

反物质探索



Bangjiao YE



中国科学技术大学 物理学院

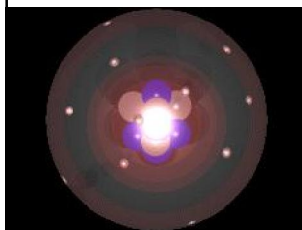
The School of Physical Sciences, USTC

科学与社会 —新生研讨课

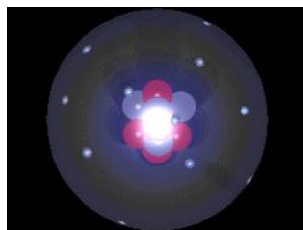
- (1) 11月份完成学生分组（**一组不超过4人**）；
- (2) 12月上旬组织学生选题，12月下旬学生完成选题；
- (3) 学生寒假期间进行项目调研；
- (4) 2015年3月份指导学生撰写报告；
- (5) 2015年4月份导师审阅修改学生报告，帮助其定稿；
- (6) 2015年5月份组织完成小班答辩；
- (7) 2015年6月份给出学生成绩。（**网上提交，打印，签字提交**）

- 什么是反物质
- 反物质探索
- 反物质的应用

一、什么是反物质

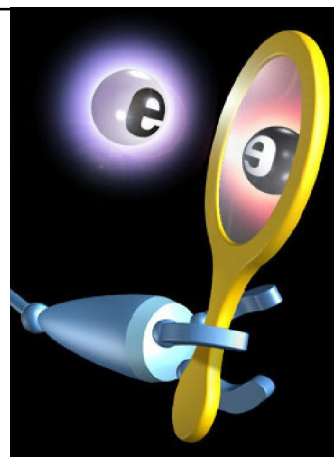


电子+质子+中子

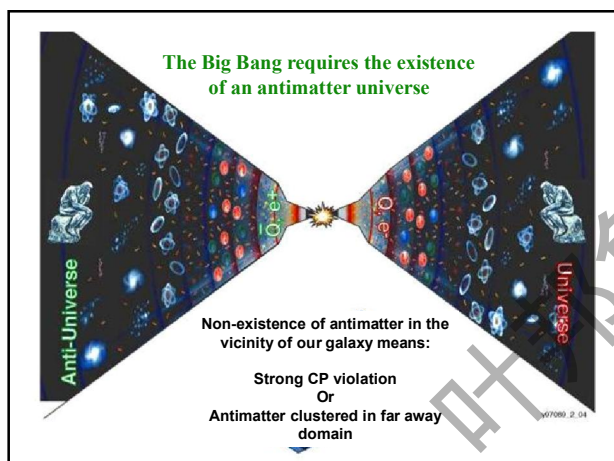
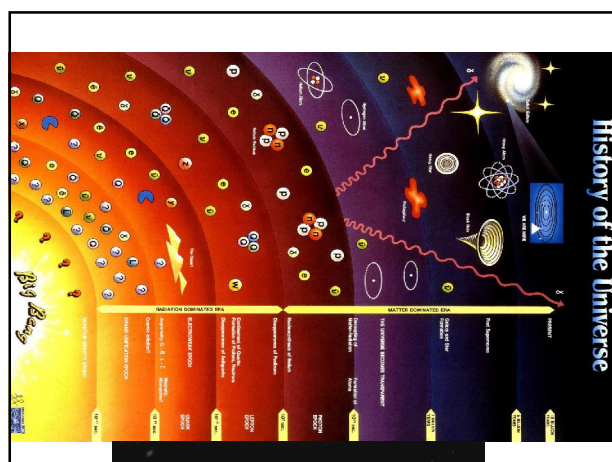
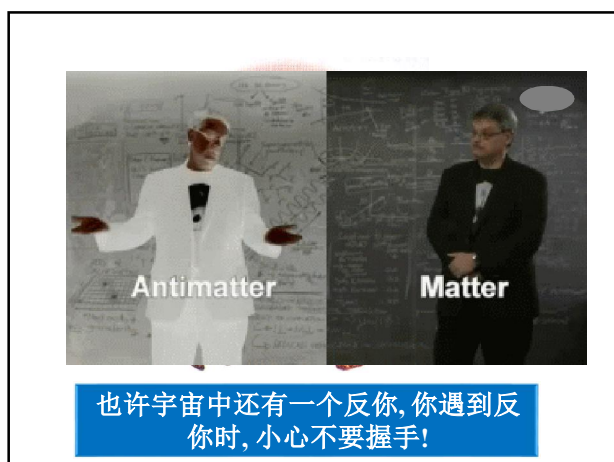


正电子+反质子+反中子

电子



反电子



大爆炸形成了我们的宇宙,应该是既有物质,又有反物质,2种物质世界应该是完全对称的。

那么,我们的另一半在哪里?

科学家们相信宇宙中某一个地方应该存在着一个反物质世界!



科学家在 $20\text{Mpc} \sim 10^8$ 光年范围没观测到宇宙中有反物质存在的证据,主要是由物质组成的。

由宇宙中的星体,气体可得

重子数/光子数 $=10^{-9} \sim 10^{-10}$

可有 $(N_B - N_{\bar{B}})/(N_B + N_{\bar{B}}) = 10^{-9} \sim 10^{-10}$

大爆炸产生的反物质哪里去了?

- 大爆炸初期,温度很高,宇宙介质是由正反物质构成的.几乎所有的粒子都具有相同的数密度.
- 随着宇宙的冷却,介质中某中粒子的静质量与温度在一个数量级时,通过热碰撞产生几率显著下降,而它的湮灭却依然容易发生.
- 温度 T 由宇宙膨胀动力学决定,衰变速率由微观动力学决定,两者不可能如此好地协调.当温度降至与某种粒子的静质量相等以后,该粒子将逐渐消失.

- 如果湮灭过程中C或CP略有破坏,则介质中正反粒子的数量开始不相等。
- 温度降至大统一尺度能量以下时,重子数不对称过程被冻结。
- 温度降至1GeV时,正反重子开始通过湮灭而消失。若正粒子数略大于反粒子数,湮灭后只剩下正粒子多余的部分。
- 重子数应远小于光子数,这正是目前的状况。

Before time = 1 microsecond (after Big Bang)

Energy $\longleftrightarrow$ protons + antiprotons

After time = 1 microsecond

Energy $\longleftarrow$ protons + antiprotons

Small excess (1/1000 000 000) of protons ?
(CP violation)

time = 1 μ s : The big antimatter massacre:

1 000 000 001 protons
+ 1 000 000 000 antiprotons
= 1 proton + energy

二、反物质探索



1928年, Dirac把量子论和相对论结合在一起,得到了一个描述电子运动的方程式。

$$i\gamma\partial\Psi = m\Psi$$

电子运动的Dirac方程

$$\left(\sum_{\mu=1}^4 i\gamma_{\mu} \frac{\partial}{\partial x_{\mu}} - \frac{m_0 c}{\hbar}\right)\Psi = 0$$

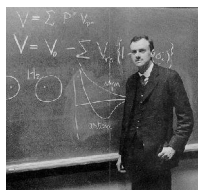
得到电子的能量为:

$$E^+ = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

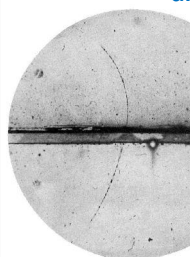
$$E^- = -\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

Paul Dirac 大胆地预言一切粒子都存在其反粒子,电子的反粒子就是正电子。

这是第一次提出反物质的存在。



In 1932, Carl Anderson discovers the positron



MARCH 15, 1933 PHYSICAL REVIEW VOLUME 43

The Positive Electron

CARL D. ANDERSON, California Institute of Technology, Pasadena, California
(Received February 26, 1933)

Out of a group of 1500 photographs of cosmic-ray tracks in a vertical Wilson chamber 15 tracks were of positive particles which could not have a mass as great as that of the electron. From an examination of the track-ionization and ionization produced it is concluded that the charge is less than twice, and is probably exactly equal, to that of the electron. If these particles carry unit positive charge the

curvature and ionization produced would be the same as for less than twenty times the electron mass. These particles will be called positrons. Because they occur in pairs associated with other tracks it is concluded that they must be secondary particles ejected from atomic nuclei.

ON August 2, 1932, during the course of photographing cosmic-ray tracks produced in a vertical Wilson chamber (magnetic field of 44,000 gauss) Anderson observed the following sequence of events:

electrons triggered in produce two tracks on piece as to give the impression of a single particle shooting through the lead plate. This

赵忠尧与诺贝尔奖擦肩而过



中国科学技术大学的缔造者之一，
近代物理系首任系主任



赵忠尧在1927年到加州理工学院攻读学位，做硬 γ 射线吸收系数的测量工作。赵忠尧用放射性元素钍衰变的中间产物Thc（即铊208）作辐射源，它能辐射出能量为2.6MeV的 γ 射线。测量这种硬 γ 射线在几种物质中的吸收系数之后，赵忠尧意外地发现，射线只在通过轻元素时吸收的情况才与公式相符，当通过重元素时，出现了反常现象，实际吸收量远大于公式给出的量。

1929年底，赵忠尧将结果整理成论文。但由于实验结果与密立根教授预期的不相符，密立根不甚相信。文章交他之后两三个月仍无回音，幸而替密立根代管研究生工作的鲍恩(Bowen)教授十分了解该实验从仪器设计到结果分析的全过程，他向密立根教授保证了实验结果的可靠性，文章才得以于1930年5月在《美国国家科学院院报》上发表。



R. A. Millikan
(1868.3.22-1953.12.19)



Carl D. Anderson
(1905.9.3-1991.1.11)



Zhao Zhongyao,
(1902.6.27-1998.5.28)

1930年春天，他重新实验，他发现， γ 射线被铅散射时，除康普顿散射外，伴随着前述的反常吸收还有一种特殊的光辐射出现。当时测定的这种特殊辐射的强度是大致各向同性的，并且每个光子的能量与一个电子质量的相当能量很接近。

这一结果表明， γ 射线在重元素中的特殊吸收不是由康普顿效应引起的，它揭示了一种新的反应机制。赵忠尧将这个实验结果写成第二篇论文，题目为《硬 γ 射线的散射》，并于1930年10月在美国《物理评论》杂志上发表。



1996 北京医院

科幻故事

- 1940, Isaac Asimov: 正电子智能机器人
- 1943, J. Williamson: 反地球
- 1966, G. Roddenberry, 《星际迷航》，反物质驱动超光速飞船。
- 1988, E. Kotani and J. M. Roberts, 用反物质探索星系。



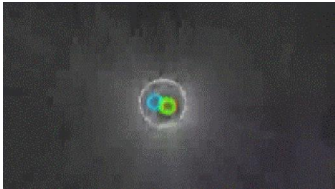


When matter is created

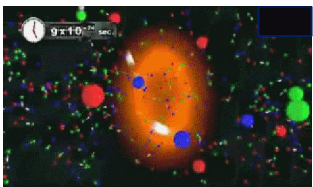
科学家们希望能在实验室制造出反物质!



欧洲世界最大的加速器



重现宇宙产生初期的景象，包括反物质产生!



通过粒子碰撞还把能量转换成正反物质，即粒子与反粒子。



反质子的发现

1955年10月，全世界的媒体的头条新闻都是：“*New Atom Particle Found; Termed a Negative Proton*”.

Segre' 和他的小组朝着自然界物质与反物质的对称性迈进了重要的一步。

Segre' and Chamberlain were awarded the Nobel Prize in 1959.



反中子发现

- 1956, B. Cork等科学家宣布发现反中子。

$2d+u$

 Neutron

$2\bar{d}+\bar{u}$

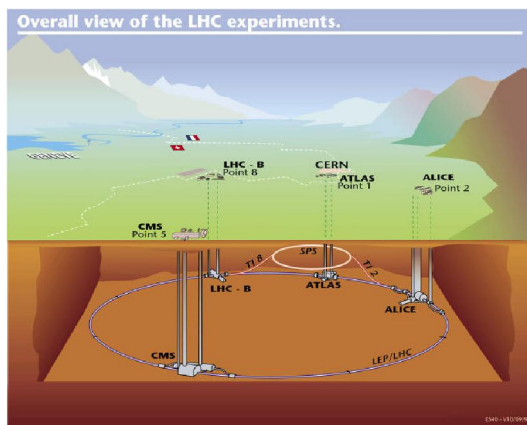
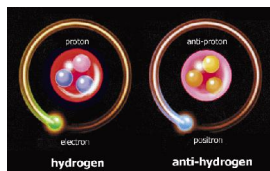
 Anti-Neutron

反原子核的发现

1965, 2组科学家(CERN, A. Zichichi; USA-BNL, L. Lederman)同时宣布发现antideuteron, 即由反质子和反中子组成的核。

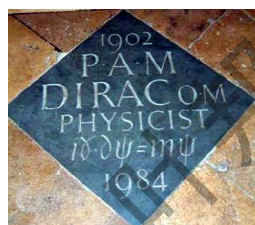
反原子的发现

□1995底, 以奥尔特勒为首的CERN PS210小组发现反原子。尽管他们在23000个计数中仅仅得到9个事例。1996年CERN正式宣布发现反原子。



- 1995年11月13日, 在伦敦威斯敏斯特教堂, 在紧挨着牛顿纪念碑的地方, 举行了狄拉克纪念碑的揭幕仪式(1984年10月20日去世), 纪念碑上写着:

$$i\gamma\partial\Psi = m\Psi$$

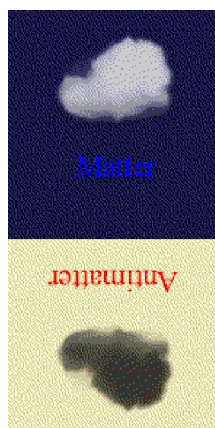


寻找太空中的反物质



太空中的反物质

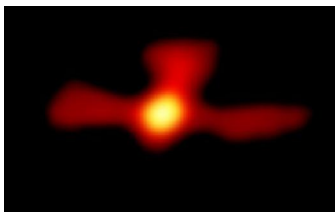
随着正电子, 反质子, 反中子和反原子的陆续发现, 科学家们开始设想在我们的宇宙中是否存在反行星, 反恒星, 反星系团。甚至存在反宇宙。



- 过去的20多年来, 科学家们试图把探测仪器用气球和卫星送到尽可能高的地方, 寻找来自太空的反物质信息。这种尝试是非常困难的。



1997年4月，美国海军研究实验室、西北大学和加州大学伯克利分校等五个著名研究机构的天文学家宣布，他们利用先进的伽马射线探测卫星发现在银河系上方约3500光年处有一个不断喷射反物质的反物质源。它喷射出的反物质在宇宙中形成了一个高达2940光年的“喷泉”。这是宇宙反物质研究领域的一个重大突破。



Searching for distant anti-galaxy: Finding antinuclei in the cosmic rays

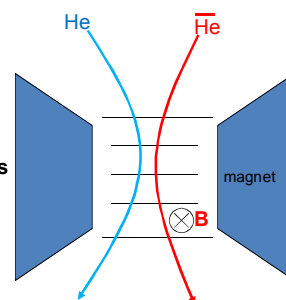
To identify He, we need to know:

- Momentum, p
- Charge, $|Q|$
- Sign of charge, $\text{sign}(Q)$

Basically Magnet + Tracker is what we need.

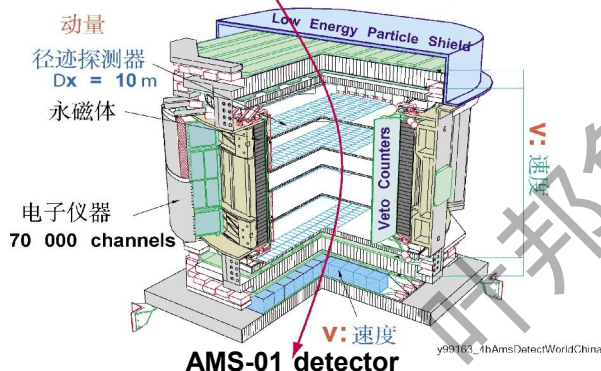
- Track curvature – Q/P
- $dE/dx \sim |Q|$

The detector has to operate outside of earth atmosphere.

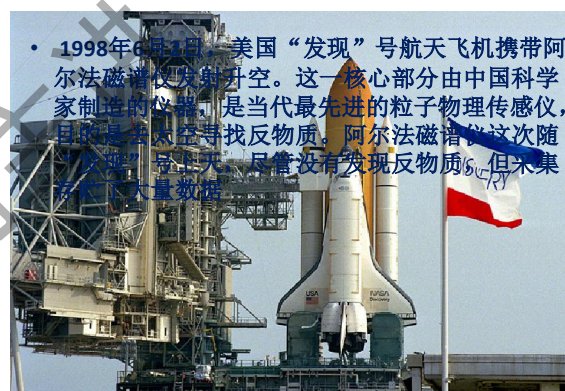


The Alpha Magnetic Spectrometer detector(AMS)

在国际空间站的一个粒子物理实验（丁肇中教授领导）。

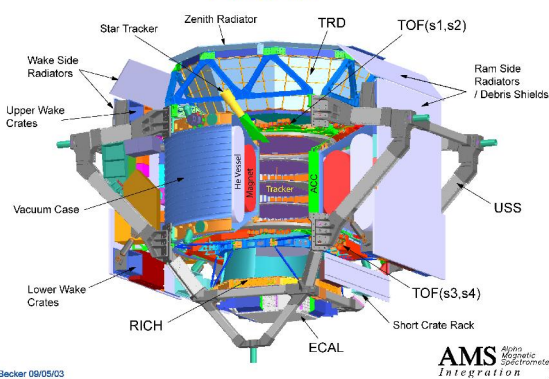


- 1998年6月2日，美国“发现”号航天飞机携带阿尔法磁谱仪发射升空。这一核心部分由中国科学家制造的仪器，是当代最先进的粒子物理传感仪，目的是在太空寻找反物质。阿尔法磁谱仪这次随“发现”号上天，尽管没有发现反物质，但采集到了大量数据。



The Space Shuttle Discovery on the Launch Pad before liftoff for the STS-91 mission. Nasa, Kennedy Space Center, June 1998.

AMS 02

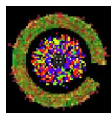


美国宇航局“奋进”号航天飞机于2011年4月29日发射升空前往国际空间站，携带“反物质太空磁谱仪”。重约6900多公斤，造价约为20亿美元

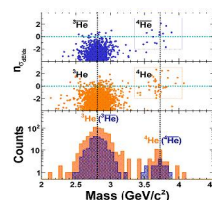


反 ^4He 核素发现

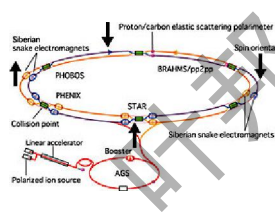
美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)获得重大发现:中国科学家参加的RHIC-STAR国际合作组探测到氦核的反物质粒子——反氦4核。将于29日出版的英国《自然》(Nature)杂志于北京时间4月25日凌晨在线发表了该成果。由中国科学家队伍研制的飞行时间探测器在该实验中起了关键的作用。



反氦-4又名反 α 粒子,是迄今为止所能探测到的最重的反物质原子核,也很可能是未来很长一段时间内所能探测到的最重反物质原子核,因为下一个更重的稳定反物质原子核产生的可能性是反氦-4的百万分之一,而以现在的加速器技术几乎不可能实现。

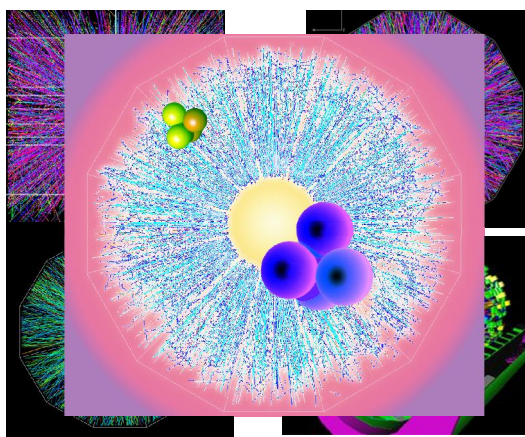
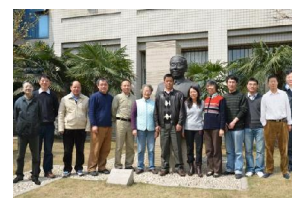
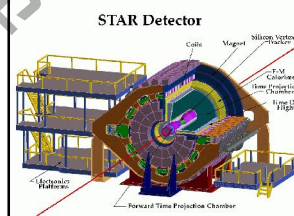


The Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC) at the Brookhaven National Laboratory (BNL) took first collision data in June-September, 2000. The collider has two intersecting rings with counter propagating beams. Below you see some initial images from head-on collisions of gold nuclei with a total energy of 26 TeV (65 GeV/nucleon in each beam).

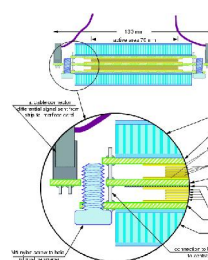


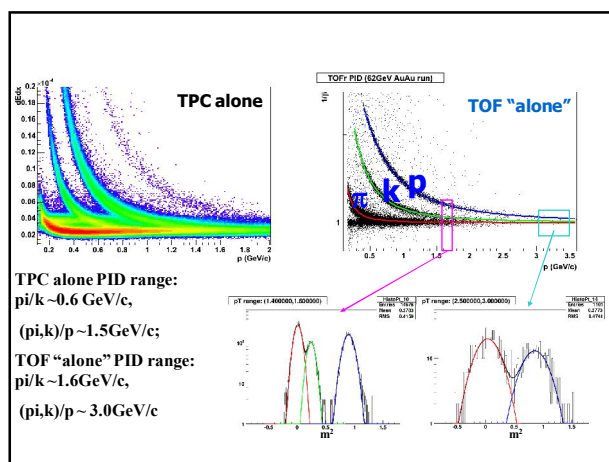
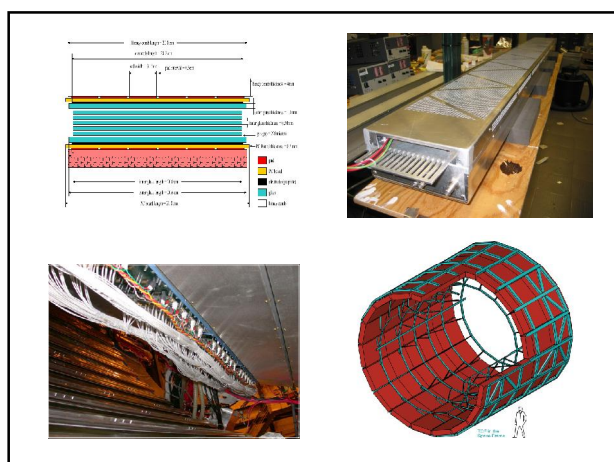
STAR中国合作组

STAR合作组由来自12个国家的54科研单位组成。其中STAR中国合作组成员包括中国科学技术大学、中国科学院近代物理研究所、中国科学院上海应用物理研究所、清华大学、华中师范大学、山东大学等。

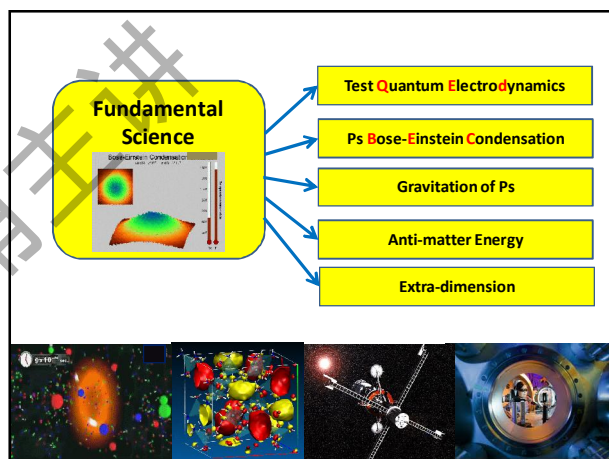
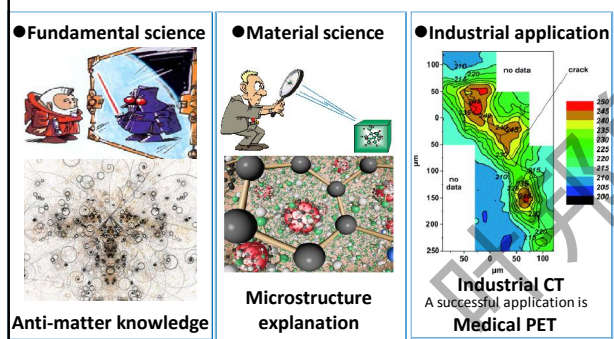


中国科学院和美国能源部共同出资研制并于2009年安装在STAR探测器上的“大型飞行时间探测装置”(TOF),在反物质4的鉴别过程中发挥了关键的作用





三、反物质的应用



Anti-matter Energy

