

# Probing Strangeness Canonical Ensemble with $K^-$ , $\phi(1020)$ and $\Xi^-$ Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV: Supplemental Material

M. S. Abdallah,<sup>5</sup> B. E. Aboona,<sup>55</sup> J. Adam,<sup>6</sup> L. Adamczyk,<sup>2</sup> J. R. Adams,<sup>39</sup> J. K. Adkins,<sup>30</sup> G. Agakishiev,<sup>28</sup> I. Aggarwal,<sup>41</sup> M. M. Aggarwal,<sup>41</sup> Z. Ahammed,<sup>60</sup> I. Alekseev,<sup>3,35</sup> D. M. Anderson,<sup>55</sup> A. Aparin,<sup>28</sup> E. C. Aschenauer,<sup>6</sup> M. U. Ashraf,<sup>11</sup> F. G. Atetalla,<sup>29</sup> A. Attri,<sup>41</sup> G. S. Averichev,<sup>28</sup> V. Bairathi,<sup>53</sup> W. Baker,<sup>10</sup> J. G. Ball Cap,<sup>20</sup> K. Barish,<sup>10</sup> A. Behera,<sup>52</sup> R. Bellwied,<sup>20</sup> P. Bhagat,<sup>27</sup> A. Bhasin,<sup>27</sup> J. Bielcik,<sup>14</sup> J. Bielcikova,<sup>38</sup> I. G. Bordyuzhin,<sup>3</sup> J. D. Brandenburg,<sup>6</sup> A. V. Brandin,<sup>35</sup> I. Bunzarov,<sup>28</sup> J. Butterworth,<sup>45</sup> X. Z. Cai,<sup>50</sup> H. Caines,<sup>63</sup> M. Calderón de la Barca Sánchez,<sup>8</sup> D. Cebra,<sup>8</sup> I. Chakaberia,<sup>31,6</sup> P. Chaloupka,<sup>14</sup> B. K. Chan,<sup>9</sup> F.-H. Chang,<sup>37</sup> Z. Chang,<sup>6</sup> N. Chankova-Bunzarova,<sup>28</sup> A. Chatterjee,<sup>11</sup> S. Chattopadhyay,<sup>60</sup> D. Chen,<sup>10</sup> J. Chen,<sup>49</sup> J. H. Chen,<sup>18</sup> X. Chen,<sup>48</sup> Z. Chen,<sup>49</sup> J. Cheng,<sup>57</sup> M. Chevalier,<sup>10</sup> S. Choudhury,<sup>18</sup> W. Christie,<sup>6</sup> X. Chu,<sup>6</sup> H. J. Crawford,<sup>7</sup> M. Csanád,<sup>16</sup> M. Daugherty,<sup>1</sup> T. G. Dedovich,<sup>28</sup> I. M. Deppner,<sup>19</sup> A. A. Derevschikov,<sup>43</sup> A. Dhamija,<sup>41</sup> L. Di Carlo,<sup>62</sup> L. Didenko,<sup>6</sup> P. Dixit,<sup>22</sup> X. Dong,<sup>31</sup> J. L. Drachenberg,<sup>1</sup> E. Duckworth,<sup>29</sup> J. C. Dunlop,<sup>6</sup> N. Elsey,<sup>62</sup> J. Engelage,<sup>7</sup> G. Eppley,<sup>45</sup> S. Esumi,<sup>58</sup> O. Evdokimov,<sup>12</sup> A. Ewigleben,<sup>32</sup> O. Eyser,<sup>6</sup> R. Fatemi,<sup>30</sup> F. M. Fawzi,<sup>5</sup> S. Fazio,<sup>6</sup> P. Federic,<sup>38</sup> J. Fedorisin,<sup>28</sup> C. J. Feng,<sup>37</sup> Y. Feng,<sup>44</sup> P. Filip,<sup>28</sup> E. Finch,<sup>51</sup> Y. Fisyak,<sup>6</sup> A. Francisco,<sup>63</sup> C. Fu,<sup>11</sup> L. Fulek,<sup>2</sup> C. A. Gagliardi,<sup>55</sup> T. Galatyuk,<sup>15</sup> F. Geurts,<sup>45</sup> N. Ghimire,<sup>54</sup> A. Gibson,<sup>59</sup> K. Gopal,<sup>23</sup> X. Gou,<sup>49</sup> D. Grosnick,<sup>59</sup> A. Gupta,<sup>27</sup> W. Guryn,<sup>6</sup> A. I. Hamad,<sup>29</sup> A. Hamed,<sup>5</sup> Y. Han,<sup>45</sup> S. Harabasz,<sup>15</sup> M. D. Harasty,<sup>8</sup> J. W. Harris,<sup>63</sup> H. Harrison,<sup>30</sup> S. He,<sup>11</sup> W. He,<sup>18</sup> X. H. He,<sup>26</sup> Y. He,<sup>49</sup> S. Heppelmann,<sup>8</sup> S. Heppelmann,<sup>42</sup> N. Herrmann,<sup>19</sup> E. Hoffman,<sup>20</sup> L. Holub,<sup>14</sup> Y. Hu,<sup>18</sup> H. Huang,<sup>37</sup> H. Z. Huang,<sup>9</sup> S. L. Huang,<sup>52</sup> T. Huang,<sup>37</sup> X. Huang,<sup>57</sup> Y. Huang,<sup>57</sup> T. J. Humanic,<sup>39</sup> G. Igo,<sup>9,\*</sup> D. Isenhowe,<sup>1</sup> W. W. Jacobs,<sup>25</sup> C. Jena,<sup>23</sup> A. Jentsch,<sup>6</sup> Y. Ji,<sup>31</sup> J. Jia,<sup>6,52</sup> K. Jiang,<sup>48</sup> X. Ju,<sup>48</sup> E. G. Judd,<sup>7</sup> S. Kabana,<sup>53</sup> M. L. Kabir,<sup>10</sup> S. Kagamaster,<sup>32</sup> D. Kalinkin,<sup>25,6</sup> K. Kang,<sup>57</sup> D. Kapukchyan,<sup>10</sup> K. Kauder,<sup>6</sup> H. W. Ke,<sup>6</sup> D. Keane,<sup>29</sup> A. Kechechyan,<sup>28</sup> M. Kelsey,<sup>62</sup> Y. V. Khyzhniak,<sup>35</sup> D. P. Kikoła,<sup>61</sup> C. Kim,<sup>10</sup> B. Kimelman,<sup>8</sup> D. Kincses,<sup>16</sup> I. Kisel,<sup>17</sup> A. Kiselev,<sup>6</sup> A. G. Knospe,<sup>32</sup> H. S. Ko,<sup>31</sup> L. Kochenda,<sup>35</sup> L. K. Kosarzewski,<sup>14</sup> L. Kramarik,<sup>14</sup> P. Kravtsov,<sup>35</sup> L. Kumar,<sup>41</sup> S. Kumar,<sup>26</sup> R. Kunnawalkam Elayavalli,<sup>63</sup> J. H. Kwasizur,<sup>25</sup> R. Lacey,<sup>52</sup> S. Lan,<sup>11</sup> J. M. Landgraf,<sup>6</sup> J. Lauret,<sup>6</sup> A. Lebedev,<sup>6</sup> R. Lednicky,<sup>28,38</sup> J. H. Lee,<sup>6</sup> Y. H. Leung,<sup>31</sup> C. Li,<sup>49</sup> C. Li,<sup>48</sup> W. Li,<sup>45</sup> X. Li,<sup>48</sup> Y. Li,<sup>57</sup> X. Liang,<sup>10</sup> Y. Liang,<sup>29</sup> R. Licenik,<sup>38</sup> T. Lin,<sup>49</sup> Y. Lin,<sup>11</sup> M. A. Lisa,<sup>39</sup> F. Liu,<sup>11</sup> H. Liu,<sup>25</sup> H. Liu,<sup>11</sup> P. Liu,<sup>52</sup> T. Liu,<sup>63</sup> X. Liu,<sup>39</sup> Y. Liu,<sup>55</sup> Z. Liu,<sup>48</sup> T. Ljubicic,<sup>6</sup> W. J. Llope,<sup>62</sup> R. S. Longacre,<sup>6</sup> E. Loyd,<sup>10</sup> N. S. Lukow,<sup>54</sup> X. F. Luo,<sup>11</sup> L. Ma,<sup>18</sup> R. Ma,<sup>6</sup> Y. G. Ma,<sup>18</sup> N. Magdy,<sup>12</sup> D. Mallick,<sup>36</sup> S. Margetis,<sup>29</sup> C. Markert,<sup>56</sup> H. S. Matis,<sup>31</sup> J. A. Mazer,<sup>46</sup> N. G. Minaev,<sup>43</sup> S. Mioduszewski,<sup>55</sup> B. Mohanty,<sup>36</sup> M. M. Mondal,<sup>52</sup> I. Mooney,<sup>62</sup> D. A. Morozov,<sup>43</sup> A. Mukherjee,<sup>16</sup> M. Nagy,<sup>16</sup> J. D. Nam,<sup>54</sup> Md. Nasim,<sup>22</sup> K. Nayak,<sup>11</sup> D. Neff,<sup>9</sup> J. M. Nelson,<sup>7</sup> D. B. Nemes,<sup>63</sup> M. Nie,<sup>49</sup> G. Nigmatkulov,<sup>35</sup> T. Niida,<sup>58</sup> R. Nishitani,<sup>58</sup> L. V. Nogach,<sup>43</sup> T. Nonaka,<sup>58</sup> A. S. Nunes,<sup>6</sup> G. Odyniec,<sup>31</sup> A. Ogawa,<sup>6</sup> S. Oh,<sup>31</sup> V. A. Okorokov,<sup>35</sup> B. S. Page,<sup>6</sup> R. Pak,<sup>6</sup> J. Pan,<sup>55</sup> A. Pandav,<sup>36</sup> A. K. Pandey,<sup>58</sup> Y. Panebratsev,<sup>28</sup> P. Parfenov,<sup>35</sup> B. Pawlik,<sup>40</sup> D. Pawlowska,<sup>61</sup> H. Pei,<sup>11</sup> C. Perkins,<sup>7</sup> L. Pinsky,<sup>20</sup> R. L. Pintér,<sup>16</sup> J. Pluta,<sup>61</sup> B. R. Pokhrel,<sup>54</sup> G. Ponimatkin,<sup>38</sup> J. Porter,<sup>31</sup> M. Posik,<sup>54</sup> V. Prozorova,<sup>14</sup> N. K. Pruthi,<sup>41</sup> M. Przybycien,<sup>2</sup> J. Putschke,<sup>62</sup> H. Qiu,<sup>26</sup> A. Quintero,<sup>54</sup> C. Racz,<sup>10</sup> S. K. Radhakrishnan,<sup>29</sup> N. Raha,<sup>62</sup> R. L. Ray,<sup>56</sup> R. Reed,<sup>32</sup> H. G. Ritter,<sup>31</sup> M. Robotkova,<sup>38</sup> O. V. Rogachevskiy,<sup>28</sup> J. L. Romero,<sup>8</sup> D. Roy,<sup>46</sup> L. Ruan,<sup>6</sup> J. Rusnak,<sup>38</sup> N. R. Sahoo,<sup>49</sup> H. Sako,<sup>58</sup> S. Salur,<sup>46</sup> J. Sandweiss,<sup>63,\*</sup> S. Sato,<sup>58</sup> W. B. Schmidke,<sup>6</sup> N. Schmitz,<sup>33</sup> B. R. Schweid,<sup>52</sup> F. Seck,<sup>15</sup> J. Seger,<sup>13</sup> M. Sergeeva,<sup>9</sup> R. Seto,<sup>10</sup> P. Seyboth,<sup>33</sup> N. Shah,<sup>24</sup> E. Shahaliev,<sup>28</sup> P. V. Shanmuganathan,<sup>6</sup> M. Shao,<sup>48</sup> T. Shao,<sup>18</sup> A. I. Sheikh,<sup>29</sup> D. Shen,<sup>50</sup> S. S. Shi,<sup>11</sup> Y. Shi,<sup>49</sup> Q. Y. Shou,<sup>18</sup> E. P. Sichtermann,<sup>31</sup> R. Sikora,<sup>2</sup> M. Simko,<sup>38</sup> J. Singh,<sup>41</sup> S. Singha,<sup>26</sup> M. J. Skoby,<sup>44</sup> N. Smirnov,<sup>63</sup> Y. Söhnngen,<sup>19</sup> W. Solyst,<sup>25</sup> P. Sorensen,<sup>6</sup> H. M. Spinka,<sup>4,\*</sup> B. Srivastava,<sup>44</sup> T. D. S. Stanislaus,<sup>59</sup> M. Stefaniak,<sup>61</sup> D. J. Stewart,<sup>63</sup> M. Strikhanov,<sup>35</sup> B. Stringfellow,<sup>44</sup> A. A. P. Suaide,<sup>47</sup> M. Sumera,<sup>38</sup> B. Summa,<sup>42</sup> X. M. Sun,<sup>11</sup> X. Sun,<sup>12</sup> Y. Sun,<sup>48</sup> Y. Sun,<sup>21</sup> B. Surrow,<sup>54</sup> D. N. Svirida,<sup>3</sup> Z. W. Sweger,<sup>8</sup> P. Szymanski,<sup>61</sup> A. H. Tang,<sup>6</sup> Z. Tang,<sup>48</sup> A. Taranenko,<sup>35</sup> T. Tarnowsky,<sup>34</sup> J. H. Thomas,<sup>31</sup> A. R. Timmins,<sup>20</sup> D. Tlusty,<sup>13</sup> T. Todoroki,<sup>58</sup> M. Tokarev,<sup>28</sup> C. A. Tomkiel,<sup>32</sup> S. Trentalange,<sup>9</sup> R. E. Tribble,<sup>55</sup> P. Tribedy,<sup>6</sup> S. K. Tripathy,<sup>16</sup> T. Truhlar,<sup>14</sup> B. A. Trzeciak,<sup>14</sup> O. D. Tsai,<sup>9</sup> Z. Tu,<sup>6</sup> T. Ullrich,<sup>6</sup> D. G. Underwood,<sup>4,59</sup> I. Upsal,<sup>45</sup> G. Van Buren,<sup>6</sup> J. Vanek,<sup>38</sup> A. N. Vasiliev,<sup>43</sup> I. Vassiliev,<sup>17</sup> V. Verkest,<sup>62</sup> F. Videbæk,<sup>6</sup> S. Vokal,<sup>28</sup> S. A. Voloshin,<sup>62</sup> F. Wang,<sup>44</sup> G. Wang,<sup>9</sup> J. S. Wang,<sup>21</sup> P. Wang,<sup>48</sup> Y. Wang,<sup>11</sup> Y. Wang,<sup>57</sup> Z. Wang,<sup>49</sup> J. C. Webb,<sup>6</sup> P. C. Weidenkaff,<sup>19</sup> L. Wen,<sup>9</sup> G. D. Westfall,<sup>34</sup> H. Wieman,<sup>31</sup> S. W. Wissink,<sup>25</sup> J. Wu,<sup>26</sup> Y. Wu,<sup>10</sup> B. Xi,<sup>50</sup> Z. G. Xiao,<sup>57</sup> G. Xie,<sup>31</sup> W. Xie,<sup>44</sup> H. Xu,<sup>21</sup> N. Xu,<sup>31</sup> Q. H. Xu,<sup>49</sup> Y. Xu,<sup>49</sup> Z. Xu,<sup>6</sup> Z. Xu,<sup>9</sup> C. Yang,<sup>49</sup> Q. Yang,<sup>49</sup> S. Yang,<sup>45</sup> Y. Yang,<sup>37</sup> Z. Ye,<sup>45</sup> Z. Ye,<sup>12</sup> L. Yi,<sup>49</sup> K. Yip,<sup>6</sup> Y. Yu,<sup>49</sup> H. Zbroszczyk,<sup>61</sup> W. Zha,<sup>48</sup> C. Zhang,<sup>52</sup> D. Zhang,<sup>11</sup> J. Zhang,<sup>49</sup> S. Zhang,<sup>12</sup> S. Zhang,<sup>18</sup> X. P. Zhang,<sup>57</sup> Y. Zhang,<sup>26</sup> Y. Zhang,<sup>48</sup> Y. Zhang,<sup>11</sup> Z. J. Zhang,<sup>37</sup> Z. Zhang,<sup>6</sup> Z. Zhang,<sup>12</sup> J. Zhao,<sup>44</sup> C. Zhou,<sup>18</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> X. Zhu,<sup>57</sup> M. Zurek,<sup>4</sup> and M. Zyzak<sup>17</sup>

## (STAR Collaboration)

- <sup>1</sup>Abilene Christian University, Abilene, Texas 79699
- <sup>2</sup>AGH University of Science and Technology, FPACS, Cracow 30-059, Poland
- <sup>3</sup>Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics NRC "Kurchatov Institute", Moscow 117218, Russia
- <sup>4</sup>Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439
- <sup>5</sup>American University of Cairo, New Cairo 11835, New Cairo, Egypt
- <sup>6</sup>Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973
- <sup>7</sup>University of California, Berkeley, California 94720
- <sup>8</sup>University of California, Davis, California 95616
- <sup>9</sup>University of California, Los Angeles, California 90095
- <sup>10</sup>University of California, Riverside, California 92521
- <sup>11</sup>Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079
- <sup>12</sup>University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois 60607
- <sup>13</sup>Creighton University, Omaha, Nebraska 68178
- <sup>14</sup>Czech Technical University in Prague, FNSPE, Prague 115 19, Czech Republic
- <sup>15</sup>Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 64289, Germany
- <sup>16</sup>ELTE Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary H-1117
- <sup>17</sup>Frankfurt Institute for Advanced Studies FIAS, Frankfurt 60438, Germany
- <sup>18</sup>Fudan University, Shanghai, 200433
- <sup>19</sup>University of Heidelberg, Heidelberg 69120, Germany
- <sup>20</sup>University of Houston, Houston, Texas 77204
- <sup>21</sup>Huzhou University, Huzhou, Zhejiang 313000
- <sup>22</sup>Indian Institute of Science Education and Research (IISER), Berhampur 760010, India
- <sup>23</sup>Indian Institute of Science Education and Research (IISER) Tirupati, Tirupati 517507, India
- <sup>24</sup>Indian Institute Technology, Patna, Bihar 801106, India
- <sup>25</sup>Indiana University, Bloomington, Indiana 47408
- <sup>26</sup>Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000
- <sup>27</sup>University of Jammu, Jammu 180001, India
- <sup>28</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141 980, Russia
- <sup>29</sup>Kent State University, Kent, Ohio 44242
- <sup>30</sup>University of Kentucky, Lexington, Kentucky 40506-0055
- <sup>31</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720
- <sup>32</sup>Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania 18015
- <sup>33</sup>Max-Planck-Institut für Physik, Munich 80805, Germany
- <sup>34</sup>Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824
- <sup>35</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow 115409, Russia
- <sup>36</sup>National Institute of Science Education and Research, HBNI, Jatni 752050, India
- <sup>37</sup>National Cheng Kung University, Tainan 70101
- <sup>38</sup>Nuclear Physics Institute of the CAS, Rez 250 68, Czech Republic
- <sup>39</sup>Ohio State University, Columbus, Ohio 43210
- <sup>40</sup>Institute of Nuclear Physics PAN, Cracow 31-342, Poland
- <sup>41</sup>Panjab University, Chandigarh 160014, India
- <sup>42</sup>Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802
- <sup>43</sup>NRC "Kurchatov Institute", Institute of High Energy Physics, Protvino 142281, Russia
- <sup>44</sup>Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907
- <sup>45</sup>Rice University, Houston, Texas 77251
- <sup>46</sup>Rutgers University, Piscataway, New Jersey 08854
- <sup>47</sup>Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil 05314-970
- <sup>48</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026
- <sup>49</sup>Shandong University, Qingdao, Shandong 266237
- <sup>50</sup>Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
- <sup>51</sup>Southern Connecticut State University, New Haven, Connecticut 06515
- <sup>52</sup>State University of New York, Stony Brook, New York 11794
- <sup>53</sup>Instituto de Alta Investigación, Universidad de Tarapacá, Arica 1000000, Chile
- <sup>54</sup>Temple University, Philadelphia, Pennsylvania 19122
- <sup>55</sup>Texas A&M University, College Station, Texas 77843
- <sup>56</sup>University of Texas, Austin, Texas 78712
- <sup>57</sup>Tsinghua University, Beijing 100084
- <sup>58</sup>University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan
- <sup>59</sup>Valparaiso University, Valparaiso, Indiana 46383
- <sup>60</sup>Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata 700064, India
- <sup>61</sup>Warsaw University of Technology, Warsaw 00-661, Poland
- <sup>62</sup>Wayne State University, Detroit, Michigan 48201

<sup>63</sup>*Yale University, New Haven, Connecticut 06520*  
(Dated: September 12, 2021)

## I. SUPPLEMENTAL MATERIAL

### A. Full Corrected $m_T$ Spectra

Figure 1 shows the corrected  $K^-$ ,  $\phi$  meson and  $\Xi^-$  invariant yields as a function of  $m_T - m_0$  for various rapidity ranges in 0–10% (left) and 10–40% (right) centrality Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 3$  GeV. The  $K^-$ ,  $\phi$ -meson and  $\Xi^-$  spectra in some rapidity intervals are scaled with arbitrary factors indicated in the figure for clarity. Dashed and solid lines depict fits to the spectra with the  $m_T$ -exponential function in order to extrapolate the unmeasured  $p_T$  ranges. Figure 2 shows the similar plot for  $K^-$  and  $\phi$  meson in 40–60% centrality Au+Au collisions.

---

\* Deceased

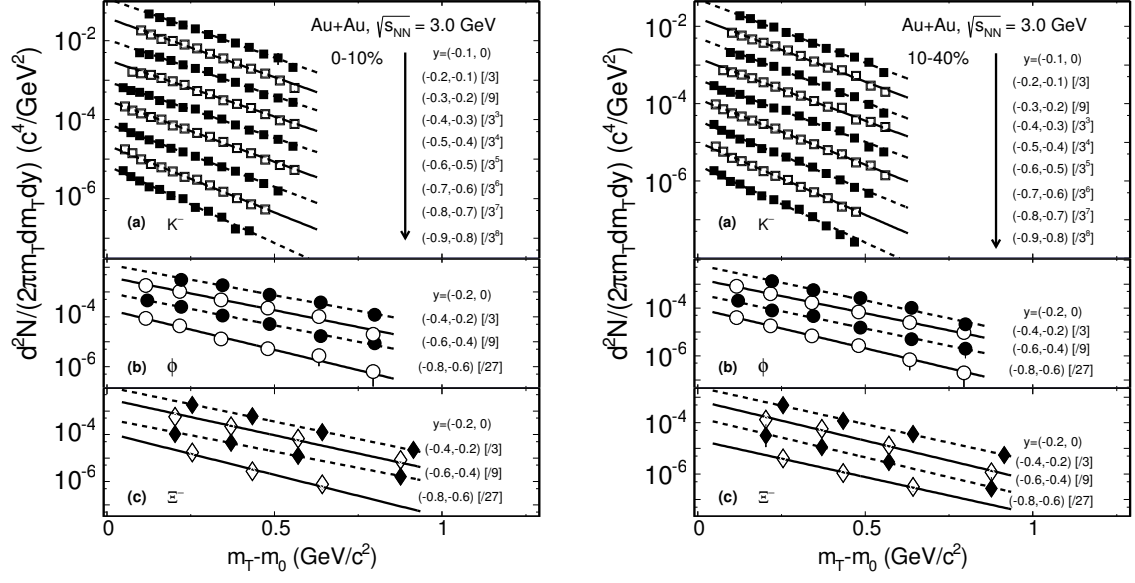


FIG. 1.  $K^-$  (a),  $\phi$  meson (b) and  $\Xi^-$  (c) invariant yields as a function of  $m_T - m_0$  for various rapidity regions in 0–10% (left) and 10–40% (right) centrality Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  GeV. Statistical and systematic uncertainties are added quadratically here for plotting. Solid and dashed black lines depict  $m_T$  exponential function fits to the measured data points with scaling factors in each rapidity windows.

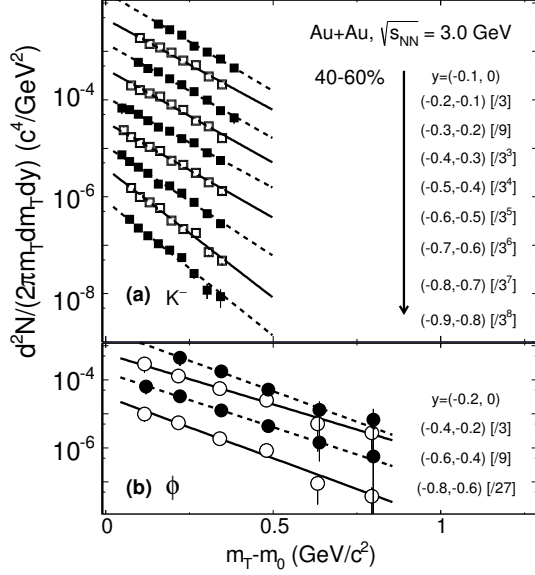


FIG. 2.  $K^-$  (a) and  $\phi$  meson (b) invariant yields as a function of  $m_T - m_0$  for various rapidity regions in 40–60% centrality Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  GeV.