

探索极端宇宙

宋黎明

2024-09-22

写在前面的话

极端宇宙是一个系统的概念，包括极端宇宙概念、探测手段、现象及其物理规律等。

极端宇宙展示了自然界的极限，挑战了我们的知识边界，同时也为科学研究提供了独特的实验室。

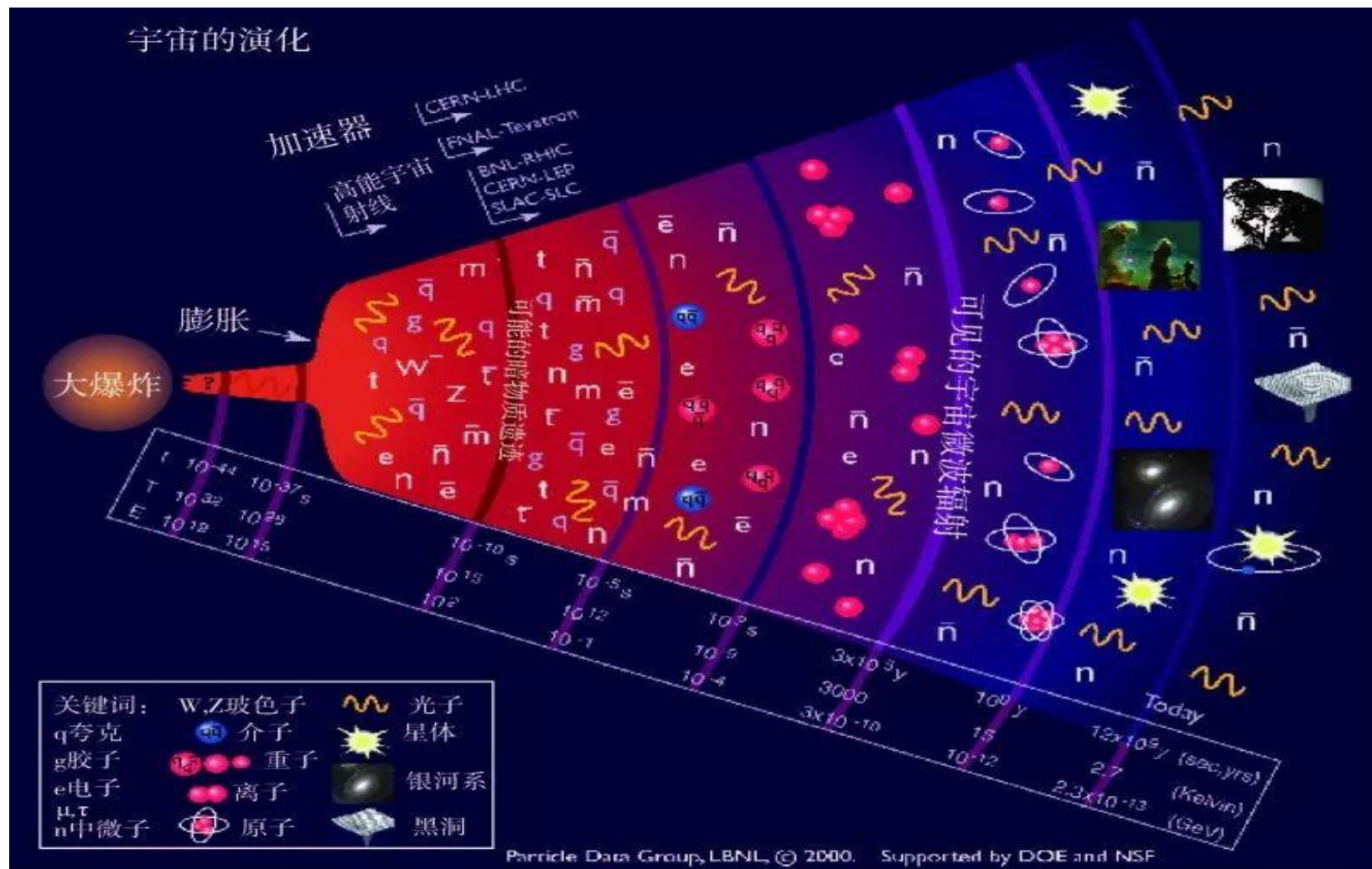
通过观测宇宙中的极端天体和在实验室中模拟极端条件，科学家们会不断深化对自然界基本规律的理解，揭示更多极端物理环境中的奥秘，推动科学的进一步发展。

报告的主要内容选自《现代物理知识》杂志，为了便于大家进一步理解和搜寻资料，有关内容会标注在报告中。

概要

- 一、重大前沿科学问题
- 二、极端宇宙基本属性
- 三、我国的空间探测规划
- 四、高能所项目简介
- 五、总结

宇宙演化示意图



宇宙演化阶段

□ 宇宙的起源与未来——大爆炸宇宙论简介		时代	物理过程
苏中启		Planck时代	
1995, 7(02): 24-27.		大统一时代	
	10 ⁻³⁵ , -33	暴胀阶段	暴胀过程
10 ¹³	10 ⁹	□ 解读宇宙的起源——2006年诺贝尔物理学奖简介	
10 ¹¹	10 ⁷	张新民	
10 ¹⁰	10 ⁶	2007, 19(2): 33-35.	
5×10 ⁹	5×10 ⁵	5	电子对湮灭
10 ⁹	10 ⁵	3分	核合成时代
3×10 ³	0.3	38万年	复合时代
		4亿年	第一代恒星生成
		星系	大尺度结构形成
2.7	3×10 ⁻⁴	137亿年	现代

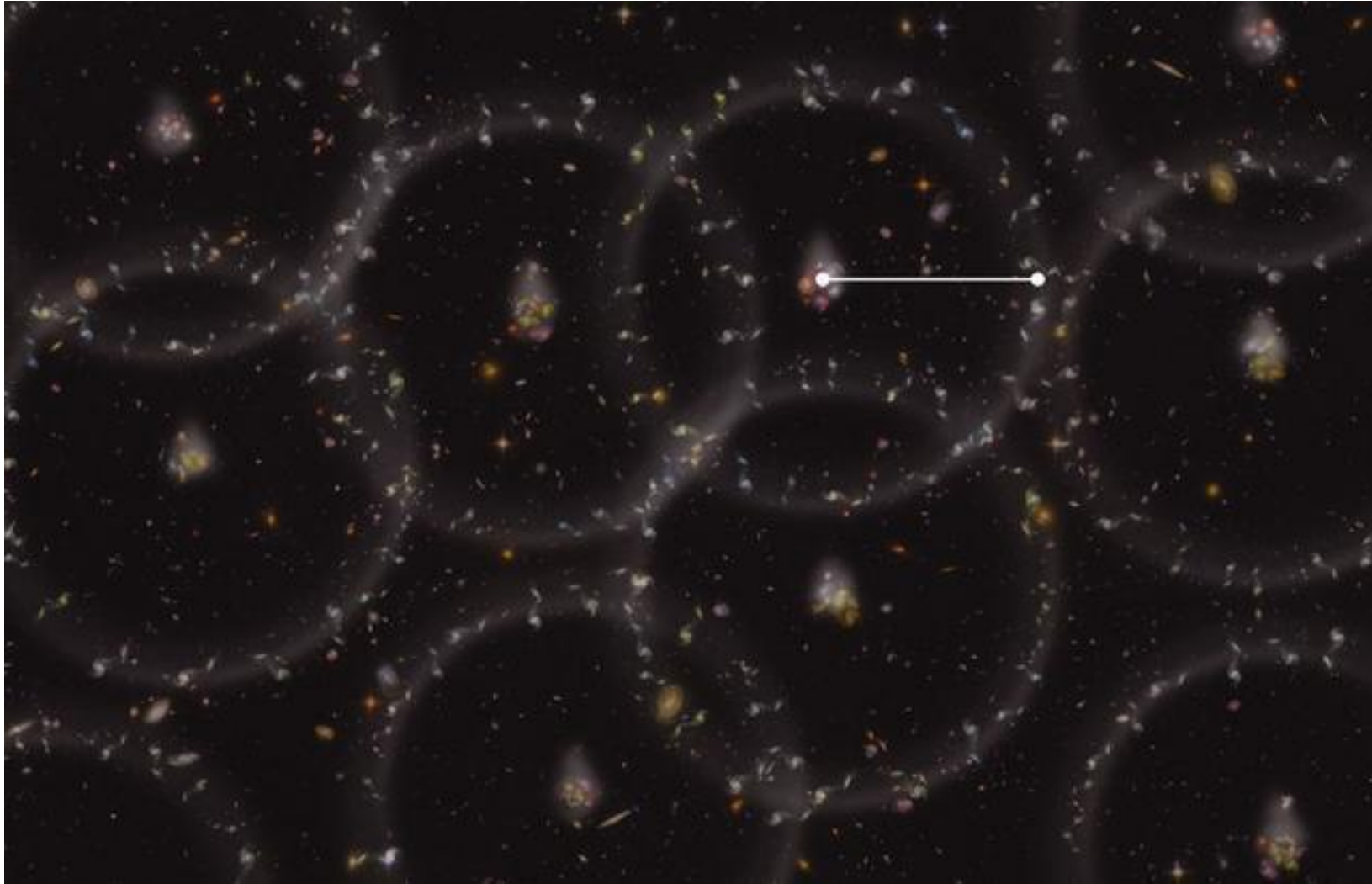
重子物质声波震荡

早期宇宙中充满着高温高密度的等离子体，“重子”指的就是等离子体中的离子（包含了质子和中子）。这样，早期宇宙从局部来看会存在“密度涨落”。

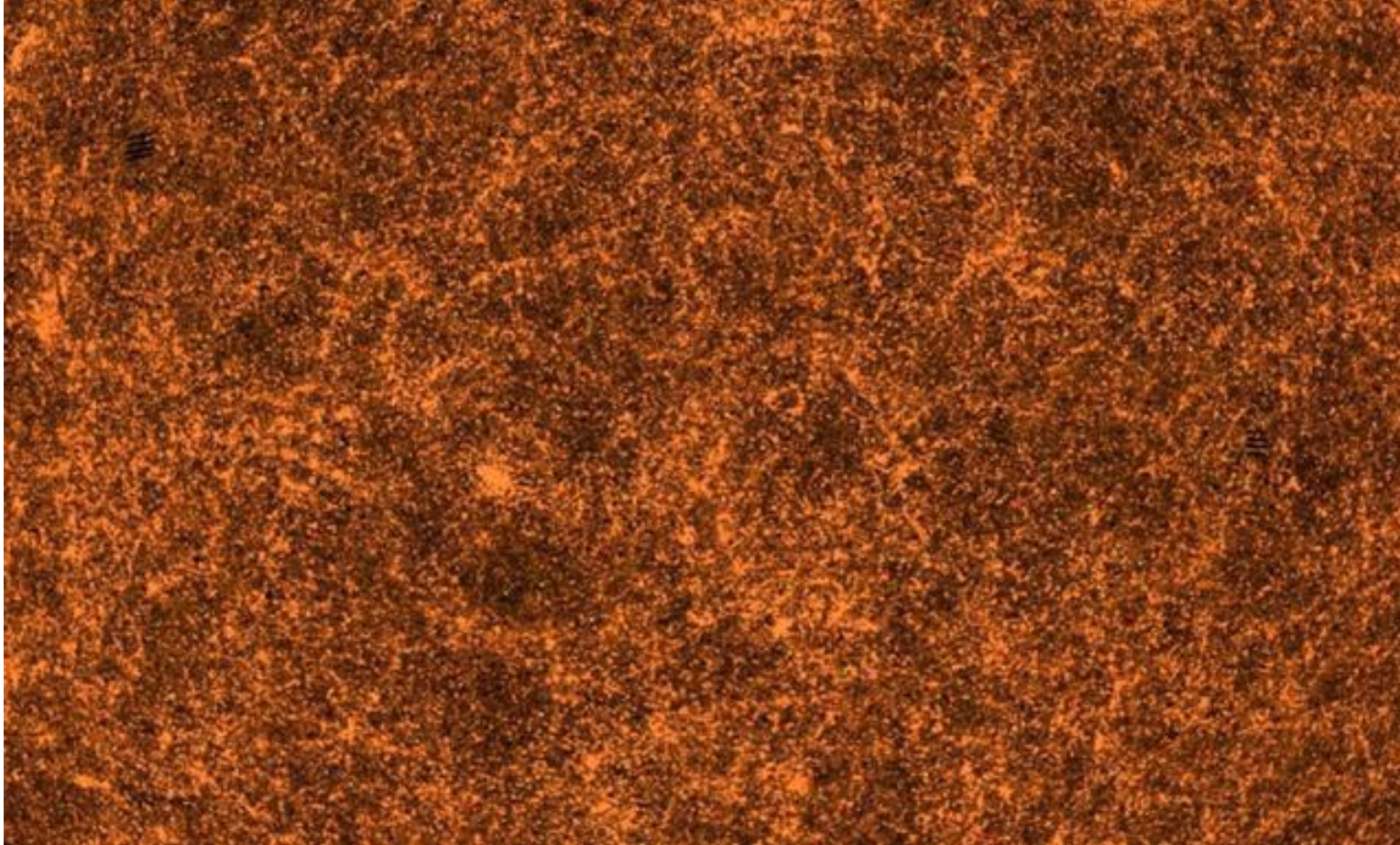
随着宇宙年龄的增长，引力（以光速运动）可以达到越来越远的地方，导致越来越大尺度的收缩和坍塌。如果重子物质组成的气体云坍塌得太厉害，那么辐射压力就会把气体云再推出去。然后引力又会吸引一部分气体云再次坍塌，如果温度还是很高，那么辐射压力又会把气体云再次推出去。这种来回振荡就类似于声波，因此称其为重子声学振荡。

重子声学振荡是宇宙中可见的重子物质的规则周期性密度涨落。正如超新星可以作为标准烛光，重子声学振荡的物质成团性也可以作为测量宇宙学距离的标准尺。

重子物质声波震荡



重子物质声波震荡—光学星系巡天



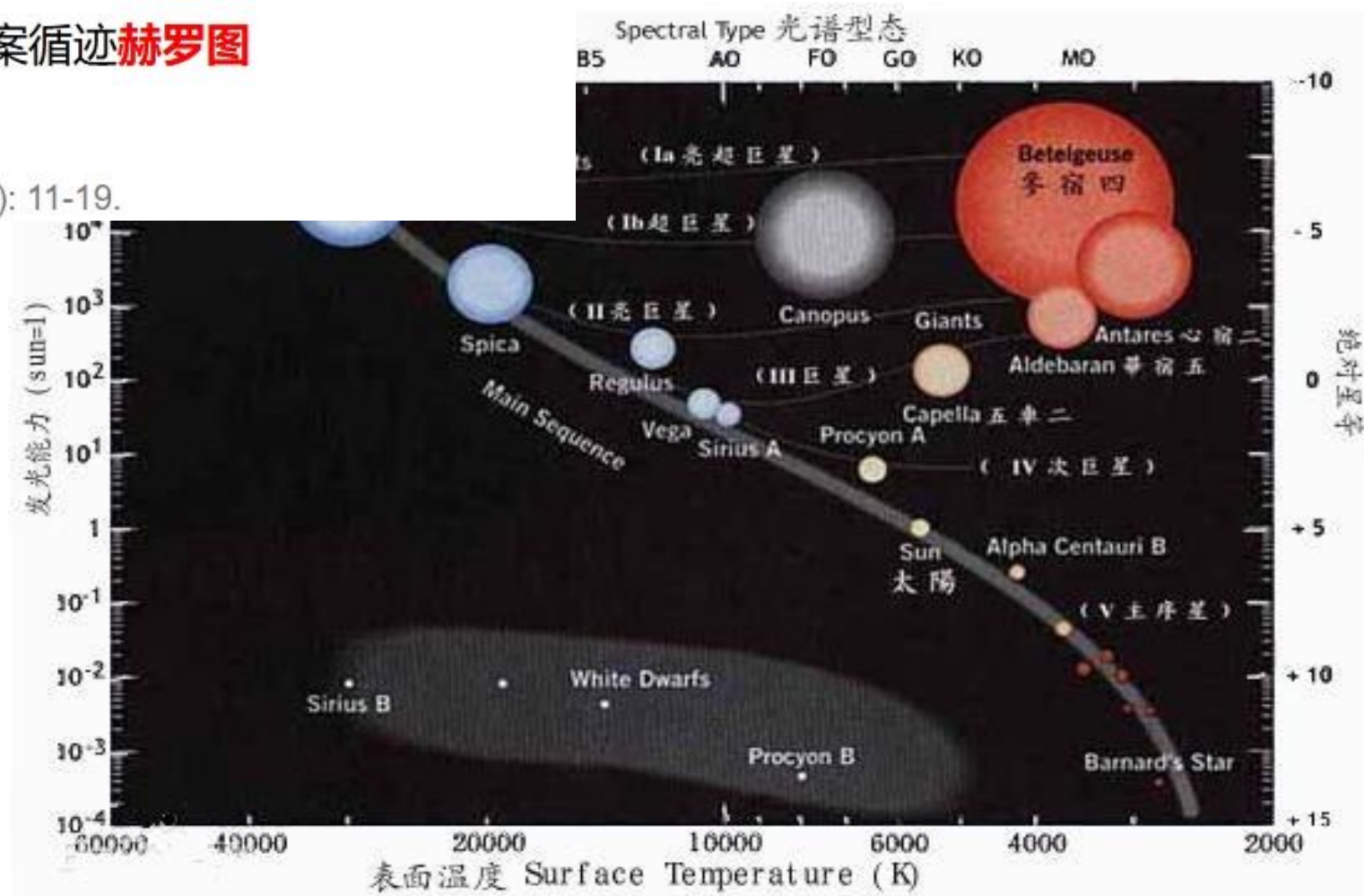
在大爆炸后大约38万年时，宇宙的温度冷却到3000K，重子和光子解耦，解耦时声波半径为38万光年，随着宇宙膨胀，目前估算值为4.9亿光年。

恒星演化示意图

□ 恒星身世案循迹赫罗图

卞毓麟

2014, 26(3): 11-19.



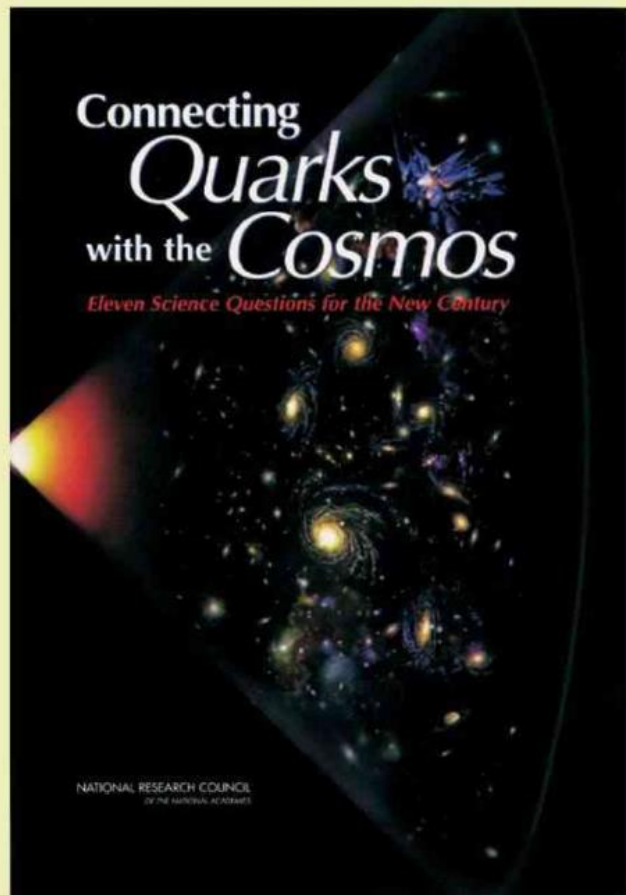
一、重大前沿科学问题

美国国家研究委员会在2002年初发布了由19名权威物理学家和天文学家联合执笔的研究报告，“建立夸克与宇宙的联系：新世纪的11个科学问题”，列出了11个与宇宙有关的难题：

- 1) 什么是暗物质；
- 2) 暗能量的本质是什么；
- 3) 宇宙是如何开始的；
- 4) 爱因斯坦的引力理论是否为定论；
- 5) 中微子的质量是多少，它如何影响到宇宙的演化；
- 6) 质子是否是稳定的；
- 7) 超高能粒子流来自哪里；
- 8) 在极高密度和温度下，物质是否会呈现出新的形态；
- 9) 是否存在额外的时空维度；
- 10) 从铁到铀等元素形成的细节是什么；
- 11) 需要新的光和物质理论来解释在甚高能和极高温时发生的情况吗（如中子星、伽马射线暴等现象）。

一、重大前沿科学问题

The Eleven Questions Identified by the *Connecting Quarks with the Cosmos* Report



1. What is Dark Matter?
2. What is the Nature of Dark Energy?
3. How Did the Universe Begin?
4. Did Einstein Have the Last Word on Gravity?
5. What are the Masses of the Neutrinos and How Have They Shaped the Evolution of the Universe?
6. How do Cosmic Accelerators Work and What are They Accelerating?
7. Are Protons Unstable?
8. What Are the New States of Matter at Exceedingly High Density and Temperature?
9. Are There Additional Space-Time Dimensions?
10. How Were the Elements from Iron to Uranium Made?
11. Is a New Theory of Light and Matter Needed at the Highest Energies?

一、重大前沿科学问题

2004年5月，美国国家科学技术委员会（NSTC）由美国能源部、宇航局、科学基金会、科技政策办公室和预算管理局的代表组成的跨部委工作小组，发表了“宇宙物理学”报告。

该报告是对美国国家研究委员会2002年的报告——“建立夸克同宇宙的联系：新世纪的11个科学问题”做出的响应。

“宇宙物理学”工作小组的这篇报告检查了联邦政府现有的投资状态，并为美国国家委员会2002年报告中提出的11个科学问题推荐了应采取的优先步骤。

下面简单介绍针对问题11的内容。

一、重大前沿科学问题

用量子力学、电磁和它们作为电动力学统一的法则似乎对实验室中的物质和辐射进行了很好的描述。宇宙为我们提供地点和天体，如中子星和伽马射线爆炸源，这里的能量远远超过为验证这些基本理论在地球上可再现的能量。

伽马射线大面积空间望远镜（GLAST）通过观测来自许多不同天体源的高能伽马射线将开启这个高能领域。GLAST有一个伽马射线成像天体望远镜，能力大大超过以前飞行的仪器，还有一台辅助的提高研究伽马射线爆的仪器。

在GLAST能区范围内，宇宙对伽马射线来说基本上是透明的。靠近可见宇宙边缘的高能源可用伽马射线光进行探测。如果这些天体在宇宙较早期间存在的话，我们就有充分的理由期待GLAST将看到红移值等于或大于5的已知类型的天体。对于伽马射线来说，小的相互作用截面意味着伽马射线可直接观测自然界最高能量的加速过程。

不像宇宙线被磁场偏转，伽马射线可以溯源到辐射源。有了GLAST，天文学家们就拥有了非常好的工具，用于研究黑洞是如何通过吸积过程能够以大的难以令人相信的速度向外加速气体喷流的。GLAST计划于2006年3月发射。

一、重大前沿科学问题

伽马射线大区域空间望远镜卫星（GLAST），是一个由NASA与美国能源部以及来自美国、法国、德国、意大利、日本、瑞典的学术机构及参与者共同开发的国际性任务。

GLAST拥有前所未有的灵敏度、角分辨率及大视场，其主要的空间目标是在伽马射线波段持续观测整个天球。GLAST的有效载荷包括一台大区域望远镜和一台 γ 射线暴监测器。

2008年6月11日在美国卡纳维拉尔角发射场发射升空，2008年8月26日，GLAST更名为“费米伽马射线空间望远镜”（Fermi Gamma-ray Space Telescope），以纪念高能物理先驱、美国科学家恩里科·费米。



一、重大前沿科学问题

为纪念创刊125周年，*Science* 杂志于2005年7月提出了125个重要的科学前沿问题，其中包含25个最突出的重点问题（highlighted questions）以及100个生命科学、物理学、数学等领域的难题。2021年4月10日，为纪念建校125周年，上海交通大学与《科学》杂志联袂策划发行《125个科学问题——探索与发现》增刊，这是《科学》杂志第二次向全球发布125个科学问题。

在两次发布中宇宙起源、引力本质、时间本质、广义相对论、宇宙维度等问题包括在其中。

《科学通报》从2016年第1期开始，陆续推出了2005年版的“*Science* 125个科学前沿问题系列解读”，邀请不同领域科学家就这些科学问题展开论述，点评当前最新研究进展、展望未来研究，对这些问题的研究进行盘点。

《现代物理知识》对这些问题中的相关物理问题也有非常多的涉猎。

二、极端宇宙基本属性

□ 探索极端宇宙

张双南, 卢方军, 徐玉朋, 董永伟, 刘红薇

2024, 36(1): 34-41.

随着物质世界的极小和极大这两极不断拓展, 微研究这两个极端不断延伸, 实际上这些极大和极小场、高能、粒子等。在物质深层次结构方面建立了粒子物理标准模型, 包括了所有已知基本粒子及其相互作用, 在宇宙起源方面则建立了大爆炸宇宙论。

□ 探索极端宇宙——从HXMT到eXTP和HERD 功。

近年更精确的实验

徐玉朋, 陈勇, 董永伟

2021, 33(2): 12-21.

还无法解释中微子的振荡, 以及暗物质、暗能量等问题。因此, 这些“标准”模型还需要进一步完善。

如粒子物理标准模型

解释必须存在的暗物

我国学者瞄准物理和天文领域洞、强引力场、强磁场和极高密度端能量、极端天体、极端引力、极端计划。

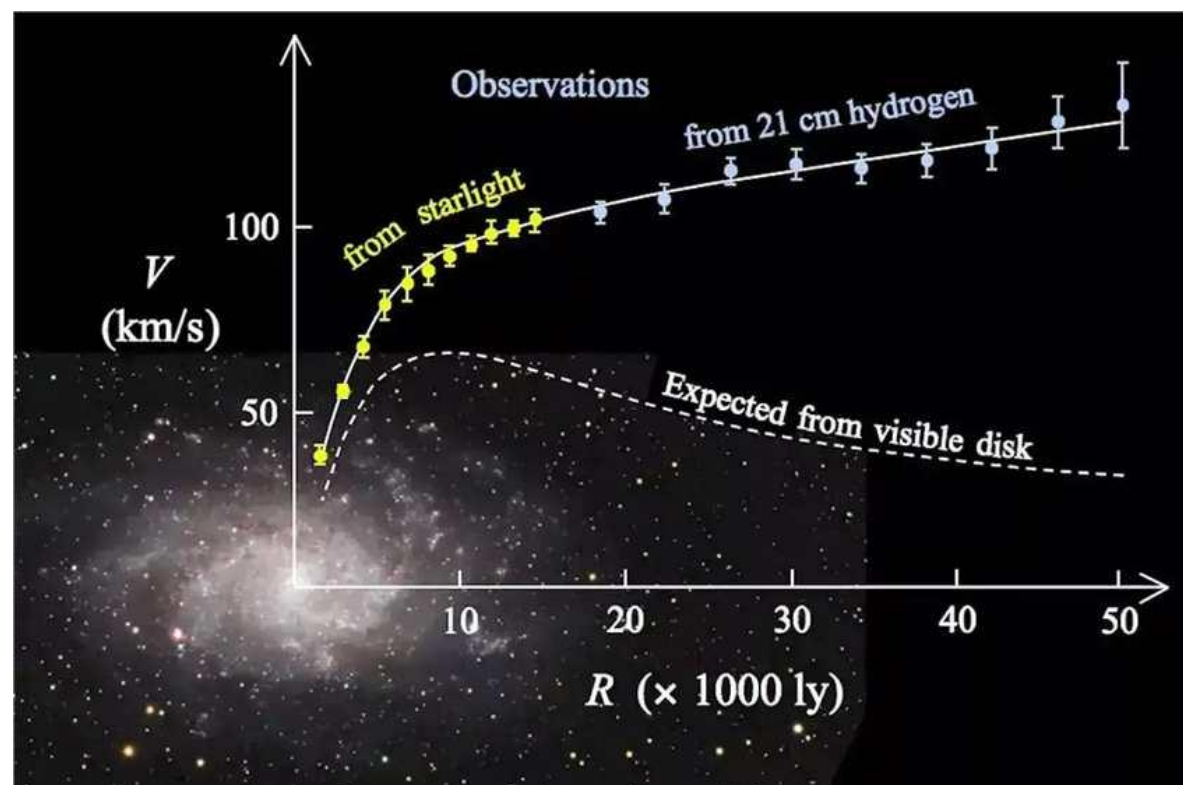
□ 探索极端宇宙——增强型X射线时变与偏振空间天文台

刘红薇, 纪龙

2020, 32(5): 34-39.

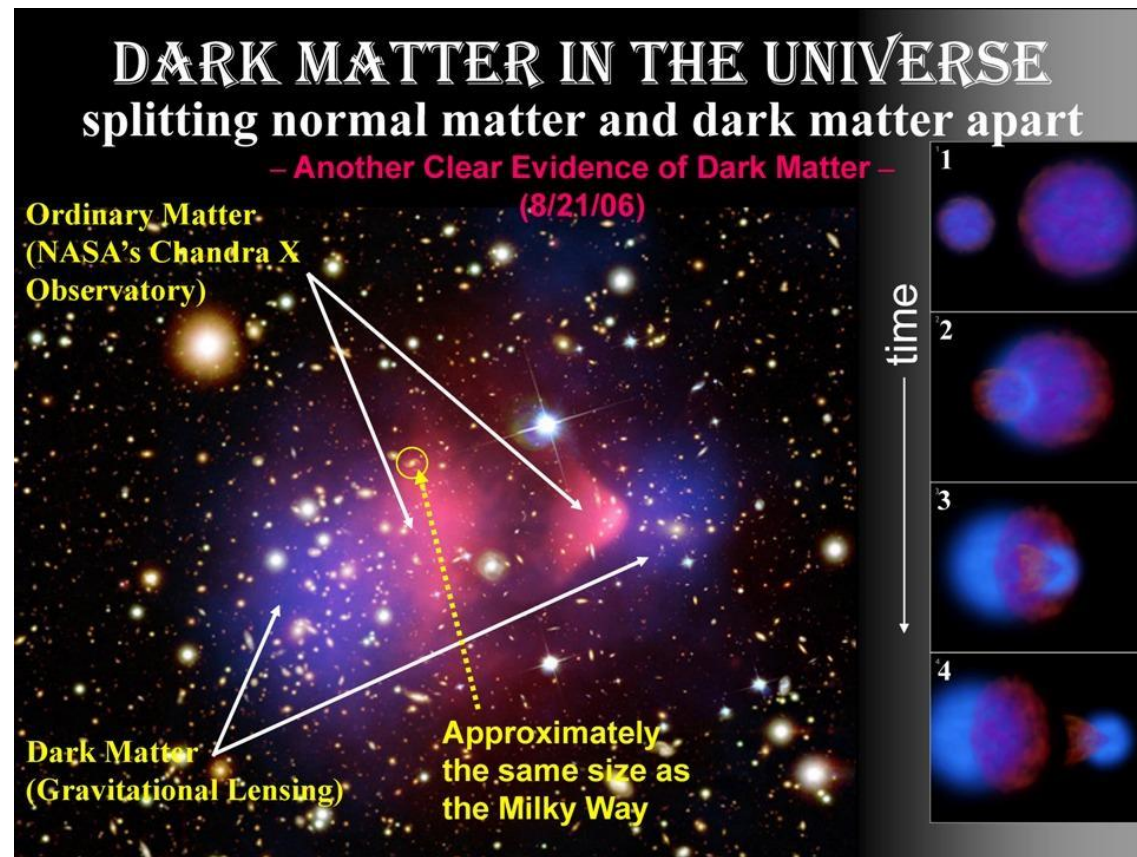
二、极端宇宙基本属性

1) 极端起源：宇宙中普遍存在大量不发光但是产生引力的暗物质，是理解宇宙演化的关键之一，暗物质和“正常”的发光物质的比例大约是6:1



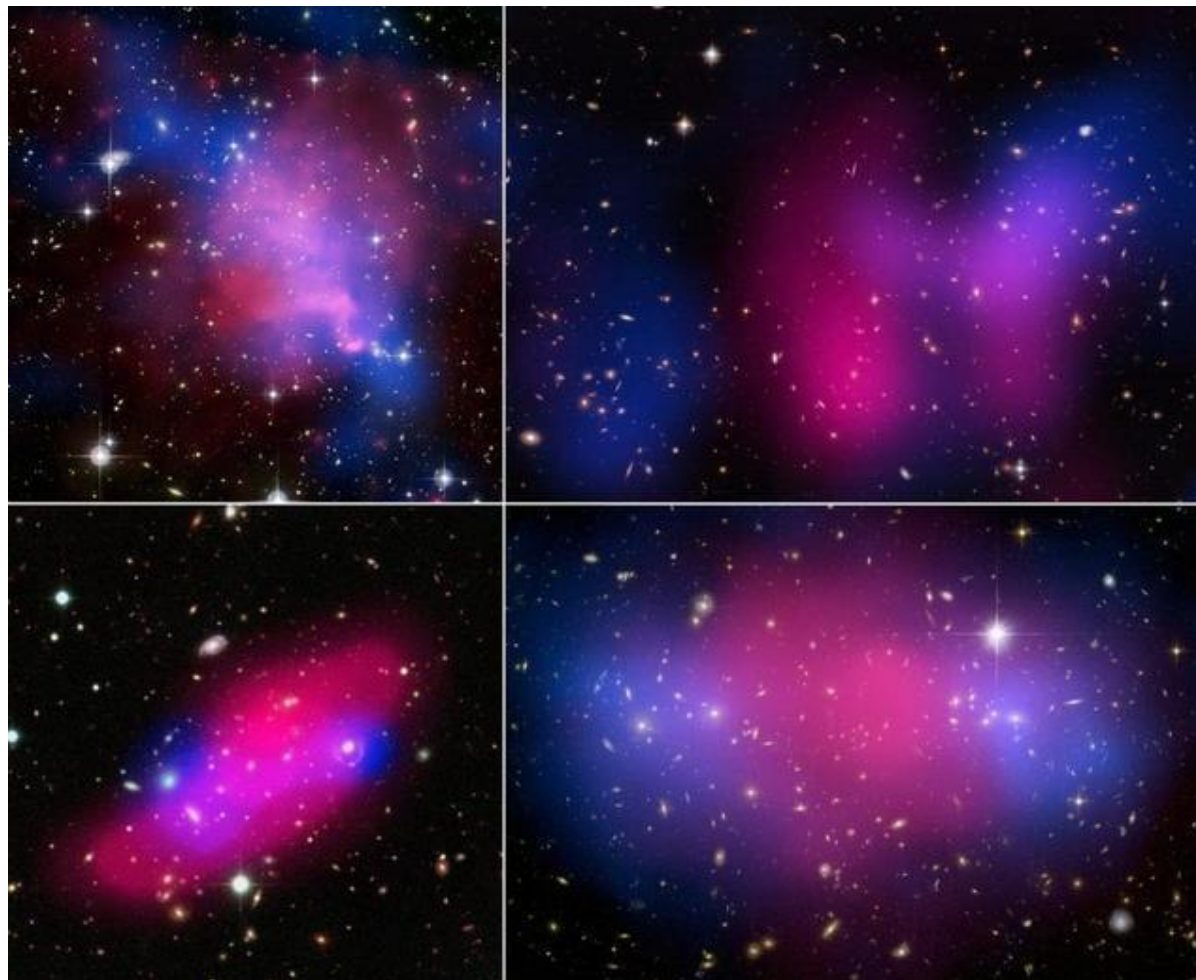
典型螺旋星系M33的旋转曲线和根据可见物质的分布预测的曲线（白线）

二、极端宇宙基本属性



子弹星系团1E 0657-56（子弹星系团是由两个相互碰撞的星系团形成），利用X射线和通过引力透镜对这一碰撞的观测，粉红色代表由两个星系团相撞而产生的高温气体所辐射的X射线，蓝色代表不可见物质。

二、极端宇宙基本属性



四个相互碰撞的星系团，显示x射线分布(粉红色)和引力质量分布(蓝色)之间的分离，表示暗物质

二、极端宇宙基本属性

- 宇宙膨胀：星系红移,星系在离我们而去，彼此之间也在相互远离，距离越远，逃离的速度就越快，这被称为哈勃定律。

- 哈勃常数 H_0 ：

$$\frac{1}{H_0} = \left(\frac{H_0}{72 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})} \right)^{-1} \times 13.6 \text{ Gyr.}$$

- 两个前提：

- 速度测量：谱线红移
- 距离测量：哈勃当初测量距离使用的标准烛光是造父变星。

二、极端宇宙基本属性

□ 宇宙加速膨胀与天文观测

廖恺, 朱宗宏

2015, 27(5): 31-39.

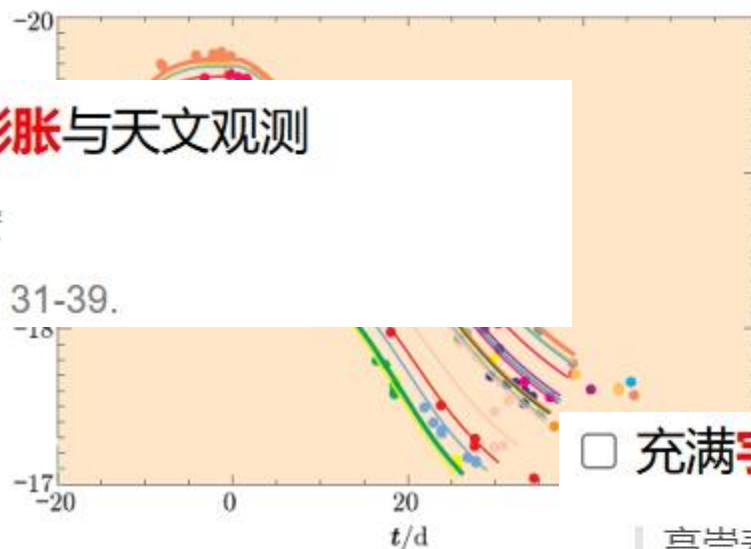
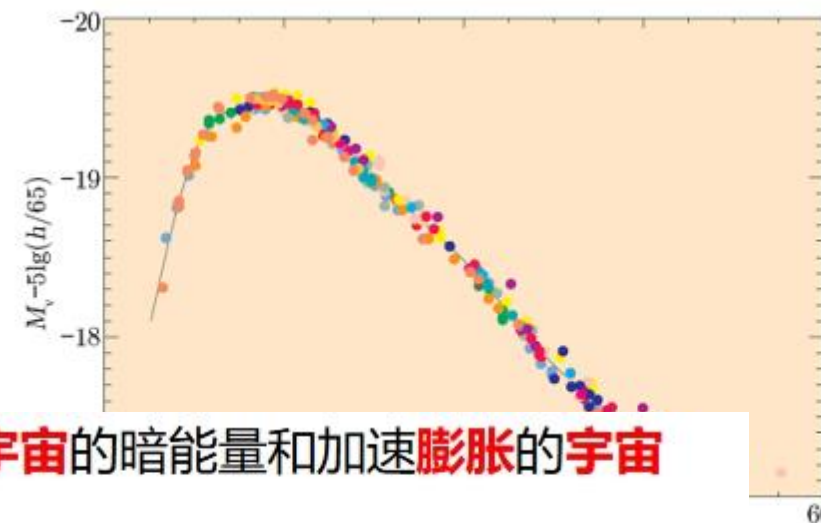


图 3 不同 Ia 型超新星的光变曲线



□ 充满宇宙的暗能量和加速膨胀的宇宙

高崇寿

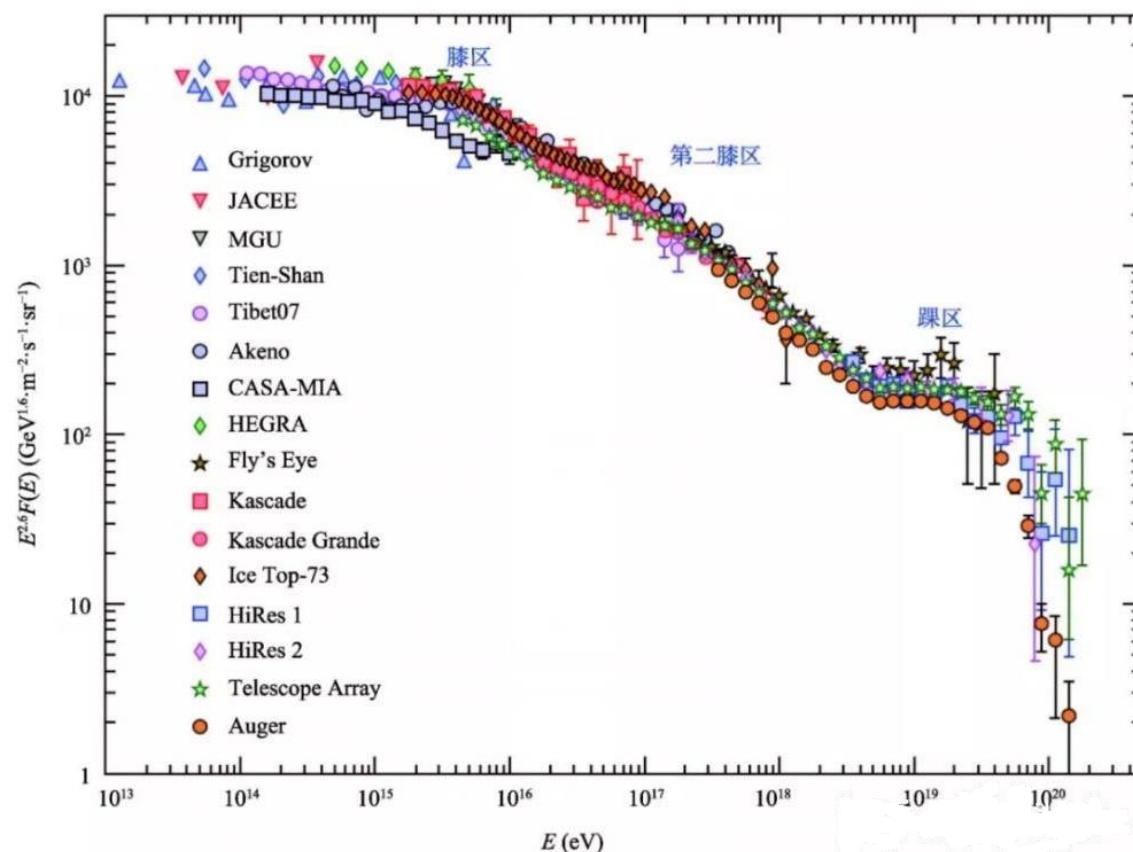
2016, 28(3): 31-37.

利用Ia型超新星的标准烛光关系, Riess et al.(1998)和 Perlmutter et al.(1999)发现宇宙相对于哈勃膨胀在加速膨胀:

宇宙中存在神秘的推动力, 可能以暗能量的形式存在。

二、极端宇宙基本属性

2) 极端能量：宇宙射线的起源和加速机制



二、极端宇宙探索计划

宇宙线成分的分辨和能谱测量是“膝”区研究的关键。

LHAASO项目第一次在银河系找到能量超过“膝”的宇宙线源，也就意味着有天体可以把宇宙线加速到这么高能量，说明银河系内天体的加速能量从“膝”以下升高到“膝”的10倍。

在膝区物理方面，LHAASO以前所未有的精度测量了“膝”区宇宙线能谱及其成分的平均对数质量，证明了“膝”区源于宇宙线的轻成分，即质子和氦。

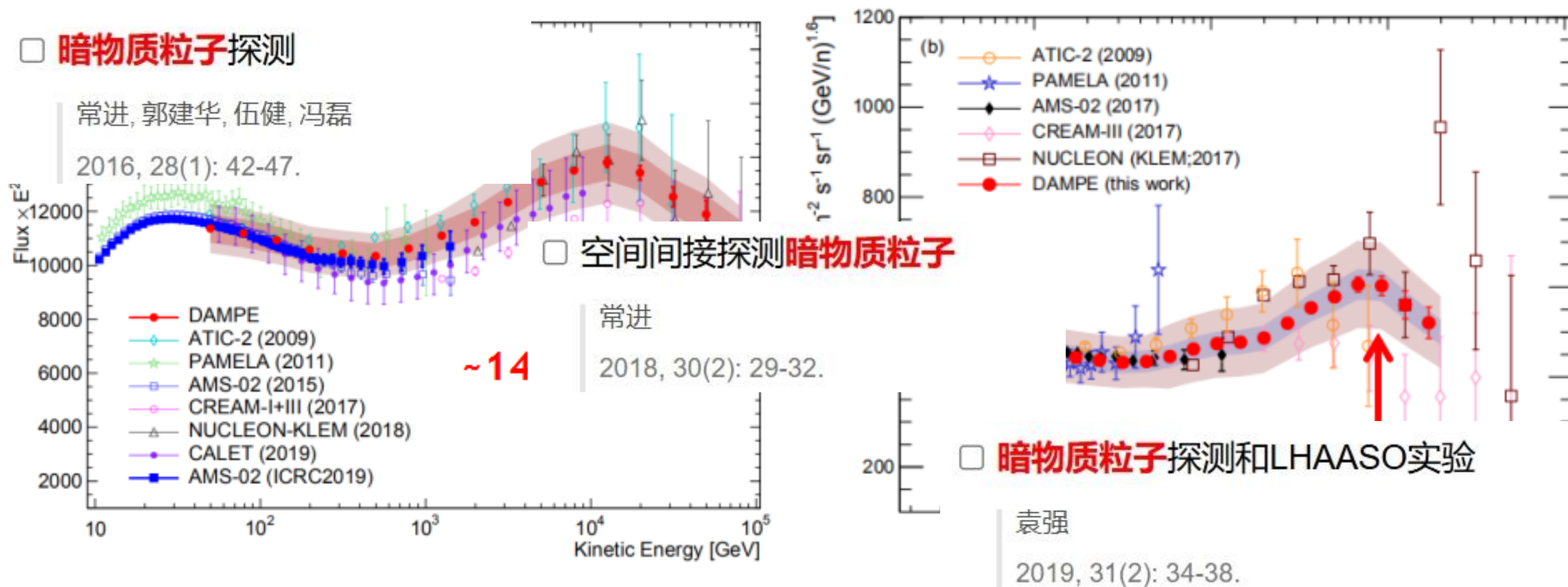
空间宇宙线直接探测实验，由于是原初宇宙线和探测器的直接相互作用，因此可以直接测量宇宙线的电荷、能量、质量等，可以区分不同成分的宇宙线。

暗物质粒子探测卫星“悟空”的结果表明，在“高能电子、伽马射线的能量测量准确度”以及“区分不同种类粒子成分”方面空间探测具有很强的能力。

2016年第一期

LHAASO项目介绍文章很多，
请在mp.ihep.ac.cn网站搜索

二、极端宇宙探索计划

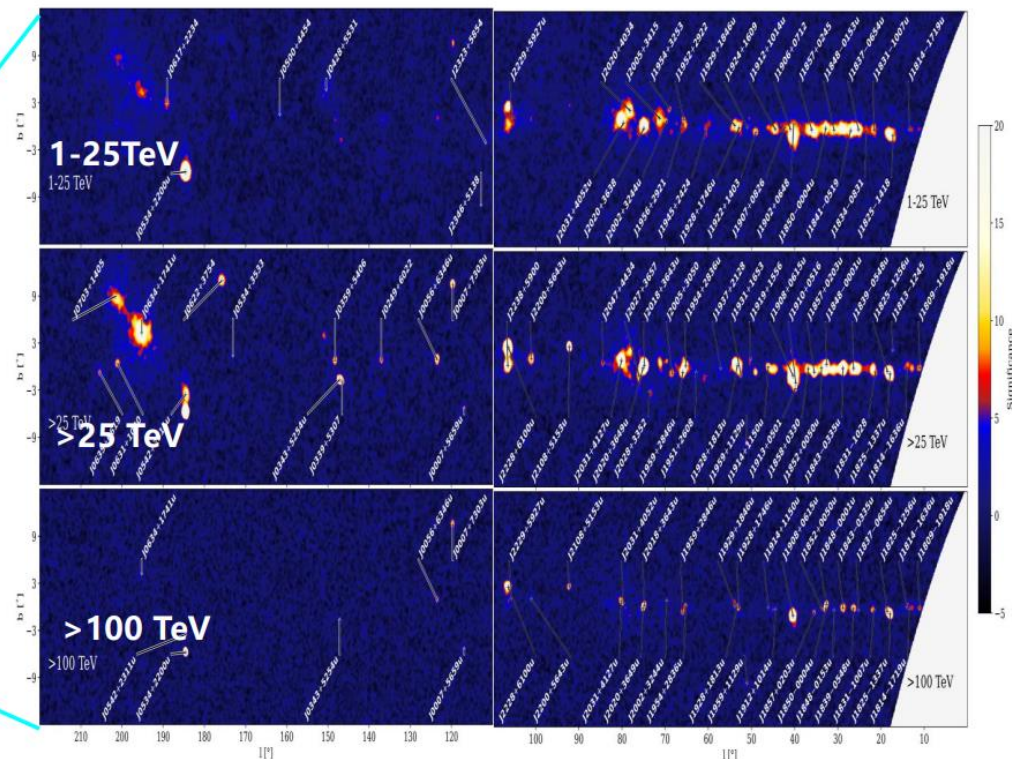
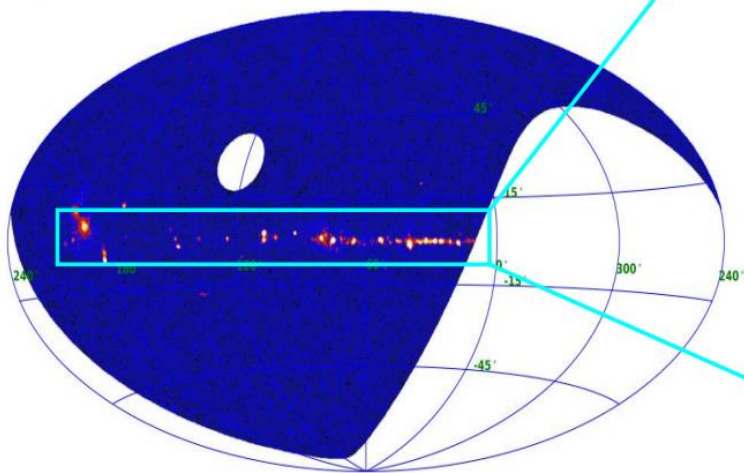


“悟空”号测量的40GeV-100TeV能段质子宇宙线能谱（左图红点）和70GeV-80TeV能段氦核宇宙线能谱（右图红点）

二、极端宇宙基本属性

3) 极端天体：LHAASO源表脉冲星风云、超新星遗迹、微类星体、年轻大质量星团

- 2021年开启超高能伽马天文 (>100 TeV, 12个超高能天体)
- 90个甚高能天体:32新发现
- 43个超高能天体



二、极端宇宙基本属性

在2017年9月22日, IceCube探测到一个能量约为 290TeV 的高能中微子事件(后面称为 IceCube-170922A), Science杂志把发现TXS 0506+056与高能中微子可能成协的研究工作评为2018年度十大进展之一。详见现代物理知识2019年第二期

□ 高能中微子天文

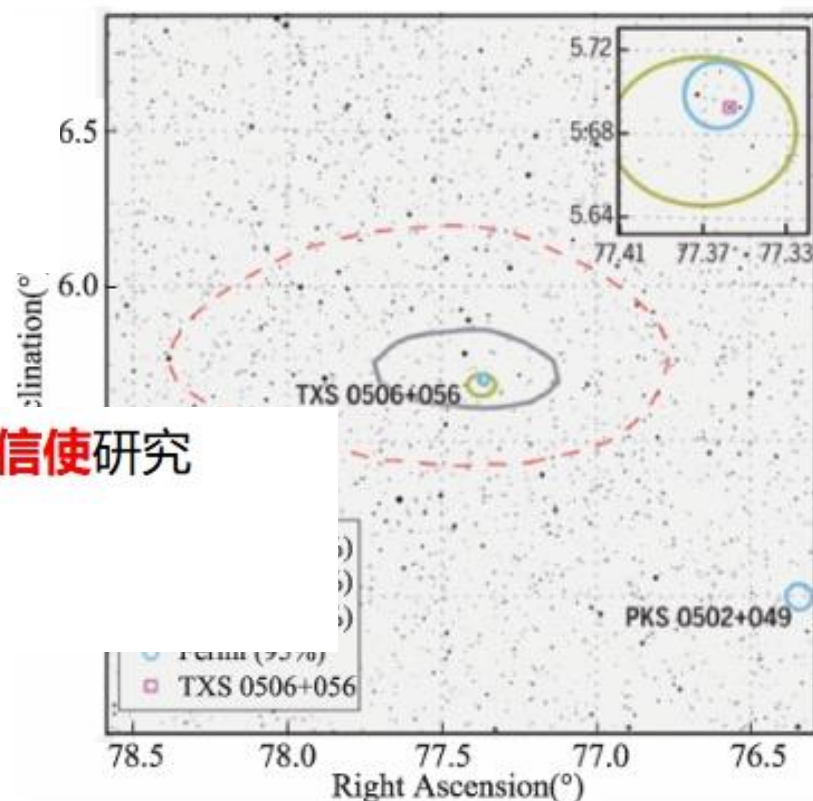
黎卓

2015, 27(6): 38-42.

□ 高能中微子与宇宙线的多信使研究

王祥玉, 薛瑞

2019, 31(2): 23-27.



二、极端宇宙探索计划

4) 极端引力： 黑洞能够提供更强的引力势和更显著的空间曲率，因此对广义相对论理论的检验将更加严格。黑洞附近的物质由于其高温、高密度和高速度，会产生强烈的X射线辐射(这也是发现黑洞的最佳手段之一)。

人类首次“看见” 位于室女座一个巨椭圆星系M87的中心的黑洞，，距离地球5500万光年，质量约为太阳的65亿倍，它的核心区域存在一个阴影，周围环绕一个新月状光环。

2019年4月10日，科学家们首次发布了M87黑洞的图像，并在此后持续开展对M87黑洞的观测研究。

二、极端宇宙探索计划



二、极端宇宙基本属性

5) 极端磁场：宇宙中的中子星表面具有宇宙中最强的磁场，其中“磁中子星”的表面磁场比实验室中人造最强的稳定磁场还要强百万亿倍，是检验这一量子电动力学预言的最佳宇宙实验室，而高灵敏度的空间X射线偏振望远镜将是进行这种检验的最佳实验仪器。

恒星演化后期发生超新星爆发，中子星在超新星暴发中产生，同时形成超新星遗迹。

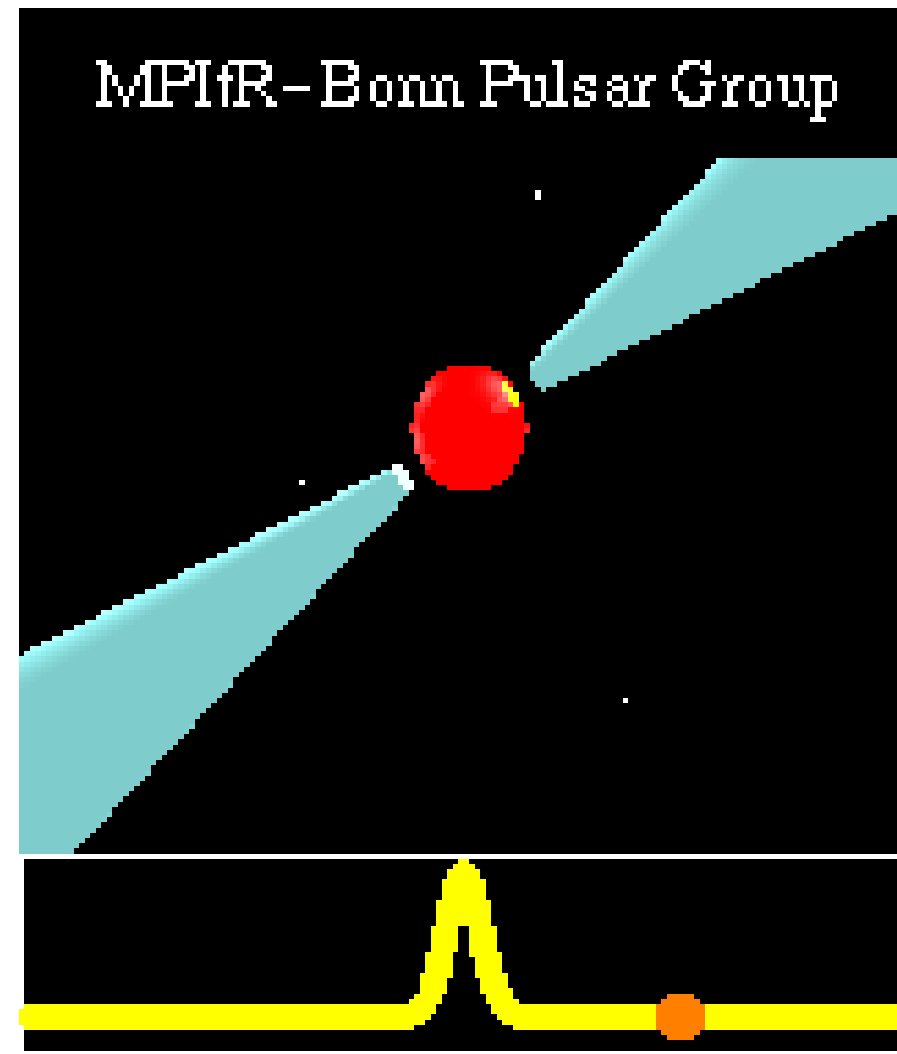
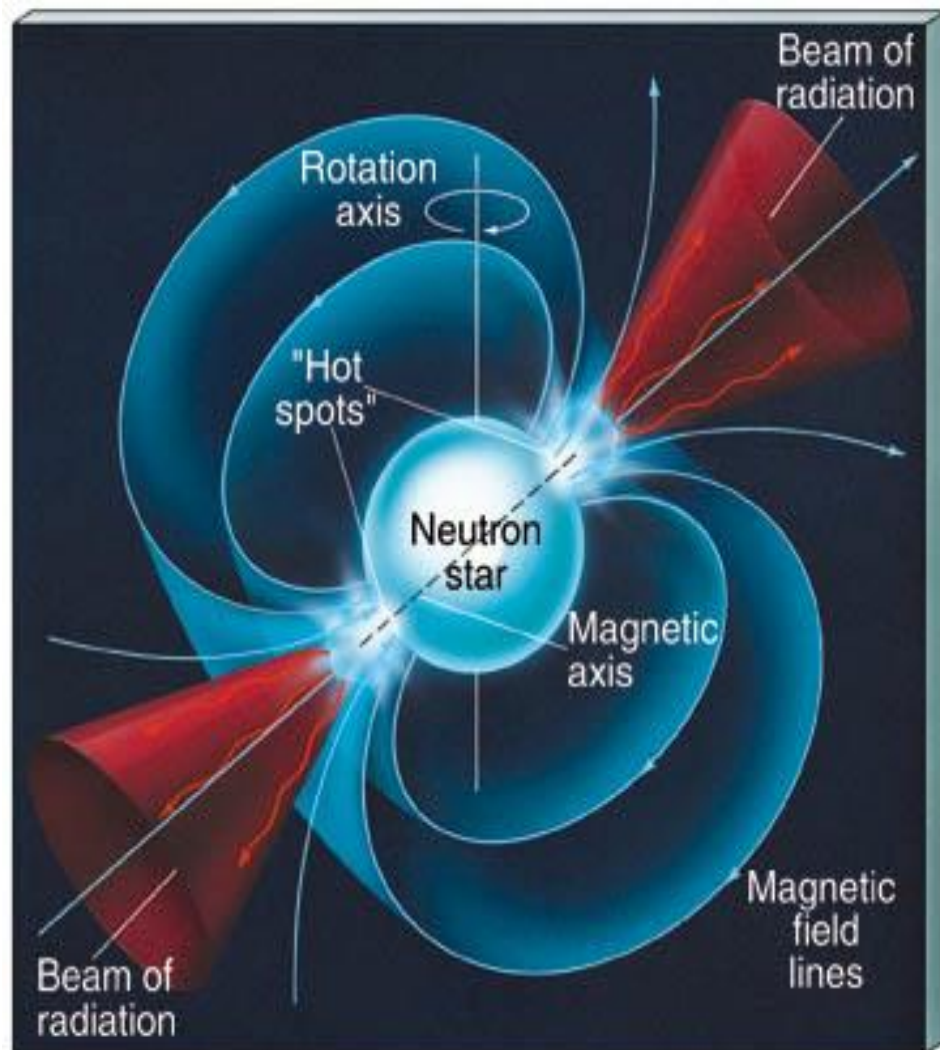
旋转的中子星发出脉冲，又叫脉冲星！

脉冲星上有宇宙中最强磁场，磁场强度 $B \sim (10^8 - 10^{14} \text{ G})$

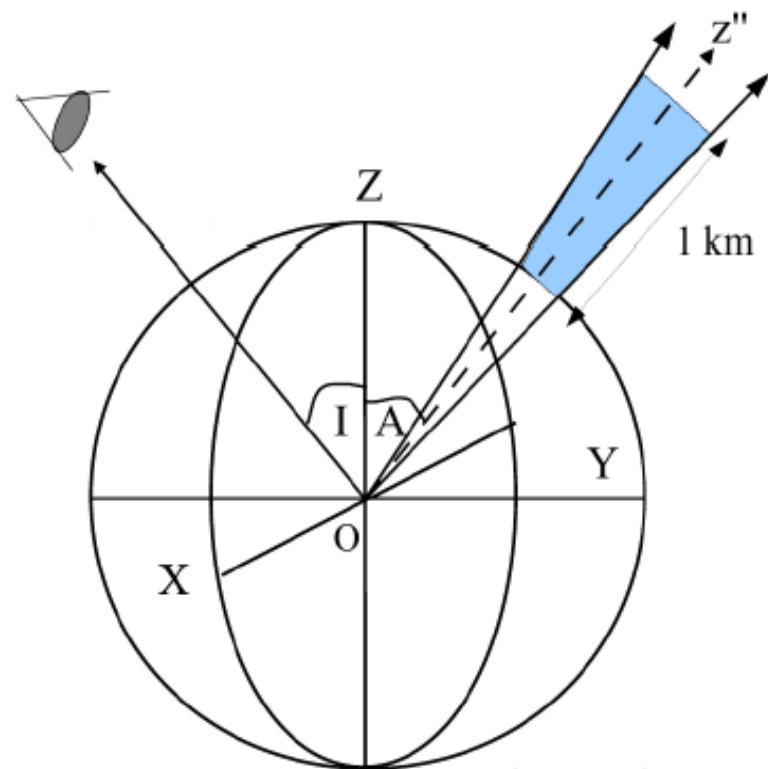
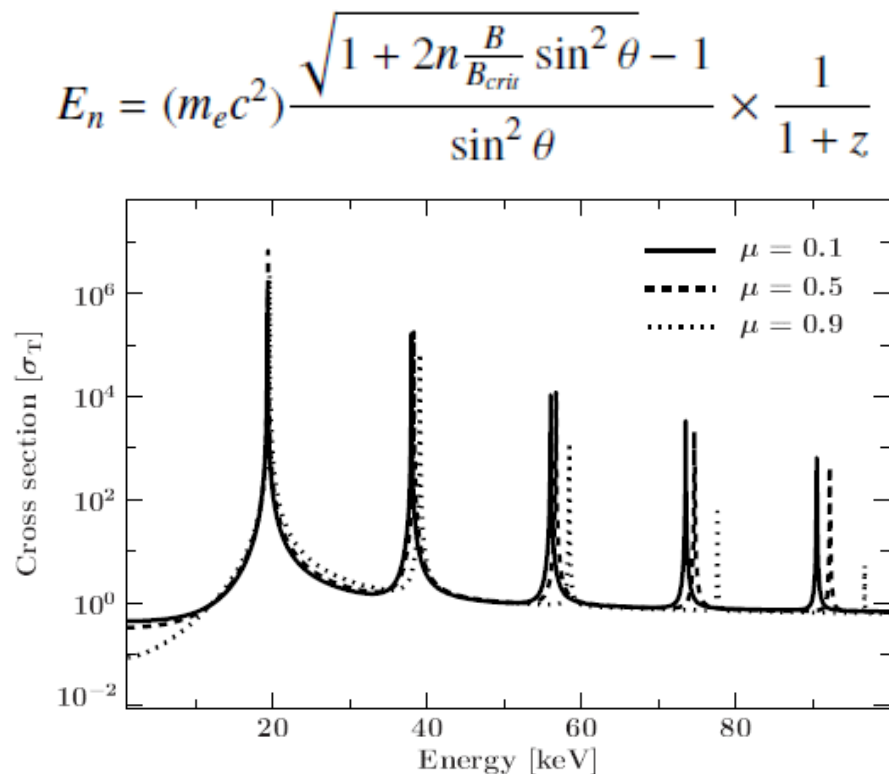
脉冲星具有最高的物质密度（原子核 10^{14} g/cm^3 ）

2022年第3期
脉冲星专题

二、极端宇宙基本属性



二、极端宇宙基本属性



在强磁场中，高能电子围绕磁力线回旋运动呈现出量子态。光子被位于量子态的电子吸收，会形成回旋吸收线。回旋吸收线的能量直接对应磁场强度，这是目前直接测量中子星磁场的唯一方法。

二、极端宇宙探索计划

6) 极端密度：宇宙中目前的“极端密度”（但是最低温度）只存在于中子星的内部。但是所谓的“中子星”内部到底主要是由中子物质还是由夸克物质组成的，目前仍然存在很大的争议，也被称为是中子星物理的“终极问题”。通过对具有“极端密度”的中子星的X射线高精度时变、能谱和偏振观测，有望在理解非微扰量子色动力学的关键问题的同时，回答中子星到底是“中子”星还是“夸克”星这个重要科学问题。

中子星是由 10^{57} 量级的中子和 10^{55} 量级的质子组成的星体，也是一个大原子核。这个原子核的半径约为10公里，比喜马拉雅山的高度还要大一些，它的质量比地球要重约五十万倍，它的密度与常见原子核的密度差不多，甚至更高，约为每立方厘米三亿吨，这是一个宏观大小、宇观质量的巨大原子核。

二、极端宇宙基本属性

中子星结构：

大气层

热X射线辐射产生于此

外壳层

固体，富中子核

内壳层

超流中子

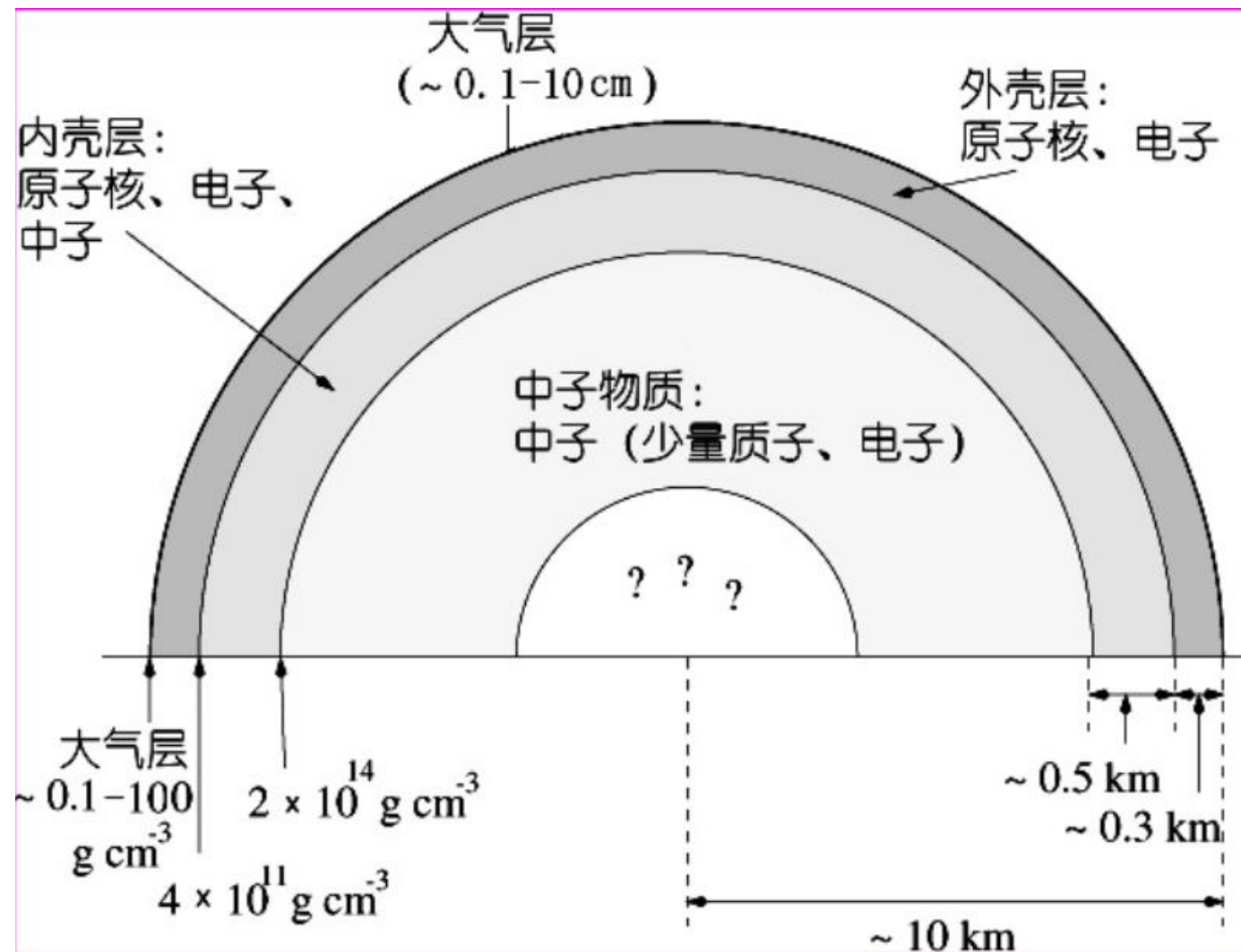
钉扎过程：glitch?

中子物质区

超流n、超导p

中子星的核

夸克物质相？



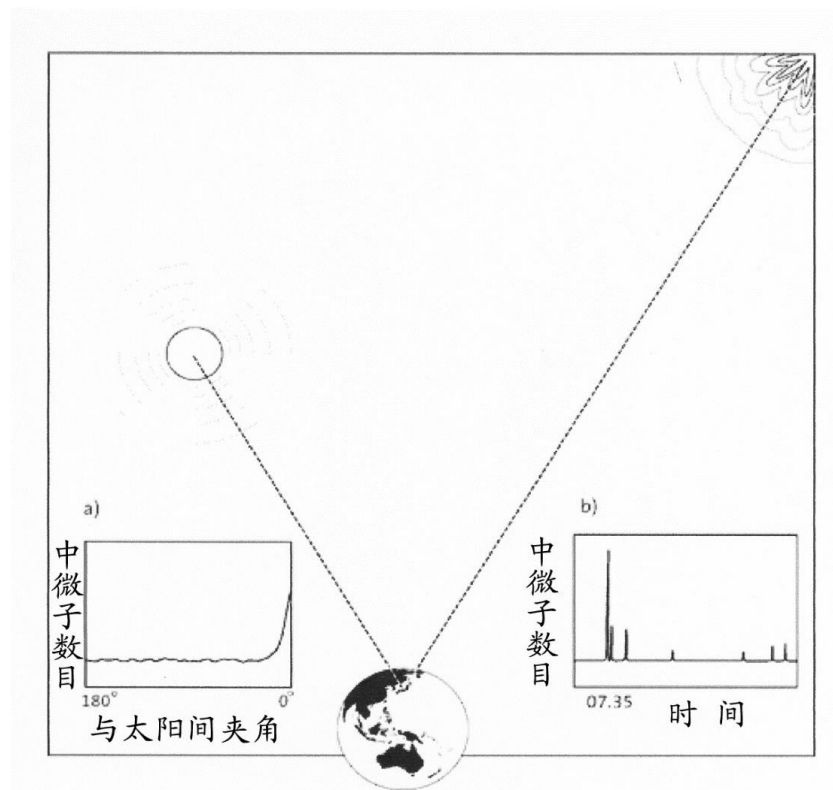
二、极端宇宙基本属性

1987年2月23日格林尼治时间10点35分，距地球最近的河外星系大麦哲伦云中爆发一颗超新星（SN1987A）。这是400年来第一次有如此近的超新星爆发。小柴昌俊发现在当天7点35分左右总共捕获了来自遥远超新星的12个中微子。这是人类第一次观测到太阳以外的宇宙中微子。

当恒星核心的核能源用尽之后，由于失去维持恒星平衡的辐射压，在自身引力作用下恒星将发生塌缩，塌缩的最初阶段会使星球内核温度激增至100亿摄氏度，在如此高的温度下，**质子与电子发生反应转变为中子并放出大量中微子**， $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ；同时当塌缩的核心密度变得很高，达到 10^{11} 克/厘米³时，物质对于中微子变得不透明，这时有 $e^+ + e^- \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$ ，形成大量的热中微子。

超新星爆发主要以中微子爆发的形式释放能量。

二、极端宇宙基本属性



□ 2002年**诺贝尔**物理奖

宋黎明, 陆埏

2003, 15(02): 6-9.

小柴昌俊在日本神冈建造的大型中微子探测器得到的实验结果。a) 在对应太阳的方位上中微子数目有明显的超出，并证实了戴维斯的结论。b) 1987年2月23日大麦哲伦云中超新星爆发（编号1987A）时，神冈的实验装置探测到了12个中微子信号，中微子信号到达的时间约为世界时1987年2月23日7时35分。

和天体物理相关的NOBEL奖

- 1967年----对核反应理论的贡献，建立了恒星能量来源的理论
- 1974年----射电综合孔径技术、脉冲星的发现
- 1978年----宇宙微波背景辐射的发现
- 1983年----恒星结构和演化（包括白矮星结构）、元素合成理论
- 1993年----脉冲双星的发现（间接验证了广义相对论）
- 2002年----宇宙中微子、宇宙X射线掠射观测
- 2006年----宇宙微波背景辐射黑体谱以及各项异常
- 2011年----通过观测超新星距离发现宇宙加速膨胀
- 2017年----直接探测到引力波
- 2019年----现代宇宙学和系外行星搜寻方法
- 2020年----黑洞存在的证明与发现

□ 天体物理与诺贝尔奖

陆埏

2023, 35(2): 15-22.

每年的Nobel物理奖解读

三、我国的空间探测计划

我国首个国家空间科学中长期发展规划，梳理出了11个亟待全球空间科学界携手率先突破和回答的重大科学前沿，具体内容包括“一黑”、“两暗”、“三起源”和“五表征”：

“一黑”旨在探索以黑洞为典型代表的致密天体及其极端条件下的物质运动规律。

“两暗”指迄今人们对其本质知之甚少的暗物质、暗能量。

“三起源”聚焦宇宙起源、太阳系起源和生命起源。

“五表征”探寻地球系统、地月空间、太阳系和系外世界的特征和运行规律，以及太空环境中的物质运动和生命活动规律。

未来5~10年，既有多项任务聚焦同一重大前沿，也有一项任务贡献多个前沿突破，中小型任务亦可为后续大型任务先导探路。

三、我国的空间探测计划

2011年，中国科学院空间科学先导专项首批（下称“专项一期”）启动，目标是通过自主和国际合作的科学卫星计划，实现科学上的重大创新，带动相关高技术跨越式发展。

专项一期在“十二五”期间开展了暗物质粒子探测卫星“悟空”、“实践十号”返回式科学实验卫星、量子科学实验卫星“墨子号”以及硬X射线调制望远镜卫星“慧眼”4颗科学卫星的研制工作，正式建立起了中国第一个科学卫星系列。

2016年8月，空间科学卫星系列入选《“十三五”国家科技创新规划》。为继续推动中国空间科学发展，中科院实施了空间科学先导专项（二期），部署的科学卫星工程包括“爱因斯坦探针”、“夸父一号”、中国科学院—欧洲空间局联合研制的太阳风—磁层相互作用全景成像卫星“微笑计划”、引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星“怀柔一号”等4个新的空间科学卫星任务。

四、高能所探测项目简介

**使命
定位**

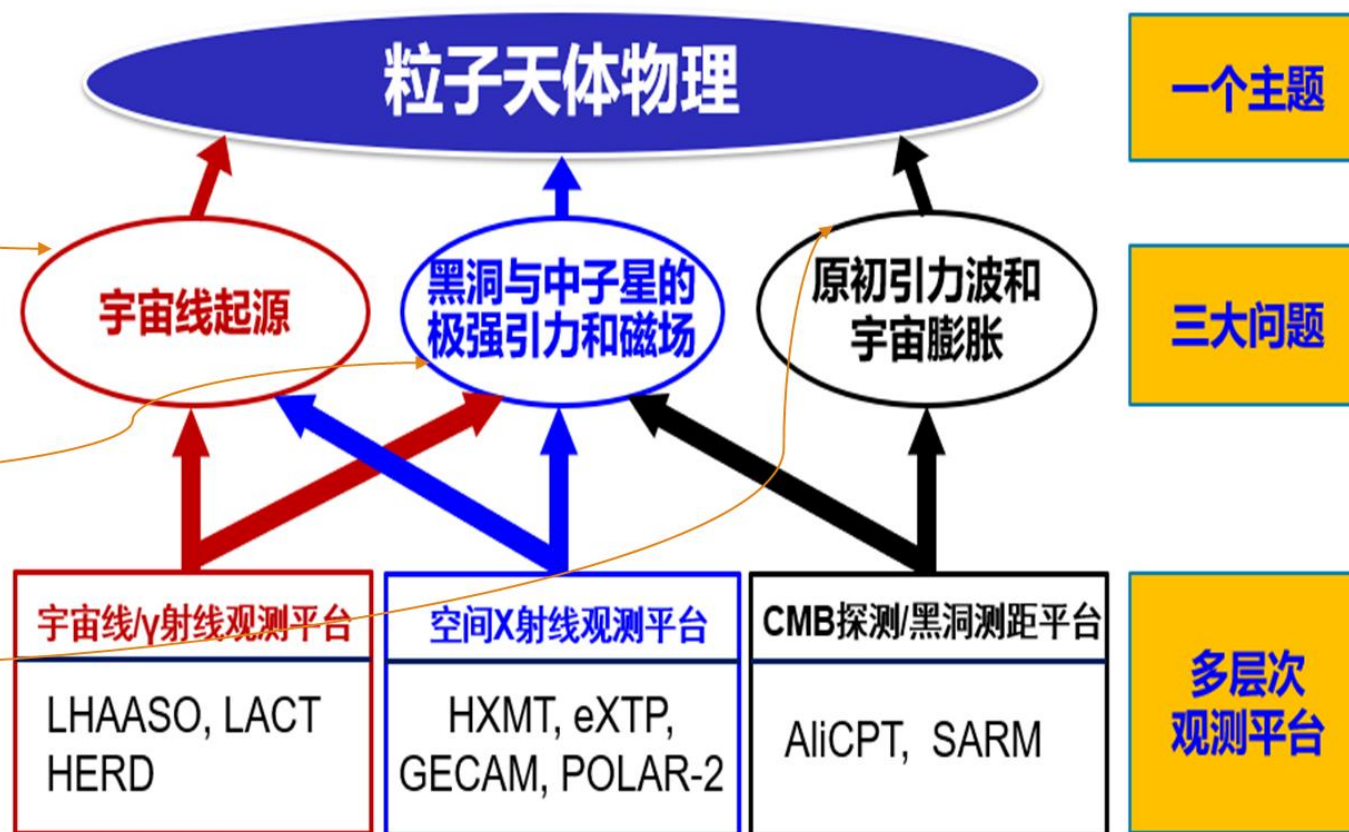
基于独特的天地立体多信使探测能力，建设国际领先粒子天体物理研究机构，破解宇宙线起源等科学难题，满足深空探测自主脉冲星导航等国家重大需求

2021年Science
125个重大问题

宇宙线的起源是
什么

为什么存在黑洞
广义相对论正确吗
致密星及物质结构

大爆炸从何开始
宇宙何时消亡，它会
继续膨胀吗



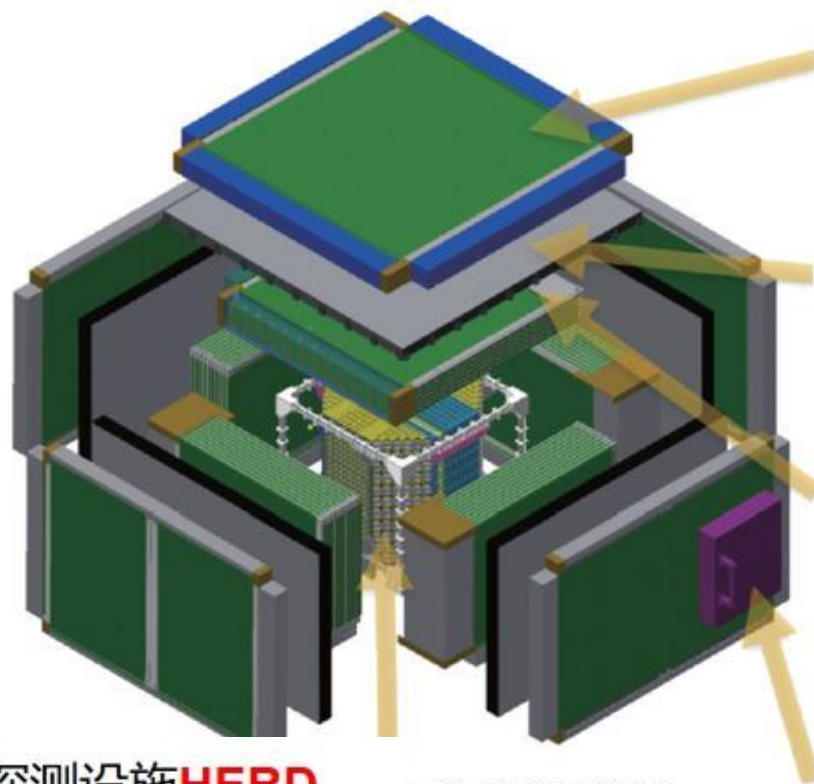
四、高能所空间项目简介

中国空间站高能宇宙辐射探测设施 (HERD) 项目是计划安装在中国空间站上的空间天文和粒子天体物理实验。HERD 项目在同等的时间内会取得比传统载荷高很多的观测显著度。在轨观测5 年可以完全覆盖宇宙线能谱的“膝区”，实现精确的成分测量，回答其起源与传播等基本问题。

HERD 由5 种不同的探测仪器构成：

- (1) 位于中心由7500 个LYSO晶体立方块构成的三维立体量能器(CALO);
- (2) 包裹量能器除底面外5 个面的光纤径迹仪(FIT);
- (3) 覆盖5 面的塑料闪烁体反符合探测器(PSD);
- (4) 为避免宇宙线的电荷碎裂效应，在最外围包裹硅电荷探测器(SCD);
- (5) 穿越辐射探测器(TRD)，用于TeV量级宇宙线粒子的能量标定。

四、高能所空间项目简介



硅电荷探测器
电荷测量

反符合探测器
伽马识别
电荷测量

光纤径迹仪
径迹测量
伽马转换和方向

穿越辐射探测器
TeV粒子标定

三维成像量能器
能量测量
粒子鉴别

□ 中国空间站高能宇宙辐射探测设施HERD

毕效军, 董永伟

2020, 32(5): 40-44.

四、高能所探测项目简介

检验极端引力、极端磁场和极端密度条件下的基本物理规律，可以通过高精度、多手段(时变、能谱、偏振)的X射线观测实现。eXTP计划配置如下四种观测仪器：

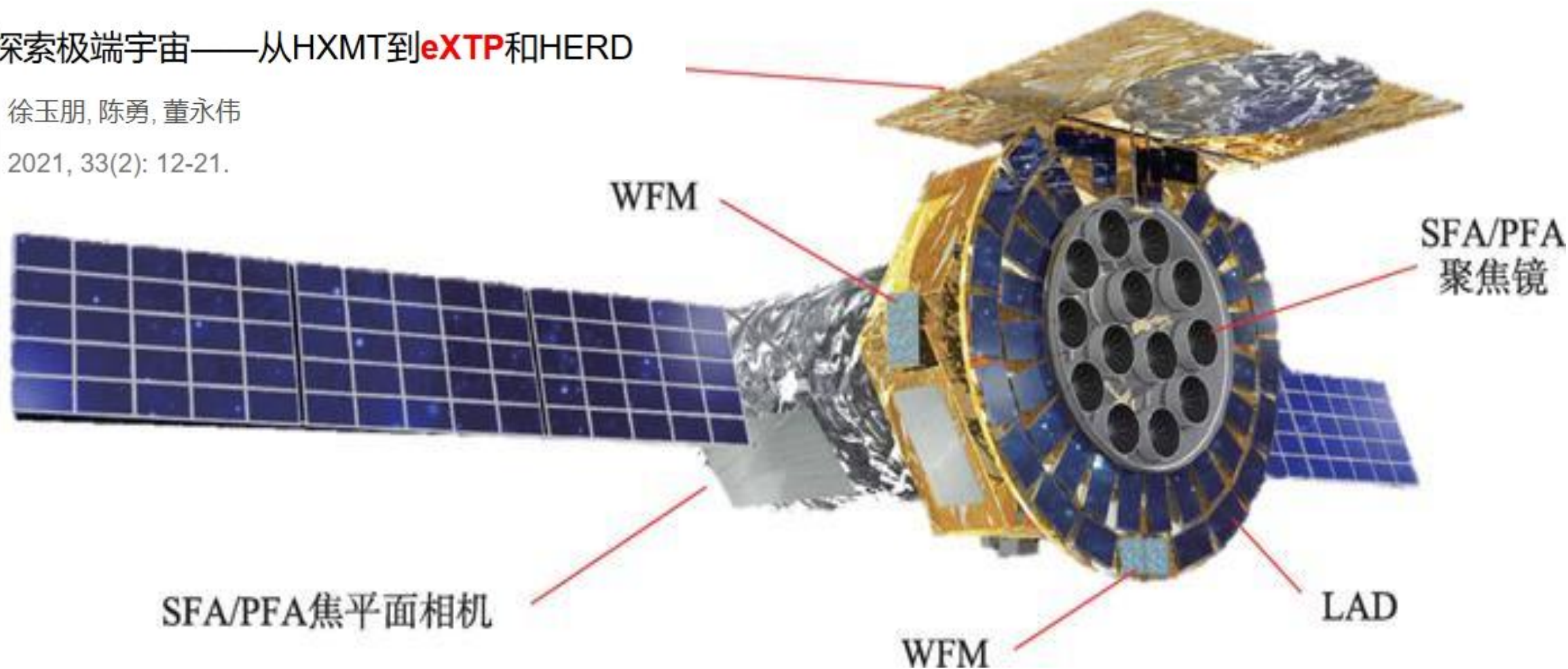
- (1) 能谱测量X射线聚焦望远镜阵列(SFA)；
- (2) 偏振测量X射线聚焦望远镜阵列(PFA)；
- (3) 大面积X射线准直望远镜(LAD)；
- (4) 广角监视器(WFM)，采用位置灵敏型大面积硅漂移探测器配合二维编码板对爆发天体进行定位。

四、高能所探测项目简介

□ 探索极端宇宙——从HXMT到eXTP和HERD

徐玉朋, 陈勇, 董永伟

2021, 33(2): 12-21.



四、高能所探测项目简介

当代宇宙学认为宇宙始于暴胀，广义相对论预言，暴胀过程中时空剧烈的膨胀将产生原初引力波，其物理本质是暴胀过程中时空本身的量子涨落。

暴胀预言的原初扰动为高斯随机场，分布于整个宇宙当中，并不局限在某个特殊的领域，因此，原初引力波是一类背景引力波。

□ 原初引力波与阿里探测计划

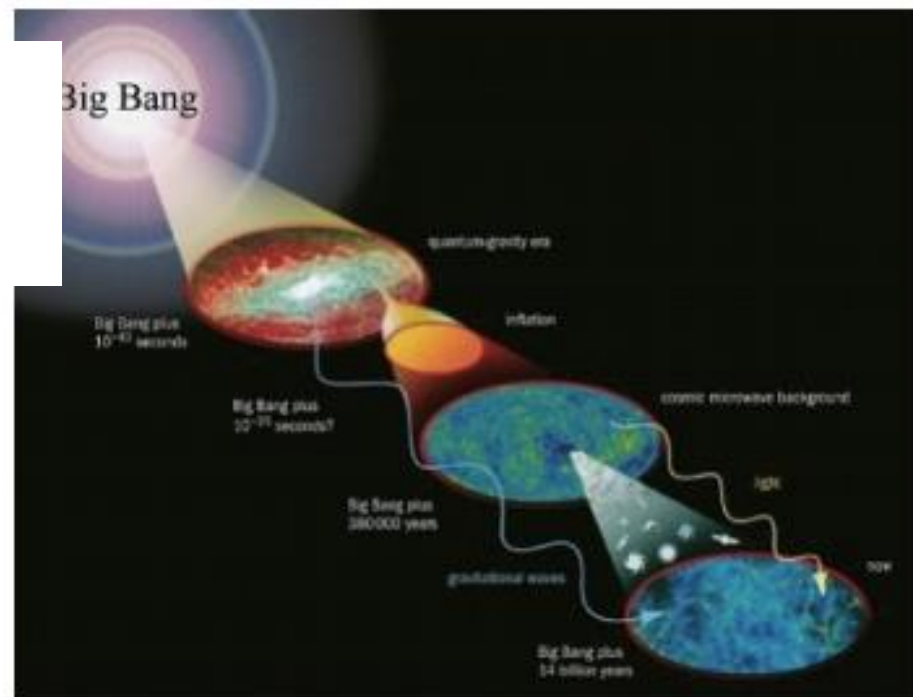
张新民, 苏萌, 李虹, 李明哲, 蔡一夫

2016, 28(2): 3-9.

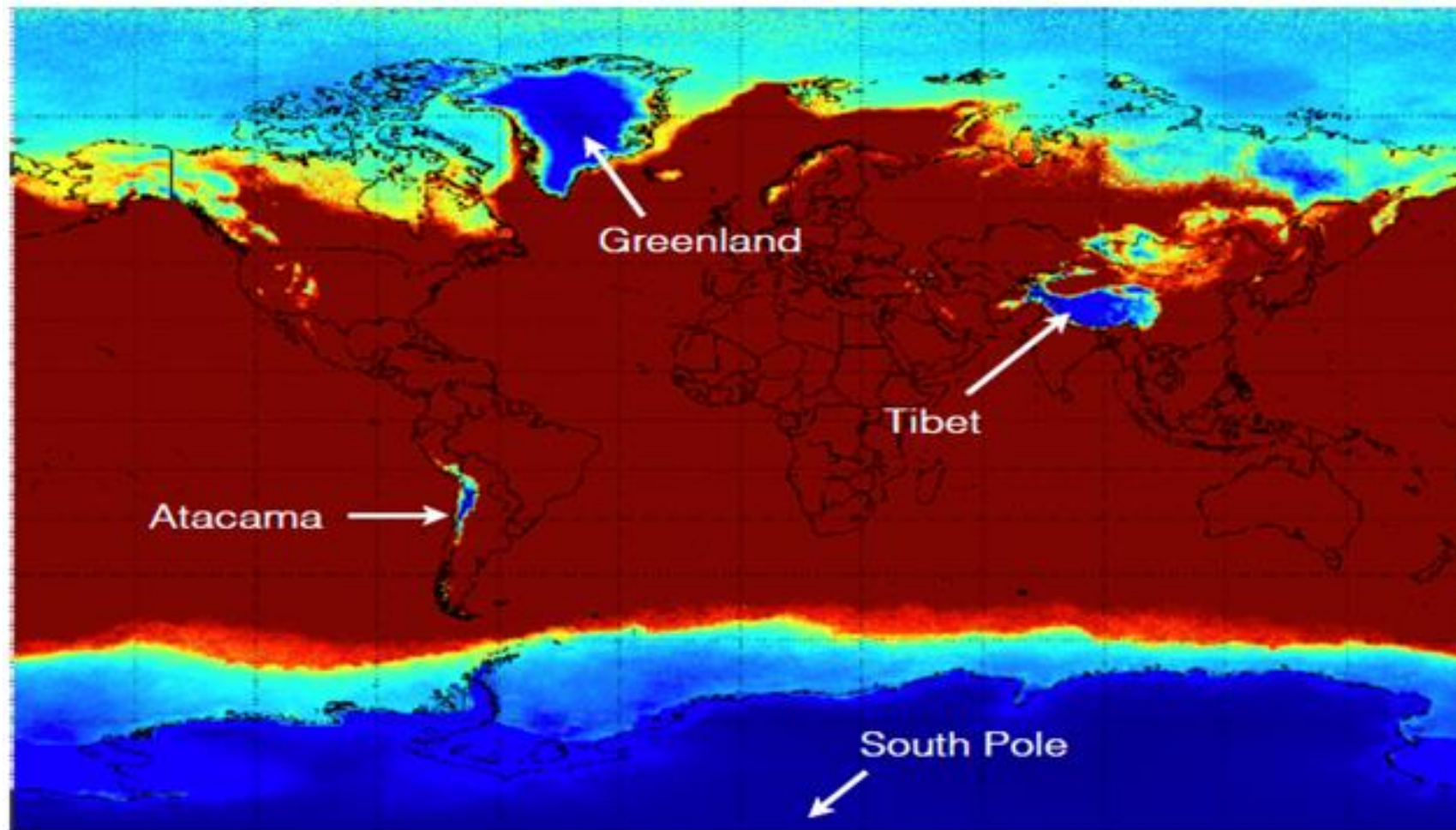
□ 阿里原初引力波探测计划

张新民

2024, 36(1): 22-25.



四、高能所探测项目简介



海拔5250米，北半球最好的微波背景辐射观测点，将与南极极点、智利阿塔卡马一起为国际三大基地

五、总结

极端宇宙的研究已经和基础物理联系在一起，它的研究促进了对黑洞、暗物质、暗能量、致密天体和极端条件下物理过程的了解，在宇宙中找到了天然的实验室。另一方面，在天体的极端条件下，基本的物理过程和规律将起着更为显著的作用，通过对天体的研究，有可能发现新的物理过程和规律。

极端宇宙联系着极大和极小两种尺度的物理规律，可以通过高精度、多手段（时变、能谱、偏振）对其开展探测研究，其研究手段在向全波段、多信使的方向发展。

我国将会有一批旗舰级的项目开始工作，探测能力将会有很大提升，也将迎来极端宇宙研究的黄金时代。