Tecnol.), Sergio Fabiani (Ric.), Alfredo Morbidini (Tecnico)
 - [OAR]: Mauro Centrone (Tecnico)
- Personale a tempo determinato (da altri progetti, contributi minori)
 - [IAPS]: Alessandro di Marco (Ric.), Fabio La Monaca (CTER), Pasqualino Loffredo (CTER) IAPS]
- Quiescenti:
 - [IAPS]: Enrico Costa, Alda Rubini, Sergio Di Cosmo

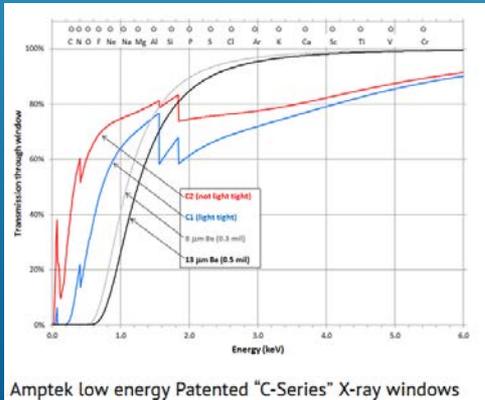
- **Criticità**

- Rafforzamento delle figure tecniche ed ingegneristiche dello IAPS
- attività attualmente non supportata da fondi dedicati ma fondi cospicui nel passato (Prin Tecno, MAP, IXPE)

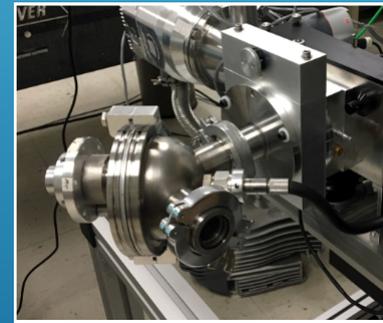
MINI ADVANCED CALIBRATION EQUIPMENT (MACE)

EXPANSION OF THE FACILITY $E < 1.5$ KEV
(AXIONS FROM ELECTRON OSCILLATION IN THE SUN WITH BABYIAXO)

- ▶ Refurbishment of an existing vacuum chamber
- ▶ Additional linear stage vacuum compatible for collimating system movement.
- ▶ Acquisition of a multianode window-less X-ray tube



Detector



30 Watt maximum air cooled

1 x 4 mm emission spot, oriented to entrance slit
All emission controls included; filament, HV and current
Available current ranges: 0-10 ma, 0-1 ma and 0-100 uA
Distance anode to cathode 8-10 mm (nominal)
3-meter high voltage and controls cable included
Readily emits soft x-rays, 70 eV and up
Wide variety of anode materials available
Single interchangeable anode or 6-anode carousel
Two output ports (optionally 3 or 4)
Passively air cooled (up to 30 Watts)
Mounting flanges NW40K (optionally DN40CF)
Max bake temperature 100 degrees C
UHV metal-seal version available, please inquire
100-220 VAC line input

X-ray tube

Mc-Pherson X-ray Tube

MINI ADVANCED CALIBRATION EQUIPMENT (MACE)

EXPANSION OF THE FACILITY AT THE ENERGY ABOVE 17 KEV

(POLARIMETRY OF SOLAR FLARES, CUSP)

We can use the scattering from Lithium or Beryllium target

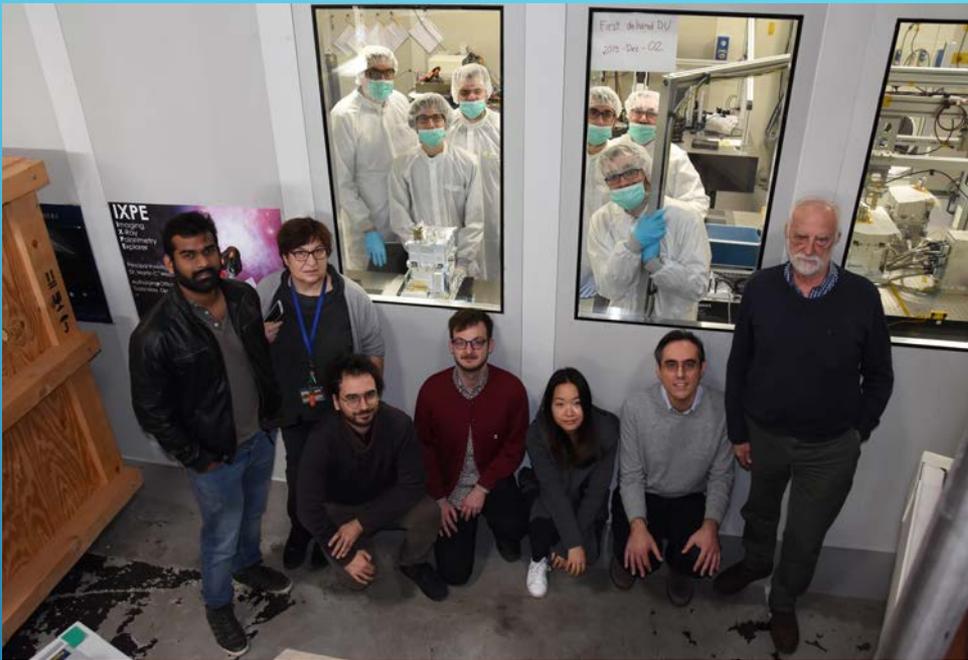


PORTABLE MULTIENERGY X-RAY
SOURCE (TAGGED IN PROSPECTIVE)

- Collaboration with IMM-CNR

IXPE HERTAG-GROUP (Parte)

- Ajay Ratheesh: Studente di dottorato III anno (Polarimetria X e Spettroscopia X)
- Alda Rubini Tecnico Elettronico
- Riccardo Ferrazzoli Studente di dottorato III anno (Polarimetria X di sorgenti estese)
- Antonino Tobia Ingegnere elettronico (ora ad Airbus)
- Fei Xie Assegno di ricerca (Simulazioni e analisi)
- Ettore Del Monte Tecnologo responsabile del project office IAPS di IXPE
- Enrico Costa Dirigente di Ricerca Emerito Senior Co-I di IXPE



Team di Calibrazione (IXPE)

- Fabio Muleri (Ricercatore team leader)
- Sergio Fabiani (Ricercatore Calibration scientist)
- Alessandro Di Marco Calibration scientist
- John Rankin Calibration support e data analysis
Studente di dottorato II anno
- Fabio La Monaca Tecnico di laboratorio
- Paolo Soffitta (Primo Ricercatore)

GRB	Π (%)	PA ($^\circ$)	σ_{det} ($\Pi > 0\%$)	Instrument	Ref.
021206	80 ± 20 0	–	> 5.7	<i>RHESSI</i> ^d	Coburn & Boggs (2003) Rutledge & Fox (2004)
041219A	41^{+57}_{-44}	–	–	–	Wigger et al. (2004)
	98 ± 33	–	~ 2.3	<i>INTEGRAL-SPI</i> ^e	Kalemci et al. (2007)
	63^{+31a}_{-30}	70^{+14}_{-11}	~ 2	–	McGlynn et al. (2007)
061122	43 ± 25^b	38 ± 16	< 2	<i>INTEGRAL-IBIS</i>	Götz et al. (2009)
100826A ^c	> 33 (90% CL)	160 ± 20	–	<i>INTEGRAL-IBIS</i>	Götz et al. (2013)
100826Ap1 ^c	27 ± 11	–	2.9	<i>IKAROS-GAP</i>	Yonetoku et al. (2011b)
100826Ap2 ^c	25 ± 15	159 ± 18	2.0	–	–
110301A	31 ± 21	75 ± 20	1.6	–	–
110721A	70 ± 22	73 ± 11	3.7	<i>IKAROS-GAP</i>	Yonetoku et al. (2012)
140206A	84^{+16}_{-28}	160 ± 11	3.3	<i>IKAROS-GAP</i>	Yonetoku et al. (2012)
151006A	> 28 (90% CL)	80 ± 15	–	<i>INTEGRAL-IBIS</i>	Götz et al. (2014)
160106A	< 84	–	–	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160131A	69 ± 24	-23 ± 12	≥ 3	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160325A	94 ± 33	41 ± 5	≥ 3	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160509A	59 ± 28	11 ± 17	~ 2.2	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160607A	< 92	–	–	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160623A	< 46 (90% CL)	–	–	COSI ^g	Lowell et al. (2017)
160703A	< 77	–	–	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160802A	< 46	–	–	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160821A	< 55	–	–	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160821A ^h	85 ± 30	-36 ± 5	≥ 3	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017); Chand et al. (2018a)
160821Ap1 ^h	54 ± 16	-39 ± 4	≥ 3	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
160821Ap2 ^h	66^{+26}_{-27}	–	~ 5.3	<i>AstroSat-CZTI</i>	Sharma et al. (2019)
160821Ap3 ^h	71^{+29}_{-41}	110^{+14}_{-15}	3.5	<i>AstroSat-CZTI</i>	–
160910A	58^{+29}_{-30}	31^{+12}_{-10}	4	<i>AstroSat-CZTI</i>	–
161218A	61^{+39}_{-46}	110^{+25}_{-26}	3.1	<i>AstroSat-CZTI</i>	–
170101A	94 ± 32	44 ± 4	≥ 3	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chattopadhyay et al. (2017)
170114A	9	40	~ 1.7	POLAR	Zhang et al. (2019)
170114A	< 41 (99% CL)	–	–	–	–
170127C	8	164	~ 1.5	POLAR	Zhang et al. (2019)
170206A	< 30 (99% CL)	–	–	–	–
170206A	4	164	~ 1.5	POLAR	Zhang et al. (2019); Burgess et al. (2019)
170206A	< 28 (99% CL)	–	–	–	–
171010A	15	122	~ 1.8	–	–
171010A	41	17	~ 2.8	–	–
171010A	11	38	~ 1.9	POLAR	Zhang et al. (2019)
171010A	< 68 (99% CL)	–	–	–	–
171010A	10	106	~ 1.5	POLAR	Zhang et al. (2019)
171010A	< 31 (99% CL)	–	–	–	–
171010A	~ 40	variable	–	<i>AstroSat-CZTI</i>	Chand et al. (2018b)

Table 1. Measured degree of linear polarization and position angle in the prompt phase of GRBs. The detection significance σ_{det} is the significance of measuring $\Pi > 0\%$. The quoted errors are at the 1σ level. ^aMeasured for the brightest pulse of duration 66 s. ^bMeasured for the second peak lasting 40 s. ^cThe main prompt emission is divided into two time intervals, p1 featuring a 47 s broad flare (line 1), and 53 s long p2 consisting of multiple pulses (line 3). Line 1 jointly fits p1 and p2 assuming they have the same Π but allowing and indeed finding a different PA between them. ^dReuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager. ^eInternational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory. ^f Π obtained for two equal 2 s time bins within a single pulse, with a significant change in PA between them. ^gCompton Spectrometer and Imager. ^hAverage polarization over the single emission episode, with a *Fermi*-GBM (*AstroSat-CZTI*) $T_{90} = 43$ s (42 s), that showed variable polarization levels and PA during three distinct time intervals p1, p2, p3 within the emission episode.