

"We're Dreaming of a dark Christmas"

Elizabeth Leason & Athoy Nilima

On behalf of









Elizabeth Leason (2nd year PhD)

Athoy Nilima

(3rd Year PhD)

Ellen Sirks (Mphys Student)

 $\overline{\Lambda}$ 

Santa and his elves...,



Prof. Alex Murphy

Xin Ran Liu (PostDoc)

Kristy Hopley (Nuffield)



Louis Headley (Mphys Student)







メド

1.17

\*

X

NY NY

Y





# LUX

2013-2016250 kg liquid xenonOn-going legacy data analysis

# LUX to LZ

# LZ

- 7 tonnes of liquid xenon
- 494 PMTs
- additional veto w / 131 "skin" F
- 'First dark' 2020
- Science data from 2021
- Plan 1000 live days





# Electrons Outgoing Particle Incoming Particle

# How the detector works

- \* Signals due to particle interactions:
  - ☆ S1 : Primary Scintillation Signal (prompt photons, directly measured by PMTs)
  - S2: Secondary Ionisation Signal (from electroluminescence of electrons extracted in gaseous phase)
- Energy and Position Reconstruction by S1-S2 Signals

\*

# LZ Skin PMT validation

1 27

 大 下

7





\*

\*\*

\*

NA A





3

- Significant hardware validation task
- 100x 1" VUV-sensitive PMTs
- Class 1000 cleanroom at the ATC
  - Cleanliness maintained throughout!
- Cryostat to test at 175 C (and 300 C)
- Measured Gains, Resolutions, Dark rates, Afterpulsing
- Designed and build measurement rig
- Developed software to analyse waveform data

\*

# PMTs: Single photoelectron data



N

Z

 $\overline{\mathbf{A}}$ 

# PMTs: Single photoelectron data



\*

\*

N.

 $\mathbf{\tilde{\mathbf{x}}}$ 

# LZ Skin PMT validation

- Not mentioned: all tubes pressure tested
- Not mentioned: all tubes HPGe radio-assayed at Boulby
- Cryostat data collection <u>complete</u>
- Last of the PMTs to be returned to the US next week
- Data analysis continues; PMTs generally meeting specs.
- Next...
  - Radon emanation tests at SDSMT...
  - Acceptance testing at SURF...
  - Installation...
  - $\circ \quad \text{Commissioning...}$



Above: Pressure test rig at the SMC. Below: PMTs being inserted @Boulby





# XIA UltraLo-1800

- Surface alpha counter
- Background rates 50+ better than conventional proportional counters.
- Can measure samples in days rather than weeks/months.
- Important for next generation of low background experiments
- > Measurement of **0.13** α/khr/cm<sup>2</sup> amongst lowest ever reported

	Sample	Duration (hrs)	Alphas	Surface Area (cm²)	Emissivity (α/khr/cm²)	9 14431(15) (44)
	Stainless Steel Tray	168	342	1800	1.24 ± 0.07	
	PTFE Liner	168	103	1800	0.38 ± 0.04	
	LZ Titanium	168	4779	707	46.65 ± 0.67	
	LZ Titanium (Citric Acid)	168	2302	707	22.07 ± 0.46	
	ULB Copper	168	13	707	0.13 ± 0.04	Appla
*		-	<u>л</u>	1. T. 4.	***	

# Low Energy Electron Recoil Science

## **ER vs NR**

- Conventional WIMP search looks for nuclear recoils (NRs)
- But dark matter is not necessarily WIMPs!
- Electron recoil (ER) searches gaining importance, e.g. **solar neutrinos, axions**...
- Difficult as background  $\gamma$  rays and  $\beta$  particles cause electron recoils.





# Solar Neutrino-Electron Scattering: Effect of Solar Metallicity

### Solar Metallicity Problem:

Recoil energy [keV

- Spectroscopic studies infers: low solar metallicities
- Helioseismologic measurements implies: high solar metallicities
- Can be solved by direct measurements of CNO neutrino fluxes, as they are more sensitive to solar metallicity

## High- and Low- Metallicity Standard Solar Models (SSM):

- Investigated two New (more refined) Generations of SSM: B16-GS98 (high metallicity) and B16-AGSS09met (low metallicity)
- op+Be7 neutrinos: No significant Model Dependencies
- CNO neutrinos: Model dependent





OIS, RRPA

Recoil energy [keV

**Next**: Check how this affects Sensitivity for Low ER Searches

# Solar Neutrino-Electron Scattering: Effect of Atomic Binding

### Approximation Schemes:

#### Free Electron Approximation:

- · All electrons are free, no atomic binding
- works well in the high keV region
- · But not in a low keV region

#### **Stepping Approximation:**

- simplest correction to consider the shell effect
- Use a stepping Function,  $\theta$ .

# Relativistic Random Phase Approximation (RRPA):

- Consider both the relativistic effect and residual two-electron correlation
- Used by J.W.Chen et. al. [1]



Fig. Variation in Event Rates with free electron approximation, stepping Approximation, and RRPA for Solar pp neutrinoelectron scattering (Solar pp- neutrinos)

## Findings

#### Reduction in Total number of Events

- pp+Be7 Neutrinos
  - ~1.5% due to stepping
- ~ 4.5% due to RRPA
- CNO neutrinos:
  - <1% due to larger recoil energy range</p>

Next:

XIX

Check how this affects Sensitivity for Low ER Searches

Ref [1] Jiunn-Wei Chen et. al. "Low Energy electronic recoil in xenon detectors by solar neutrinos"

## Compton Scattering: Effect of Atomic Binding

## **Geant4 Physics:**

- Low Energy Livermore:
  - constrain the ejected direction of the Compton electron into the photon plane
  - Total Cross-section: Interpolation making direct use of shell cross section data

## · Low Energy Monash:

- two-body fully relativistic threedimensional scattering framework
- Use of **Relativistic Impulse Approximation (RIA):** Atomic Binding Effect + Doppler Broadening

**Aim:** Test and Compare (existing) Livermore and Monash Models for LZ



*Next*: Run High Statistic Sims to compare event rates

\*

# Low Energy ER Models

## Solar axions

- Couple to electrons via axio-electric effect (analogous to photoelectric effect).
- Energy spectrum -> signal model:

## \* LZ sensitivity projection:





## ALPs and HPs

- ALPs = Axion like particles
- # HPs = Hidden photons
- \* Monoenergetic peaks at particle mass

# Mirror Dark Matter

## Model

- \* Hidden sector isomorphic to standard model.
- \* Each SM particle has a mirror partner.
- Mirror electrons interact with Xe atomic electrons via kinetic mixing – giving ER signal.



## **UPDATE: Shielding Effects**

- MDM captured by interactions with the Earth builds up over time.
- Captured MDM interacts with incoming mirror electrons.
- Two effects:
  - deflection by mirror e.m. field
  - collisional shielding



References:

Theory: B Holdom <u>PRLB. 166 196 (1986)</u>, R. Foot, H Lew, R Volkas <u>PRLB. 272 67 (1991)</u> Phenomenology: J.Feng, <u>JCAP 0907:004</u>, R.Foot <u>IntJModPhysA.29.1430013</u>, Shielding effects: R.Foot, <u>arXiv:1806.04293</u> (June 2018)



New signal model



Dashed line - no shielding. Solid line - with shielding. Reduction below 2keV.

LUX analysis in progress, using Run3 (2013) data.

Result: 90% CL on kinetic mixing parameter vs mirror electron temperature.

\*\*\*

1/L

\*



# Merry Christmas and a Happy New Year!

Find us at @SURF

Trailer - <u>https://youtu.be/-wZoenzMXGI</u> Film - <u>https://youtu.be/VwhdRge1Blg</u>

Nuffield Placement - Kristy Hopley



#### PHYSICAL REVIEW D 97, 112002 (2018)



#### LUX trigger efficiency

D.S. Akerib 1,2,3, S. Alsum 4, H.M. Araújo 5, X. Bai 6, J. Balaithy 7, P. Beltrame 8, E.P. Bernard 9, A. Bernstein<sup>10</sup>, T.P. Biesiadzinski<sup>1,2,3</sup>, E.M. Boulton<sup>9,11,12</sup>, B. Boxer<sup>13</sup>, P. Brás<sup>14</sup>, S. Burdin<sup>13</sup> D. Byram<sup>15,16</sup>, M.C. Carmona-Benitez<sup>17</sup>, C. Chan<sup>18</sup>, J.E. Cutter<sup>7</sup>, T.J.R. Davison<sup>8</sup>, E. Druszkiewicz<sup>19</sup>, S.R. Fallon<sup>20</sup>, A. Fan<sup>2,3</sup>, S. Fiorucci<sup>11,18</sup>, R.J. Gaitskell<sup>18</sup>, J. Genovesi<sup>2</sup> C. Ghag<sup>21</sup>, M.G.D. Gilchriese<sup>11</sup>, E. Grace<sup>17</sup>, C. Gwilliam<sup>13</sup>, C.R. Hall<sup>22</sup>, S.J. Haselschwardt<sup>23</sup>, S.A. Hertel<sup>24,11</sup>, D.P. Hogan<sup>9</sup>, M. Horn<sup>16,9</sup>, D.O. Huang<sup>18</sup>, C.M. Ignarra<sup>2,3</sup>, R.G. Jacobsen<sup>9</sup>, W. Ji 1,2,3, K. Kamdin 9,11, K. Kazkaz 10, D. Khaitan 19, R. Knoche 22, E.V. Korolkova 25, S. Kravitz<sup>11</sup>, V.A. Kudryavtsev<sup>25</sup>, B.G. Lenardo<sup>7,10</sup>, K.T. Lesko<sup>11</sup>, J. Liao<sup>18</sup>, J. Lin<sup>9</sup>, A. Lindote<sup>14</sup>, M.I. Lopes<sup>14</sup>, A. Manalaysay<sup>7</sup>, R.L. Mannino<sup>26,4</sup>, N. Marangou<sup>5</sup>, M.F. Marzioni<sup>8</sup>, D.N. McKinsey 9,11, D.-M. Mei 15, M. Moongweluwan 19,\*, J.A. Morad 7, A.St.J. Murphy 8, C. Nehrkorn<sup>23</sup>, H.N. Nelson<sup>23</sup>, F. Neves<sup>14</sup>, K.C. Oliver-Mallory<sup>9,11</sup>, K.J. Palladino<sup>4</sup>, E.K. Pease 9,11, G. Rischbieter 20, C. Rhyne 18, P. Rossiter 25, S. Shaw 23,21, T.A. Shutt 1,2,3, C. Silva<sup>14</sup>, M. Solmaz<sup>23</sup>, V.N. Solovov<sup>14</sup>, P. Sorensen<sup>11</sup>, T.J. Sumner<sup>5</sup>, M. Szydagis<sup>20</sup>, D.J. Taylor<sup>16</sup>, W.C. Taylor<sup>18</sup>, B.P. Tennyson<sup>12</sup>, P.A. Terman<sup>26</sup>, D.R. Tiedt<sup>6</sup>, W.H. To<sup>27</sup>, M. Tripathi<sup>7</sup>, L. Tvrznikova<sup>9,11,12</sup>, U. Utku<sup>21</sup>, S. Uvarov<sup>7</sup>, V. Velan<sup>9</sup>, J.R. Verbus<sup>18</sup>, R.C. Webb 26, J.T. White 26,a, T.J. Whitis 1,2,3, M.S. Witherell 11, F.L.H. Wolfs 19, D. Woodward 17, J. Xu<sup>10</sup>, K. Yazdani<sup>5</sup>, C. Zhang<sup>1</sup>



#### Results of a search for sub-GeV dark matter using 2013 LUX data

D.S. Akerib,<sup>1,2,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H.M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E.P. Bernard,<sup>9</sup> A. Bernstein,<sup>10</sup> T.P. Biesiadzinski,<sup>1,2,3</sup> E.M. Boulton,<sup>9,11,12</sup> B. Boxer,<sup>13</sup> P. Brás,<sup>14</sup> S. Burdin,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>15,16</sup>
M.C. Carmona-Benitze,<sup>17</sup> C. Chan,<sup>18</sup> J.E. Cutter,<sup>7</sup> T.J.R. Davison,<sup>8</sup> E. Druszkiewicz,<sup>19</sup> S.R. Fallon,<sup>20</sup> A. Fan,<sup>2,3</sup> S. Fiorucci,<sup>11,18</sup> R.J. Gaitskell,<sup>18</sup> J. Genovesi,<sup>20</sup> C. Ghag,<sup>21</sup> M.G.D. Gilchrines,<sup>11</sup> C. Gwilliam,<sup>13</sup> C.R. Hall,<sup>22</sup> S.J. Haselschwardt,<sup>23</sup> S.A. Hertel,<sup>24,11</sup> D.P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn,<sup>16,9</sup> D.Q. Huang,<sup>18</sup> C.M. Ignarra,<sup>2,3</sup> R.G. Jacobsen,<sup>9</sup> O. Jahangir,<sup>21</sup> W. Ji,<sup>1,2,3</sup> K. Kandin,<sup>9,11</sup> K. Kazkaz,<sup>10</sup> D. Khaitan,<sup>19</sup> R. Knoche,<sup>22</sup> E.V. Korolkova,<sup>25</sup> S. Kravitz,<sup>11</sup> V.A. Kudryavtsev,<sup>25</sup> B.G. Lenardo,<sup>7,10</sup> K.T. Lesko,<sup>11</sup> J. Liao,<sup>18</sup> J. Lin,<sup>9</sup>
A. Lindote,<sup>14</sup> M.I. Lopes,<sup>14</sup> A. Manalaysay,<sup>7</sup> R.L. Mannino,<sup>26,4</sup> N. Marangou,<sup>5</sup> M.F. Mazioni,<sup>8</sup> D.N. McKinsey,<sup>9,11</sup> D.-M. Mei,<sup>15</sup> M. Moongweluwan,<sup>19</sup> J.A. Morad,<sup>7</sup> A.S.L.J. Murphy,<sup>8</sup> A. Naylor,<sup>25</sup> C. Nehrkorn,<sup>23</sup> H.N. Nelson,<sup>23</sup> F. Neves,<sup>14</sup> K.C. Oliver-Mallory,<sup>9,11</sup> K.J. Palladino,<sup>4</sup> E.K. Pease,<sup>9,11</sup> Q. Riffard,<sup>9,11</sup> G.R.C. Rischbieter,<sup>20</sup>
C. Rhyne,<sup>18</sup> P. Rossiter,<sup>25</sup> S. Shaw,<sup>23,21</sup> T.A. Shutt,<sup>1,2,3</sup> C. Silva,<sup>14</sup> M. Solmaz,<sup>23</sup> V.N. Solovov,<sup>14</sup> P. Sorensen,<sup>11</sup> T.J. Summer,<sup>5</sup> M. Szydagis,<sup>20</sup> D.J. Taylor,<sup>15</sup> W.C. Taylor,<sup>15</sup> B.P. Tennyson,<sup>12</sup> P.A. Terman,<sup>26</sup> D.R. Tiedt,<sup>6</sup> W.H. To,<sup>27</sup> M. Stitherell,<sup>11</sup> F.L.H. Wolfs,<sup>19</sup> D. Woodward,<sup>17</sup> J. Xu,<sup>10</sup> K. Yazdani,<sup>5</sup> and C. Zhang<sup>15</sup>

#### Projected WIMP sensitivity of the LUX-ZEPLIN (LZ) dark matter experiment

D.S. Akerib,<sup>1,2</sup> C.W. Akerlof,<sup>3</sup> S.K. Alsum,<sup>4</sup> H.M. Araújo,<sup>5</sup> M. Arthurs,<sup>3</sup> X. Bai,<sup>6</sup> A.J. Bailev,<sup>5, a</sup> J. Balaithy,<sup>7</sup> S. Balashov,<sup>8</sup> D. Bauer,<sup>5</sup> J. Belle,<sup>9</sup> P. Beltrame,<sup>10</sup> T. Benson,<sup>4</sup> E.P. Bernard,<sup>11,12</sup> T.P. Biesiadzinski,<sup>1</sup>, K.E. Boast, <sup>13</sup> B. Boxer, <sup>14</sup> P. Brás, <sup>15</sup> J.H. Buckley, <sup>16</sup> V.V. Bugaev, <sup>16</sup> S. Burdin, <sup>14</sup> J.K. Busenitz, <sup>17</sup> C. Carels, <sup>13</sup> D.L. Carlsmith,<sup>4</sup> B. Carlson,<sup>18</sup> M.C. Carmona-Benitez,<sup>19</sup> C. Chan,<sup>20</sup> J.J. Cherwinka,<sup>4</sup> A. Cole,<sup>12</sup> A. Cottle,<sup>9</sup> W.W. Craddock,<sup>1</sup> A. Currie,<sup>5, b</sup> J.E. Cutter,<sup>21</sup> C.E. Dahl,<sup>22,9</sup> L. de Viveiros,<sup>19</sup> A. Dobi,<sup>12, c</sup> J.E.Y. Dobson,<sup>23, d</sup> E. Druszkiewicz,<sup>24</sup> T.K. Edberg,<sup>7</sup> W.R. Edwards,<sup>12, e</sup> A. Fan,<sup>1, 2</sup> S. Fayer,<sup>5</sup> S. Fiorucci,<sup>12</sup> T. Fruth,<sup>13</sup> R.J. Gaitskell,<sup>20</sup> J. Genovesi,<sup>6</sup> C. Ghag,<sup>23</sup> M.G.D. Gilchriese,<sup>12</sup> M.G.D.van der Grinten,<sup>8</sup> C.R. Hall,<sup>7</sup> S. Hans,<sup>25</sup> K. Hanzel,<sup>12</sup> S.J. Haselschwardt,<sup>26</sup> S.A. Hertel,<sup>27</sup> S. Hillbrand,<sup>21</sup> C. Hjemfelt,<sup>6</sup> M.D. Hoff,<sup>12</sup> J.Y-K. Hor,<sup>1</sup> D.Q. Huang,<sup>20</sup> C.M. Ignarra,<sup>1,2</sup> W. Ji,<sup>1,2</sup> A.C. Kaboth,<sup>28,8</sup> K. Kamdin,<sup>12,11</sup> J. Keefner,<sup>18</sup> D. Khaitan,<sup>24</sup> A. Khazov,<sup>8</sup> Y.D. Kim,<sup>29</sup> C.D. Kocher,<sup>20</sup> E.V. Korolkova,<sup>30</sup> H. Kraus,<sup>13</sup> H.J. Krebs,<sup>1</sup> L. Krezko,<sup>31</sup> B. Krikler,<sup>31</sup> V.A. Kudryavtsev<sup>10</sup> S. Kyre<sup>26</sup> J. Lee,<sup>29</sup> B.G. Lenard<sup>2</sup> D.S. Leonard<sup>29</sup> K.T. Lesh<sup>12</sup> C. Levy<sup>2</sup> J. Li<sup>29</sup> J. Liao,<sup>20</sup> F.-T. Liao,<sup>13</sup> J. Lin,<sup>11,12</sup> A. Lindote,<sup>15</sup> R. Linehan,<sup>1,2</sup> W.H. Lippincott,<sup>9</sup> X. Liu,<sup>10</sup> M.I. Lopes,<sup>15</sup> B. López Paredes,<sup>5</sup> W. Lorenzon,<sup>3</sup> S. Luitz,<sup>1</sup> J.M. Lyle,<sup>20</sup> P. Majewski,<sup>8</sup> A. Manalaysay,<sup>21</sup> R.L. Mannino,<sup>33</sup> C. Maupin,<sup>18</sup> D.N. McKinsey, <sup>11,12</sup> Y. Meng, <sup>17</sup> E.H. Miller,<sup>6</sup> J. Mogy <sup>32,12,1</sup> M.E. Monzani, <sup>12,18</sup> J.A. Morad, <sup>21</sup> E. Morrison,<sup>6</sup> B.J. Mount,<sup>34</sup> A.St.J. Murphy,<sup>10</sup> H.N. Nelson,<sup>26</sup> F. Neves,<sup>15</sup> J. Nikoleyczik,<sup>4</sup> K. O'Sullivan,<sup>12,11,h</sup> I. Olcina,<sup>5</sup> M.A. Olevitch,<sup>16</sup> K.C. Oliver-Mallory,<sup>12,11</sup> K.J. Palladino,<sup>4</sup> S.J. Patton,<sup>12</sup> E.K. Pease,<sup>12</sup> B. Penning,<sup>35</sup> A. Piepke,<sup>1</sup> S. Powell,<sup>14</sup> R.M. Preece,<sup>8</sup> K. Pushkin,<sup>3</sup> B.N. Ratcliff,<sup>1</sup> J. Reichenbacher,<sup>6</sup> C.A. Rhyne,<sup>20</sup> A. Richards,<sup>5</sup> J.P. Rodrigues,<sup>15</sup> R. Rosero,<sup>25</sup> P. Rossiter,<sup>30</sup> J.S. Saba,<sup>12</sup> M. Sarvchev,<sup>9</sup> R.W. Schnee,<sup>6</sup> M. Schubnell,<sup>3</sup> P.R. Scovell, S. Shaw,<sup>26</sup> T.A. Shutt,<sup>1,2</sup> J.J. Silk,<sup>7</sup> C. Silva,<sup>15</sup> K. Skarpaas,<sup>1</sup> W. Skulski,<sup>24</sup> M. Solmaz,<sup>26</sup> V.N. Solovo,<sup>15</sup> P. Sorensen.<sup>12</sup> I. Stancu.<sup>17</sup> M.R. Stark.<sup>6</sup> T.M. Stiegler.<sup>33</sup> K. Stifter.<sup>1, 2</sup> M. Szydagis.<sup>32</sup> W.C. Taylor.<sup>20</sup> R. Taylor.<sup>5</sup> D.J. Taylor,<sup>18</sup> D. Temples,<sup>22</sup> P.A. Terman,<sup>33</sup> K.J. Thomas,<sup>12, i</sup> M. Timalsina,<sup>6</sup> W.H. To,<sup>1, 2</sup> A. Tomás,<sup>5</sup> T.E. Tope, M. Tripathi,<sup>21</sup> C.E. Tull,<sup>12</sup> L. Tvrznikova,<sup>36, 11, 12</sup> U. Utku,<sup>23</sup> J. Va'vra,<sup>1</sup> A. Vacheret,<sup>5</sup> J.R. Verbus,<sup>20, j</sup> E. Voirin,<sup>5</sup> M.L. Waldron, <sup>12</sup> J.R. Wason,<sup>11,12</sup> R.C. Webb,<sup>33</sup> D.T. White,<sup>46</sup> T.J. White,<sup>13,17</sup> W.J. Wisnewski,<sup>1</sup> M.S. Witherell,<sup>12,11</sup> F.L.H. Wolfs,<sup>24</sup> D. Woodward,<sup>30,k</sup> S.D. Worm,<sup>8,1</sup> M. Yeh,<sup>25</sup> J. Yin,<sup>24</sup> and I. Young<sup>9</sup>

RECEIVED: October 9, 2017 ACCEPTED: January 20, 2018 PUBLISHED: February 1, 2018

PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

#### Position reconstruction in LUX



#### The LUX collaboration

D.S. Akerib, a,b,c S. Alsum, d H.M. Araújo, K. Bai, A.J. Bailey, J. Balajthy, P. Beltrame, h E.P. Bernard,<sup>1,j</sup> A. Bernstein,<sup>k</sup> T.P. Biesiadzinski,<sup>a,b,c</sup> E.M. Boulton,<sup>1,j</sup> P. Brás,<sup>1</sup> D. Byram,<sup>m,n</sup> S.B. Cahn, M.C. Carmona-Benitez, a, P C. Chan, A. Currie, J.E. Cutter, T.J.R. Davison, A. Dobi,<sup>8</sup> E. Druszkiewicz,<sup>1</sup> B.N. Edwards,<sup>1</sup> S.R. Fallon,<sup>4</sup> A. Fan,<sup>b,c</sup> S. Fiorucci,<sup>4,8</sup> R.J. Gaitskell,<sup>4</sup> J. Genovesi,<sup>4</sup> C. Ghag,<sup>7</sup> M.G.D. Gilchriese,<sup>8</sup> C.R. Hall,<sup>8</sup> M. Hanhardt,<sup>f,n</sup> S.J. Haselschwardt.<sup>p</sup> S.A. Hertel, J.R.W D.P. Hogan, <sup>1</sup> M. Horn, <sup>1</sup>J.<sup>n</sup> D.Q. Huang,<sup>q</sup> C.M. Ignarra,<sup>b,c</sup> R.G. Jacobsen,<sup>1</sup> W. Ji,<sup>a,b,c</sup> K. Kamdin,<sup>1</sup> K. Kazkaz,<sup>k</sup> D. Khaitan,<sup>1</sup> R. Knoche,<sup>8</sup> N.A. Larsen,<sup>1</sup> B.G. Lenardo, k.r K.T. Lesko, A. Lindote, M.I. Lopes, A. Manalaysay, R.L. Mannino, d.x M.F. Marzioni," D.N. McKinsey, 1.J.s D.-M. Mei," J. Mock," M. Moongweluwan, J.A. Morad, A.St.J. Murphy.<sup>h</sup> C. Nehrkorn.<sup>p</sup> H.N. Nelson.<sup>p</sup> F. Neves.<sup>1</sup> K. O'Sullivan.<sup>4,j,a</sup> K.C. Oliver-Mallory,<sup>1</sup> K.J. Palladino,<sup>b,c,d</sup> E.K. Pease,<sup>i,j</sup> C. Rhyne,<sup>q</sup> S. Shaw,<sup>p,v</sup> T.A. Shutt,<sup>a,c</sup> C. Silva,<sup>1,1</sup> M. Solmaz,<sup>p</sup> V.N. Solovov,<sup>1</sup> P. Sorensen,<sup>3</sup> T.J. Sumner,<sup>e</sup> M. Szydagis,<sup>4</sup> D.J. Taylor," W.C. Taylor, B.P. Tennyson, P.A. Terman, \* D.R. Tiedt, W.H. To.b.c.) M. Tripathi," L. Tyrznikova, 13,8 S. Uvarov," V. Velan, J.R. Verbus, 9 R.C. Webb, X J.T. White, X T.J. Whitis, a.b.c M.S. Witherell, F.L.H. Wolfs, J. Xu, K. Yazdani, S.K. Young" and C. Zhang"

#### Liquid xenon scintillation measurements and pulse shape discrimination in the LUX dark matter detector

D. S. Akerib<sup>1,23</sup> S. Alsum<sup>4</sup>, H. M. Aradijo<sup>5</sup>, X. Bail<sup>6</sup>, A. J. Bailey<sup>5</sup>, J. Balajhy,<sup>7</sup> P. Beltrame<sup>8</sup>, E. P. Bernard<sup>9,10</sup>
 A. Bernstein,<sup>11</sup> T. P. Biesiadzinski,<sup>1,23</sup> E. M. Boulton,<sup>31,21,0</sup> P. Brás,<sup>13</sup> D. Byran,<sup>14,15</sup> M. C. Carmona-Benlez,<sup>16,17</sup>
 C. Chan,<sup>18</sup> A. Currie<sup>7</sup>, J. E. Cutter,<sup>10</sup> T. J. R. Davison,<sup>4</sup> A. Dobi,<sup>12</sup> E. Druszkiewicz,<sup>20</sup> B. N. Edwards,<sup>10</sup> S. R. Fallon,<sup>21</sup>
 A. Fan,<sup>23</sup> S. Fiorucci,<sup>12,18</sup> R. J. Gatiskell,<sup>18</sup> J. Genovesi,<sup>12</sup> C. Ghag,<sup>22</sup> M. G. D. Gilchriese,<sup>12</sup> C. R. Hall,<sup>7</sup>
 S. J. Haselschwardt,<sup>17</sup> S. A. Herrel<sup>23,12,10</sup> D. P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn <sup>15,50,10</sup> D. Q. Huaag,<sup>18</sup> C. M. Ignarra <sup>22,24</sup> R. G. Jacobsen,<sup>9</sup>
 W. Ji,<sup>1,23</sup> K. Kamdin,<sup>9</sup> K. Kazkaz,<sup>11</sup> D. Khaitan,<sup>30,4</sup> R. Knoche,<sup>7</sup> B. G. Lenarde,<sup>10,11,24</sup> K. T. Lesko,<sup>12</sup> J. Liao,<sup>18</sup>
 A. Lindote,<sup>3</sup> M. L. Lopes,<sup>13</sup> A. Manalaysay,<sup>19</sup> R. L. Mannino,<sup>24</sup> M. F. Marzioni,<sup>5</sup> D. N. McKinsey,<sup>9,12,10</sup> D. M. Mei,<sup>14</sup>
 J. Moock,<sup>13</sup> M. Moongweluwan,<sup>30</sup> J. A. Morad,<sup>19</sup> A. S. J. J. Murphy<sup>6</sup> C. Nehrkom,<sup>17</sup> H. N. Nelson,<sup>17</sup> F. Neves,<sup>13</sup>
 C. Silulivan,<sup>9,12,10</sup> K. C. Oliver-Mallory,<sup>9</sup> K. J. Palladino,<sup>4,23</sup> E. K. Pease,<sup>9,12,10</sup> C. Rhyne,<sup>18</sup> S. Shaw,<sup>17,22</sup> T. A. Shutt,<sup>13</sup> S. Silun,<sup>31</sup> S. Osmean,<sup>10</sup> J. P. Notens,<sup>11</sup> J. Soroken,<sup>15</sup> W. C. Taylor,<sup>18</sup>
 B. P. Tennyson,<sup>10</sup> P. A. Terman,<sup>35</sup> D. R. Tiedt,<sup>6</sup> W. H. To,<sup>26,23</sup> M. Tripathi,<sup>19</sup> L. Tvrznikova,<sup>9,12,10</sup> U. Utku,<sup>22</sup> S. Uvarov,<sup>19</sup> V. Velan,<sup>9</sup> J. R. Verbus,<sup>16</sup> R. C. Webb,<sup>53</sup> J. T. White,<sup>3</sup> J. J. Suitherell,<sup>12</sup> F. L. H. Wolfs,<sup>20</sup> J. Xu,<sup>11</sup>

#### PHYSICAL REVIEW D 98, 062005 (2018)

#### Search for annual and diurnal rate modulations in the LUX experiment

D.S. Akerib,<sup>1,2,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H. M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E.P. Bernard,<sup>9</sup> A. Bernstein,<sup>10</sup> T.P. Biesiadzinski,<sup>1,2,3</sup> E. M. Boulton,<sup>2,1,1,2</sup> B. Boxer,<sup>13</sup> P. Brás,<sup>4</sup> S. Burdin,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>15,16</sup> M. C. Carmona-Benitez,<sup>17</sup> C. Chan,<sup>18</sup> J. E. Cutter,<sup>7</sup> J. N. Davison,<sup>8</sup> E. Durszkiewicz,<sup>19</sup> S. K. Fallon,<sup>20</sup> A. Fan-<sup>2,3</sup> S. Fiorucci,<sup>11,18</sup> N. J. Gatiskell,<sup>14</sup> J. Genovesi,<sup>20</sup> C. Ghag,<sup>21</sup> M. G.D. Gilchriese,<sup>11</sup> C. Gwilliam,<sup>13</sup> C. R. Hall,<sup>22</sup> S. J. Haselschwardt,<sup>22</sup> S. A. Hertel,<sup>24,11</sup> D. P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn,<sup>16</sup> D. Q. Huang,<sup>18</sup> C. M. Ignarra,<sup>13</sup> R. G. Jacobsen,<sup>9</sup> W. Ji,<sup>12,2</sup> K. Kandin,<sup>91</sup> K. Kazaza,<sup>10</sup> D. Khaitan,<sup>19</sup> R. Knoche,<sup>22</sup> C. V. Korolkova,<sup>25</sup> S. Kraviz,<sup>11</sup> V. A. Kudryavsev,<sup>25</sup> B. G. Lenardo,<sup>1,10</sup> K. T. Lesko,<sup>11</sup> J. Liao,<sup>8</sup>

J. Lin,<sup>9,11</sup> A. Lindote,<sup>14</sup> M. I. Lopes,<sup>14</sup> A. Manalaysay,<sup>7</sup> R. L. Mannino,<sup>254</sup> N. Marangou,<sup>5</sup> M. F. Marzioni,<sup>8</sup> D. N. McKinsey,<sup>9,11</sup> D.-M. Mei,<sup>15</sup> M. Moongweluwan,<sup>19</sup> J. A. Morad,<sup>7</sup> A. St. J. Murphy,<sup>8</sup> C. Nehrkom,<sup>25</sup> H. N. Nelson,<sup>25</sup> F. Neves,<sup>14</sup> K. C. Oliver-Malory,<sup>9,11</sup> K. J. Palladino,<sup>4</sup> E. K. Pease,<sup>9,11</sup> G. R. C. Rischbieter,<sup>20</sup> C. Rhyne,<sup>18</sup> P. Rossier,<sup>25</sup> S. Shaw,<sup>32,11</sup> T. A. Shut,<sup>12,23</sup> C. Silva,<sup>14</sup> M. Solmaz,<sup>24</sup> V. N. Solovov,<sup>14</sup> P. Sorensen,<sup>11</sup> T. J. Sumner,<sup>5</sup> M. Szydagis,<sup>20</sup> D. J. Taylor,<sup>16</sup> W. C. Taylor,<sup>18</sup> B. P. Tennyson,<sup>12</sup> P. A. Terman,<sup>26</sup> D. R. Tiedt,<sup>6</sup> W. H. To<sup>27</sup> M. Tripathi,<sup>1</sup> L. Tvrznikova,<sup>31,11,2</sup> U. Utku,<sup>21</sup> S. Uvarov,<sup>7</sup> V. Velan,<sup>9</sup> J. R. Verbus,<sup>18</sup> R. C. Webb,<sup>56</sup> J. T. White,<sup>26</sup> T. J. Whitis,<sup>1,23</sup> M. S. Witherell,<sup>11</sup> F. L. H. Wolfs,<sup>19</sup> D. Woodward,<sup>17</sup> J. Xu,<sup>10</sup> K. Yazdani,<sup>2</sup> and C. Zhang<sup>15</sup>

PHYSICAL REVIEW D 97, 102008 (2018)

#### Calibration, event reconstruction, data analysis, and limit calculation for the LUX dark matter experiment

D.S. Akerib,<sup>12,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H. M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> A. J. Baijey,<sup>5</sup> J. Balajity,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E. P. Bernard,<sup>9,10</sup> A. Bernstein,<sup>11</sup> T. P. Biesiadzinski,<sup>12,3</sup> E. M. Boulton,<sup>91,10</sup> P. Brás,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>14,15</sup> S. B. Cahm,<sup>10</sup> M. C. Carmona-Benitz,<sup>11</sup> M.<sup>14</sup> C. Chan,<sup>15</sup> J. E. Cutter,<sup>10</sup> T. J. R. Davison,<sup>8</sup> A. Dohi<sup>12</sup> J. E. Y. Dobson,<sup>20</sup> E. Druszkiewicz,<sup>21</sup> B. N. Edwards,<sup>10</sup> C. H. Faham,<sup>12</sup> S. R. Fallon,<sup>22</sup> A. Fan,<sup>24</sup> S. Fiorucci,<sup>12,18</sup> R. J. Gaitskell,<sup>18</sup> V. M. Gehman,<sup>13</sup> J. Genovsi,<sup>22</sup> C. Ghag,<sup>23</sup> M. G. D. Gilchriese,<sup>12</sup> C. R. Hall,<sup>3</sup> M. Hanhardt,<sup>35</sup> S. J. Haeelschwardt,<sup>17</sup> S. A. Hertel,<sup>13,10</sup> D. P. Hogan,<sup>3</sup> M. Horm,<sup>15,50</sup> D. Q. Huang,<sup>15</sup> C. M. Hall,<sup>31</sup> M. Hanhardt,<sup>35</sup> S. J. Haeelschwardt,<sup>17</sup> K. Karkaz,<sup>11</sup> D. Khaitan,<sup>7</sup> R. Knoche,<sup>7</sup> N. A. Larsen,<sup>10</sup> C. Lee,<sup>23</sup> B. G. Lenardo,<sup>10</sup> K. T. Leeko,<sup>15</sup> A. Lindote,<sup>15</sup> J. Mockayay,<sup>15</sup> E. K. Pasae,<sup>17</sup> C. Nehrkorn,<sup>17</sup> H. N. Nelson,<sup>17</sup> F. Netsek,<sup>15</sup> A. J. Lindote,<sup>15</sup> J. K. K. Kandin,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. K. Casab,<sup>16</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. K. Peasae,<sup>15</sup> J. L. Richhart,<sup>16</sup> C. Nhyne,<sup>18</sup> S. Shaw,<sup>17,20</sup> T. A. Shutt,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. B. P. Tennyson,<sup>10</sup> P. A. Terman,<sup>25</sup> D. R. Tied,<sup>16</sup> H. T. J. J. Minti,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. Mocka,<sup>15</sup> J. K. Yazuhai,<sup>15</sup> S. K. Young,<sup>16</sup> M. S. Witherell,<sup>17</sup> F. H. Wolfs,<sup>12</sup> J. K. Verbus,<sup>18</sup> K. K. Zubard,<sup>16</sup> X. K. Yundhai,<sup>15</sup> K. Yundhai,<sup>16</sup> J. J. Wolfs,<sup>12</sup> J. K. Verbu

(LUX Collaboration)



![](_page_23_Picture_0.jpeg)

![](_page_23_Picture_1.jpeg)

- A alpha counter which employs electronic background suppression to achieve background rates a factor 50+ better than conventional proportional counters.
- Fast counting time, can measure samples in days rather than weeks/months.

\*

- This combines with the new generation of BUGS detectors to expand screening capability for next gen low background experiments
- Not only to reduce backgrounds but to measure contaminations
  - Feed to background models

# XIA UltraLo-1800

 $\succ$ 

Sample	Duration (hrs)	Alphas	Surface Area (cm²)	Emissivity (α/khr/cm²)
Stainless Steel Tray	168	342	1800	1.24 ± 0.07
PTFE Liner	168	103	1800	0.38 ± 0.04
LZ Titanium	168	4779	707	46.65 ± 0.67
LZ Titanium (Citric Acid)	168	2302	707	22.07 ± 0.46
ULB Copper	168	13	707	0.13 ± 0.04

- > IBM made a similar measurement at a surface lab and achieved **0.3**  $\alpha$ /khr/cm<sup>2</sup>.
- Boulby system limited by Rn in Ar gas supply
  - Fitting low-Rn charcoal trap

- Achieved a measurement of **0.13** α/khr/cm<sup>2</sup> amongst lowest ever reported
  - XMASS Kamiko Group report similar sensitivity

![](_page_24_Figure_7.jpeg)

![](_page_24_Picture_8.jpeg)

#### Projected WIMP sensitivity of the LUX-ZEPLIN (LZ) dark matter experiment

D.S. Akerib,<sup>1,2</sup> C.W. Akerlof,<sup>3</sup> S.K. Alsum,<sup>4</sup> H.M. Araújo,<sup>5</sup> M. Arthurs,<sup>3</sup> X. Bai,<sup>6</sup> A.J. Bailey,<sup>5, a</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> S. Balashov,<sup>8</sup> D. Bauer,<sup>5</sup> J. Belle,<sup>9</sup> P. Beltrame,<sup>10</sup> T. Benson,<sup>4</sup> E.P. Bernard,<sup>11,12</sup> T.P. Biesiadzinski,<sup>1,2</sup> K.E. Boast,<sup>13</sup> B. Boxer,<sup>14</sup> P. Brás,<sup>15</sup> J.H. Buckley,<sup>16</sup> V.V. Bugaev,<sup>16</sup> S. Burdin,<sup>14</sup> J.K. Busenitz,<sup>17</sup> C. Carels,<sup>13</sup> D.L. Carlsmith,<sup>4</sup> B. Carlson,<sup>18</sup> M.C. Carmona-Benitez,<sup>19</sup> C. Chan,<sup>20</sup> J.J. Cherwinka,<sup>4</sup> A. Cole,<sup>12</sup> A. Cottle,<sup>9</sup> W.W. Craddock,<sup>1</sup> A. Currie,<sup>5, b</sup> J.E. Cutter,<sup>21</sup> C.E. Dahl,<sup>22, 9</sup> L. de Viveiros,<sup>19</sup> A. Dobi,<sup>12, c</sup> J.E.Y. Dobson,<sup>23, d</sup> E. Druszkiewicz,<sup>24</sup> T.K. Edberg,<sup>7</sup> W.R. Edwards,<sup>12, e</sup> A. Fan,<sup>1, 2</sup> S. Fayer,<sup>5</sup> S. Fiorucci,<sup>12</sup> T. Fruth,<sup>13</sup> R.J. Gaitskell,<sup>20</sup> J. Genovesi,<sup>6</sup> C. Ghag,<sup>23</sup> M.G.D. Gilchriese,<sup>12</sup> M.G.D.van der Grinten,<sup>8</sup> C.R. Hall,<sup>7</sup> S. Hans,<sup>25</sup> K. Hanzel,<sup>12</sup> S.J. Haselschwardt,<sup>26</sup> S.A. Hertel,<sup>27</sup> S. Hillbrand,<sup>21</sup> C. Hjemfelt,<sup>6</sup> M.D. Hoff,<sup>12</sup> J.Y-K. Hor,<sup>17</sup> D.Q. Huang,<sup>20</sup> C.M. Ignarra,<sup>1,2</sup> W. Ji,<sup>1,2</sup> A.C. Kaboth,<sup>28,8</sup> K. Kamdin,<sup>12,11</sup> J. Keefner,<sup>18</sup> D. Khaitan,<sup>24</sup> D.N. McKinsey,<sup>11,12</sup> Y. Meng,<sup>17</sup> E.H. Miller,<sup>6</sup> J. Mock,<sup>32,12, f</sup> M.E. Monzani,<sup>1,2,g</sup> J.A. Morad,<sup>21</sup> E. Morrison,<sup>6</sup> B.J. Mount,<sup>34</sup> A.St.J. Murphy,<sup>10</sup> H.N. Nelson,<sup>26</sup> F. Neves,<sup>15</sup> J. Nikoleyczik,<sup>4</sup> K. O'Sullivan,<sup>12,11, h</sup> I. Olcina,<sup>5</sup> M.A. Olevitch,<sup>16</sup> K.C. Oliver-Mallory,<sup>12,11</sup> K.J. Palladino,<sup>4</sup> S.J. Patton,<sup>12</sup> E.K. Pease,<sup>12</sup> B. Penning,<sup>35</sup> A. Piepke,<sup>17</sup> S. Powell,<sup>14</sup> R.M. Preece,<sup>8</sup> K. Pushkin,<sup>3</sup> B.N. Ratcliff,<sup>1</sup> J. Reichenbacher,<sup>6</sup> C.A. Rhyne,<sup>20</sup> A. Richards,<sup>5</sup> J.P. Rodrigues,<sup>15</sup> R. Rosero,<sup>25</sup> P. Rossiter,<sup>30</sup> J.S. Saba,<sup>12</sup> M. Sarychev,<sup>9</sup> R.W. Schnee,<sup>6</sup> M. Schubnell,<sup>3</sup> P.R. Scovell,<sup>13</sup> S. Shaw,<sup>26</sup> T.A. Shutt,<sup>1,2</sup> J.J. Silk,<sup>7</sup> C. Silva,<sup>15</sup> K. Skarpaas,<sup>1</sup> W. Skulski,<sup>24</sup> M. Solmaz,<sup>26</sup> V.N. Solovov,<sup>15</sup> P. Sorensen,<sup>12</sup> I. Stancu,<sup>17</sup> M.R. Stark,<sup>6</sup> T.M. Stiegler,<sup>33</sup> K. Stiffer,<sup>1, 2</sup> M. Szydagis,<sup>32</sup> W.C. Taylor,<sup>20</sup> R. Taylor,<sup>5</sup> D.J. Taylor,<sup>18</sup> D. Temples,<sup>22</sup> P.A. Terman,<sup>33</sup> K.J. Thomas,<sup>12, i</sup> M. Timalsina,<sup>6</sup> W.H. To,<sup>1, 2</sup> A. Tomás,<sup>5</sup> T.E. Tope,<sup>9</sup> M. Tripathi,<sup>21</sup> C.E. Tull,<sup>12</sup> L. Tvrznikova,<sup>36,11,12</sup> U. Utku,<sup>23</sup> J. Va'vra,<sup>1</sup> A. Vacheret,<sup>5</sup> J.R. Verbus,<sup>20, j</sup> E. Voirin,<sup>9</sup> W.L. Waldron,<sup>12</sup> J.R. Watson,<sup>11,12</sup> R.C. Webb,<sup>33</sup> D.T. White,<sup>26</sup> T.J. Whitis,<sup>1,37</sup> W.J. Wisniewski,<sup>1</sup> M.S. Witherell,<sup>12,11</sup> F.L.H. Wolfs,<sup>24</sup> D. Woodward,<sup>30, k</sup> S.D. Worm,<sup>8,1</sup> M. Yeh,<sup>25</sup> J. Yin,<sup>24</sup> and I. Young<sup>9</sup>

The definitive expectation for what LZ will deliver.

## The benchmark!

Results of a search for sub-GeV dark matter using 2013 LUX data

D.S. Akerib,<sup>1,2,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H.M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E.P. Bernard,<sup>9</sup> A. Bernstein,<sup>10</sup> T.P. Biesiadzinski,<sup>1,2,3</sup> E.M. Boulton,<sup>9,11,12</sup> B. Boxer,<sup>13</sup> P. Brás,<sup>14</sup> S. Burdin,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>15,16</sup>
M.C. Carmona-Benitez,<sup>17</sup> C. Chan,<sup>18</sup> J.E. Cutter,<sup>7</sup> T.J.R. Davison,<sup>8</sup> E. Druszkiewicz,<sup>19</sup> S.R. Fallon,<sup>20</sup> A. Fan,<sup>2,3</sup> S. Fiorucci,<sup>11,18</sup> R.J. Gaitskell,<sup>18</sup> J. Genovesi,<sup>20</sup> C. Ghag,<sup>21</sup> M.G.D. Gilchriese,<sup>11</sup> C. Gwilliam,<sup>13</sup> C.R. Hall,<sup>22</sup> S.J. Haselschwardt,<sup>23</sup> S.A. Hertel,<sup>24,11</sup> D.P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn,<sup>16,9</sup> D.Q. Huang,<sup>18</sup> C.M. Ignarra,<sup>2,3</sup> R.G. Jacobsen,<sup>9</sup> O. Jahangir,<sup>21</sup> W. Ji,<sup>1,2,3</sup> K. Kamdin,<sup>9,11</sup> K. Kazkaz,<sup>10</sup> D. Khaitan,<sup>19</sup> R. Knoche,<sup>22</sup> E.V. Korolkova,<sup>25</sup> S. Kravitz,<sup>11</sup> V.A. Kudryavtsev,<sup>25</sup> B.G. Lenardo,<sup>7,10</sup> K.T. Lesko,<sup>11</sup> J. Liao,<sup>18</sup> J. Lin,<sup>9</sup>
A. Lindote,<sup>14</sup> M.I. Lopes,<sup>14</sup> A. Manalaysay,<sup>7</sup> R.L. Mannino,<sup>26,4</sup> N. Marangou,<sup>5</sup> M.F. Marzioni,<sup>8</sup> D.N. McKinsey,<sup>9,11</sup> D.-M. Mei,<sup>15</sup> M. Moongweluwan,<sup>19</sup> J.A. Morad,<sup>7</sup> A.St.J. Murphy,<sup>8</sup> A. Naylor,<sup>25</sup> C. Nehrkorn,<sup>23</sup> H.N. Nelson,<sup>23</sup> F. Neves,<sup>14</sup> K.C. Oliver-Mallory,<sup>9,11</sup> K.J. Palladino,<sup>4</sup> E.K. Pease,<sup>9,11</sup> Q. Riffard,<sup>9,11</sup> G.R.C. Rischbieter,<sup>20</sup>
C. Rhyne,<sup>18</sup> P. Rossiter,<sup>25</sup> S. Shaw,<sup>23,21</sup> T.A. Shutt,<sup>1,2,3</sup> C. Silva,<sup>14</sup> M. Solmaz,<sup>23</sup> V.N. Solovov,<sup>14</sup> P. Sorensen,<sup>11</sup> T.J. Sumner,<sup>5</sup> M. Szydagis,<sup>20</sup> D.J. Taylor,<sup>16</sup> W.C. Taylor,<sup>18</sup> B.P. Tennyson,<sup>12</sup> P.A. Terman,<sup>26</sup> D.R. Tiedt,<sup>6</sup> W.H. To,<sup>27</sup> M. Tripathi,<sup>7</sup> L. Tvrznikova,<sup>9,11,12,\*</sup> U. Utku,<sup>21</sup> S. Uvarov,<sup>7</sup> V. Velan,<sup>9</sup> R.C. Webb,<sup>26</sup> J.T. White,<sup>26</sup> T.J. Whitis,<sup>1,2,3</sup> M.S. Witherell,<sup>11</sup> F.L.H. Wolfs,<sup>19</sup> D. Woodward,<sup>17</sup> J. Xu,<sup>10</sup> K. Yazdani,<sup>5</sup> and C. Zhang<sup>15</sup>

Alex - Lead internal review committee

'Bremsstrahlung' and 'Migdal' effects.

A standard WIMP interaction involves a scatter with a xenon *nucleus* 

 $\rightarrow$  There are inevitable residual *atomic* emissions

Here we use these to increase sensitivity to low energy recoils

 $\rightarrow$  Improved response to low mass dark matter

First major experiment to use this technique 'in anger'

PHYSICAL REVIEW D 98, 062005 (2018)

#### Search for annual and diurnal rate modulations in the LUX experiment

D. S. Akerib,<sup>1,2,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H. M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E. P. Bernard,<sup>9</sup> A. Bernstein,<sup>10</sup>
T. P. Biesiadzinski,<sup>1,2,3</sup> E. M. Boulton,<sup>9,11,12</sup> B. Boxer,<sup>13</sup> P. Brás,<sup>14</sup> S. Burdin,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>15,16</sup> M. C. Carmona-Benitez,<sup>17</sup>
C. Chan,<sup>18</sup> J. E. Cutter,<sup>7</sup> T. J. R. Davison,<sup>8</sup> E. Druszkiewicz,<sup>19</sup> S. R. Fallon,<sup>20</sup> A. Fan,<sup>2,3</sup> S. Fiorucci,<sup>11,18</sup> R. J. Gaitskell,<sup>18</sup>
J. Genovesi,<sup>20</sup> C. Ghag,<sup>21</sup> M. G. D. Gilchriese,<sup>11</sup> C. Gwilliam,<sup>13</sup> C. R. Hall,<sup>22</sup> S. J. Haselschwardt,<sup>23</sup> S. A. Hertel,<sup>24,11</sup>
D. P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn,<sup>16,9</sup> D. Q. Huang,<sup>18</sup> C. M. Ignarra,<sup>2,3</sup> R. G. Jacobsen,<sup>9</sup> W. Ji,<sup>12,3</sup> K. Kamdin,<sup>9,11</sup> K. Kazkaz,<sup>10</sup>
D. Khaitan,<sup>19</sup> R. Knoche,<sup>22</sup> E. V. Korolkova,<sup>25</sup> S. Kravitz,<sup>11</sup> V. A. Kudryavtsev,<sup>25</sup> B. G. Lenardo,<sup>7,10</sup> K. T. Lesko,<sup>11</sup> J. Liao,<sup>18</sup>
J. Lin,<sup>9,11</sup> A. Lindote,<sup>14</sup> M. I. Lopes,<sup>14</sup> A. Manalaysay,<sup>7</sup> R. L. Mannino,<sup>26,4</sup> N. Marangou,<sup>5</sup> M. F. Marzioni,<sup>8</sup>
D. N. McKinsey,<sup>9,11</sup> D.-M. Mei,<sup>15</sup> M. Moongweluwan,<sup>19</sup> J. A. Morad,<sup>7</sup> A. St. J. Murphy,<sup>8</sup> C. Nehrkorn,<sup>23</sup> H. N. Nelson,<sup>23</sup>
F. Neves,<sup>14</sup> K. C. Oliver-Mallory,<sup>9,11</sup> K. J. Palladino,<sup>4</sup> E. K. Pease,<sup>9,11</sup> G. R. C. Rischbieter,<sup>20</sup> C. Rhyne,<sup>18</sup> P. Rossiter,<sup>25</sup>
S. Shaw,<sup>23,21</sup> T. A. Shutt,<sup>1,2,3</sup> C. Silva,<sup>14</sup> M. Solmaz,<sup>23</sup> V. N. Solovov,<sup>14</sup> P. Sorensen,<sup>11</sup> T. J. Sumner,<sup>5</sup> M. Szydagis,<sup>20</sup>
D. J. Taylor,<sup>16</sup> W. C. Taylor,<sup>18</sup> B. P. Tennyson,<sup>12</sup> P. A. Terman,<sup>26</sup> D. R. Tiedt,<sup>6</sup> W. H. To,<sup>27</sup> M. Tripathi,<sup>7</sup> L. Tvrznikova,<sup>9,11,12</sup>
I. Uutku,<sup>21</sup> S. Uvarov,<sup>7</sup> V. Velan,<sup>9</sup> J. R. Verbus,<sup>18</sup> R. C. Webb,<sup>26</sup> J. T. White,<sup>26</sup> T. J. Whitis,<sup>1,2,3</sup> M. S. Witherell,<sup>11</sup>
F. L. H. Wolfs,<sup>19</sup> D. Woodward,<sup>17</sup> J. Xu,<sup>10,\*</sup> K. Yazdani,<sup>5</sup> and C. Zhang<sup>15</sup>

![](_page_27_Figure_4.jpeg)

FIG. 6. The observed LUX event rates in the 2–6 keV<sub>ec</sub> energy window (top) and that in the 6–10 keV<sub>ec</sub> window (bottom) from 2013 to 2016. No data exist between 12/2013 and 9/2014 because of detector maintenance. Dashed lines illustrate the best fits to an annual modulation model, determined using the unbinned maximum likelihood method. For the purpose of illustration the live time is folded in the event rate rather than in the fit function; a bin size of 25 days is used.

- Testing DAMA.
- Are there annual modulations in bulk event rate? (esp. in 2-6 keV bin)
   No!

![](_page_27_Figure_8.jpeg)

FIG. 7. The evaluated 90% LUX contours for the modulation parameters in the signal region of 2–6 keV<sub>ce</sub> (solid line, purple-filled), and that in the control region of 6–10 keV<sub>ce</sub> (dashed line, blue-filled). The DAMA result (DAMA/NaI and DAMA/LIBRA) for 2–6 keV<sub>ce</sub> [14] (black dot with error bars) and the XENON100 result for 2–5.8 keV<sub>ce</sub> [41] (dotted line, greenfilled) are also shown for comparison.

World leading limit strongly excludes modulation seen in DAMA.

PHYSICAL REVIEW D 97, 102008 (2018)

# Calibration, event reconstruction, data analysis, and limit calculation for the LUX dark matter experiment

D. S. Akerib, <sup>1,2,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H. M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> A. J. Bailey,<sup>5</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E. P. Bernard,<sup>9,10</sup> A. Bernstein,<sup>11</sup> T. P. Biesiadzinski, <sup>1,2,3</sup> E. M. Boulton,<sup>9,12,10</sup> P. Brás,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>14,15</sup> S. B. Cahn,<sup>10</sup>
M. C. Carmona-Benitez, <sup>16,17,†</sup> C. Chan,<sup>18</sup> A. Currie,<sup>5</sup> J. E. Cutter,<sup>19</sup> T. J. R. Davison,<sup>8</sup> A. Dobi,<sup>12</sup> J. E. Y. Dobson,<sup>20</sup> E. Druszkiewicz,<sup>21</sup> B. N. Edwards,<sup>10</sup> C. H. Faham,<sup>12</sup> S. R. Fallon,<sup>22</sup> A. Fan,<sup>2,3</sup> S. Fiorucci,<sup>12,18</sup> R. J. Gaitskell,<sup>18</sup>
V. M. Gehman,<sup>12</sup> J. Genovesi,<sup>22</sup> C. Ghag,<sup>20</sup> M. G. D. Gilchriese,<sup>12</sup> C. R. Hall,<sup>7</sup> M. Hanhardt,<sup>6,15</sup> S. J. Haselschwardt,<sup>17</sup>
S. A. Hertel,<sup>23,12,10</sup> D. P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn,<sup>15,9,10</sup> D. Q. Huang,<sup>18</sup> C. M. Ignarra,<sup>2,3</sup> R. G. Jacobsen,<sup>9</sup> W. Ji,<sup>1,2,3</sup> K. Kamdin,<sup>9</sup>
K. Kazkaz,<sup>11</sup> D. Khaitan,<sup>21</sup> R. Knoche,<sup>7</sup> N. A. Larsen,<sup>10</sup> C. Lee,<sup>1,2,3</sup> B. G. Lenardo,<sup>19,11</sup> K. T. Lesko,<sup>12</sup> A. Lindote,<sup>13</sup>
M. I. Lopes,<sup>13</sup> A. Manalaysay,<sup>19</sup> R. L. Mannino,<sup>24,4</sup> M. F. Marzioni,<sup>8</sup> D. N. McKinsey,<sup>9,12,10</sup> D.-M. Mei,<sup>14</sup> J. Mock,<sup>22</sup>
M. Moongweluwan,<sup>21</sup> J. A. Morad,<sup>19</sup> A. St. J. Murphy,<sup>8</sup> C. Nehrkorn,<sup>17</sup> H. N. Nelson,<sup>17</sup> F. Neves,<sup>13</sup> K. O'Sullivan,<sup>9,12,10</sup>
K. C. Oliver-Mallory,<sup>9</sup> K. J. Palladino,<sup>42,3</sup> E. K. Pease,<sup>9,12,10</sup> L. Reichhart,<sup>20</sup> C. Rhyne,<sup>18</sup> S. Shaw,<sup>17,20</sup> T. A. Shut,<sup>1,2,3</sup>
C. Silva,<sup>13</sup> M. Solmaz,<sup>17</sup> V. N. Solovov,<sup>13</sup> P. Sorensen,<sup>12</sup> T. J. Sumner,<sup>5</sup> M. Szydagis,<sup>22</sup> D. J. Taylor,<sup>15</sup> W. C. Taylor,<sup>18</sup> B. P. Tennyson,<sup>10</sup> P. A. Terman,<sup>24</sup> D. R. Tiedt,<sup>6</sup> W. H. To<sup>25,2,3</sup> M. Tripathi,<sup>19</sup> L. Tvrznikova,<sup>9,12,10</sup> S. Uvarov,<sup>19</sup> V. Velan,<sup>9</sup> J. R. Verbus,<sup>18</sup> R. C. Webb,<sup>24</sup> J. T. White,<sup>24,\*</sup> T. J. Whitis,<sup>1,2,3</sup> M. S. Witherell,<sup>12</sup> F. L. H. Wolfs,<sup>21</sup> J. Xu,<sup>11</sup> K. Yazdani,<sup>5</sup> S. K. Young,<sup>22</sup> and C. Zhang<sup>14</sup>

(LUX Collaboration)

The full technical description of the methods 'behind' the science results.

Alex - Lead internal review committee

Maria Francesca, Lea - contributed

![](_page_29_Picture_0.jpeg)

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 908 (2018) 401-410

![](_page_29_Picture_2.jpeg)

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

LUX trigger efficiency

D.S. Akerib<sup>1,2,3</sup>, S. Alsum<sup>4</sup>, H.M. Araújo<sup>5</sup>, X. Bai<sup>6</sup>, J. Balajthy<sup>7</sup>, P. Beltrame<sup>8</sup>, E.P. Bernard<sup>9</sup>, A. Bernstein<sup>10</sup>, T.P. Biesiadzinski<sup>1,2,3</sup>, E.M. Boulton<sup>9,11,12</sup>, B. Boxer<sup>13</sup>, P. Brás<sup>14</sup>, S. Burdin<sup>13</sup>, D. Byram<sup>15,16</sup>, M.C. Carmona-Benitez<sup>17</sup>, C. Chan<sup>18</sup>, J.E. Cutter<sup>7</sup>, T.J.R. Davison<sup>8</sup>, E. Druszkiewicz<sup>19</sup>, S.R. Fallon<sup>20</sup>, A. Fan<sup>2,3</sup>, S. Fiorucci<sup>11,18</sup>, R.J. Gaitskell<sup>18</sup>, J. Genovesi<sup>20</sup>, C. Ghag<sup>21</sup>, M.G.D. Gilchriese<sup>11</sup>, E. Grace<sup>17</sup>, C. Gwilliam<sup>13</sup>, C.R. Hall<sup>22</sup>, S.J. Haselschwardt<sup>23</sup>, S.A. Hertel<sup>24,11</sup>, D.P. Hogan<sup>9</sup>, M. Horn<sup>16,9</sup>, D.Q. Huang<sup>18</sup>, C.M. Ignarra<sup>2,3</sup>, R.G. Jacobsen<sup>9</sup>, W. Ji<sup>1,2,3</sup>, K. Kamdin<sup>9,11</sup>, K. Kazkaz<sup>10</sup>, D. Khaitan<sup>19</sup>, R. Knoche<sup>22</sup>, E.V. Korolkova<sup>25</sup>, S. Kravitz<sup>11</sup>, V.A. Kudryavtsev<sup>25</sup>, B.G. Lenardo<sup>7,10</sup>, K.T. Lesko<sup>11</sup>, J. Liao<sup>18</sup>, J. Lin<sup>9</sup>, A. Lindote<sup>14</sup>, M.I. Lopes<sup>14</sup>, A. Manalaysay<sup>7</sup>, R.L. Mannino<sup>26,4</sup>, N. Marangou<sup>5</sup>, M.F. Marzioni<sup>8</sup>, D.N. McKinsey<sup>9,11</sup>, D.-M. Mei<sup>15</sup>, M. Moongweluwan<sup>19,\*</sup>, J.A. Morad<sup>7</sup>, A.St.J. Murphy<sup>8</sup>, C. Nehrkorn<sup>23</sup>, H.N. Nelson<sup>23</sup>, F. Neves<sup>14</sup>, K.C. Oliver-Mallory<sup>9,11</sup>, K.J. Palladino<sup>4</sup>, E.K. Pease<sup>9,11</sup>, G. Rischbieter<sup>20</sup>, C. Rhyne<sup>18</sup>, P. Rossiter<sup>25</sup>, S. Shaw<sup>23,21</sup>, T.A. Shutt<sup>1,2,3</sup>, C. Silva<sup>14</sup>, M. Solmaz<sup>23</sup>, V.N. Solovov<sup>14</sup>, P. Sorensen<sup>11</sup>, T.J. Sumner<sup>5</sup>, M. Szydagis<sup>20</sup>, D.J. Taylor<sup>16</sup>, W.C. Taylor<sup>18</sup>, B.P. Tennyson<sup>12</sup>, P.A. Terman<sup>26</sup>, D.R. Tiedt<sup>6</sup>, W.H. To<sup>27</sup>, M. Tripathi<sup>7</sup>, L. Tvrznikova<sup>9,11,12</sup>, U. Utku<sup>21</sup>, S. Uvarov<sup>7</sup>, V. Velan<sup>9</sup>, J.R. Verbus<sup>18</sup>, R.C. Webb<sup>26</sup>, J.T. White<sup>26,a</sup>, T.J. Whitis<sup>1,2,3</sup>, M.S. Witherell<sup>11</sup>, F.L.H. Wolfs<sup>19</sup>, D. Woodward<sup>17</sup>, J. Xu<sup>10</sup>, K. Yazdani<sup>5</sup>, C. Zhang<sup>15</sup>

Demonstrates a measured trigger efficiency between 99% and 100% over the full fiducial volume of the detector

Alex - internal review committee

PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

RECEIVED: October 9, 2017 ACCEPTED: January 20, 2018 PUBLISHED: February 1, 2018

#### Position reconstruction in LUX

![](_page_30_Picture_4.jpeg)

inst

#### The LUX collaboration

D.S. Akerib, a,b,c S. Alsum, H.M. Araújo, X. Bai, A.J. Bailey, J. Balajthy, P. Beltrame, h E.P. Bernard, *i,j* A. Bernstein, *k* T.P. Biesiadzinski, *a,b,c* E.M. Boulton, *i,j* P. Brás, *l* D. Byram, *m,n* S.B. Cahn, M.C. Carmona-Benitez, o.p C. Chan, A. Currie, J.E. Cutter, T.J.R. Davison, h A. Dobi,<sup>s</sup> E. Druszkiewicz,<sup>t</sup> B.N. Edwards,<sup>j</sup> S.R. Fallon,<sup>u</sup> A. Fan,<sup>b,c</sup> S. Fiorucci,<sup>q,s</sup> R.J. Gaitskell,<sup>q</sup> J. Genovesi,<sup>4</sup> C. Ghag,<sup>y</sup> M.G.D. Gilchriese,<sup>8</sup> C.R. Hall,<sup>g</sup> M. Hanhardt,<sup>f,n</sup> S.J. Haselschwardt, P S.A. Hertel, j.s. W D.P. Hogan, M. Horn, i.j. D.Q. Huang, C.M. Ignarra, b.c. R.G. Jacobsen,<sup>1</sup> W. Ji,<sup>a,b,c</sup> K. Kamdin,<sup>1</sup> K. Kazkaz,<sup>k</sup> D. Khaitan,<sup>1</sup> R. Knoche,<sup>g</sup> N.A. Larsen,<sup>j</sup> B.G. Lenardo, k,r K.T. Lesko, A. Lindote, M.I. Lopes, A. Manalaysay, R.L. Mannino, d,x M.F. Marzioni,<sup>h</sup> D.N. McKinsey,<sup>i,j,s</sup> D.-M. Mei,<sup>m</sup> J. Mock,<sup>u</sup> M. Moongweluwan,<sup>t</sup> J.A. Morad,<sup>r</sup> A.St.J. Murphy,<sup>h</sup> C. Nehrkorn,<sup>p</sup> H.N. Nelson,<sup>p</sup> F. Neves,<sup>l</sup> K. O'Sullivan,<sup>i,j,s</sup> K.C. Oliver-Mallory,<sup>i</sup> K.J. Palladino,<sup>b,c,d</sup> E.K. Pease,<sup>i,j</sup> C. Rhyne,<sup>q</sup> S. Shaw,<sup>p,v</sup> T.A. Shutt,<sup>a,c</sup> C. Silva,<sup>1,1</sup> M. Solmaz,<sup>p</sup> V.N. Solovov,<sup>1</sup> P. Sorensen,<sup>s</sup> T.J. Sumner,<sup>e</sup> M. Szydagis,<sup>u</sup> D.J. Taylor," W.C. Taylor,<sup>q</sup> B.P. Tennyson,<sup>j</sup> P.A. Terman,<sup>x</sup> D.R. Tiedt,<sup>f</sup> W.H. To,<sup>b,c,y</sup> M. Tripathi, L. Tvrznikova, i,j,s S. Uvarov, V. Velan, J.R. Verbus, R.C. Webb, J.T. White, X T.J. Whitis, a,b,c M.S. Witherell, F.L.H. Wolfs, J. Xu, K. Yazdani, S.K. Young" and C. Zhangm

Novel single photon counting technique

## Novel analysis technique

Not much Edinburgh involvement

#### PHYSICAL REVIEW D 97, 112002 (2018)

## Liquid xenon scintillation measurements and pulse shape discrimination in the LUX dark matter detector

D. S. Akerib,<sup>1,2,3</sup> S. Alsum,<sup>4</sup> H. M. Araújo,<sup>5</sup> X. Bai,<sup>6</sup> A. J. Bailey,<sup>5</sup> J. Balajthy,<sup>7</sup> P. Beltrame,<sup>8</sup> E. P. Bernard,<sup>9,10</sup> A. Bernstein,<sup>11</sup> T. P. Biesiadzinski,<sup>1,2,3</sup> E. M. Boulton,<sup>9,12,10</sup> P. Brás,<sup>13</sup> D. Byram,<sup>14,15</sup> M. C. Carmona-Benitez,<sup>16,17</sup>
C. Chan,<sup>18</sup> A. Currie,<sup>5</sup> J. E. Cutter,<sup>19</sup> T. J. R. Davison,<sup>8</sup> A. Dobi,<sup>12</sup> E. Druszkiewicz,<sup>20</sup> B. N. Edwards,<sup>10</sup> S. R. Fallon,<sup>21</sup> A. Fan,<sup>2,3</sup> S. Fiorucci,<sup>12,18</sup> R. J. Gaitskell,<sup>18</sup> J. Genovesi,<sup>21</sup> C. Ghag,<sup>22</sup> M. G. D. Gilchriese,<sup>12</sup> C. R. Hall,<sup>7</sup>
S. J. Haselschwardt,<sup>17</sup> S. A. Hertel,<sup>23,12,10</sup> D. P. Hogan,<sup>9</sup> M. Horn,<sup>15,9,10</sup> D. Q. Huang,<sup>18</sup> C. M. Ignarra,<sup>2,3</sup> R. G. Jacobsen,<sup>9</sup> W. Ji,<sup>1,2,3</sup> K. Kamdin,<sup>9</sup> K. Kazkaz,<sup>11</sup> D. Khaitan,<sup>20,\*</sup> R. Knoche,<sup>7</sup> B. G. Lenardo,<sup>19,11,24,+</sup> K. T. Lesko,<sup>12</sup> J. Liao,<sup>18</sup>
A. Lindote,<sup>13</sup> M. I. Lopes,<sup>13</sup> A. Manalaysay,<sup>19</sup> R. L. Mannino,<sup>25,4</sup> M. F. Marzioni,<sup>8</sup> D. N. McKinsey,<sup>9,12,10</sup> D.-M. Mei,<sup>14</sup> J. Mock,<sup>21</sup> M. Moongweluwan,<sup>20</sup> J. A. Morad,<sup>19</sup> A. St. J. Murphy,<sup>8</sup> C. Nehrkorn,<sup>17</sup> H. N. Nelson,<sup>17</sup> F. Neves,<sup>13</sup>
K. O'Sullivan,<sup>9,12,10</sup> K. C. Oliver-Mallory,<sup>9</sup> K. J. Palladino,<sup>4,2,3</sup> E. K. Pease,<sup>9,12,10</sup> C. Rhyne,<sup>18</sup> S. Shaw,<sup>17,22</sup> T. A. Shutt,<sup>1,3</sup>
C. Silva,<sup>13</sup> M. Solmaz,<sup>17</sup> V. N. Solovov,<sup>13</sup> P. Sorensen,<sup>12</sup> T. J. Sumner,<sup>5</sup> M. Szydagis,<sup>21</sup> D. J. Taylor,<sup>15</sup> W. C. Taylor,<sup>18</sup>
B. P. Tennyson,<sup>10</sup> P. A. Terman,<sup>25</sup> D. R. Tiedt,<sup>6</sup> W. H. To,<sup>26,2,3</sup> M. Tripathi,<sup>19</sup> L. Tvrznikova,<sup>9,12,10</sup> U. Utku,<sup>22</sup> S. Uvarov,<sup>19</sup>
V. Velan,<sup>9</sup> J. R. Verbus,<sup>18</sup> R. C. Webb,<sup>25</sup> J. T. White,<sup>25</sup> T. J. Whitis,<sup>1,2,3</sup> M. S. Witherell,<sup>12</sup> F. L. H. Wolfs,<sup>20</sup> J. Xu,<sup>11</sup> K. Yazdani,<sup>5</sup> S. K. Young,<sup>21</sup> and C. Zhang<sup>14</sup>

New measurement of the singlet-to-triplet scintillation ratio for electron recoils (ER) below 46 keV

First-ever measurement of the NR singlet-to-triplet ratio at recoil energies below 74 keV.

Not much Edinburgh involvement