

# 高能诱发核反应中粒子产生的相对信息熵\*

EMU01 国际合作组

M. I. Adamovich<sup>13</sup>, M. M. Aggarwal<sup>4</sup>, Y. A. Alexandrov<sup>13</sup>, N.P. Andreeva<sup>1</sup>, Z. V. Anson<sup>1</sup>, R. Arora<sup>4</sup>, F. A. Avetyan<sup>20</sup>, S. K. Badyal<sup>8</sup>, E. S. Basova<sup>17</sup>, I. K. Bazarov<sup>17</sup>, K. B. Bhalla<sup>7</sup>, A. Bhasin<sup>8</sup>, V. S. Bhatia<sup>4</sup>, V. G. Bogdanov<sup>15</sup>, V. I. Bubnov<sup>1</sup>, T. H. Burnett<sup>16</sup>, 蔡勳<sup>19</sup>, D. A. Carshiev<sup>17</sup>, A. M. Ceitimbetov<sup>1</sup>, I. Y. Chasnikov<sup>1</sup>, L. P. Chernova<sup>18</sup>, M. M. Chernyavski<sup>13</sup>, G. Z. Eligbaeva<sup>1</sup>, L. E. Eremenko<sup>1</sup>, 冯笙琴<sup>19</sup>, A. S. Gaitinov<sup>1</sup>, E. Ganssauge<sup>12</sup>, S. Garpman<sup>11</sup>, S. G. Gerassimov<sup>13</sup>, J. Grote<sup>16</sup>, K. G. Gulamov<sup>18</sup>, S. K. Gupta<sup>7</sup>, V. K. Gupta<sup>8</sup>, H. H. Heckman<sup>3</sup>, B. Jakobsson<sup>11</sup>, B. Judek<sup>14</sup>, L. Just<sup>9</sup>, S. Kachroo<sup>8</sup>, G. S. Kalyachkina<sup>1</sup>, E. K. Kanygina<sup>1</sup>, M. Karabova<sup>6</sup>, S. P. Kharlamov<sup>13</sup>, S. Kitroo<sup>8</sup>, S. A. Krasnov<sup>6</sup>, S. Kulikova<sup>6</sup>, V. Kumar<sup>7</sup>, P. Lal<sup>7</sup>, V. G. Larionova<sup>13</sup>, 刘连寿<sup>19</sup>, S. Lokanathan<sup>7</sup>, J. Lord<sup>16</sup>, N. S. Lukicheva<sup>18</sup>, 罗世彬<sup>10</sup>, T. N. Maksimkina<sup>6</sup>, L. K. Mangotra<sup>8</sup>, N. A. Marutyan<sup>20</sup>, N. V. Maslennikova<sup>13</sup>, I. S. Mittra<sup>4</sup>, S. Mokerjee<sup>7</sup>, J. Musulmanbekov<sup>6</sup>, S. Z. Nasyrov<sup>17</sup>, V. S. Navotny<sup>18</sup>, M. Ochs<sup>12</sup>, G. I. Orlova<sup>13</sup>, I. Otterlund<sup>11</sup>, H. S. Palsania<sup>7</sup>, N. G. Peresadko<sup>13</sup>, N. V. Petrov<sup>17</sup>, V. A. Plyushchev<sup>15</sup>, 钱琬燕<sup>19</sup>, 秦玉明<sup>10</sup>, R. Raniwala<sup>7</sup>, S. Raniwala<sup>7</sup>, N. K. Rao<sup>8</sup>, J. Ravina<sup>17</sup>, V. M. Rappoport<sup>13</sup>, J. T. Rhee<sup>12</sup>, M. Roeper<sup>12</sup>, N. Saidkhanov<sup>18</sup>, N. A. Salmanova<sup>13</sup>, L. G. Sarkisova<sup>20</sup>, V. R. Sarkisyan<sup>20</sup>, G.S. Shabratova<sup>6</sup>, T. I. Shakhova<sup>1</sup>, S. N. Shpilev<sup>18</sup>, D. Skelding<sup>16</sup>, K. Soderstrom<sup>11</sup>, Z. I. Solovjeva<sup>15</sup>, E. Stenlund<sup>11</sup>, S.C. Strausz<sup>15</sup>, E.L.Surin<sup>18</sup>, L. N. Svechnikova<sup>18</sup>, K. D. Tolstov<sup>6</sup>, M. Tothova<sup>9</sup>, M. I. Tretyakova<sup>13</sup>, T. P. Trofimova<sup>17</sup>, U. I. Tuleeva<sup>17</sup>, B. P. Tursunov<sup>17</sup>, S. Vokal<sup>6</sup>, J. Vrlakova<sup>9</sup>, 王海桥<sup>19</sup>, 翁智群<sup>5</sup>, R. J. Wilkes<sup>16</sup>, 许国发<sup>2</sup>, 杨纯斌<sup>19</sup>, 张东海<sup>10</sup>, 郑蒲英<sup>2</sup>, S. I. Zhochova<sup>18</sup>, 周代翠<sup>19</sup>.

1 (Alma Ata, Inst. of High Energy Physics, Kazakhstan, CIS)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

3 (Berkeley, Lawrence Berkeley Lab, USA)

4 (Chandigarh, Panjab University, India)

5 (湖南教育学院 长沙 410012)

6 (Duban, JINR, Russia, CIS)

7 (Jaipur, University of Rajasthan, India)

\* 国家自然科学基金、国家教委优秀年轻教师基金、霍英东教育基金会基金、瑞典 NFR 和 International Seminar in Uppsala、联邦德国 Minister of Research and Technology、第三世界科学院 TWRG-277、印度 Department of University Grants Commission、美国 USDOE 和 NSF 的资助。

- 8 (Jammu, University of Jammu, India)  
 9 (Kosice, Safarik University, Czechoslovakia)  
 10 (山西师范大学物理系 临汾 041004)  
 11 (Lund, University of Lund, Sweden)  
 12 (Marburg, Philipps University, Germany)  
 13 (Moscow, Lebedev Institute, Russia, CIS)  
 14 (Ottawa, NRC, Canada)  
 15 (St Petersburg, V G Khlopin Radium Institute, Russia, CIS)  
 16 (Seattle, University of Washington, USA)  
 17 (Tashkent, Institute of Nuclear Physics, Uzbekistan, CIS)  
 18 (Tashkent, Physical-Technical Institute, Uzbekistan, CIS)  
 19 (华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430070)  
 20 (Yerevan, Physical Institute, Armenia, CIS)

1992年9月5日收到

### 摘 要

在本实验中,引用了一个新的特征量,相对信息熵  $R$ ,研究了能量为 14.6, 60, 200 AGeV 的氧离子和 200 AGeV 的硫离子诱发核反应的产生粒子多重数分布. 在目前的能区中,  $R$  近似地能量无关.  $R$  对快度窗口大小依赖的饱和性,揭示了中心区的熵集中产生. 实验结果与 Lund 模型的 FRITIOF 模拟计算的预言一致.

**关键词** 高能诱发核反应, 粒子产生, 相对信息熵.

## 1 引 言

在 高能碰撞的末态中,大量的低横动量强子产生,是目前存在的强相互作用理论-量子色动力学(QCD)所不能解释的“软过程”.人们认为,关于高能重离子诱发核反应多粒子产生的研究,有可能提供强作用物质相变以及夸克-胶子等离子体形成的信号<sup>[1]</sup>.反映碰撞末态体系的一个可测的关键性物理量是产生粒子多重数,因此,有关多重数分布的性质的细致分析,可以使我们了解在较广阔的能区中这种软过程反应机制的背景情况.

最近,有的作者<sup>[2]</sup>采用信息熵的方法,来讨论质心系(cms)总能量 $\sqrt{s}$ 高达几十到几百 GeV 的质子-质子(反质子)碰撞(简记为 pp)实验的多重数分布.他们建议了一种标度化的信息熵  $S/Y_{\max}$ ,其中熵  $S$  和最大 cms 快度  $Y_{\max}$  的定义为

$$S^{pp} = - \sum_{n=1}^N P^{pp}(n) \ln P^{pp}(n), \quad (1)$$

$$Y_{\max}^{pp} = \ln \frac{\sqrt{s} - 2m_p}{m_\pi}, \quad (2)$$

式中,  $m_p$  和  $m_\pi$  分别是质子和  $\pi$  介子的质量,  $P^{pp}(n)$  是产生粒子(绝大多数是  $\pi$  介子)的

多重数  $n$  的分布,  $N$  是最大多重数。他们得到了如下的一些实验事实: 这种标度化的熵, 不论在全相空间中还是在有限的快度窗口  $|y| \leq Y_c$  内, 在高能区都似乎与能量无关, 而与标度化窗口大小

$$\xi = Y_c / Y_{\max} \quad (3)$$

有关。但是, 以上定义的  $S/Y_{\max}$  (所谓单位快度的熵) 是一个物理含义不太清楚的变量, 而且不能应用于核-核碰撞(简记为 BA) 的研究。此外, 对于不同的射弹核和靶核组合, 目前也没有一个恰当的标准去定义如同式(2)那样的  $Y_{\max}^{\text{BA}}$ 。针对这些困难, 蔡勳等人<sup>[3]</sup> 提出了一种新的特征变量-相对信息熵  $R$ , 它不仅本身具有明确的物理意义, 还能够一致地处理 pp 碰撞和 BA 碰撞。本文的目的, 报告 EMU01 国际合作组关于能量高达 200 A GeV 的氧离子和硫离子诱发核反应中多粒子产生的相对信息熵的实验研究结果。在第二节中, 简要地给出文献[3]中所引入的相对信息熵的概念, 并对有关的核碰撞几何作必要的讨论。EMU01 实验的描述和 Monte Carlo 模拟 (FRITIOF) 在第三节中介绍。第四节进行实验数据的分析和物理讨论。第五节是本文的结论。

## 2 粒子产生的相对信息熵

考虑具有  $N$  个可能末态的事件的不确定性测量, 按照信息理论<sup>[3,4]</sup>, 信息熵的定义为

$$H = - \sum_{n=1}^N P(n) \log_l P(n), \quad (4)$$

式中, 对数的底  $l$  决定了熵的单位,  $P(n)$  为第  $n$  个末态出现的几率, 它满足归一化条件

$$\sum_{n=1}^N P(n) = 1. \quad (5)$$

如果该事件是确定的, 即出现为某个末态的几率是 1, 其它  $N-1$  个末态出现的几率全是 0, 则熵  $H$  的值最小, 等于 0。反之, 事件完全不确定,  $N$  个可能末态出现的几率相等,  $H$  的值最大, 为

$$H_{\max} = \log_l N. \quad (6)$$

显然, 熵作为描写不确定度的物理量, 只对于可能末态的数目相等的那些事件的比较, 才有实际意义。而对于那些可能末态的数目  $N$  不相同的事件, 即使采用相同的对数底  $l$ , 它们的熵量值其实是相互不可比较的。这就是文献[2]的作者所提出的建议中的主要困难。

蔡勳等<sup>[3]</sup> 提出采用下式定义的相对熵

$$R = \frac{H}{H_{\max}} \quad (7)$$

来作为事件不确定性测量的新物理量。由于对于具有不同的可能末态数的事件, 它们的相对熵的取值范围都是

$$0 \leq R \leq 1, \quad (8)$$

这不仅克服了文献[2]的困难, 而且是与对数底的取值无关的无量纲量。

采用这种新物理量的更重要的物理意义, 是它可以同时适用于 pp 碰撞和 BA 碰撞。当我们研究高能碰撞时, 不同末态的标记是产生粒子的多重数。对于给定能量下给定的

射弹和靶,最大的多重数就是该组合下的可能末态数  $N$ 。例如,cms 能量为  $\sqrt{s}$  的 pp 碰撞,可能末态的数目(即最大多重数)原则上可以用下式来估计

$$N_{pp} = \frac{\sqrt{s} - 2m_p}{m_\pi} \quad (9)$$

对于相应的核子-核子的 cms 能量也为  $\sqrt{s}$  的 BA 碰撞(射弹核和靶核的核子数分别为  $B$  和  $A$ ),采用通常的核碰撞几何图象,即核-核反应可以看作参加反应的核子-核子碰撞过程的线性叠加,可能末态的数目的估计应为

$$N^{BA} = W(B, A, b) \frac{N_{pp}}{W(1, 1, 0)} \quad (10)$$

上式中,  $W(B, A, b)$  为参加反应的核子数,它是  $B$ ,  $A$  和碰撞参数  $b$  的函数<sup>[7]</sup>

$$W(B, A, b) = B + A \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{B}{A} \right)^{2/3} \right)^{3/2} \right] \lambda(b), \quad (11)$$

这里,当  $b = 0$  时,有  $\lambda(b) = 1$ ; 当  $b = (B^{1/3} + A^{1/3})r_0$  时,有  $\lambda(b) = 0$ 。  $r_0$  是核子的半径。在本文中,我们不考虑核内的非线性级联效应。由于要估计可能末态的最大数目,需要  $b = 0$  的对心碰撞的  $\lambda$  值。利用所求得的可能末态数,计算出最大熵,针对有关实验的多重数分布,就可以获得它的相对信息熵。

### 3 EMU01 实验和 FRITIOF 模拟

核研究用的乳胶探测技术具有作用星图象完整和空间分辨本领强的两大优点,因此特别适宜于高能诱发核反应中末态粒子的多重数和角度的测量。EMU01 国际合作组采用了两种束流曝光方式:平行束流方向的乳胶叠和垂直束流方向的乳胶室。能量为 14.6 AGeV 的氧离子束流在美国的 BNL/AGS 上运行,能量为 60, 200 AGeV 的氧离子和 200 AGeV 的硫离子束流在欧洲的 CERN/SPS 上运行。EMU01 实验的测量仪器是数字控制的半自动(即核径迹的分辨依赖于测量技术人员)的显微设备,它的三维  $x, y, z$  座标的平台精度达到  $1\mu\text{m}$ , 因此粒子的发射角的精度可以达到  $3 \times 10^{-2}\text{mrad}$ 。文献 [6] 中给出了 EMU01 实验的细节。

在下一节中报告的 EMU01 实验数据,与取名为 FRITIOF<sup>[7]</sup> 的 Monte Carlo 模拟计算结果作了比较。该模拟程序包的基础是关于高能核-核碰撞的 Lund 模型,它是 Lund 强子散射模型的推广。模型的基本特征是,射弹强子与靶强子内部的部分子通过动量交换形成弦(纵向激发),而且形成时间较长,因此非线性的级联效应在这个模型中可以忽略。

### 4 实验数据的分析与物理讨论

在本文的研究中,我们采用了能量分别为 14.6, 60, 200 AGeV 的氧离子束流与乳胶核靶 (AgBr, CNO, H) 的诱发相互作用 ( $^{16}\text{O} + \text{Em}$ ) 的无偏数据样本,还有 200 AGeV 的硫离子束流与乳胶核靶作用 ( $^{32}\text{S} + \text{Em}$ ) 的无偏事例样本。

在图 1 中,给出了三个能量下的  $^{16}\text{O} + \text{Em}$  作用在全相空间中的相对熵。图中的实线是 FRITIOF 在高能下 Monte Carlo 模拟的结果,虚线是向低能区域的外推。由图中明显看出,在全相空间中,粒子产生的相对熵  $R$  几乎是一个能量无关的量,其数值约等于 0.6。实验数据与 FRITIOF 的模型预言符合得相当好。

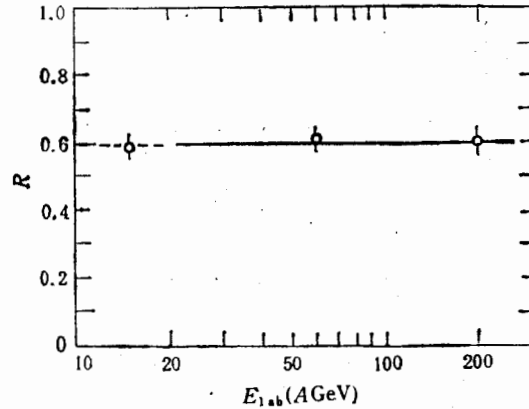


图 1 14.6,60,200 AGeV 能量下  $^{16}\text{O} + \text{Em}$  作用的全相空间的相对信息熵  
实线为 FRITIOF 模拟结果,  $\circ$   $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 。

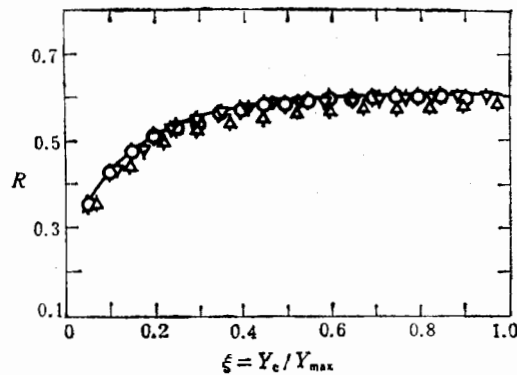


图 2 14.6,60,200 AGeV 能量下  $^{16}\text{O} + \text{Em}$  作用的相对信息熵  
对标度窗口大小  $\xi$  的依赖关系。  
曲线为 FRITIOF 模拟结果,  $\Delta$  14.6 AGeV;  $\nabla$  60 AGeV;  $\circ$  200 AGeV; —FRITIOF。

其次,研究  $R$  随着所观测的快度窗口大小的变化,也显示出非常有意义的函数关系。采用式(3)定义的标度化窗口大小  $\xi$ ,我们在图 2 中画出了  $^{16}\text{O} + \text{Em}$  作用在三个能量下的  $R$ - $\xi$  的数据。可以很清楚地看到,当 cms 对称性的快度窗口从非常小逐渐变宽时,相对熵开始较迅速地增加,然后就较缓慢地趋向全相空间的饱和值。此外,  $R(\xi)$ - $\xi$  的函数关系似乎对能量的依赖性很弱。FRITIOF 模拟对于较高的两个能量 (60, 200 A GeV) 的计算,与上述的实验特征完全吻合。由于 Lund 模型原有的高能条件限制,不适合去作 14.6 AGeV 低能量的 FRITIOF 计算。

图 3 的数据是能量为 200 AGeV 的  $^{16}\text{O} + \text{Em}$  和  $^{32}\text{S} + \text{Em}$  作用的  $R(\xi)$ - $\xi$  关系的

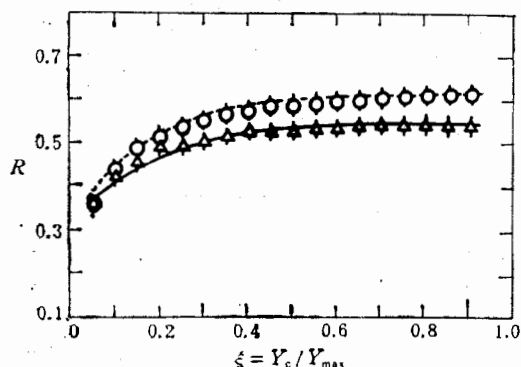


图3 200 AGeV 能量下  $^{16}\text{O} + \text{Em}$  和  $^{32}\text{S} + \text{Em}$  作用的相对信息熵。

曲线为 FRITIOF 模拟结果。○  $^{16}\text{O} + \text{Em}$ ；△  $^{32}\text{S} + \text{Em}$ ；----- } FRITIOF。

比较。对于相同的靶核， $R(\xi)$  的饱和值随着射弹核的增大而减小。FRITIOF 模拟对于这两种射弹核的预言都与实验数据一致。

在我们早期的工作中<sup>[8]</sup>，对于 14.6, 60 和 200 AGeV 的三种入射能量，多重数分布的数据显示出一种近似的标度性质：以多重数的平均值作标度变量  $z = n/\langle n \rangle$ ，标度化的分布函数  $\phi(z) = \langle n \rangle P(n)$  近似地能量无关。设在某能量下的多重数的最大值  $N$  与平均值  $\langle n \rangle$  的关系为  $N = K\langle n \rangle$ ，定义新的标度变量  $u = z/K$  和相应的归一化的分布函数  $\phi(u) = K\phi(z)$ ，对于全快速度区间，相对熵  $R(\xi)$  的饱和值  $R_{\text{sat}}$  很容易由式 (4)，(6) 和 (7) 求得

$$R_{\text{sat}} = 1 - \frac{\beta}{\log_2 \langle n \rangle + \log_2 K}, \quad (12)$$

其中，

$$\beta = \int_0^1 du \phi(u) \log_2 \phi(u). \quad (13)$$

在信息理论中， $\beta$  称为分布  $P(n)$  的负熵。在现有的三个能量的实验中，标度化分布  $\phi(z)$  与入射能量近似无关的现象，也直接在相对熵的测量中表现出来。实验中给出  $R < 1$ ，即表明负熵  $\beta < \log_2 \langle n \rangle + \log_2 K$ 。虽然在目前的能区负熵  $\beta$  保持为常数，但不能断定在更高的能区负熵减小的可能性。这一点在质子-质子(反质子)碰撞实验中<sup>[9]</sup>，从 CERN/ISR 能区 ( $\sqrt{s} = 10 \sim 60 \text{ GeV}$ ) 到 CERN/SPS 能区 ( $\sqrt{s} = 540 \sim 900 \text{ GeV}$ ) KNO 标度无关性破坏现象已得到了暗示。

由于相对熵在快速度窗口增大时有饱和现象，即负熵在核-核碰撞的快速度中心区最大。这表明高能诱发核反应中，信息熵的产生主要集中在中心区，而在碎裂区的熵产生几乎可以忽略不计。中心快速度区的熵集中产生，这个实验事实与一些建立在混沌和相干产生机制框架的模型的预言一致<sup>[10]</sup>。

## 5 结 论

在本工作中，我们引入了一个新的特征量，相对信息熵  $R$ ，来研究入射能量在 14.6

至 200 A GeV 的区域中氧和硫诱发核反应的产生粒子多重数分布。在我们的实验中, 观察到以下一些现象:

1. 在目前的能区中, 全快度空间和具有不同大小的 cms 对称的快度窗口内,  $R$  的值对于能量的依赖不敏感。

2.  $R(\xi)$  随  $\xi$  的变宽而增大, 但在小  $\xi$  区间上升迅速, 在大  $\xi$  区间缓慢, 并且趋向饱和。

3. 在相同的能量和靶核的情况下,  $R$  随射弹核的增大而减小。

以上的实验事实, 与 FRITIOF 的 Monte Carlo 模拟计算的预言一致。

### 参 考 文 献

- [1] 蔡勤, 物理学进展, 8(1988)186; H. Satz, CERN preprint, CERN-TH 6216/91, Oct. 1991; H. R. Schmidt and J. Schukraft, GSI preprint, GSI-92-19, March 1992.
- [2] V. Simak, M. Sumbera and I. Zborovsky, *Phys. Rev.*, **B206** (1988) 159.
- [3] Z. M. Zhou and X. Cai, *Chinese Phys. Lett.*, **6** (1989) 317; X. Cai, D. C. Zhou, J. C. Zhou and Z. M. Zhou, Proc. of Intern. Workshop on Correlations and Multiparticle Production, Marburg, Germany, May 14-16, 1990, Edited by M. Plümer, S. Raha and R. M. Weiner, World Scientific.
- [4] L. Brillouin, Science and Information Theory, Academic, New York, 1962; A. Wehrl, *Rev. Mod. Phys.*, **50** (1978) 221.
- [5] I. Otterlund, *Nucl. Phys.*, **A418** (1984) 87c.
- [6] EMU01 Collaboration: M. I. Adamovich et al., *Phys. Rev. Lett.*, **62** (1989) 2801.
- [7] B. Nilsson-Almqvist and E. Stenlund, *Comp. Phys. Comm.*, **43** (1987) 373; 以及其中引用的文献。
- [8] EMU01 Collaboration: M. I. Adamovich et al., *Phys. Lett.*, **B223** (1989) 262.
- [9] UA5 Collaboration: G. J. Alner et al., *Phys. Rep.*, **154** (1987) 247.
- [10] P. A. Carruthers et al., *Phys. Lett.* **B212** (1988) 369; R. M. Weiner, *Z. Phys.*, **C38**(1988) 396.

## Relative Information Entropy of Particle Production in High Energy Induced Nuclear Reactions

EMU01 Collaboration

Received on September 5, 1992

### Abstract

A new characteristic quantity called relative information entropy  $R$  is introduced, which is employed to investigate the multiplicity distribution of produced particles in 14.6, 60, 200 A GeV oxygen ions and 200 A GeV sulphur ions induced nuclear reactions. It is found that  $R$  is insensitive to energy.  $R$  increases with the size of rapidity window and rapidly reaches saturation, which explores the fact that the entropy is concentrated in the central rapidity region. The experimental results are in good agreement with the prediction of the FRITIOF simulation of the Lund model.

**Key words** High energy induced nuclear reaction, Particle production, Relative information entropy.