



中国科学院理论物理研究所

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences

开放 交融 求真 创新



# “两暗一新”、机遇与挑战

## 973项目启动会议

吴岳良

中国科学院理论物理研究所

中国科学院卡弗里理论物理研究所

中国科学院理论物理前沿重点实验室

2010.03.18-19

# “两暗一新”

暗物质、暗能量、新理论

- 现状和意义
- 机遇与挑战
- 基础与展望

# 现状和意义

我们每个人都曾有过仰望天空的经历和感受，尤其在宁静的夜晚：

仰望天空、默默沉思、总会自问：

宇宙是由什么组成？又是如何构成？  
宇宙是怎么起源？又是如何演化？

# 仰望天空



# 所有已知物质都是由基本粒子组成

- 希腊思想家恩培多克 (Empedocles) 率先提出四元素说:

陆地、空气、水、火

- 中国先哲认为物理世界的基本组成为五元素说:

土、木、金、火、水



空气、水、火、土

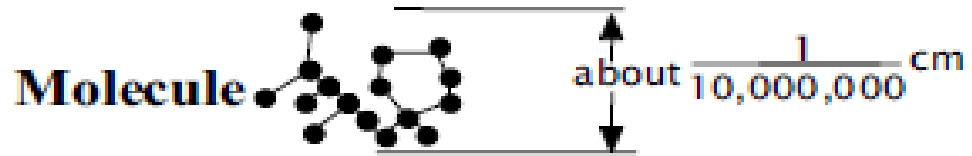
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
I      II      III The Generations of Matter			

- 粒子物理学家已经发展出一个称为“标准模型”的理论: 能解释数以百计的粒子和复杂的作用力。
- 世界万物不论从银河、山川到分子都是由夸克和轻子构成的

6 种夸克      如组成中子和质子的上、下夸克  
6 种轻子      大家熟知的轻子就是电子  
4 种传播子      传递相互作用的粒子, 像光子等

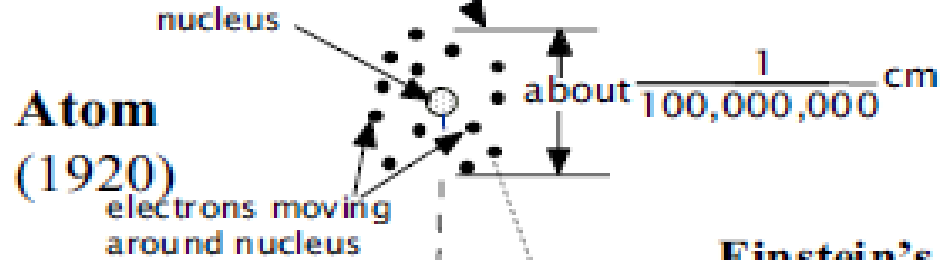
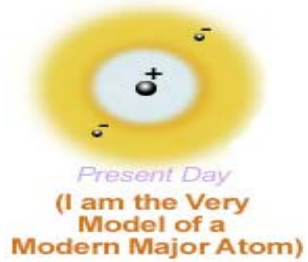


分子

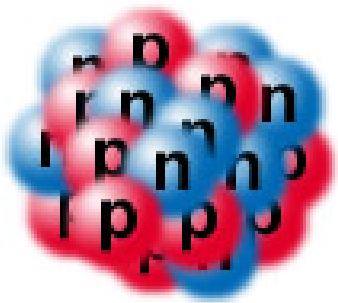


1900

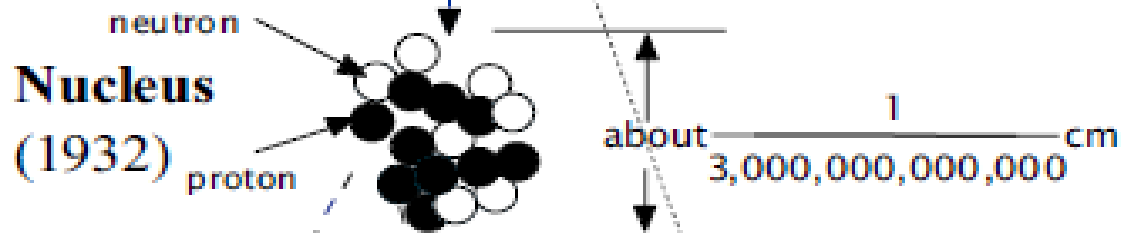
原子



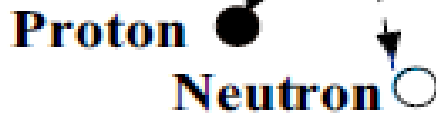
Einstein's decisive work was before 1925



核子



质子 中子



about  $\frac{1}{10,000,000,000,000}$  cm

**Electron (1900)**



The Proton and Neutron,  
Unlike the Electron,  
Are Not Elementary Particles

质子 中子

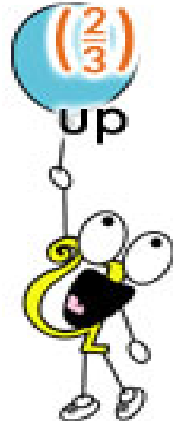
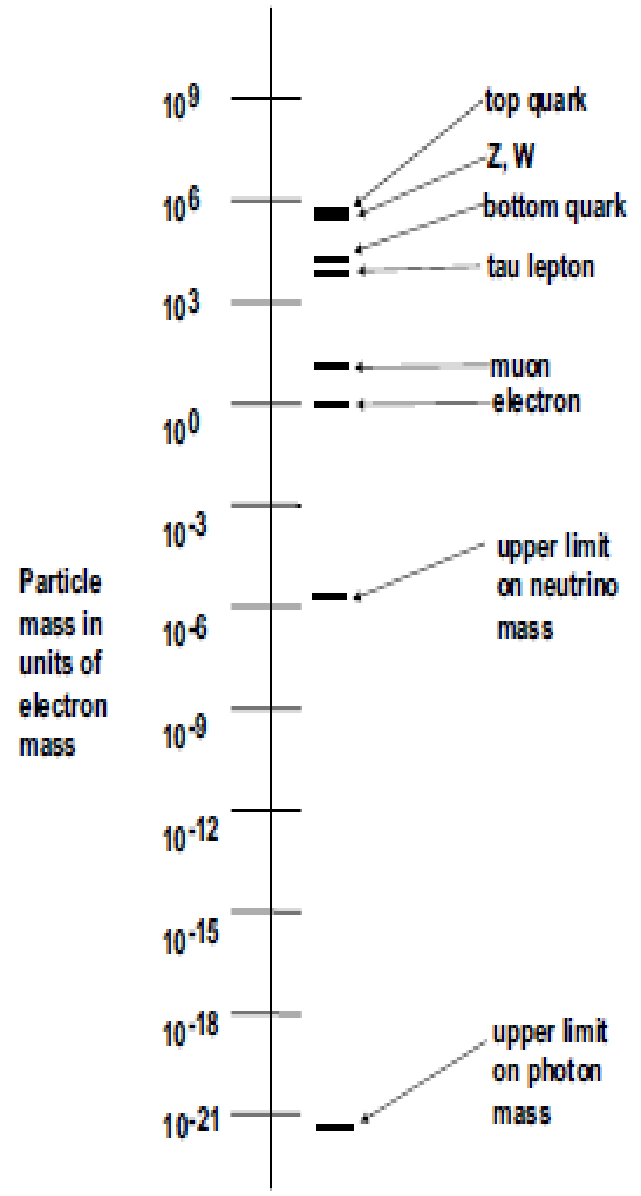


Fig  
qua

f the

夸克

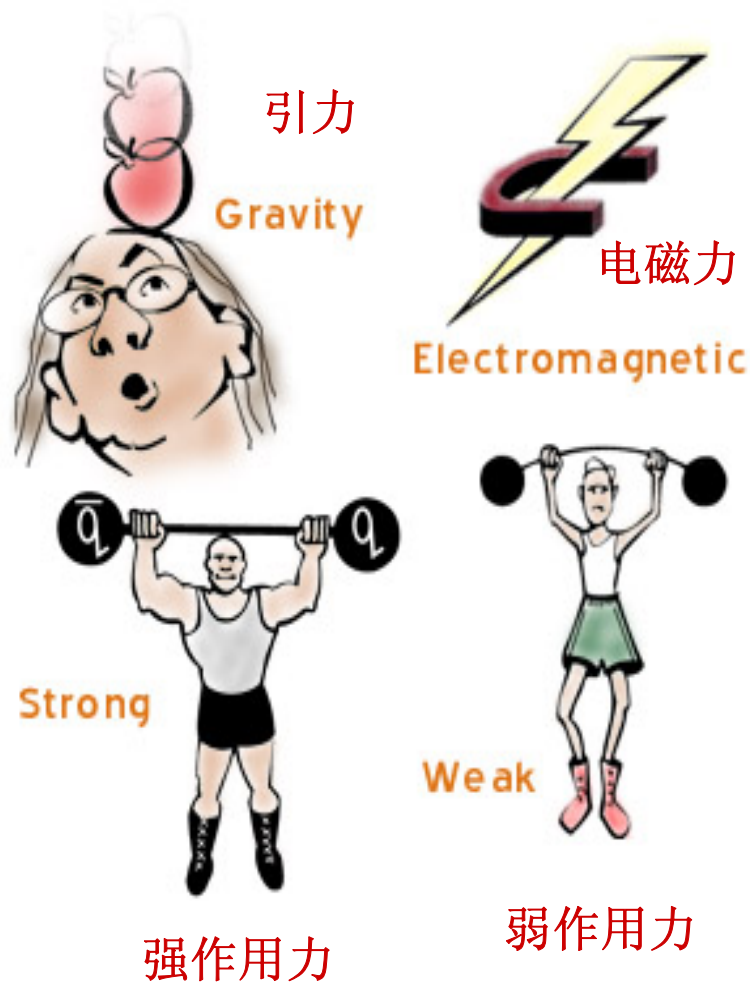
6 种夸克



• Nuclear force: it holds the nucleus together and is also called the strong force.

# 所有已知物质都是靠基本作用力结合而成

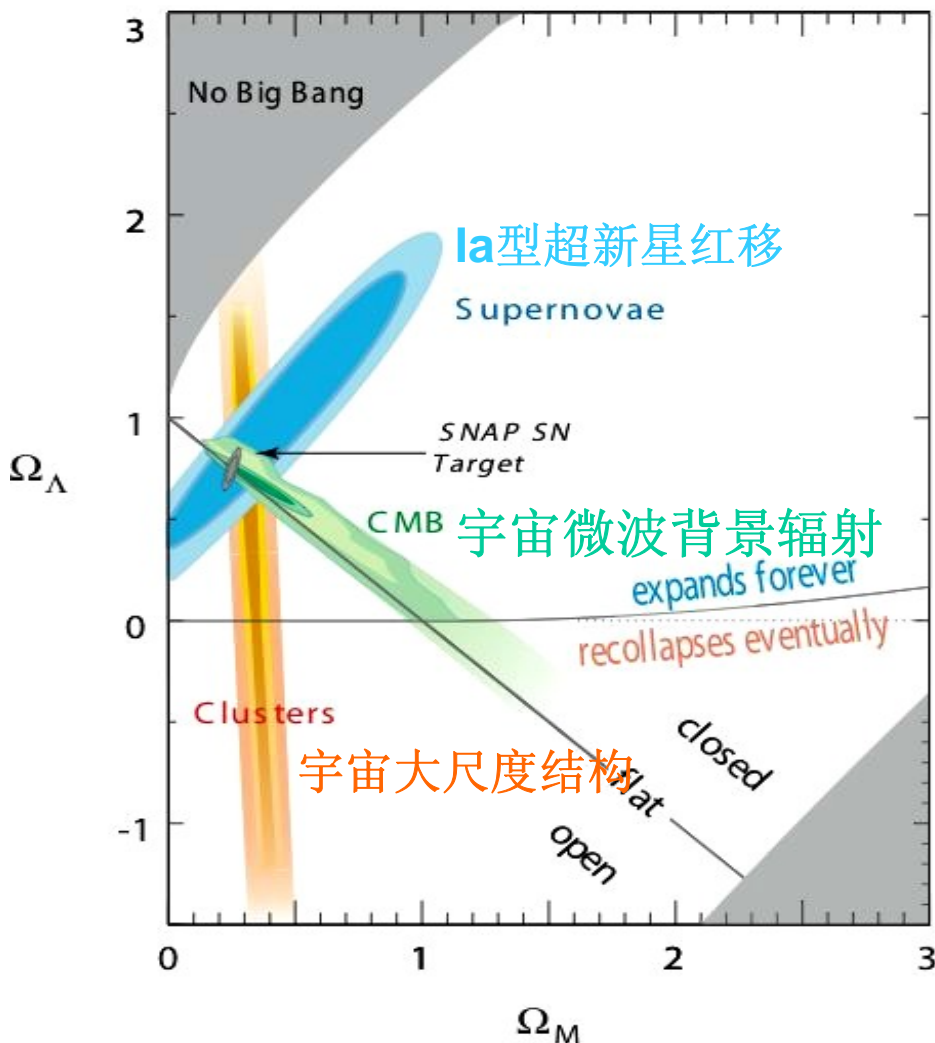
- 我们所生活的宇宙，因为基本粒子的相互作用而存在，这些作用力包括了吸引与排斥力、衰变和湮灭。
- 在粒子之间有四种作用力：  
引力、电磁力、弱作用力、  
强作用力  
世界上所有的力都可以被归纳成这四种相互作用力！
- 事实上，任何你能想到的力 ——  
摩擦力、磁力、万有引力、原子核衰变等等，都是由这四种基本相互作用力之一所引起的。





# 粒子天体宇宙学观察

暗  
能  
量



➤ 随着越来越多和越来越精确的宇宙学数据的获得，暗物质暗能量存在的证据变得越来越清楚。

➤ 伴随着一系列更高精度的天文学观测实验的实施，预示着宇宙学研究的黄金时代已经开启。

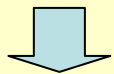
暗物质

# 现代宇宙学模型

大爆炸



暴胀



Universe  
宇宙

## 宇宙组成

Dark Energy  
暗能量 ~70%

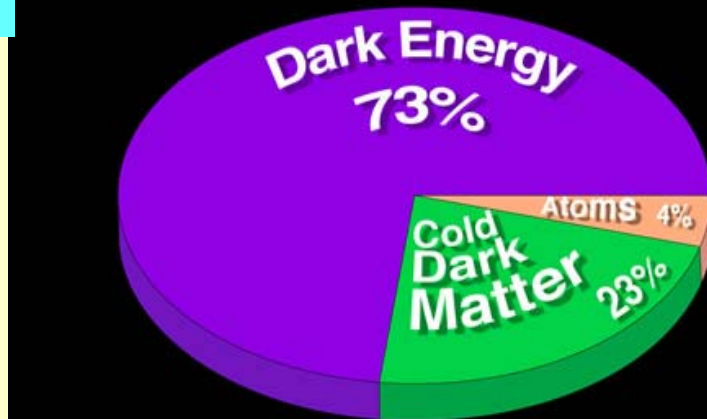
Matter  
物质 ~30%

Dark Matter  
暗物质 90%

Quark Matter  
夸克物质 10%

H (77%)

He (23%)



宇宙学模型：以大爆炸宇宙学标准模型为基础的

暴胀 ⊕ 暗能量 ⊕ 暗物质 ⊕ 夸克物质

# 物质和能量

## Matter & Energy

可见宇宙

黑暗宇宙

普通物质

**ORDINARY MATTER**

电子 **Electrons**, 中子/质子 **neutron/proton**  
原子 **Atoms**, 分子 **Molecules**,  
水 **Water**, 土 **Earth**, 火 **Fire**, 木 **Wood**,  
人 **People**, 星 **Stars**, 银河 **Galaxy**

暗物质

**DARK MATTER ???**

普通能量

**ORDINARY ENERGY**

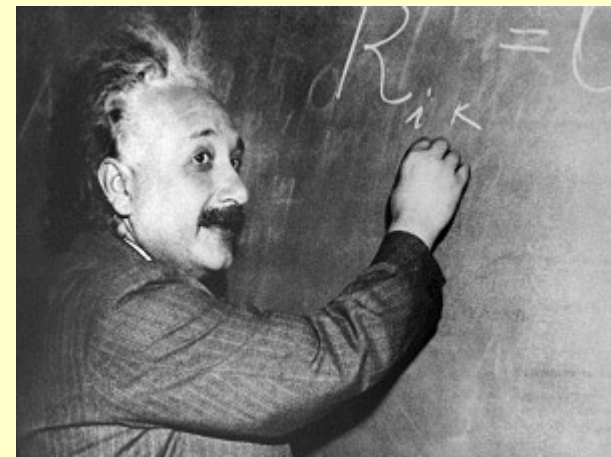
化学能 **Chemical**, 太阳能 **Solar**  
风能 **wind**, 水能 **water**  
电能 **electrical**, 核能 **nuclear**,  
引力能 **gravitational**

暗能量

**DARK ENERGY ???**

# 宇宙起源和演化

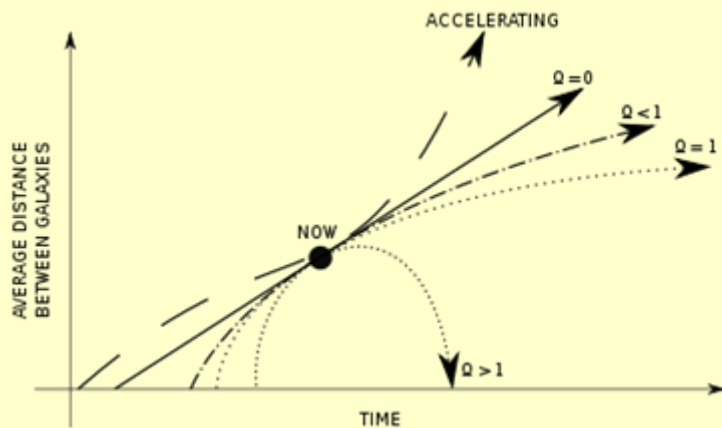
直到上世纪初，爱因斯坦发展了广义相对论，奠定了描述引力和宇宙的理论基础，使得我们能真正开始探索宇宙的起源、形成和演化规律，广义相对论的创立对人类认识宇宙产生了革命性的变革。



## 爱因斯坦场方程

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

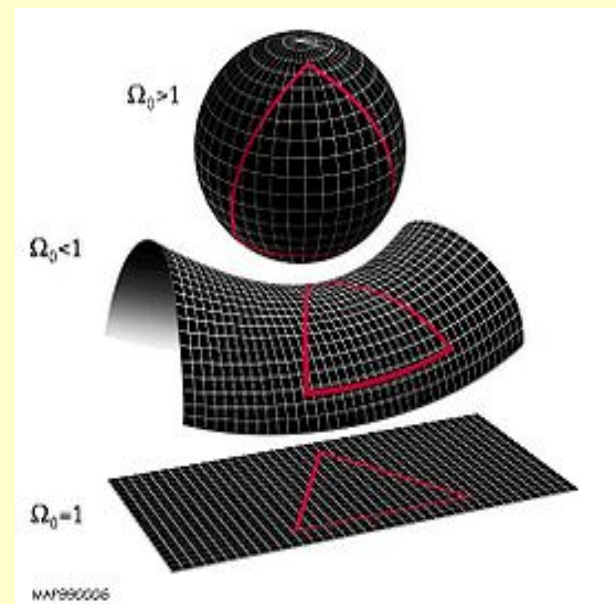
物质和能量的分布  
决定宇宙的几何形状



闭宇宙

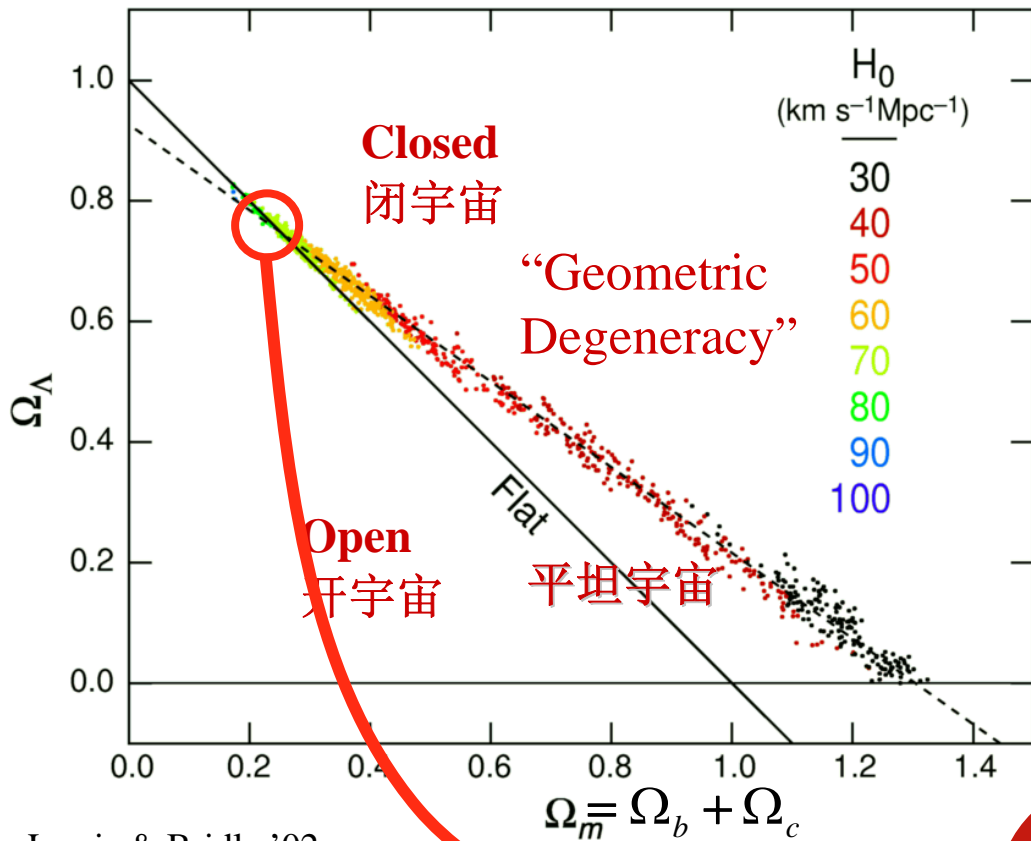
开宇宙

平坦宇宙

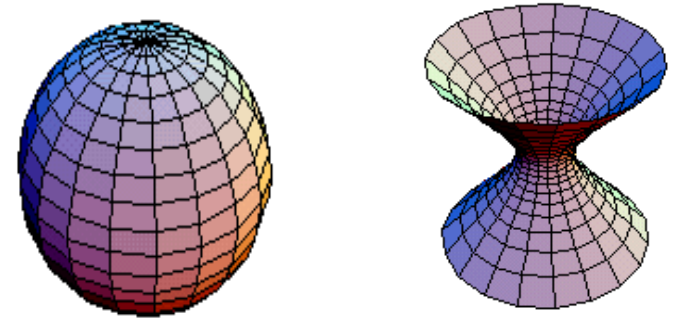


## Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker metric

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + R(t)^2 \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$



Lewis & Bridle '02



**Closed** 闭宇宙      **Open** 开宇宙

暗物质和暗能量在宇宙中所占的比例与宇宙的几何直接相关。从宇宙微波背景实验，表明我们处于宇宙状态的“几何简并”点上。

# WMAP5 only best fit LCDM

在宇宙平坦假设下  
Assume flatness

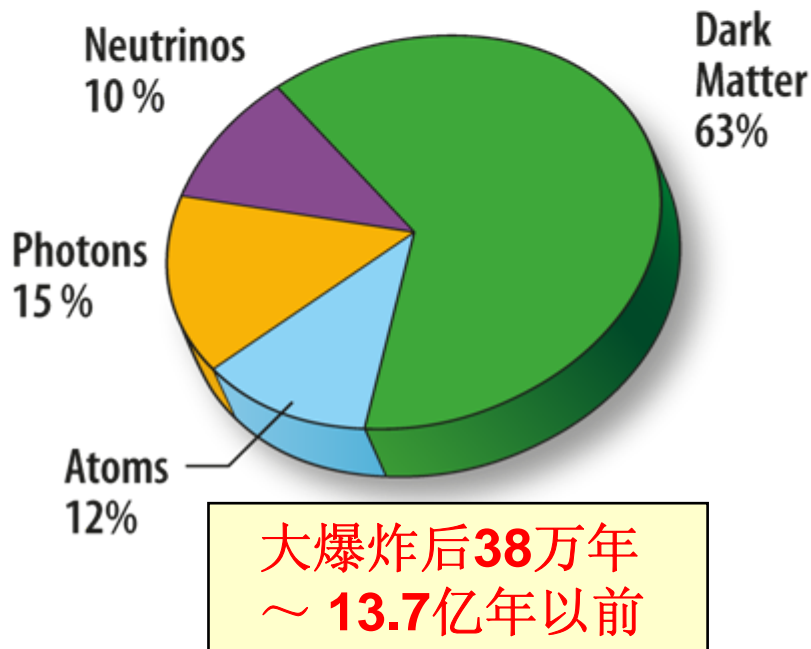
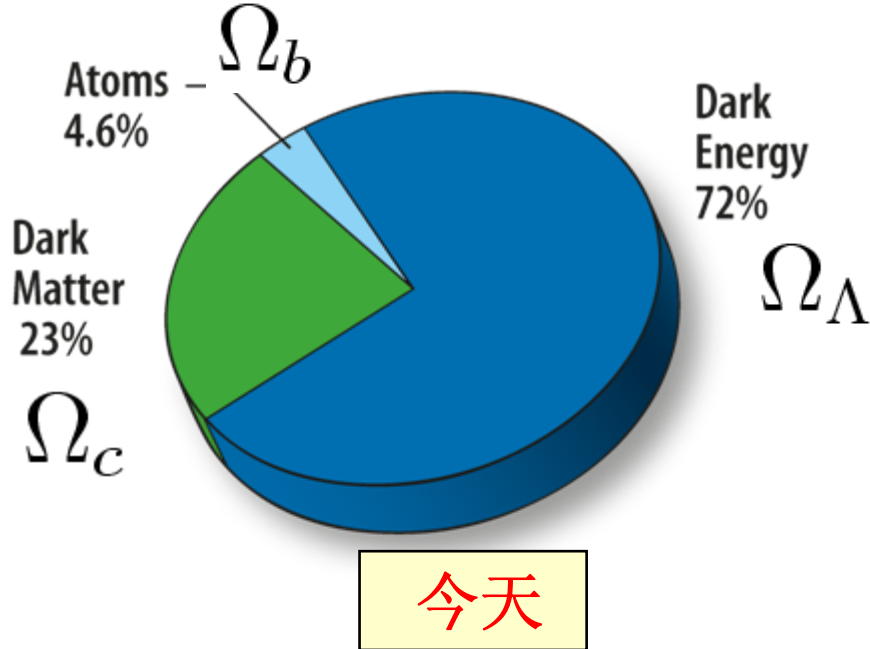
- $\Omega_b h^2 = 0.02273 \pm 0.00062$
- $\Omega_c h^2 = 0.1099 \pm 0.0062$
- $h = 0.719 \pm 0.027$
- $\sigma_8 = 0.796 \pm 0.036$
- $\tau = 0.087 \pm 0.017$
- $n_s = 0.963 \pm 0.015$

# 宇宙演化与暗物质 暗能量的重要作用

A six parameter model agrees with virtually all cosmological measurements regardless of redshift or method.

The model assumes a flat geometry, a new form of matter, something that mimics a cosmological constant, and a deviation from scale invariance

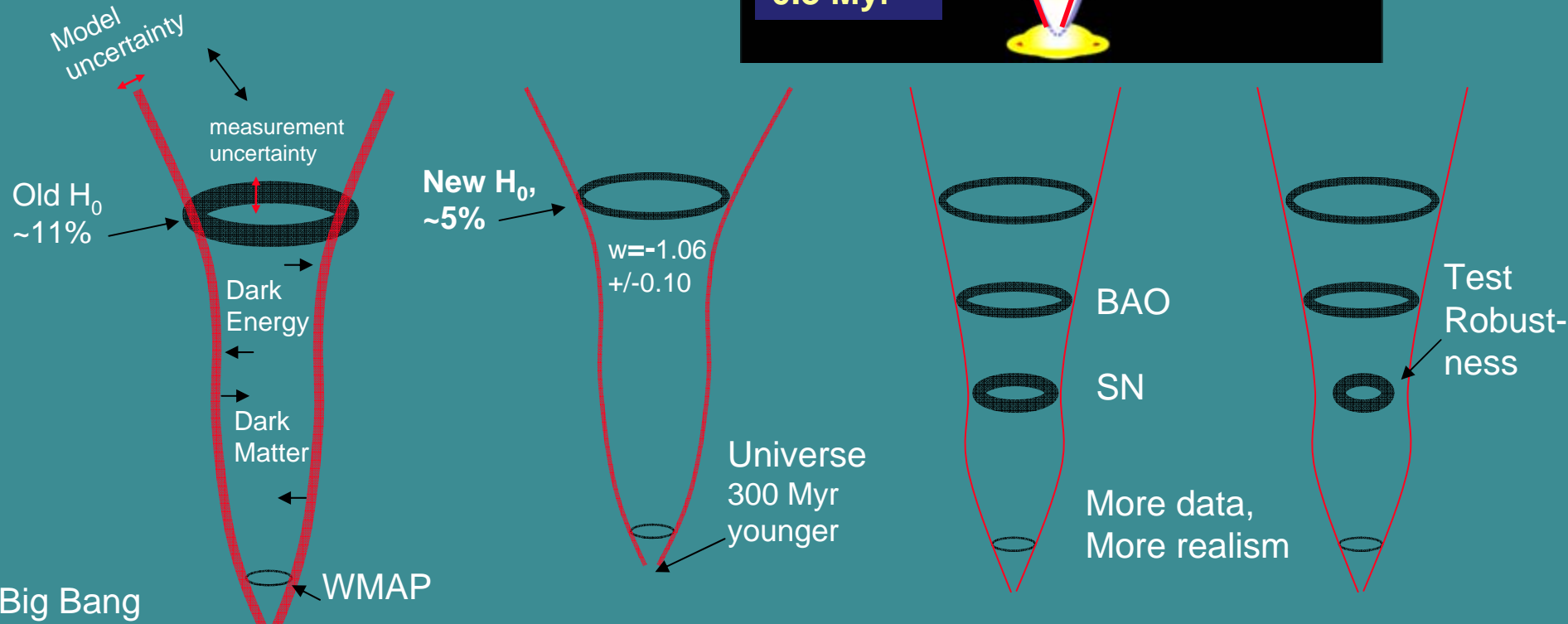
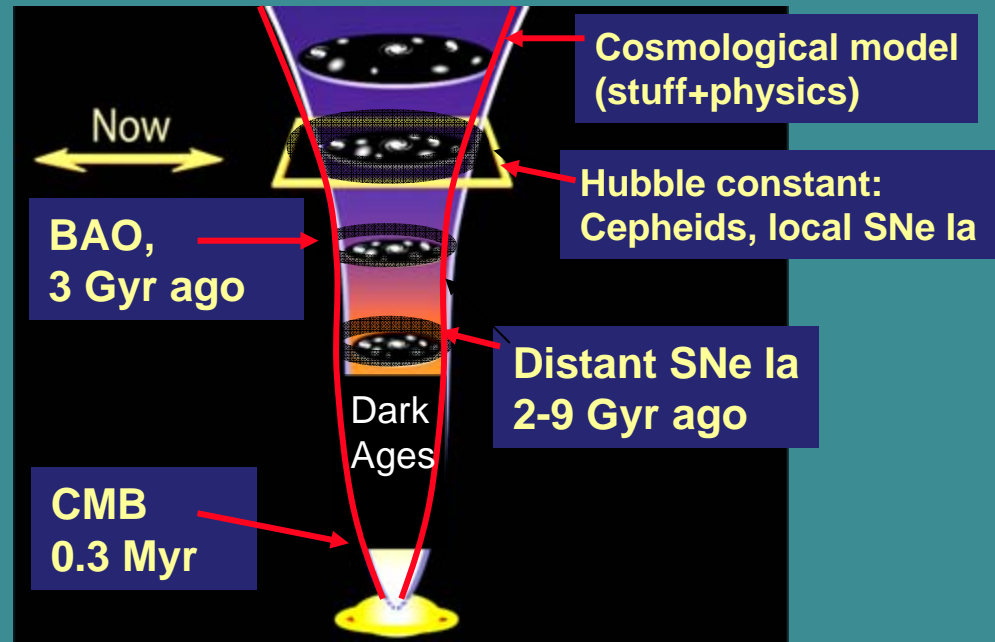
(  $P(k) \propto k^{n_s=1}$ ,  $\sim 2.5 - 3\sigma$ ).



# 宇宙演化与暗物质暗能量

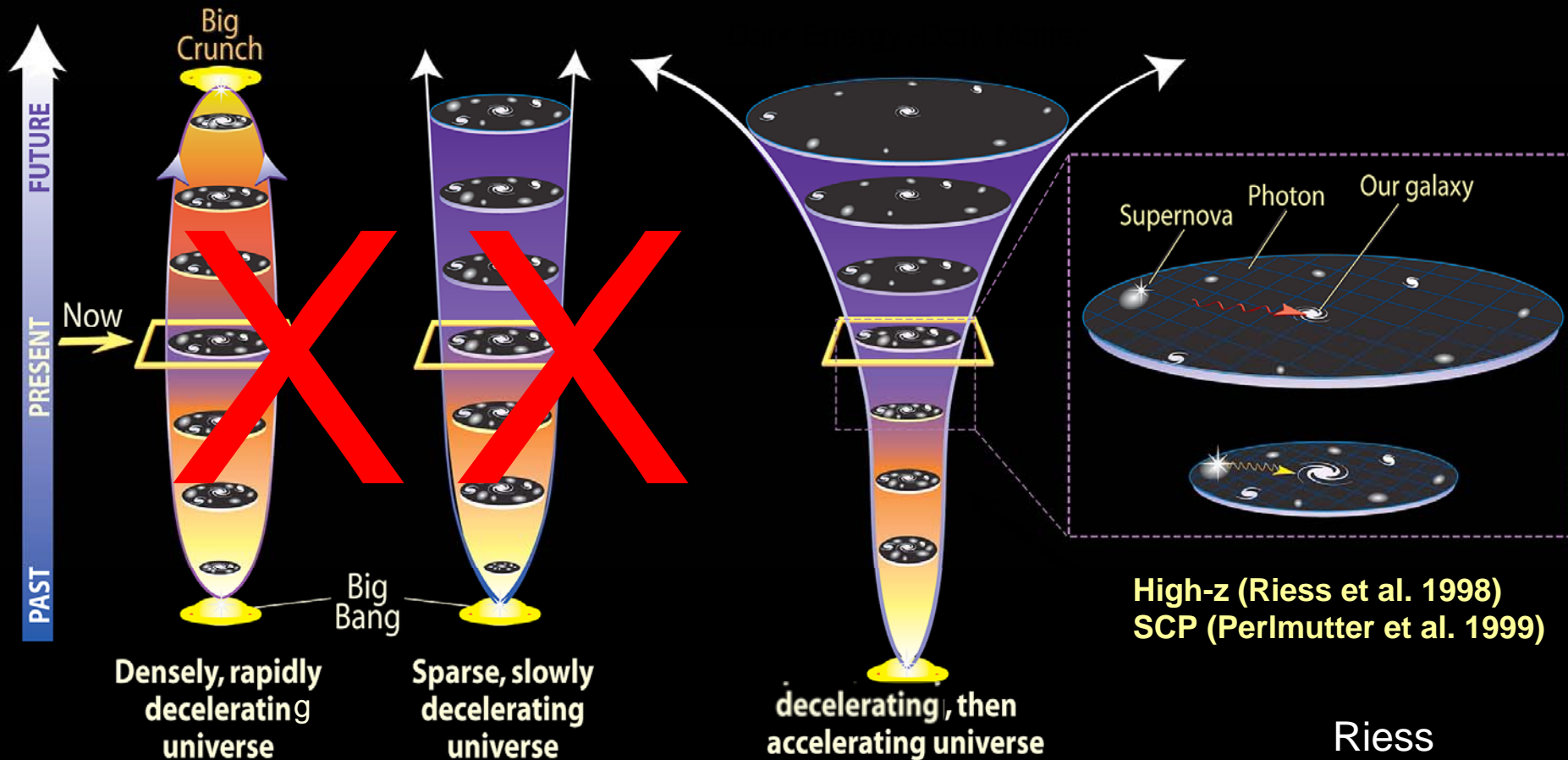
宇宙在不同时期的膨胀历史可帮助我们更好地理解暗能量物理。

Expansion history at *different ages* helps to understand the physics of Dark energy.



# 宇宙演化史表明：我们的宇宙是一个加速膨胀的宇宙

## 宇宙膨胀模型

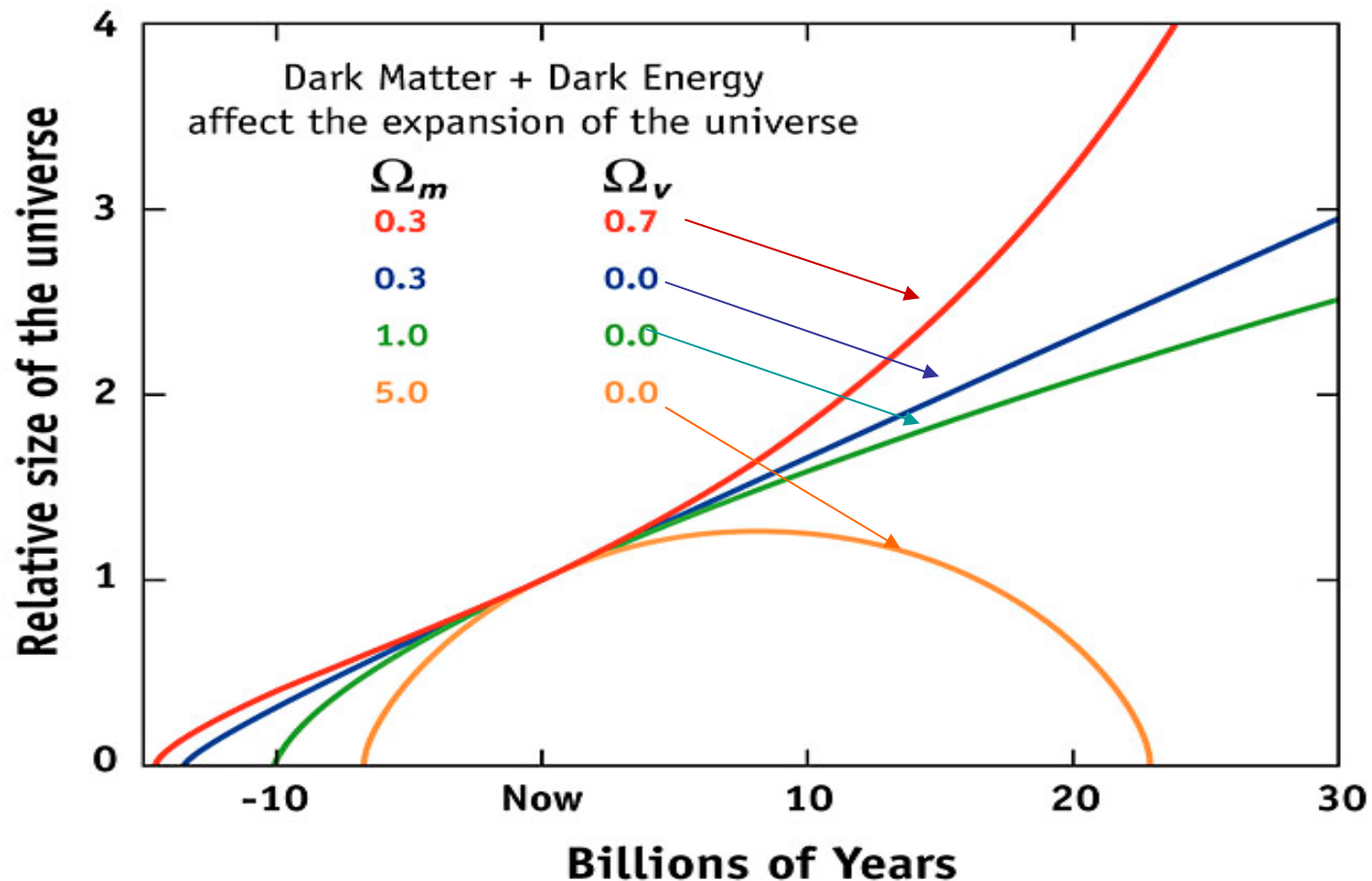


Need greater precision, longer history to understand Dark Energy!  
A more precise Hubble constant helps with this!



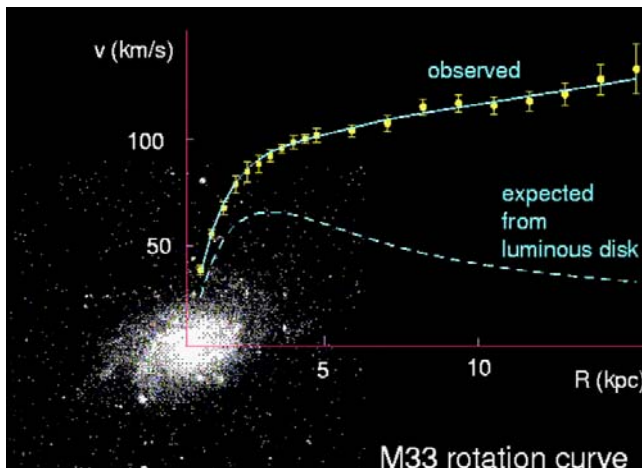
# 宇宙将来的演化 与暗物质&暗能量密切相关

## EXPANSION OF THE UNIVERSE



# 暗物质

- 暗物质的存在已经通过星系的引力效应得到证实，特别是光穿过星系时产生的引力透镜效应，表明大量暗物质的存在。
- 暗物质是由什么组成的仍然是个迷，甚至对于暗物质粒子的质量是多大，仍在几十个数量级上无法确定。
- 暗物质被认为是笼罩21世纪现代物理学的一朵乌云，它将预示着物理学的又一次革命。



星系旋转曲线



引力透镜



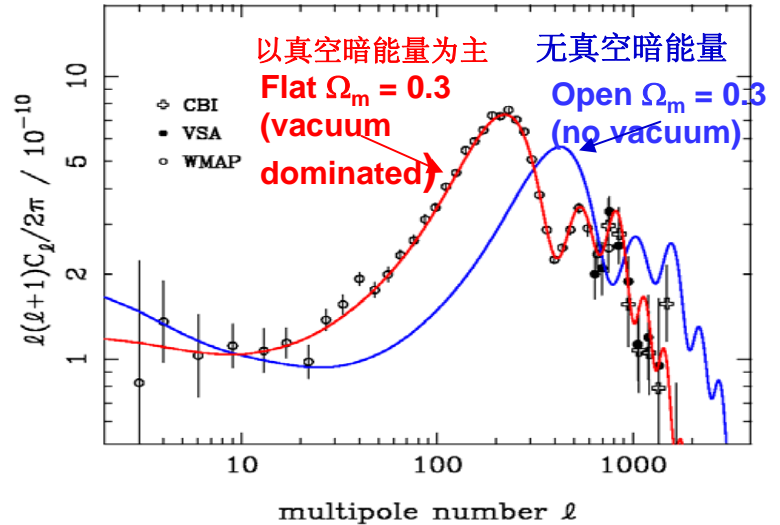
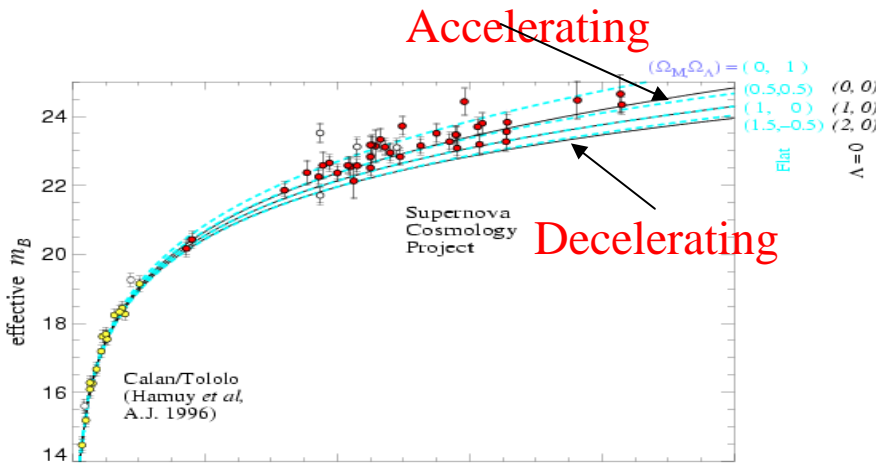
# 暗能量

暗能量的存在已通过对Ia型超新星、宇宙微波背景等实验观测得到表明。

宇宙膨胀加速用普通物质和引力理论难以解释,但暗能量的本质是什么并不清楚。

暗能量被认为是笼罩21世纪现代物理学的另一朵乌云,预示着物理学的革命性的突破。

Fainter SN →



Ia型超新星 Earlier times →

WMAP 宇宙微波背景观测

# 暗物质暗能量的理论研究和实验预研

## 项目的科学意义

**暗物质、暗能量**

**可能出现革命性突破的基本科学问题：**

“揭开暗物质、暗能量之谜，将是人类认识宇宙的又一次重大飞跃，可能导致一场新的物理学革命。为此，需投资建设几项关键性的探测暗物质、暗能量的重大实验装置，包括地下和太空的粒子探测器和在南极建立大口径天文望远镜，以取得第一手实验数据，在国际竞争中处于主导地位”

《创新2050：科学技术与中国的未来》（2009）  
（中国科学院战略研究系列报告）



国家重点基础研究发展计划

# “暗物质暗能量的理论研究及实验预研” (973) 项目启动会

## 项目的现实意义和主要目标

### 项目摘要：

充分利用理论研究与实验探测设计相结合和多学科交叉融合的优势，积极发挥理论先行的作用，突破探测器的关键技术，优化实验探测方案设计，为开展对暗物质的空间和地下探测、暗能量的精确测量等提供可靠的物理依据和可行的实验设计及有效的探测方案，为推进我国空间卫星的天体粒子物理实验平台、国家深部地下实验室，南极 Dome A 地面天文望远镜观测实验基地等大科学目标的建设做出前瞻性、基础性、战略性的实质贡献。

**紧密结合实验观测，基于对称性等基本原理和量子场论，建立一个自洽的超越粒子物理和宇宙学标准模型、能解释暗物质暗能量的新理论**

项目的现实意义和目标

# 机遇与挑战

# 天时、地利、人和

## ➤ 天时:

暗物质、暗能量  
现代物理学的两朵乌云

## ➤ 地利:

空间探测——卫星、空间站  
地下探测——深部国家地下实验室  
地面探测——对撞机LHC、ILC

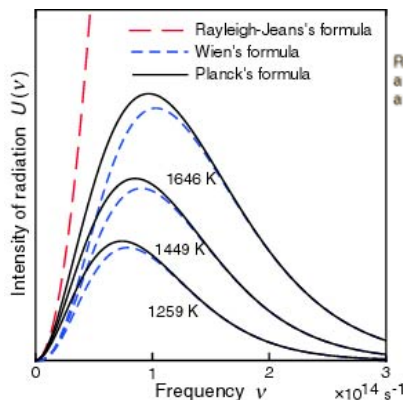
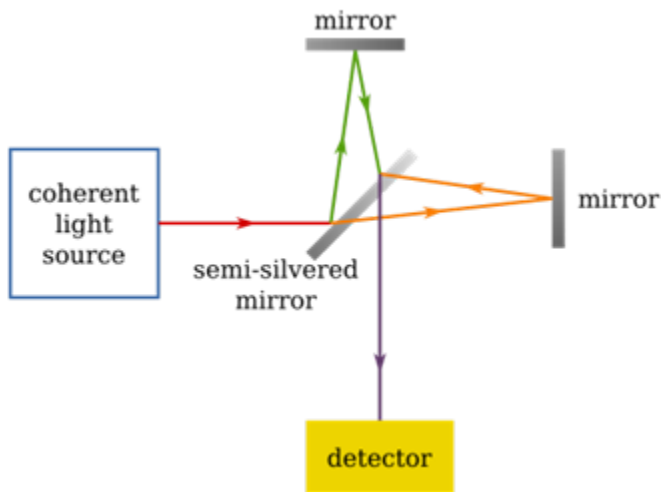
## ➤ 人和:

国际国内科学家的共识  
政府部门的重视  
社会公众的关心

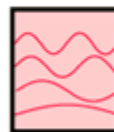
# 天 时

1900年，开尔文：“There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.”，“Two small, puzzling clouds remained on the horizon” ——黑体辐射实验和迈克尔逊-莫雷实验

热辐射物体能量随发光波长分布：  
维恩公式和瑞利-金斯公式  
分别在长波和短波与实验结果不符



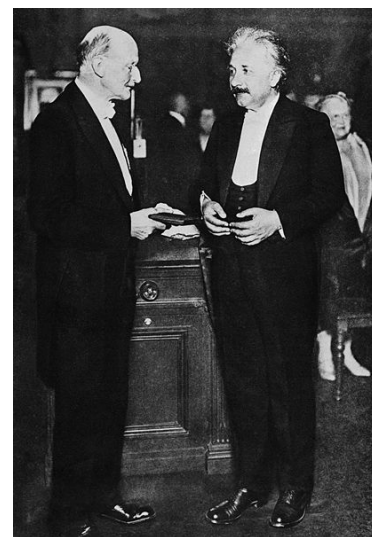
Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory



	#Modes per unit frequency per unit volume	Probability of occupying modes	Average energy per mode
CLASSICAL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Equal for all modes	$kT$
QUANTUM	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Quantized modes: require $h\nu$ energy to excite upper modes, less probable	$\frac{h\nu}{e^{kT} - 1}$

## 电磁相互作用

- 与能量有关
- 与物质和运动有关
- 与真空有关（以太说）



十九世纪物理学晴朗天空中的“两朵乌云”，给物理学界带来了革命性变革，导致“新理论”的发现——“量子论”和“相对论”，极大地推进了人类对物质世界的认识。



# 天 时

## 暗物质和暗能量

是二十世纪物理学和天文学晴朗天空中的“两朵乌云”

世纪难遇的重大科学问题：

- 理解暗物质和暗能量问题同样需要发展和建立新的理论，一旦取得突破，将带来一场重大的物理学和天文学革命。
- 与粒子物理和量子场论所涉及到的最基本的关键问题密切相关，如真空和对称破缺机制，新的基本粒子和物质形态

### 引力相互作用

- 与能量有关
- 与物质和运动有关（加速膨胀）
- 与真空有关（宇宙常数）

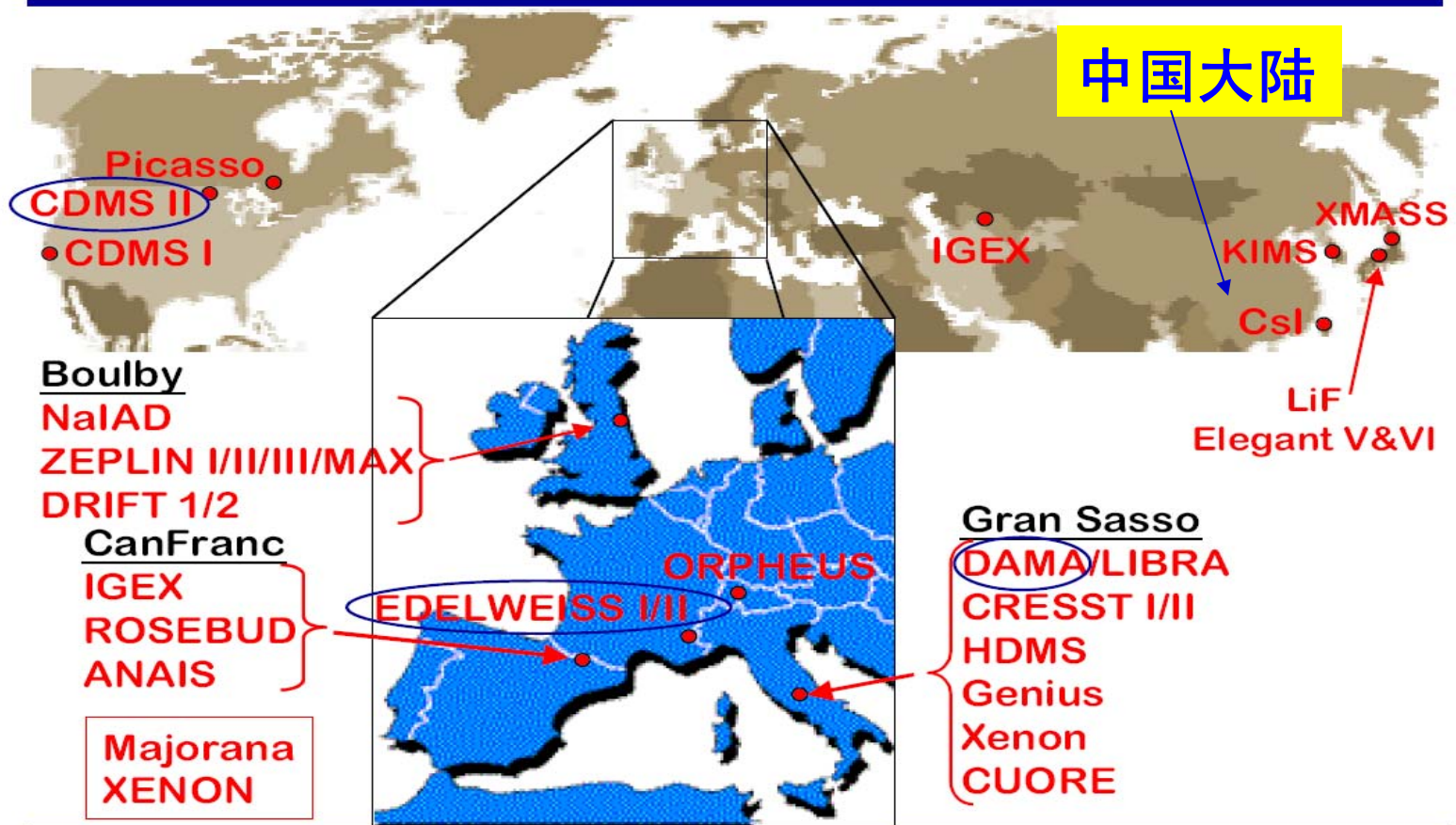
量子引力、物质时空统一理论

人类对物质、时空和宇宙的起源等基本问题有更深入的认识

# 地利

## 当今世界暗物质地下探测实验的地理分布图

### WIMP-detection Experiments Worldwide



# 地下实验

## 四川省锦屏山地形

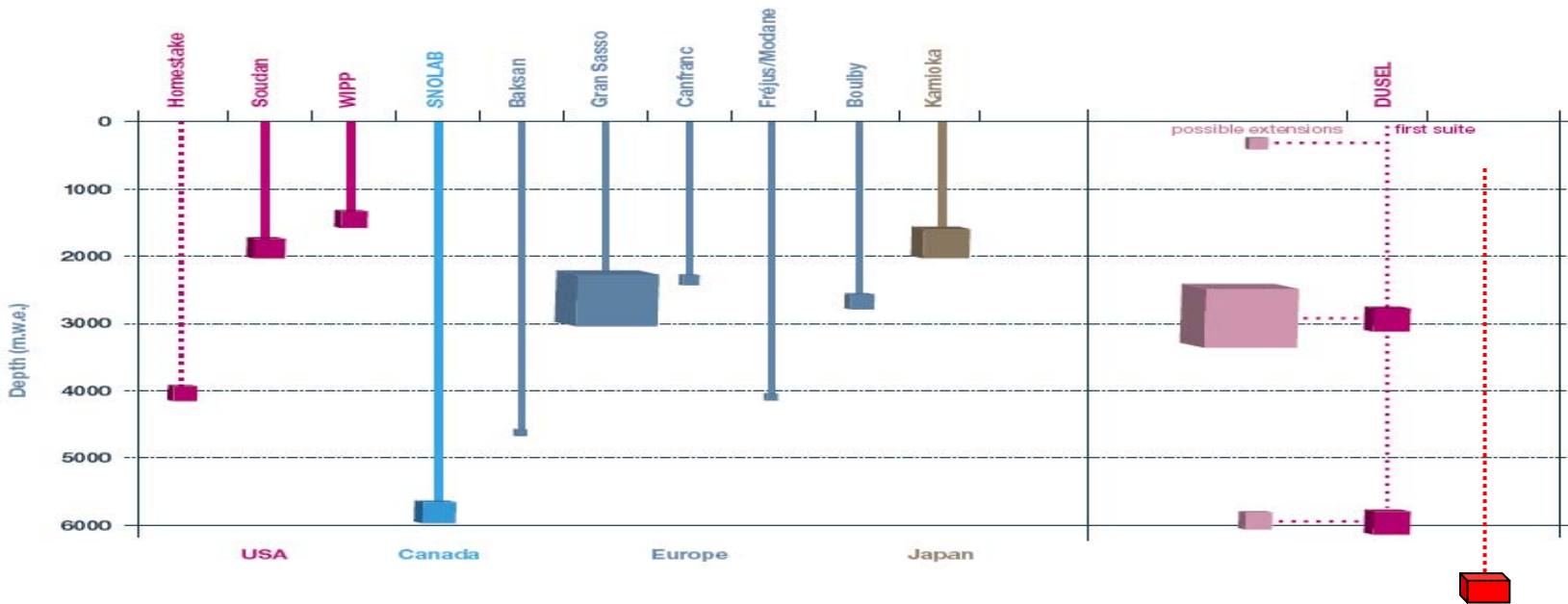
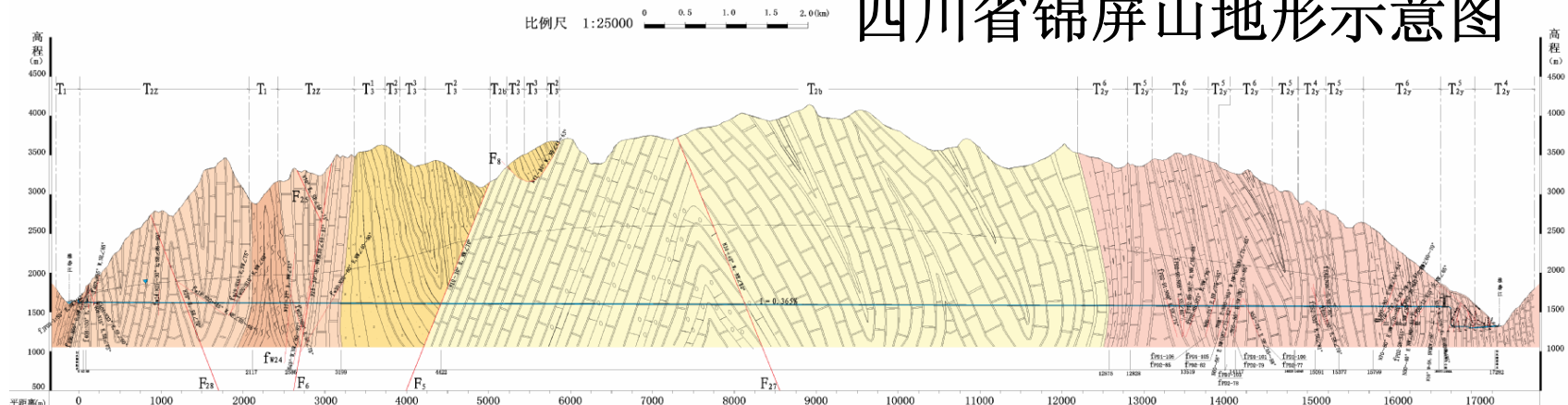


雅砻江



锦屏深部地下实验室位置

# 四川省锦屏山地形示意图



我国有条件建成世界上最大埋深的地下实验室

四川锦屏山隧道

# 地面实验

# 暗物质探测

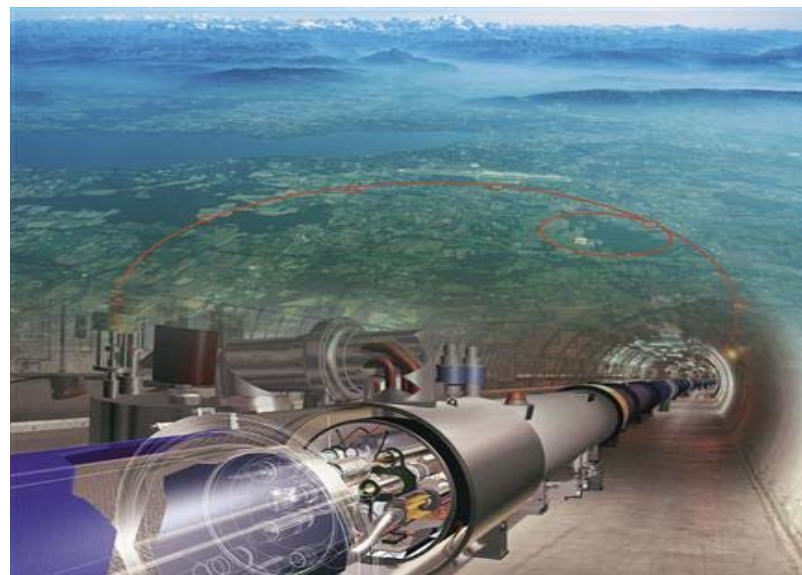
## 暗物质可能的微观解释

暗物质的存在要求有超出标准模型的新物理。

许多新物理模型中自然要求存在稳定的弱相互作用的有质量粒子(WIMP)，其相互作用和质量在电弱相互作用及相关能标附近。

在宇宙早期的大爆炸之后的演化中，它们通过脱离热平衡和化学平衡而残留下来，是宇宙中暗物质的一类可能的候选者。

暗物质直接产生：  
**LHC对撞机**



# 地面实验

# 南极冰穹-A天文观测站

NEWS

NATURE [Vol 451] 14 February 2008

## NATURE报道——中国天文学家注目南极

### Chinese astronomers look to Antarctic



• First astronomers at Dome A: Xu Zhou (Left), and Zhenxi Zhu (Right)

Jan 10, 2008

以我国为主导的南极天文学研究  
受到国际科学界的广泛关注！  
NATURE、SCIENCE相继报道  
中国天文学家登上南极冰穹A。

A Chinese expedition returned last week from a 14-day crawl across the East Antarctic ice sheet in cargo containers, pulled by tractors, that doubled as living quarters. The trip, sponsored by the Polar Research Institute of China, completes only the second traverse to Dome A — the highest point on the eastern ice cap and the place where China intends to start building a research base next year.

The team also set up a suite of research instruments to study the atmosphere and sky above Dome A, most notably a remotely operated observatory called PLATO, which will assess how good the skies are for astronomical 'seeing'. PLATO includes four 14.5-centimetre telescopes. In China, that will take advantage of more than three straight months of darkness during the Antarctic winter. "We think Dome A is the best site on Earth for astronomy," says Xiangqun Cui of the Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology.

The hope is that the desolate plateau, which sits 4,100 metres above sea level, will boast conditions unrivalled elsewhere on the planet — even at the French/Italian base at Antarctica's Dome C, 1,200 kilometres away, which set up its own automated test observatory in 2003 and has since ramped up to larger projects.

Proponents of Antarctic astronomy have looked to Domes A and C as alternative sites to the South Pole, above which 300 metres of turbulent air cause observations of stars to jitter and blur<sup>1</sup>. Dome C, by contrast, has only



Cold comfort: China has set up a remotely operated observatory on Dome A, the summit of East Antarctica's ice cap.

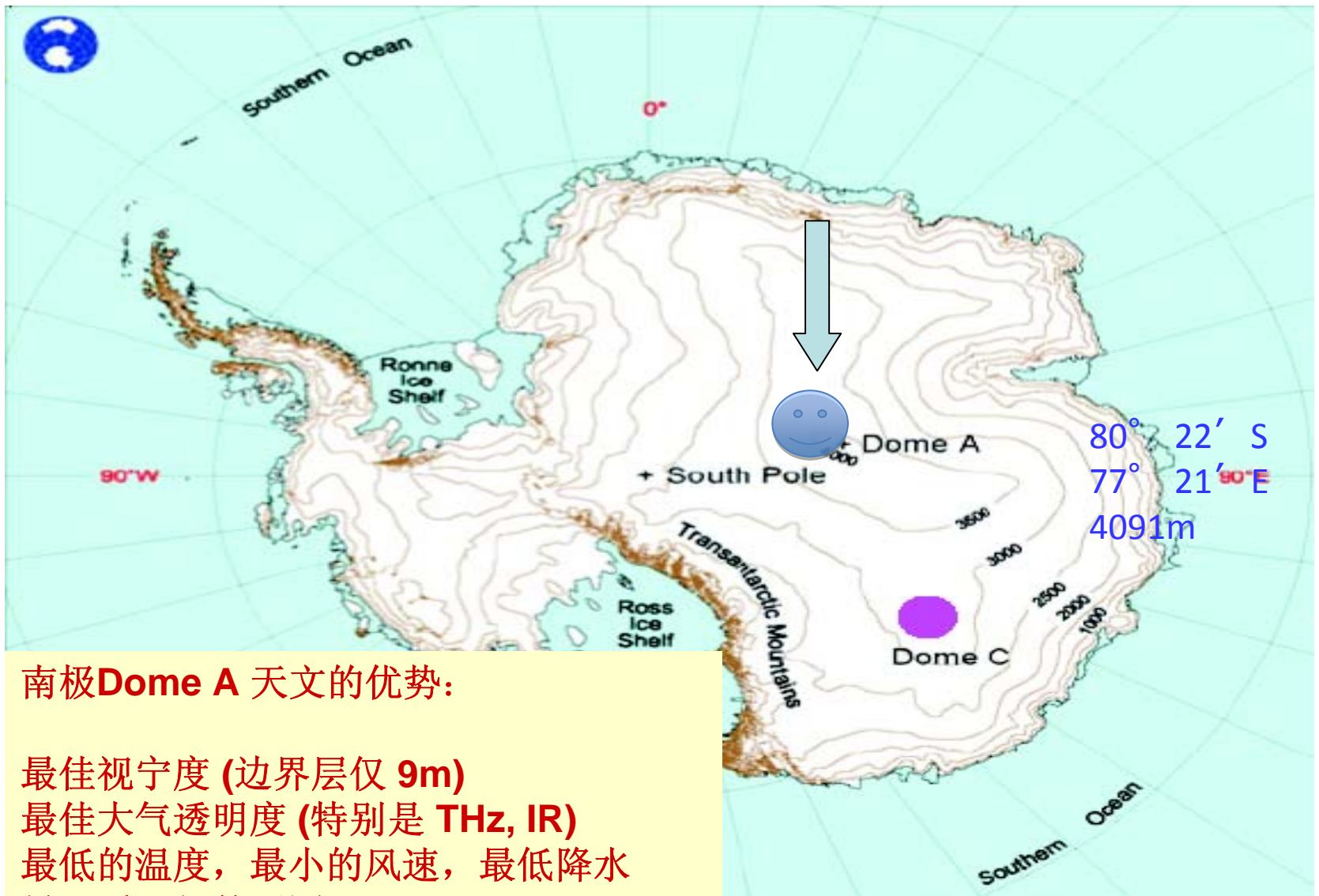


additional 100 metres is very important because

Such conditions make Dome A attractive to Chinese astronomers, who have begun work on a suite of three 0.5-metre telescopes that they hope to deploy at the site in 2009. They are also eyeing the location for a potential US\$40-million, 4-metre infrared and optical telescope. A proposal on that may be submitted this summer to the Chinese Academy of Sciences.

The true potential of Dome A may lie in observations outside optical wavelengths. The efficiency of infrared astronomy is particularly sensitive to temperature, and winter nights that drop as low as  $-90^{\circ}\text{C}$  will eliminate much of the noise from the atmosphere and the telescope itself, researchers say.

南极冰穹A有可能是世界上条件最好的地面观测站址之一，用于探测暗能量暗物质，具备得天独厚的一些条件。



### 南极Dome A 天文的优势:

最佳视宁度 (边界层仅 9m)

最佳大气透明度 (特别是 THz, IR)

最低的温度, 最小的风速, 最低降水量, 适于红外观测

最长的连续观测时间

地质稳定, 便于自适应光学修正

# 空间

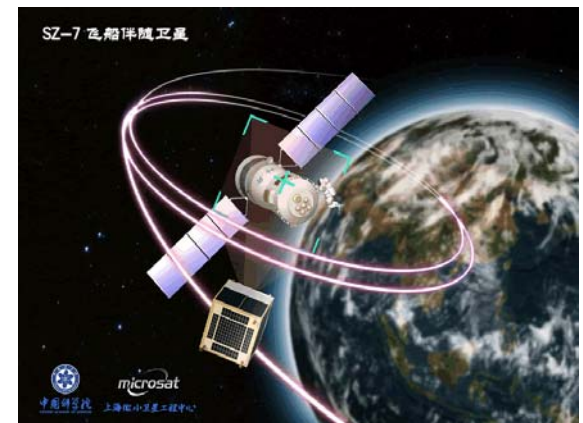
# 卫星平台

我国现有的卫星平台完全能满足暗物质空间探测要求。

1. 2吨的卫星平台是现成的。

上海微小卫星工程中心提出了暗物质粒子探测器与卫星平台一体化设计和面向载荷需求的高可靠卫星系统设计。

给出初步的轨道设计和卫星构形、姿态控制、电源、星务管理、高速数传、测控等方案，完全能够满足科学探测任务的需要。





# 人和：形成共识

## 暗物质和暗能量：现代物理学的两朵乌云！

2006年，美国NSF(自然科学基金会)，NASA(宇航局)，DOE(能源部)联合成立了“暗物质研究评估小组”和“暗能量研究评估小组”，并在2007年的报告中指出“…解决暗物质之谜的重要性尤为突出”…“需要一个雄大的观测计划全力研究暗能量的性质”。“…美国必须立刻加大投入，保持领先地位…”

美国国家研究委员会的最新报告声称，美国宇航局和美国能源部将把“暗能量合作计划(JDEM)”作为“超越爱因斯坦”计划的第一步来先行实施。

2008年，欧洲推出了粒子天文学路线图（14个国家，19个基金机构），列举了7个重要领域：  
暗物质、暗能量、宇宙线、中微子、引力波…  
建议10年投资10亿欧元。

2009年，中国国家科技部批准“暗物质暗能量的理论研究和实验预研”973项目，中科院部署重要方向性项目，清华大学、交通大学等立项

# 人和：公众关注

- 搜索 暗物质 获得约 247,000 条结果
- 搜索 暗能量 获得约 973,000 条结果
- 搜索暗物质暗能量 获得约 227,000 条结果
- 搜索 dark matter 获得约 56,500,000 条结果
- 搜索 dark energy 获得约 49,800,000 条结果
- 搜索 dark matter dark energy 获得约 4,040,000 条结果

2010.03.14

# 人和：形成队伍

我国科学家对暗物质和暗能量的研究，无论在理论模型和方法，还是实验探测和技术方面都已迈出了重要的一步。

实验方面：

- 中科院紫金山天文台利用ATIC探测器发现高能电子能谱的“超”，可能是暗物质湮灭有关，结果发表在2008年11月20日的“自然”上。入选美国物理协会和欧洲物理协会分别选出的2008年度世界物理领域重大研究进展。也被评为2008年中国基础研究十大新闻。
- 中科院高能物理所多位实验物理学家参与了意大利DAMA实验组对暗物质的长期探测，声称探测到了暗物质粒子的信号。
- 上海交通大学在暗物质直接探测的XENON探测技术方面已有基础。
- 清华大学在低本底、低能量阈高纯锗探测器方面开展了长期研究。

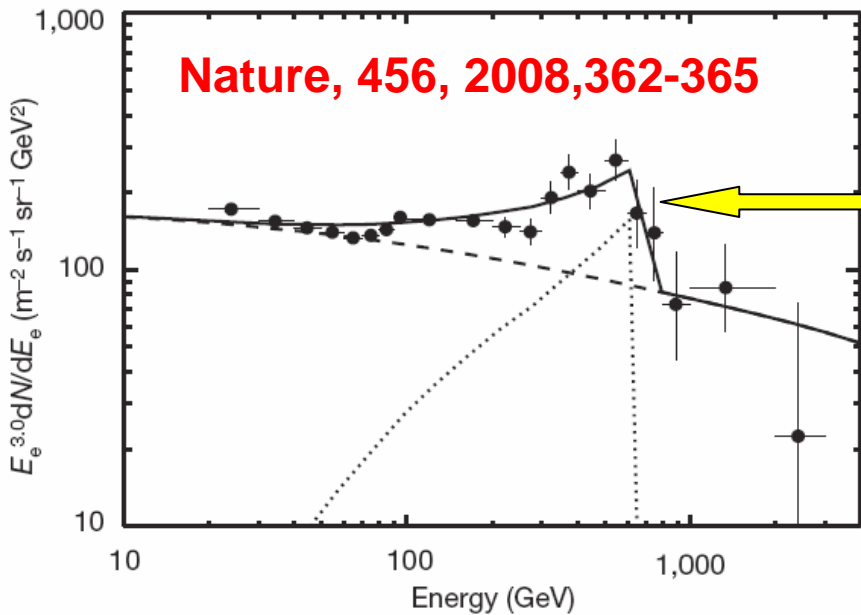
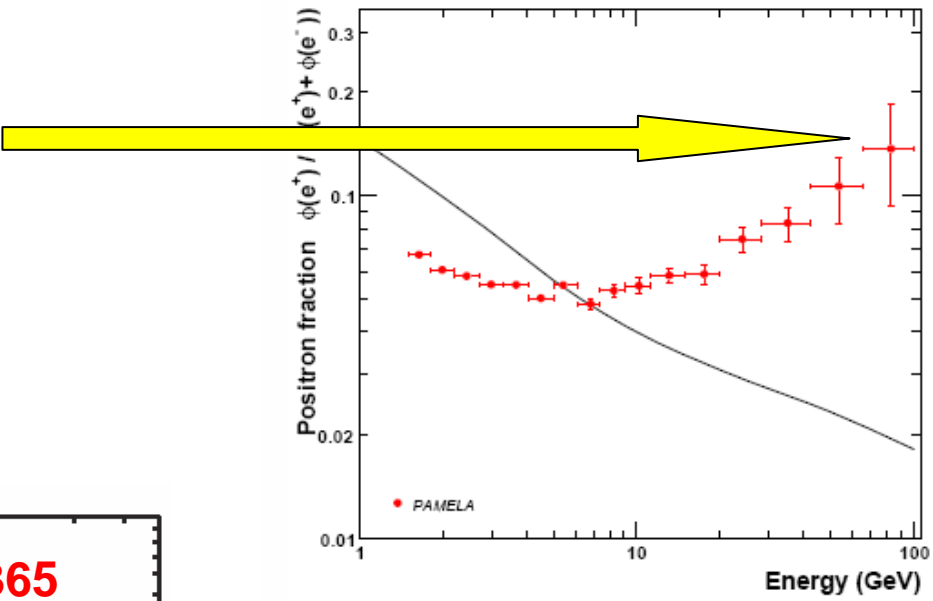
理论方面：

中科院理论物理所，中科院高能物理所，中科院国家天文台，北京大学，清华大学，中国科技大学，复旦大学等单位的研究人员提出了解释暗物质和暗能量的理论模型和机制，做出了具有国际影响的工作。

在很多方面已有了长期的工作积累和研究结果。我国已具备了开展这方面的理论研究和实验探测的基础以及实验所需的合适条件

# 暗物质研究基础：空间探测方面

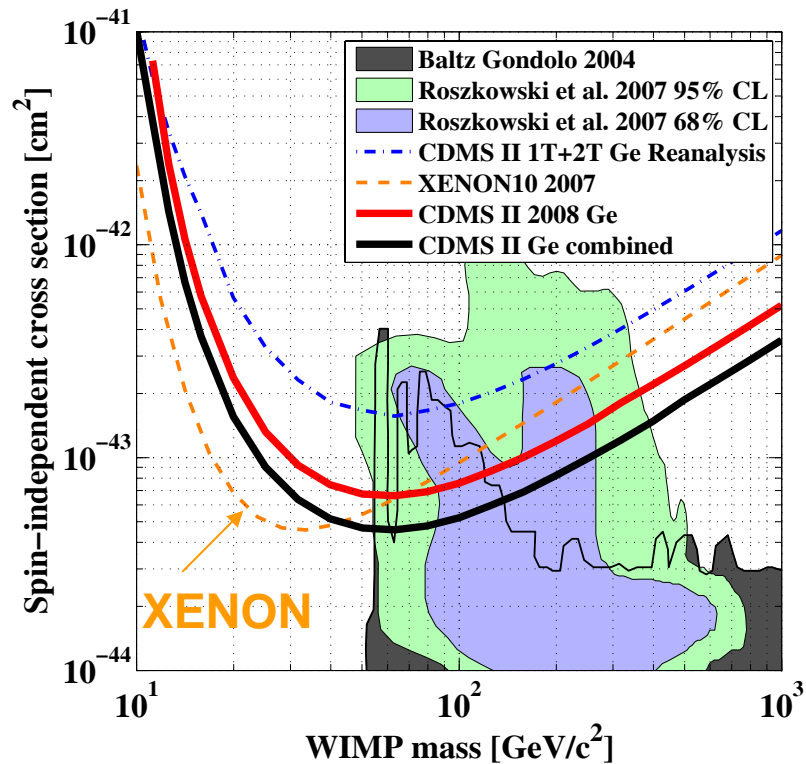
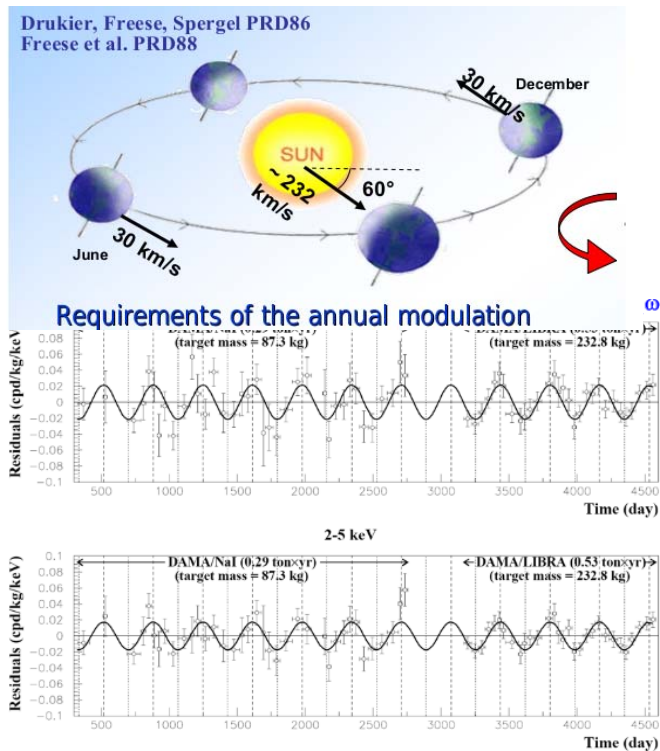
**PAMELA**卫星发现正电子能谱在  
高能区反常增大



**Nature, 456, 2008, 362-365**

**ATIC** 气球发现正负  
电子能谱在**600GeV**  
高能区有明显“超出”

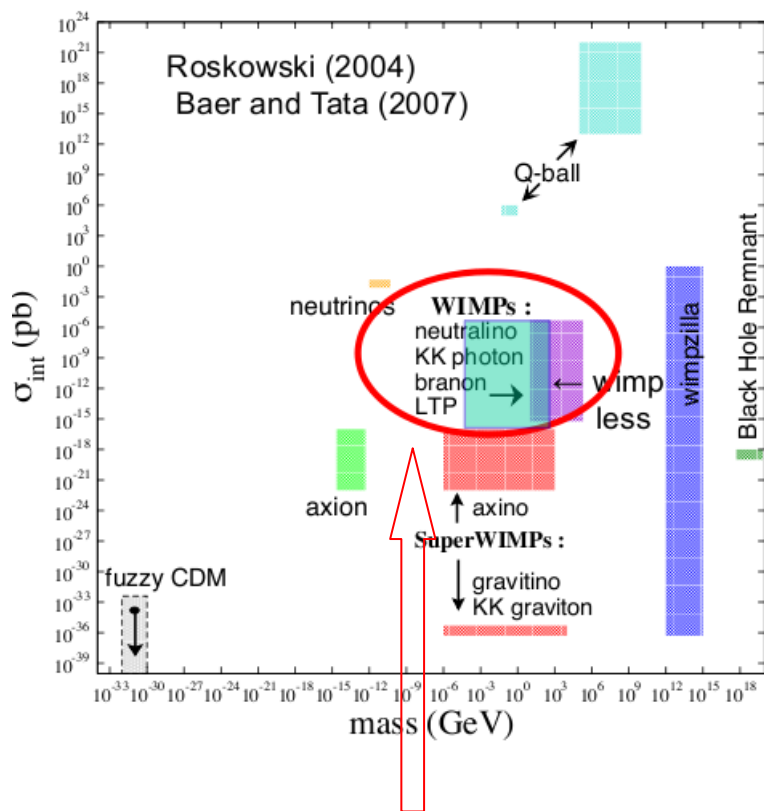
# 暗物质实验研究基础：直接探测(地下)方面



DAMA实验组报道观测到正面信号

直接探测上限进入 $10^{-44}\text{cm}^2$

# 暗物质理论研究与新物理唯象



## 新物理模型暗物质构造:

- 唯象学限制要求的对称性
  - 最小超对称模型 (R-宇称)
  - 额外维度模型 (KK-宇称)
- 利用理论自身对称性
  - 空间反演对称性和正反粒子变换对称性
- 加入新对称性构造暗物质
  - 额外分立对称性

### 弱相互作用大质量粒子(WIMP):

- ✓ 湮灭过程耦合强度是电弱相互作用
- ✓ 质量在电弱能标附近

### 其他候选者:

- ✓ 轴子 (axion),
- ✓ 超弱相互作用的大质量粒子 (superWIMP)

# 基础与展望

# 课题设置

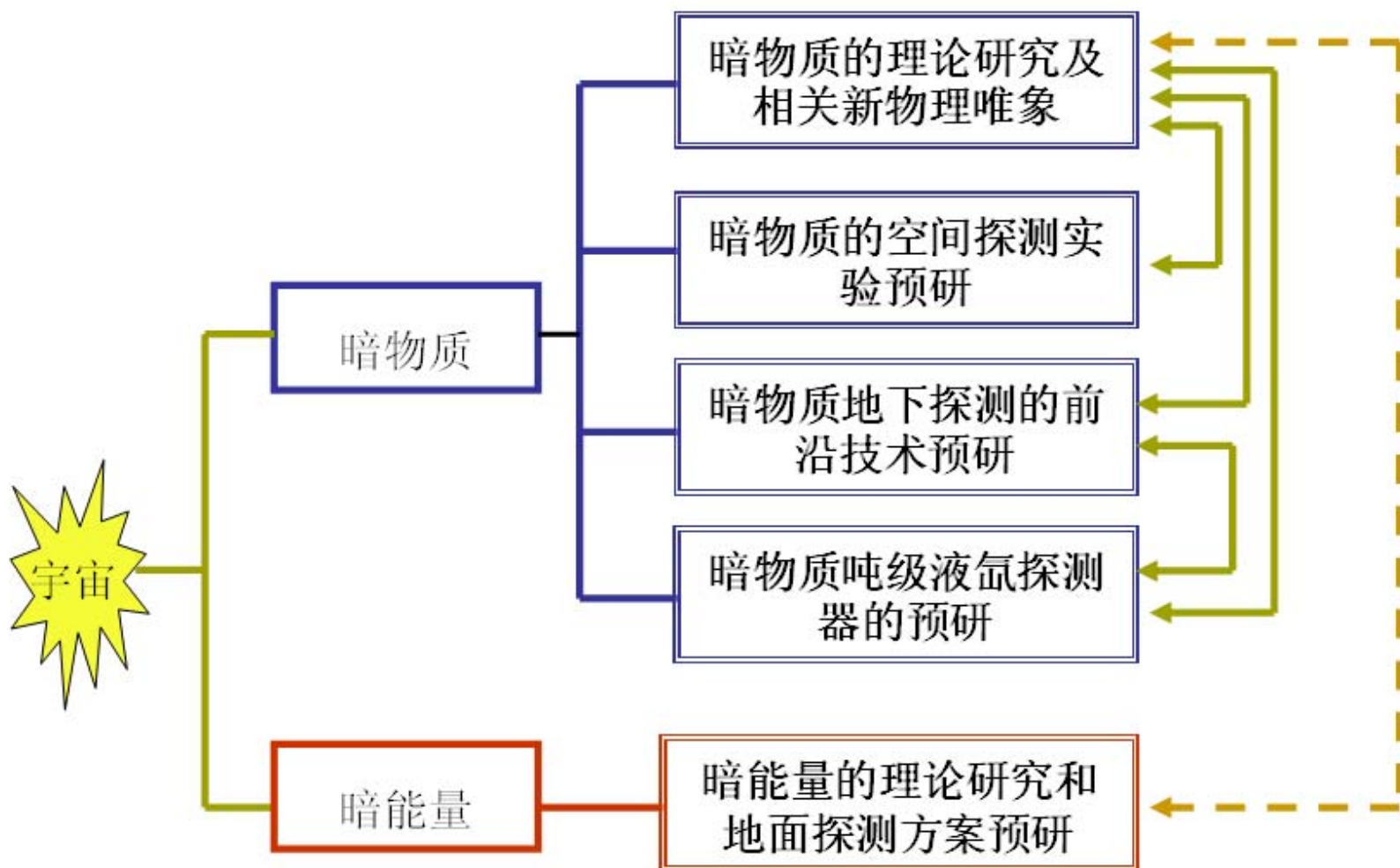
- 课题一：暗物质的理论研究及相关新物理唯象 周宇峰
- 课题二：暗物质的空间探测实验研究 常 进
- 课题三：暗物质的地下探测的前沿技术预研 胡红波
- 课题四：暗物质吨级液氙探测器的预研 季向东
- 课题五：暗能量的理论研究和地面探测方案研究 蔡荣根

## 总体学术思路：

- 一. 发挥理论先行，理论与模拟相结合对实验给予指导。
- 二. 从地下、地面到空间多种手段，互为补充，构成有机整体。



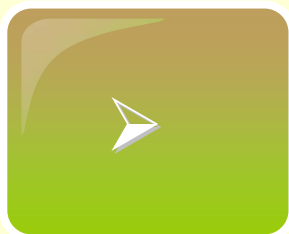
# 五个部分之间的关系图



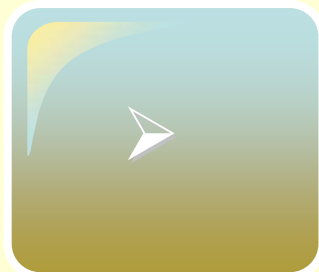
本项目集中了国内在暗物质和暗能量领域的主要优势单位，而组成的一个跨学科的研究队伍



有开展暗物质和暗能量理论研究需要具备的坚实理论基础，包括粒子物理理论、引力理论、超弦理论等基本理论。

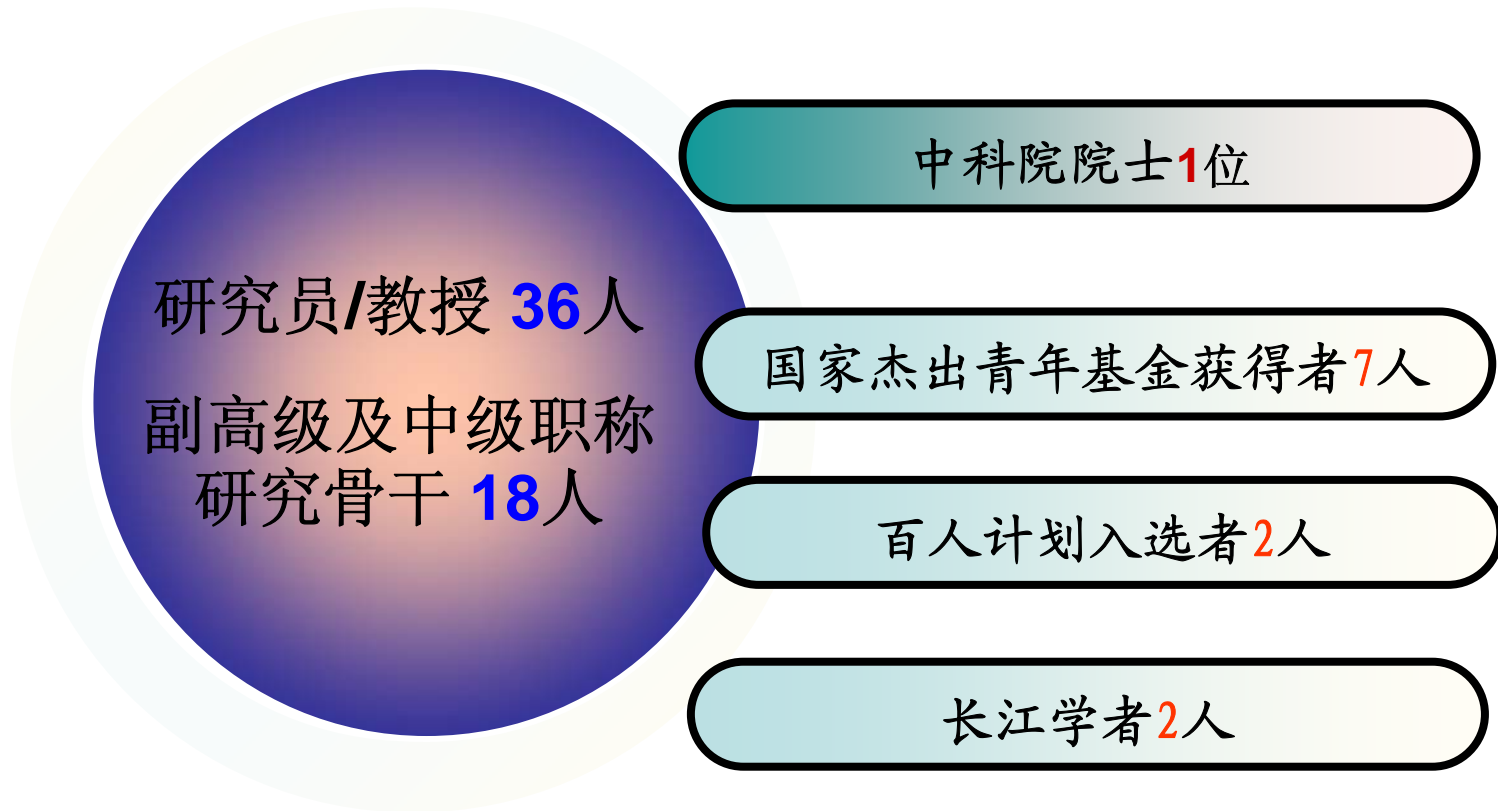


有加速器和探测器建造和相关技术及国际合作的丰富经验。



长期参与了 ATIC 与 DAMA 及 XENON 等实验组的研究，取得了重要成果，积累了丰富的经验。

# 有一支强的研究队伍



中科院理论物理研究所

中科院紫金山天文台

中国科技大学

中科院上海应用物理研究所

中科院高能物理研究所

中科院国家天文台

上海交通大学

中国原子能科学研究院

# 我国开展暗物质暗能量研究特色

1

充分利用锦屏山和南极冰穹A的有利地理优势

2

独特的空间探测器技术

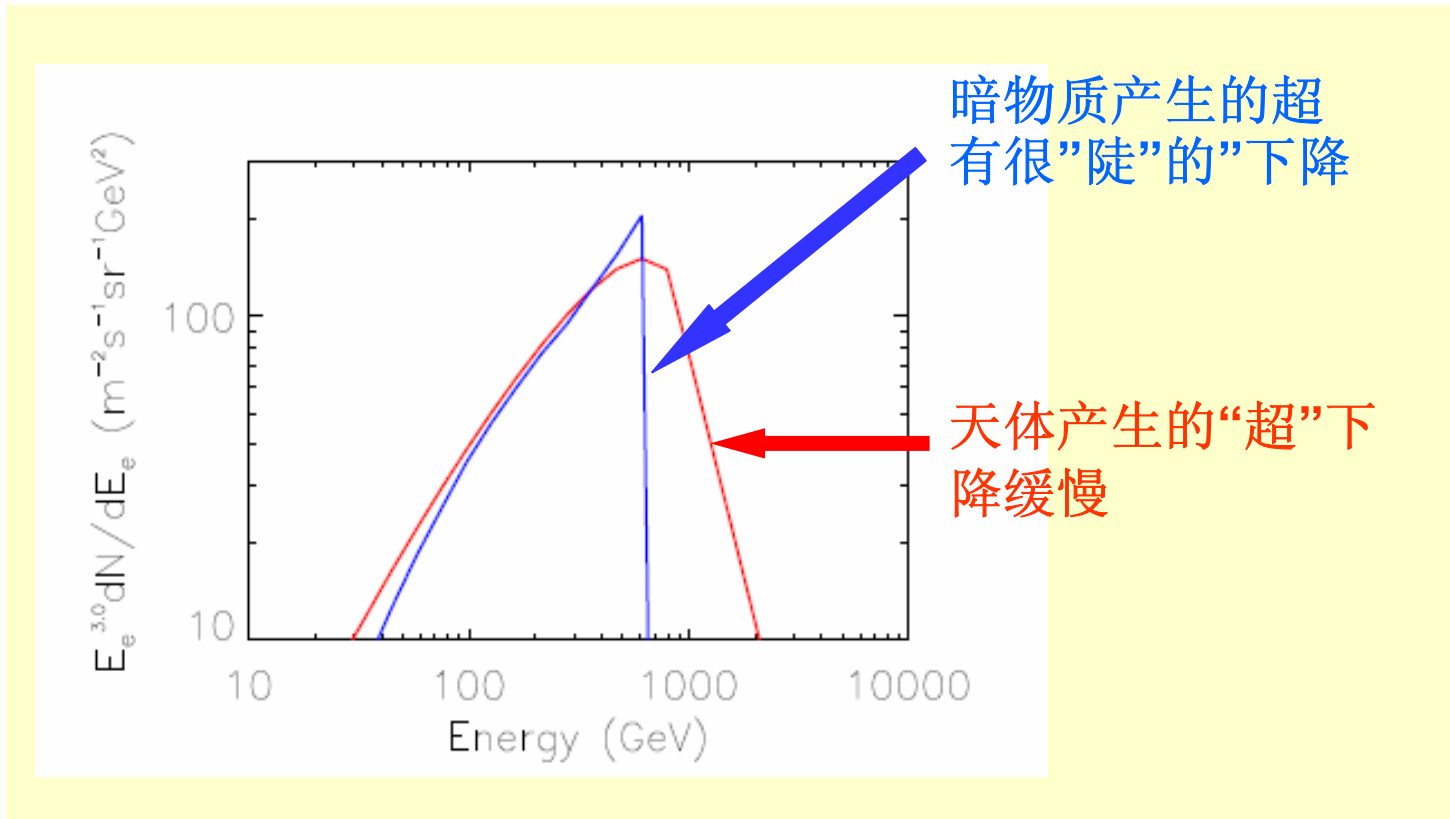
3

多学科的交叉融合，理论与实验紧密结合

4

国内多个优势单位的强强联合和通力合作

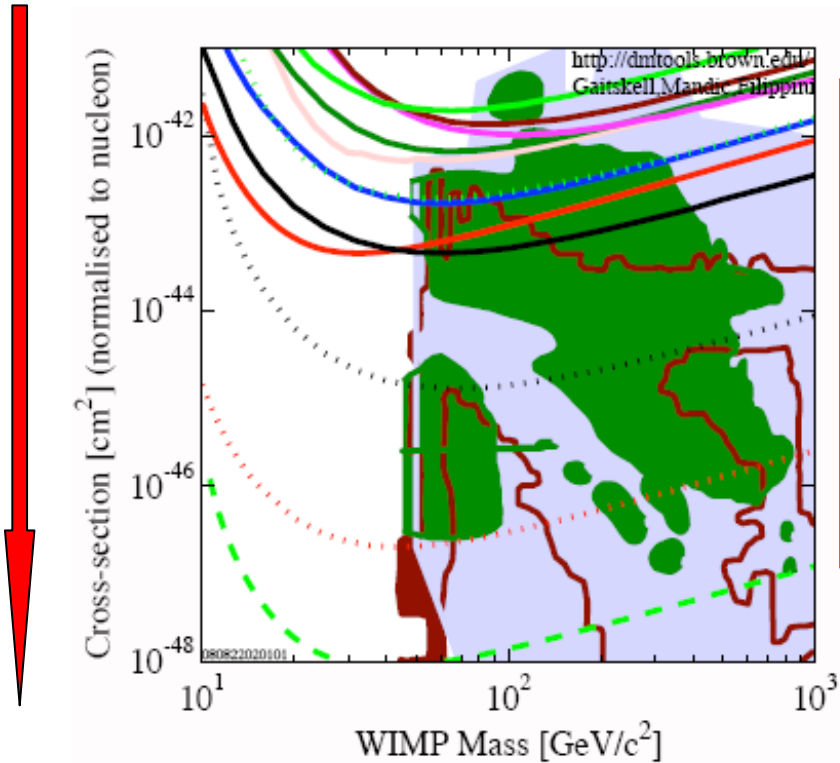
# 暗物质空间实验探测



能量分辨本领是关键

达到**1.5%**  区分暗物质/特殊天体

# 暗物质地下探测



## 暗物质地下实验的发展趋势

- 低本底（更深）
- 吨级质量（更大）

- 暗物质的作用截面非常小
- 探测器能逐个事例鉴别本底
- 需要更深的地下实验室（大于6000米水当量）

## 理论研究

- 利用对称性、量子场论等基本原理解构造暗物质模型
- 研究WIMP暗物质的起源，湮灭及衰变过程等
- 对暗物质进行直接和间接的实验探测
- 在大型强子对撞机(LHC)上寻找暗物质粒子

## 研究目标

建立超越粒子物理标准模型包含暗物质的更基本理论，给实验测量提供理论依据，并接受实验的检验。

# 展 望

暗物质问题起源于天文观测，其最终解决则依赖于物理学与天文学的结合，它应该是天文学与物理学的交叉与融合。

暗物质研究的发展趋势必将从天文观测转向对暗物质粒子性质的实验探测。从现在开始至二十年将是暗物质探测的最重要和关键的时期。

在暗物质、暗能量国际重大前沿研究领域，我国科学家应该有所作为。只要大家齐心协力、优势互补、通力合作、努力拼搏，充分用好天时、地利、人和，我们完全有信心经过这个项目五年的支持，做出跨越式的发展。



# 结束语

**“两暗一新”、迎接挑战！**

**十年太久、只争朝夕！**

谢谢！

*THANKS*

