



清华大学
Tsinghua University

二十一世纪粒子物理天空的乌云



暗物质

王青

2021年8月10日

PreSUSY 2021



清华大学
Tsinghua University

首届“青年科学家50²论坛”于2021年8月1日在南方科技大学举行



科学探索奖
XPLORER PRIZE



青年科学家
50²论坛
XPLORER FORUM

科学的问题与价值



主持人蒋昌建



李培根



潘建伟



刘颖



吴华强



青年科学家

50²论坛

XPLORER FORUM

科学探索奖
XPLORER PRIZE

青年科学家
50²论坛
XPLORER FORUM



清华大学
Tsinghua University



科学探索奖
XPLORER PRIZE



青年科学家
50²论坛
XPLORER FORUM

十大科学技术问题

如何延缓衰老，促进机体修复，提高人类寿命？

人类的意识，以及学习和记忆的生物基础从何而来？

如何实现量子计算实用化？

太阳能发电的规模化高效应用如何突破？

清洁能源、环境保护、气候变化的协同机制如何建立？

人类如何在地外行星（如火星）上居住一年以上？

人脑和机器是否能实现直接通讯？

通用人工智能是否能实现？

如何“求教”大自然，开发高度集成、智能、可修复的仿生系统？

暗能量和暗物质的本质是什么？



青年科学家
50²论坛
XPLORER FORUM

在20210801的“青年科学家50²论坛”上，

由“科学探索奖”的 100 位获奖人提出并投票

评选的“十大科学技术问题”公布



科学探索奖
XPLORER PRIZE



青年科学家
50²论坛
XPLORER FORUM



● 大纲

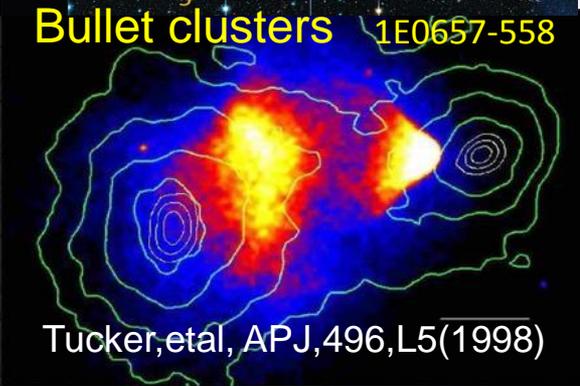
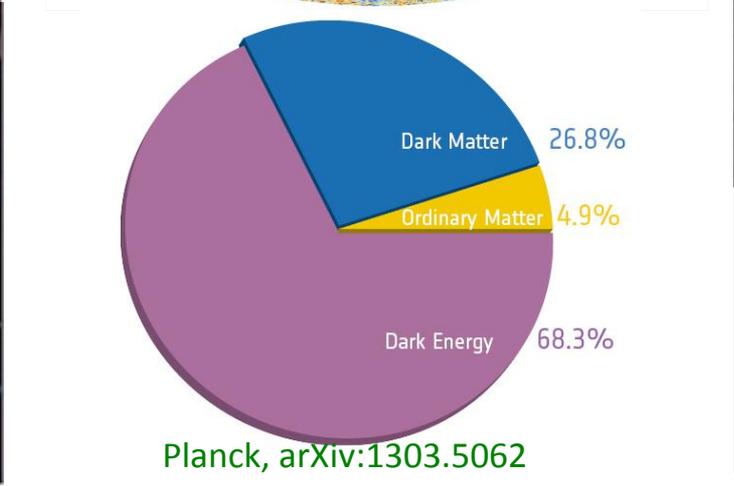
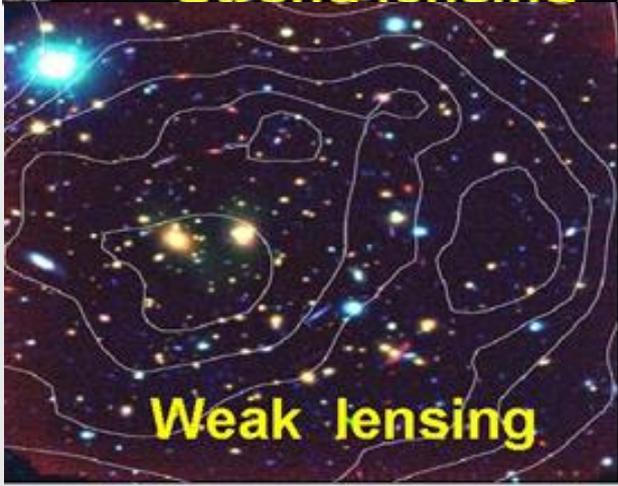
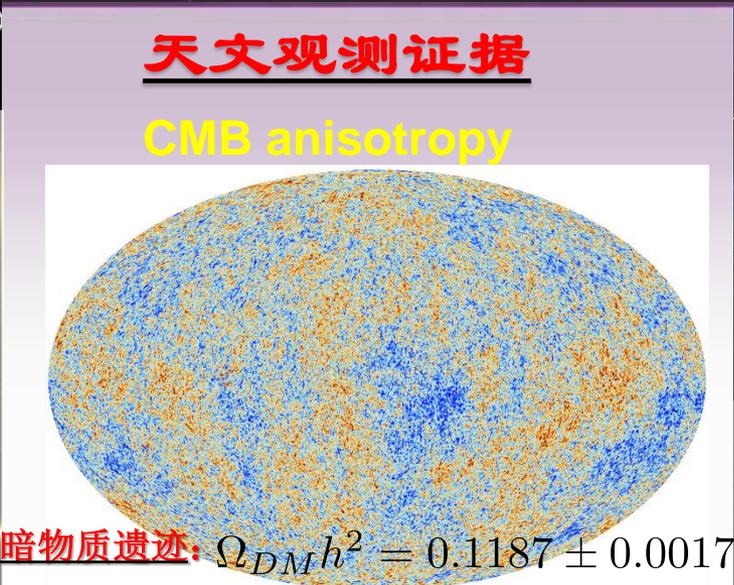
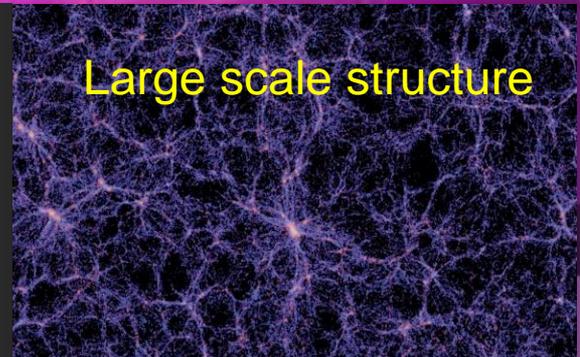
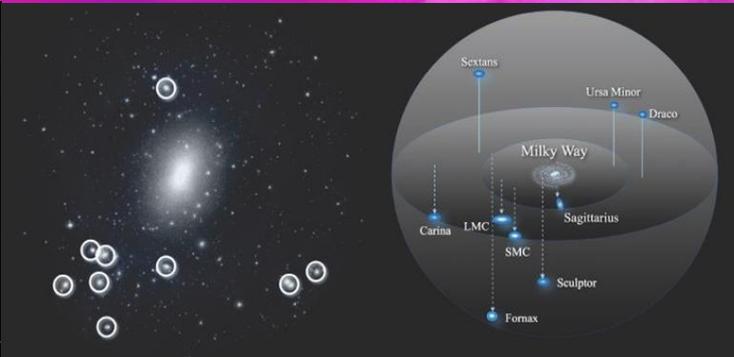
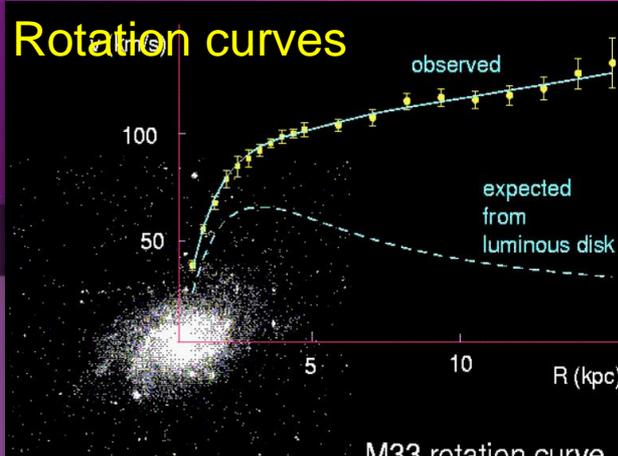
- 暗物质存在吗？它有啥特性？
- 为什么要在粒子物理里寻找暗物质？
- 暗物质研究的现状
- 暗物质研究的未来

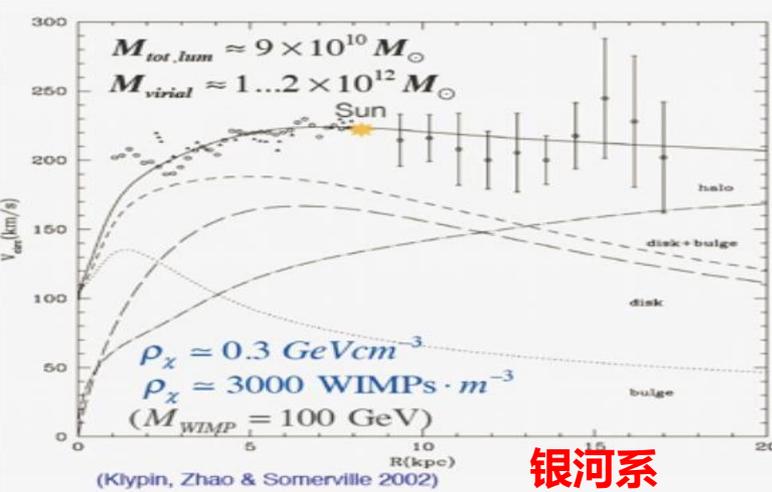


清华大学

Tsinghua University

暗物质存在吗？它有啥特性？





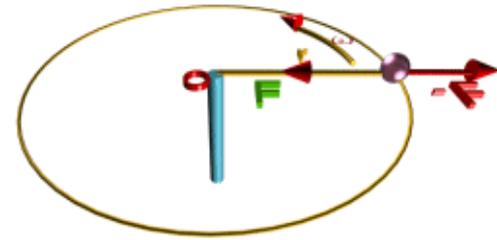
银河系

$$m \frac{V^2}{R} = G \frac{M_{in} m}{R^2}$$

$$\rightarrow V(R) \propto R^{-1/2}$$

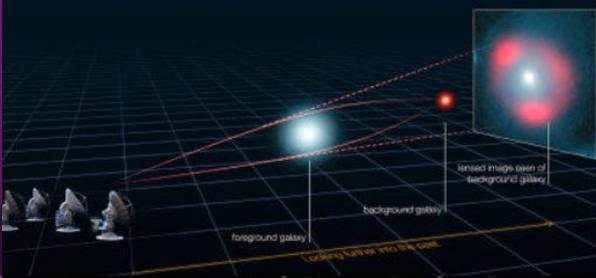
$R > R_0$ 为可见物质的范围

M_{in} 为 R 距离内星系的质量



本科普通物理的力学例子





Gravity Lensing



Just as a glass lens will bend light rays that pass through it, a powerful gravitational field will cause light rays passing nearby to become bent, causing a "lensing effect."

DM self interaction



清华大学

Tsinghua University

盘型暗物质会触发周期性的彗星导致恐龙灭绝

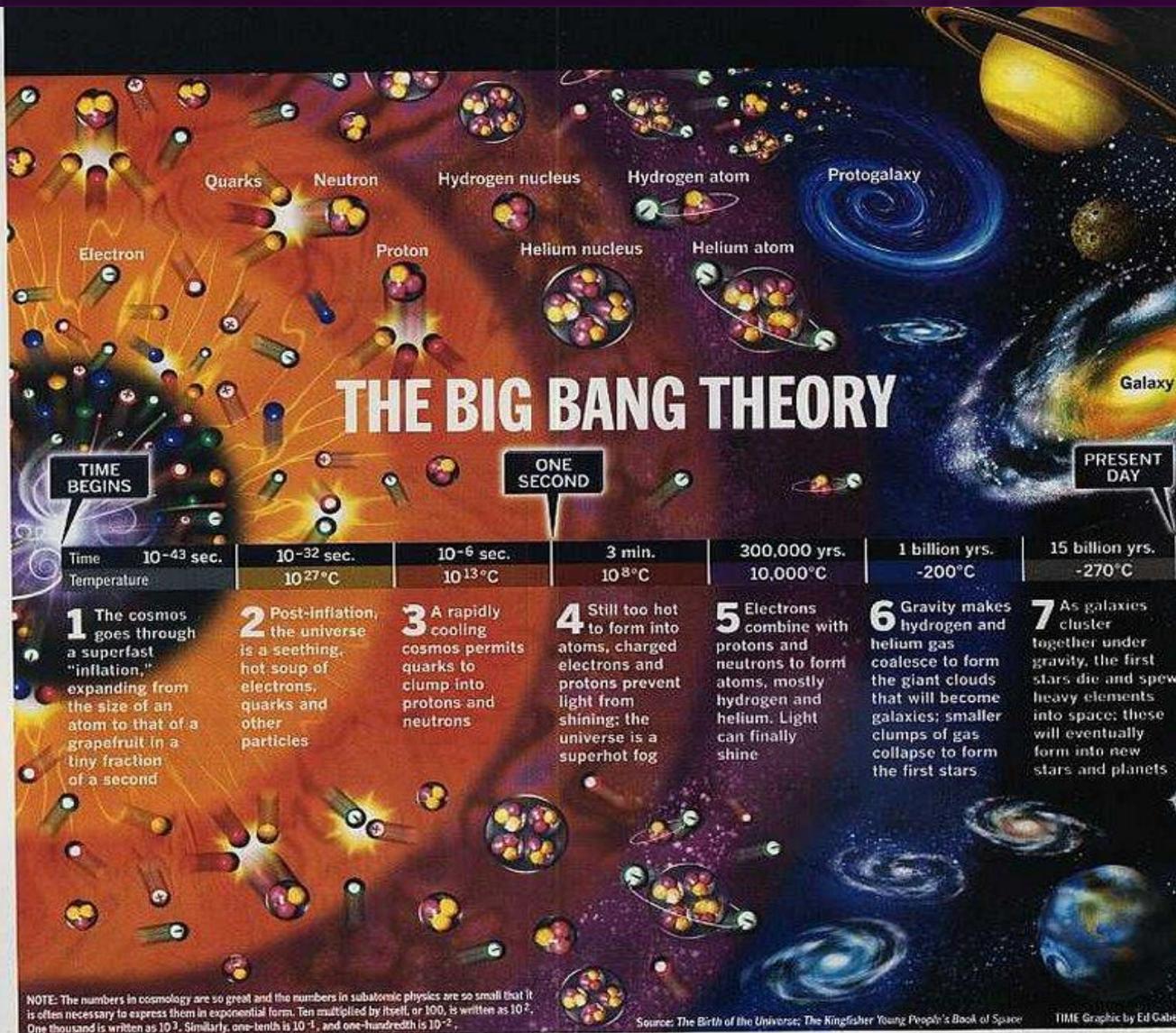


● 我们身边有暗物质吗？

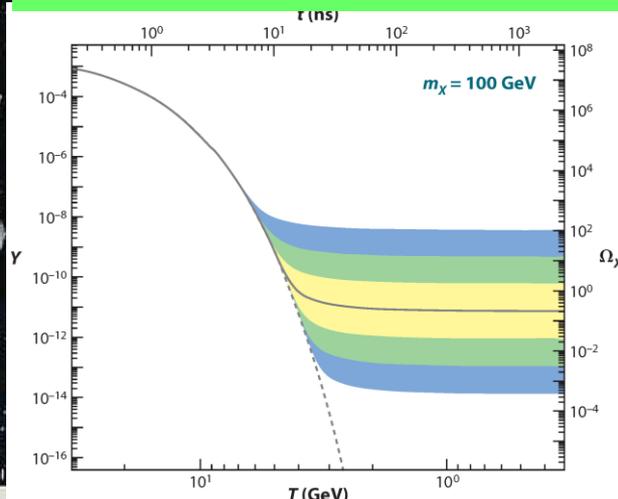




● 宇宙演化如何产生当今的暗物质遗迹？ 流行观点



宇宙高温时暗物质与普通物质“相互转化”，形成致密热平衡等离子体。宇宙膨胀，温度和暗物质密度降低，暗物质与普通物质粒子之间的转化率也降低。当哈勃膨胀速度超过转化速率后，暗物质的产生湮灭反应速率不足以维持体系的平衡。暗物质退耦，遗迹丰度相对稳定。





● 暗物质与普通物质有什么异同？

- 参与引力相互作用 这是它被引入的原因，也是它被称为物质的原因
- 不参与电磁相互作用 中性：不发和吸收光、不带电，因而被称为暗的
或足够小的电荷；电偶极矩和磁偶极矩
- 不参与强相互作用 中性：不带强作用的颜色
- 稳定或长寿命；对自作用限制弱 从早期留存至今，寿命是宇宙寿命量级
- 非重子暗物质为主 星系结构形成；大质量致密晕天体在银河系暗物质晕占比 $< 8\%$
褐矮星、木星大小的巨行星、恒星级黑洞遗迹、白矮星、中子星等
- 非重子中冷暗物质为主 先形成小再合并成大结构，与星系大于星系团年龄相符

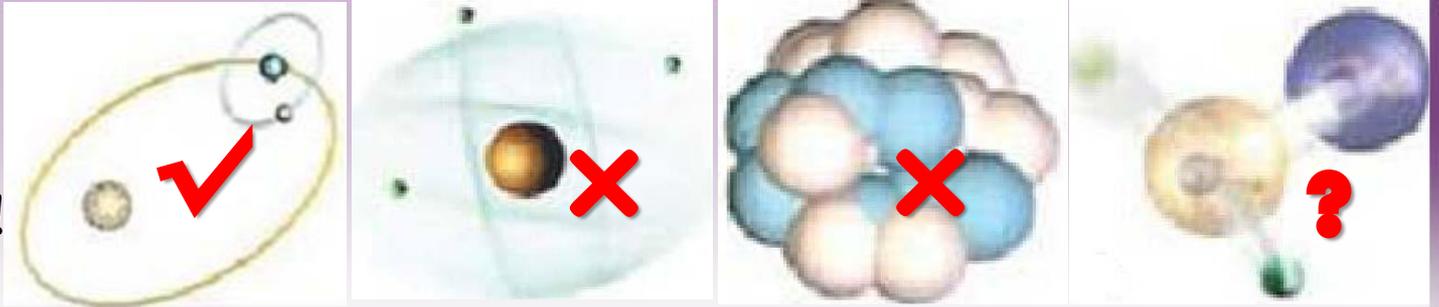
参与的作用

种类



● 暗物质参与弱相互作用吗？或是参与某种新的相互作用？

● 不知道!



● 如果暗物质只有纯引力作用，在地球上无法检测到它

● 如质量在TeV尺度，有弱作用强度作用，产生合适遗迹密度

WIMP miracle

或

WIMPlless miracle

● 引出热门的弱作用大质量粒子 Weakly Interacted Massive Particle

● 暗物质可以不参与标准模型作用，可具有某种新的相互作用



- 关于暗物质的细节

- We know almost nothing about dark matter except for:
 - Equation of state **Non-relativistic particles**
 - Total energy density
 - 23% of the total energy density
 - About five times of the energy density of baryons
 - Its velocity around the earth
 - About 200 km/sec
 - Energy density around the earth
 - 0.4 GeV/cm^3 **$22.4 \text{ mol/L} \sim 1\text{Pa}$**



清华大学

Tsinghua University

为什么要在粒子物理里寻找暗物质？

20世纪开始时的经典物理学

21世纪初的基础物理学 **粒子物理与宇宙学**

经典物理的大厦完美无缺

粒子物理标准模型 + 广义相对论 + 大爆炸

物理学再没新东西了

基础物理物理再没新东西了 新物理；修改引力.....



黑体辐射； 以太



暗能量； 暗物质

黑体辐射导致量子力学

暗能量导致 ???

经典真空：一直在寻找以太

量子真空：一直在寻找新物理 (**暗物质**)

苦苦探寻未果导致 **狭义相对论**

若真苦苦探寻未果导致 ???

大厦建成后没多久就有了新的发展

能否重现百年前的物理学历史?

1974: c quark observed (SLAC,BNL)
1974-77: τ lepton observed (SLAC)
1977: b quark observed (FNAL)
1983: W and Z observed (CERN)
1995: t quark observed (FNAL)
2000: ν_τ observed (FNAL)
2012: H observed (CERN)
2024: dark matter ?

玛雅历2012.12.21结束后

开启了 后希格斯 时代

1974: Binary Pulsar

1987: Supernova

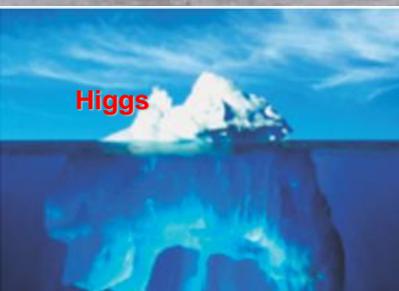
1992: Cosmic Microwave Background

1998: Universe expanding

2016: Gravitation Wave

20世纪初，曾经有两朵小小的乌云，竟然酝酿出漫天的狂飙，
动摇了几个世纪以来建成的物理学大厦。雨过天晴，相对论和
量子力学巍然耸立，人类社会进入科学技术迅猛发展的新时代。

21世纪初，又有两朵乌云，是否还会像百年前那样酝酿新风暴，
把人类对宇宙和自然的认识推向新的高峰，拭目以待！



Higgs

- 非渐近自由的规范作用
- 唯一的标量场
- 负责所有粒子质量产生



模型缔造者温伯格，带着未见新物理的遗憾走了

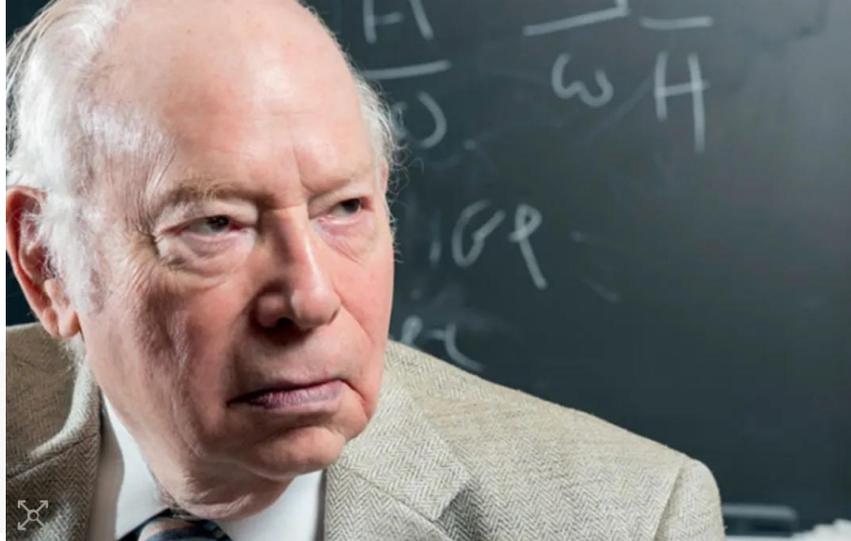
中国物理学会期刊网 今天

以下文章来源于返朴，作者Matt Valentine



返朴

溯源守拙·问学求新



一般认为：温伯格所提的基本粒子中的费米子质量的问题是下一个时代的粒子物理才有可能予以考虑研究的内容。目前是研究基本粒子中的玻色子的规范粒子的质量的时代，连玻色子中的希格斯玻色子的质量也是无法研究的。规范玻色子的质量的起源在粒子物理标准模型中通过引入希格斯场建立希格斯机制得以实现，只是2013年诺贝尔物理奖的核心。这个对规范玻色子质量的解释是否就满意了呢？ 否！

人们相信目前的希格斯场及其相互作用很可能只是一个有效的理论，并不是背后真正的基本相互作用，这是当今探索新物理的主要考虑。

当被问及如果可以选择，
他希望在有生之年解开什
么谜团时，

温伯格无需多想：他希望

能够解释观测到的夸克和

轻子质量的模式。



● 暗物质与超对称理论

- 新物理原来最被看好的是超对称理论
- 它可解决涉及质量起源的希格斯粒子引发的精细调节问题
- 超对称理论预言一定存在暗物质粒子
- 人们热切期望在TeV能区发现超对称
- 由此导致在TeV能区的粒子物理范围内寻找暗物质的热潮
- 可惜一直没有找到.....



- 暗物质是粒子（场）吗？和普通物质有相互作用吗？

What makes dark matter ?

Atoms: 3 forces and many fund. particles

- √ 修改引力? 超出粒子物理范畴
- √ 粒子? 经验和量子场论要求物质以粒子形式出现！

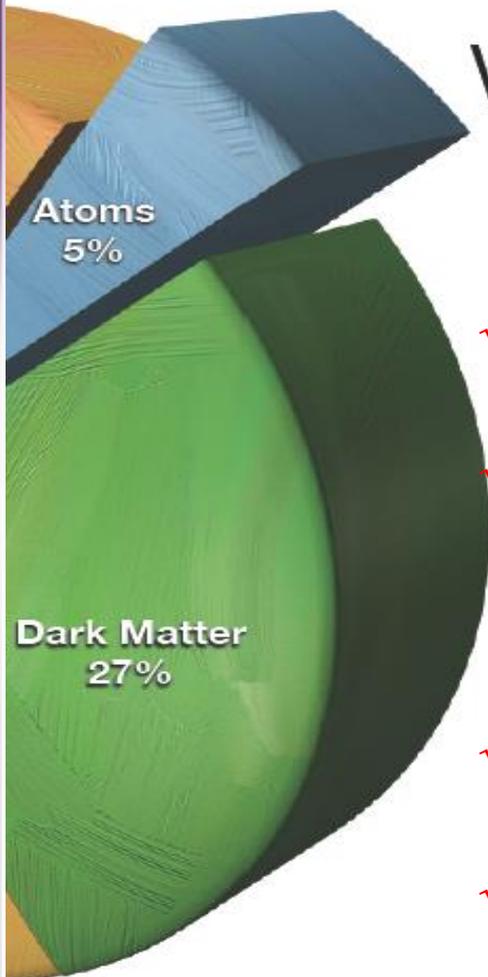
DM Particle

暗物质和普通物质

???

同量级也许意味着它们有同样的起源

- √ 非引力作用? 是否参与弱相互作用或其它?
- √ 和哪代作用? 和夸克还是和轻子作用?





清华大学

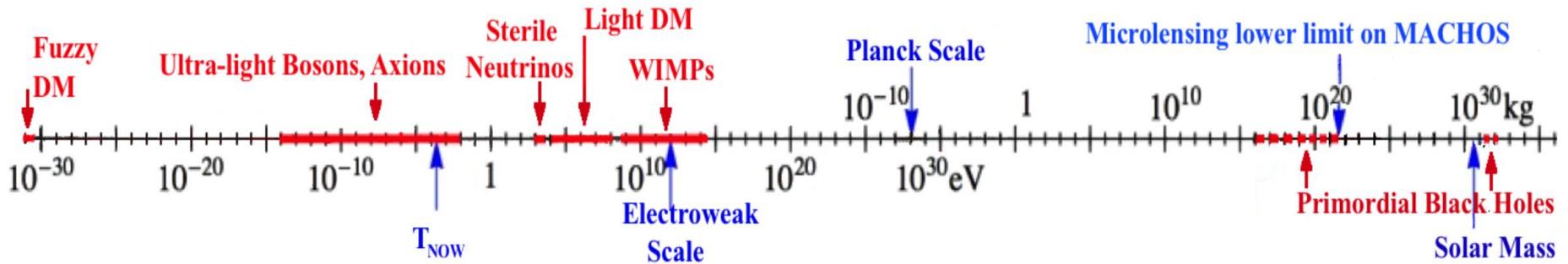
Tsinghua University

暗物质研究的现状





暗物质候选者？



- 原初黑洞 (10^{40} - 10^{55} GeV)
- 超重暗物质 : WIMPzilla 10^{15} GeV
- 常规 WIMPs 暗物质理论模型 (GeV- 1 TeV)

e.g MSSM, Extral dimension, Little Higgs, Singlet DM models

- 轻DM 粒子 (keV) Sterile neutrinos
- 极轻暗物质 (10^{-10} - 10^{-22} eV) Axion and Axion-like particles , Fuzzy DM



● 基本粒子理论中的暗物质：

- ❖ 弱作用大质量粒子 WIMPs : 相互作用截面和弱相互作用界面相当。
- ❖ 惰性中微子 Sterile neutrinos : 除引力外不与标准模型粒子作用的中性轻子。
- ❖ 中性微子 Neutralinos : 中性规范粒子和希格斯对应的超对称伙伴的组合。
- ❖ 非对称暗物质 Asymmetric dark matter : 不具有物质反物质对称性的暗物质。
- ❖ 轴子、类轴子 Axions : 为解决QCD中强CP问题由Peccei-Quinn提出的粒子。
- ❖ 暗光子 Dark photon : 可以和光子发生混合的U (1) 规范粒子
- ❖ 镜像暗物质 Mirror world dark matter : 与现实物质形成镜像的世界中的粒子。
- ❖ 额外维度暗物质 Extra dimensional dark matter : 额外维空间所产生的粒子。
- ❖ 强作用大质量粒子 SIMPs : 具有强作用自作用的大质量粒子。
- ❖ 复合暗物质 Composite dark matter : 形成束缚态的暗物质粒子。



RECEIVED: January 18, 2012

REVISED: March 11, 2012

ACCEPTED: March 24, 2012

PUBLISHED: April 11, 2012

Spin 3/2 particle as a dark matter candidate: an effective field theory approach

Ran Ding^a and Yi Liao^{a,b,c}

^a*School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

^b*Center for High Energy Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

^c*Kavli Institute for Theoretical Physics China, CAS, Beijing 100190, China*

一般讨论的都是
自旋0和1/2的暗物质粒子

偏离 WIMP, 理论越来越复杂、任意...

PUBLISHED: May 20, 2014

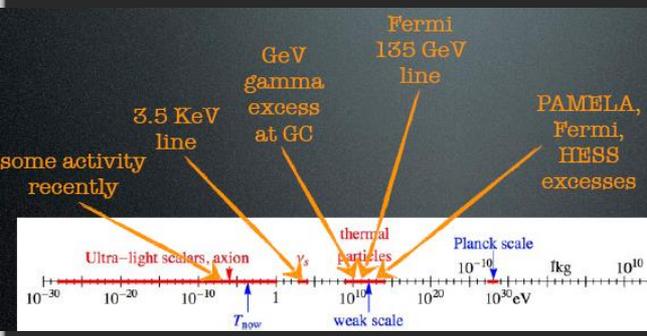
Higgsphobic and fermiophobic Z' as a single dark matter candidate

Nan Chen,^a Ying Zhang,^b Qing Wang,^{a,c,d,1} Giacomo Cacciapaglia,^{e,f,1}
Aldo Deandrea^{e,f,g} and Luca Panizzi^h

^a*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China*

^b*School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R. China*

^c*Center for High Energy Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China*



χ



χ

Scattering χ

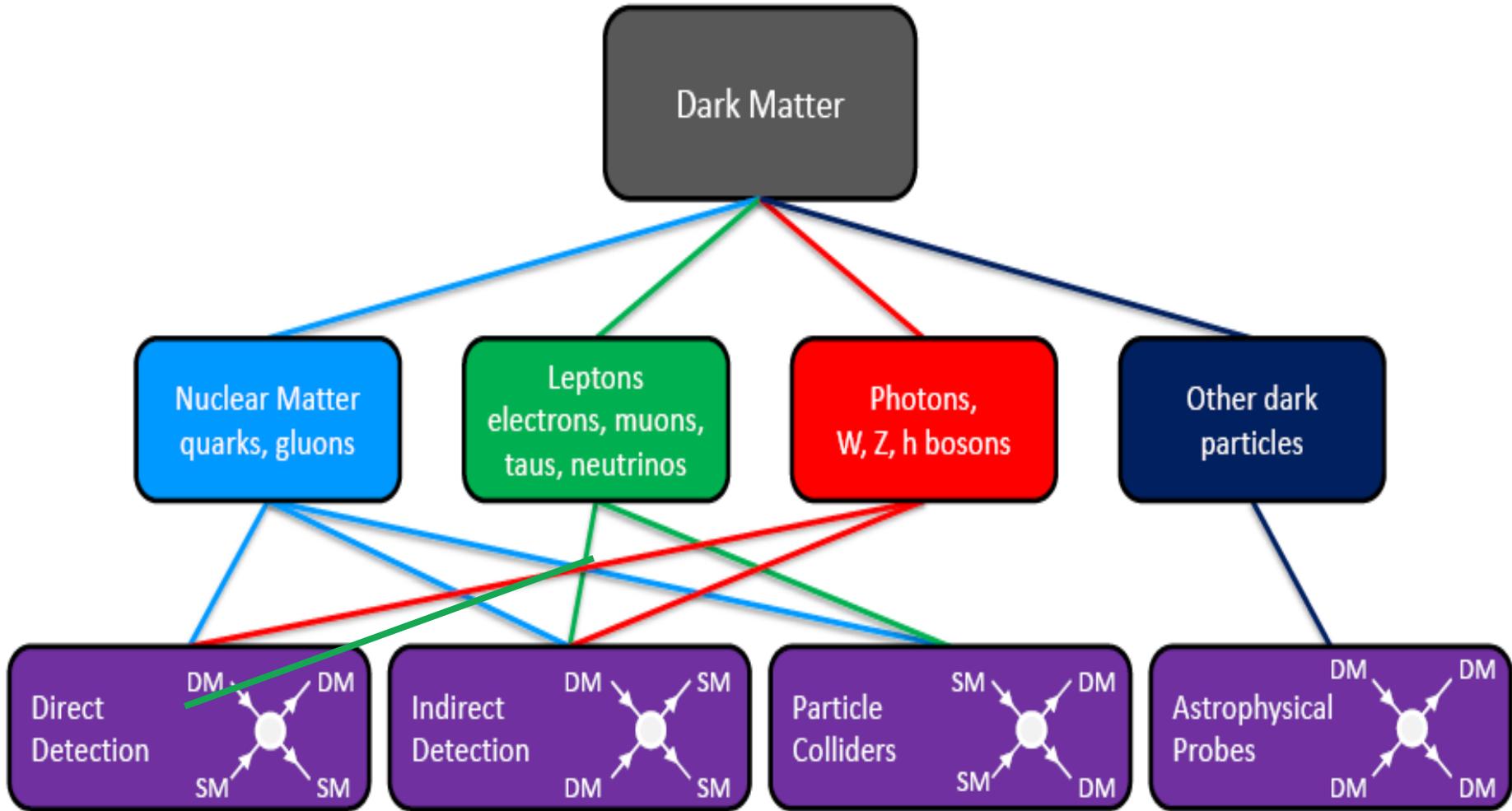
(Astrophysics observation, just talked)

χ





● 暗物质与普通物质可能的非引力相互作用：



tension 多讲

anomaly 少讲

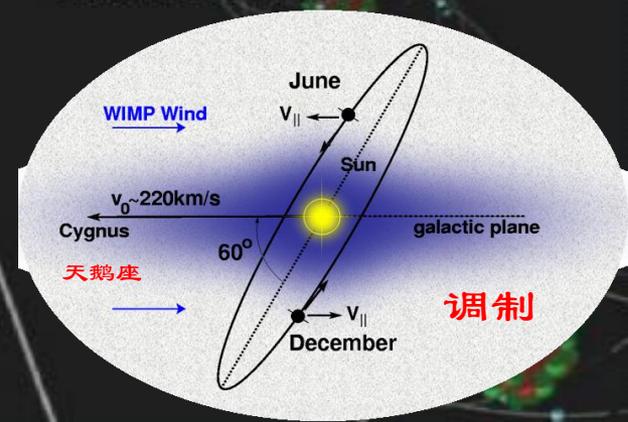
no evidence 基本不讲

many facts 讲过了

Direct Dark Matter Detection

WIMPs and Neutrons
scatter from the
Atomic Nucleus

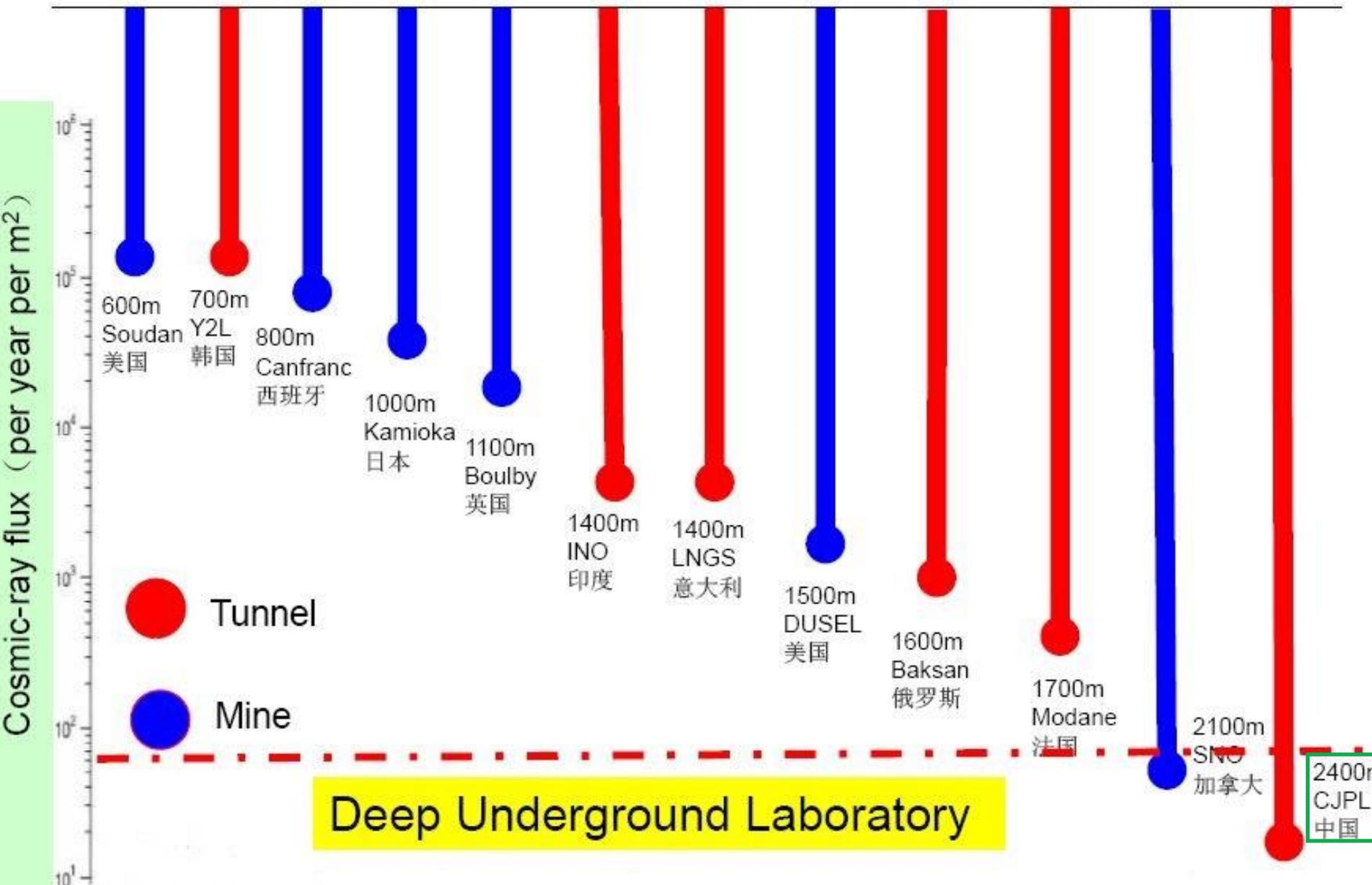
Photons and Electrons
scatter from the
Atomic Electrons



Many International Efforts Over Last 20 Years



Comparison of rock overburden of these UL





清华大学
Tsinghua University

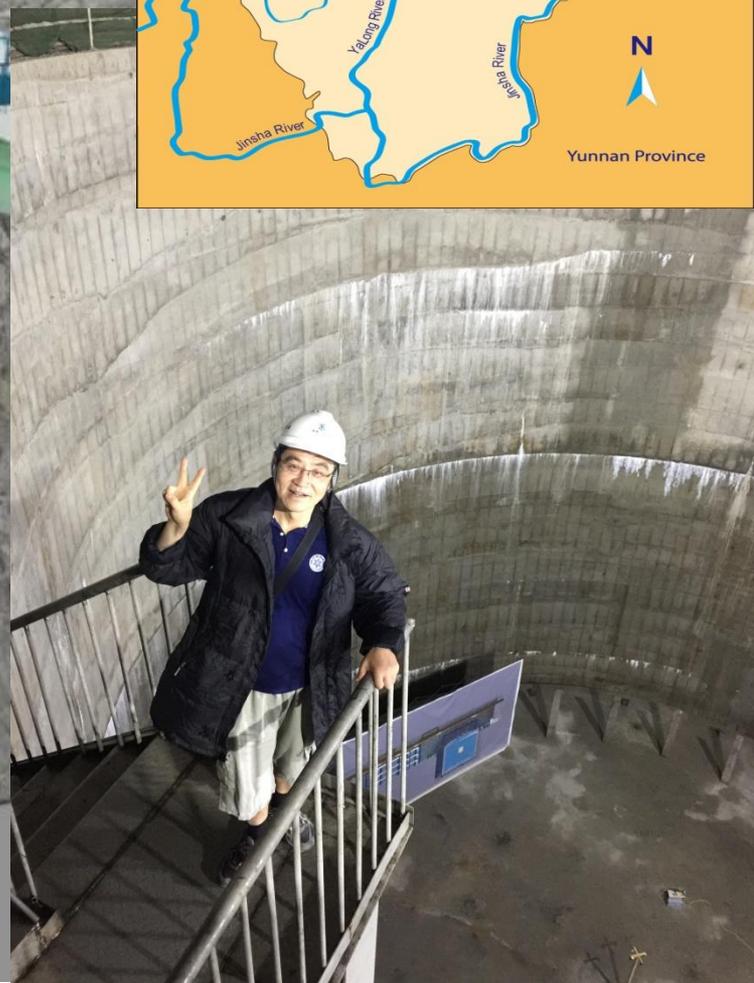
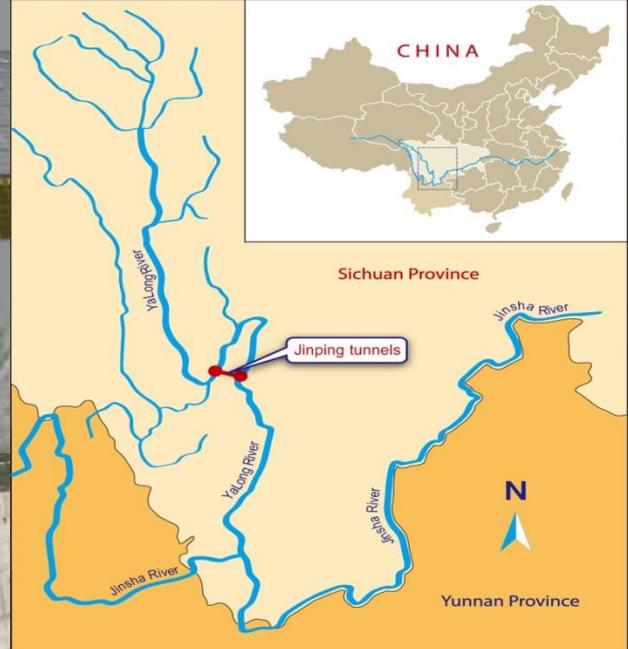
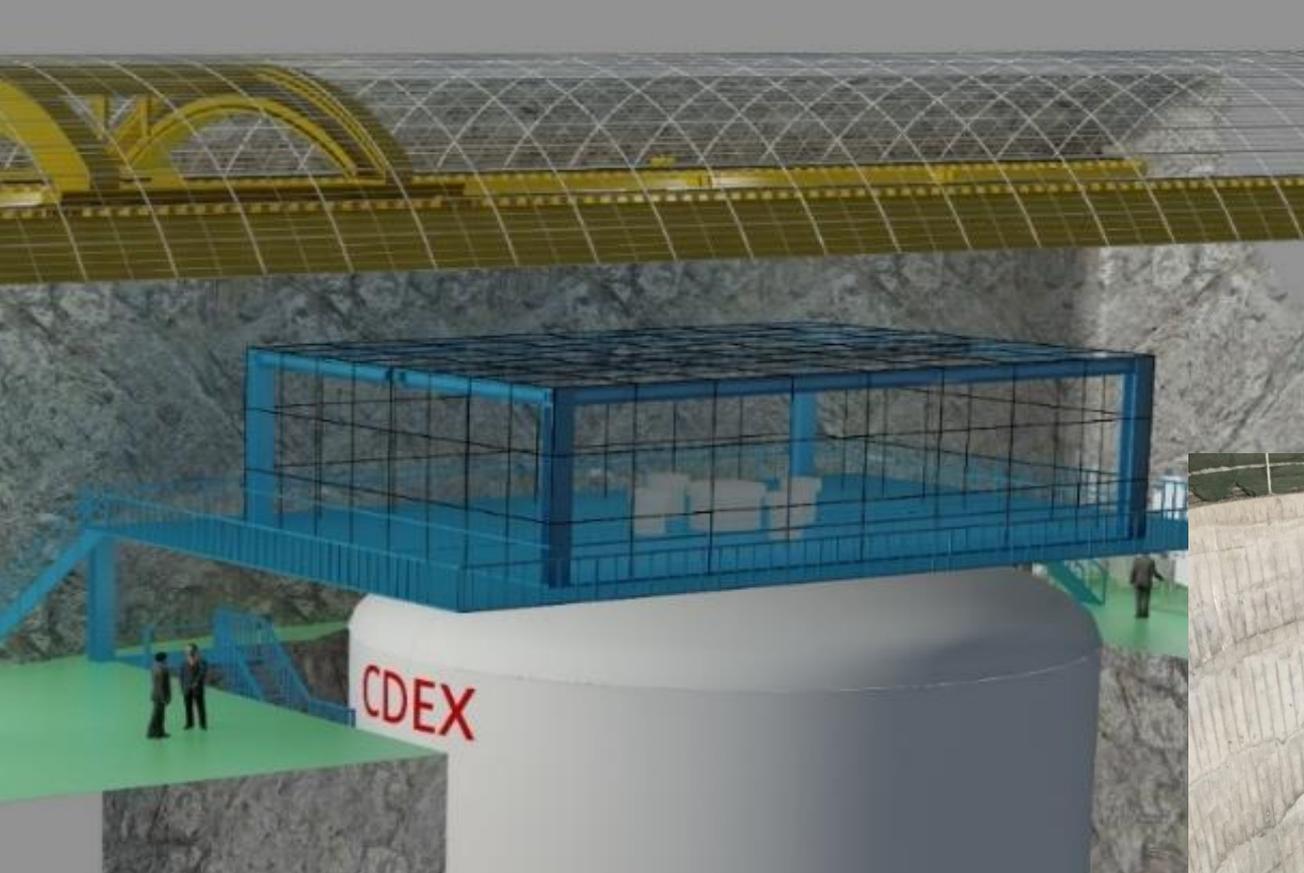
中国锦屏地下实验室
Jinping Underground Laboratory

世界最深地下实验室

长啥样?

马豪

清华大学工程物理系 副教授



- Per-CDEX
 - 2002-2004 TEXONO + KIMs
 - 2004-2008 DM at y2L
- CDXE 10年
 - 2008 - 2010 CJPLI 建设
 - 2010 - 2014 实验系统建立
 - 2014 - 2018 物理运行与成果

王青的博士—杨丽桃2017，现在就职清华工程物理系



王青的博士—陈楠2014



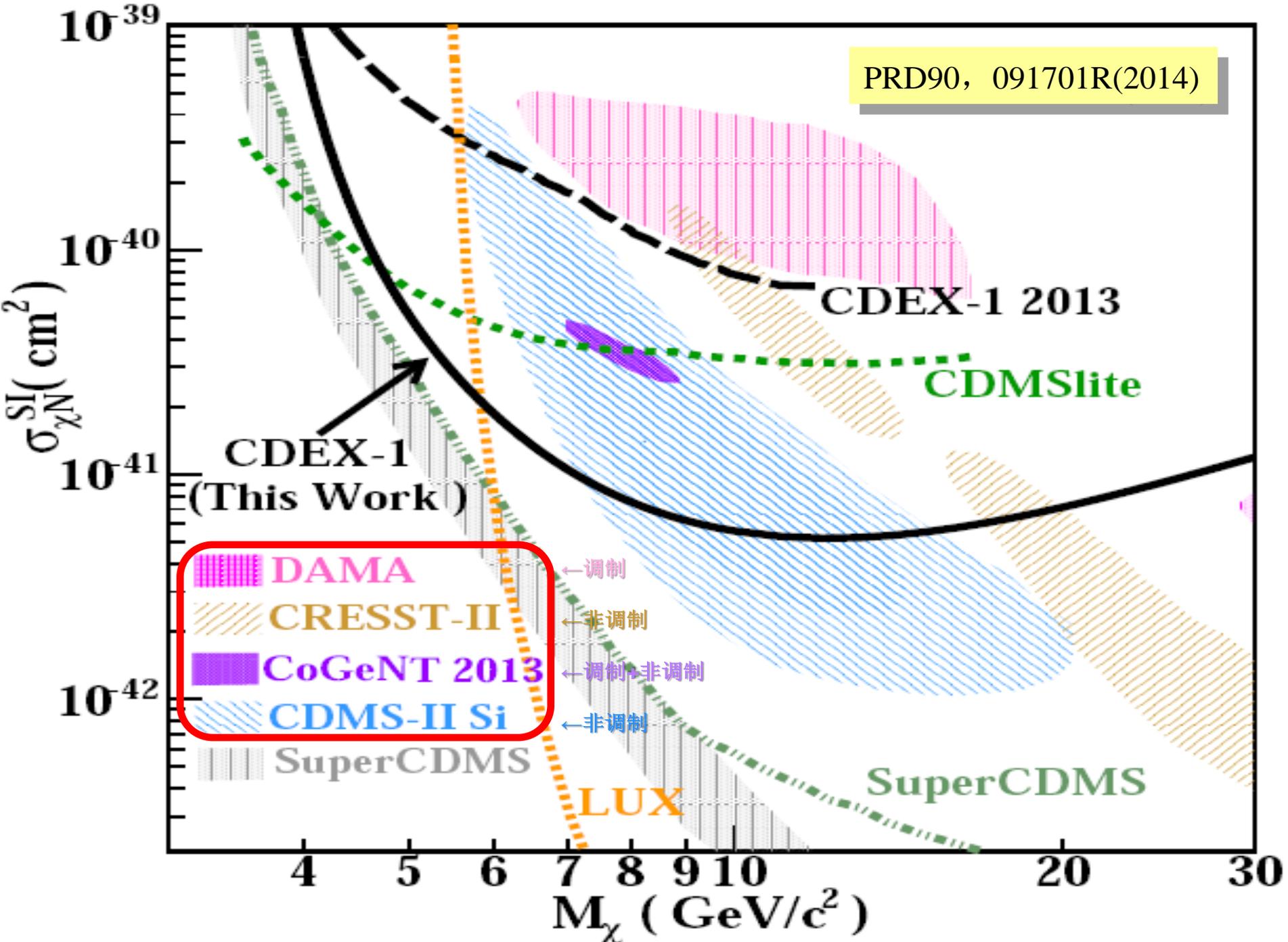
20170802王青与杨丽桃
在锦屏一期实验室



王青的博士—王轶2020



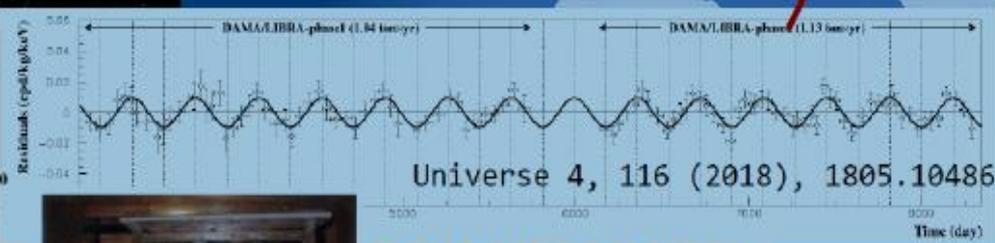
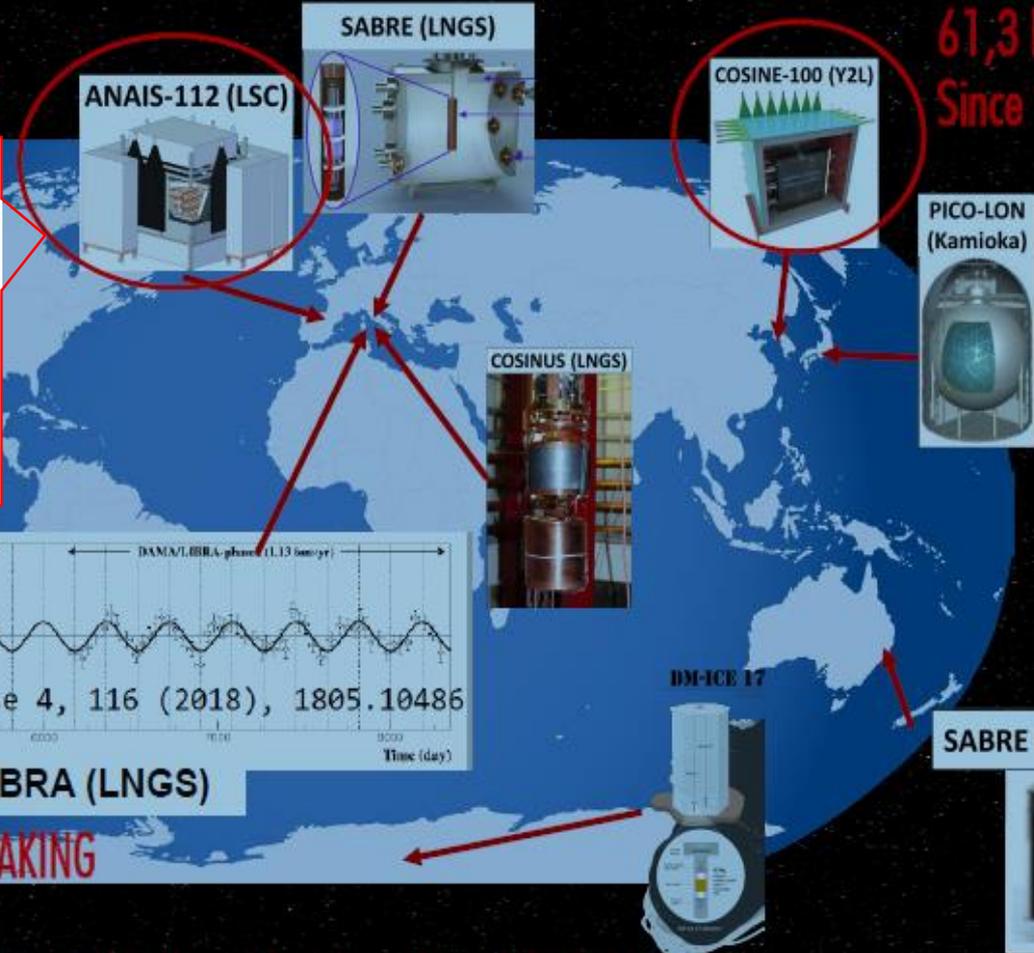
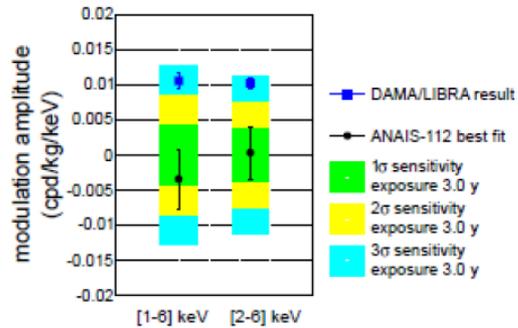
王青的博士—马菁露2018





IN DATA-TAKING
112,5 kg
Since Aug 17

IN DATA-TAKING
61,3 kg (effective mass)
Since Sept-Oct 16



IN DATA-TAKING
~250 kg
Since Sept 2003 phase -1 / since Dec 2010 phase-2

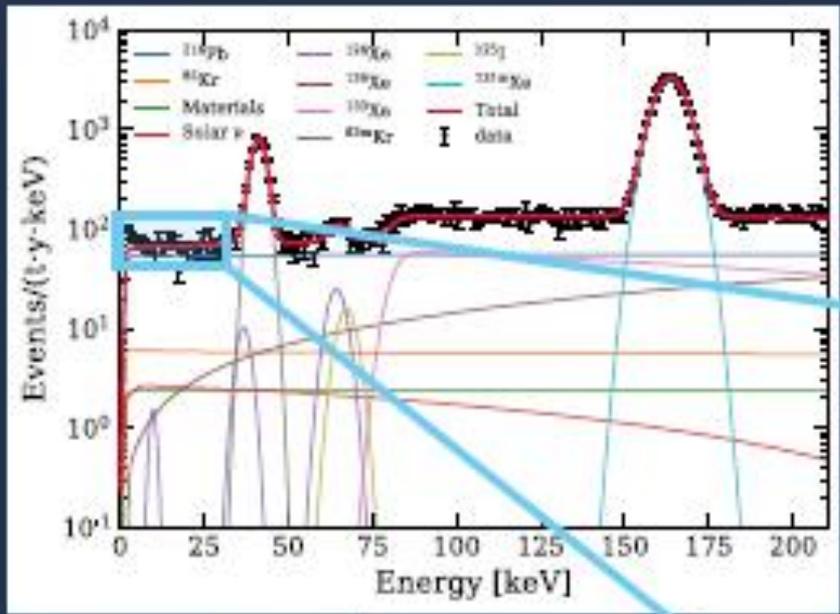
Experimental Situation

EXCITING MYSTERY FROM ERS

EXCESS OF ELECTRONIC RECOIL EVENTS AT LOW ENERGY

Phys. Rev. D 102, 072004

12 October 2020



76 ± 2 events/(t-y-keV)
Fitted background in [1, 30] keV

Events in [1, 7] keV **232 ± 15** expected **285** observed

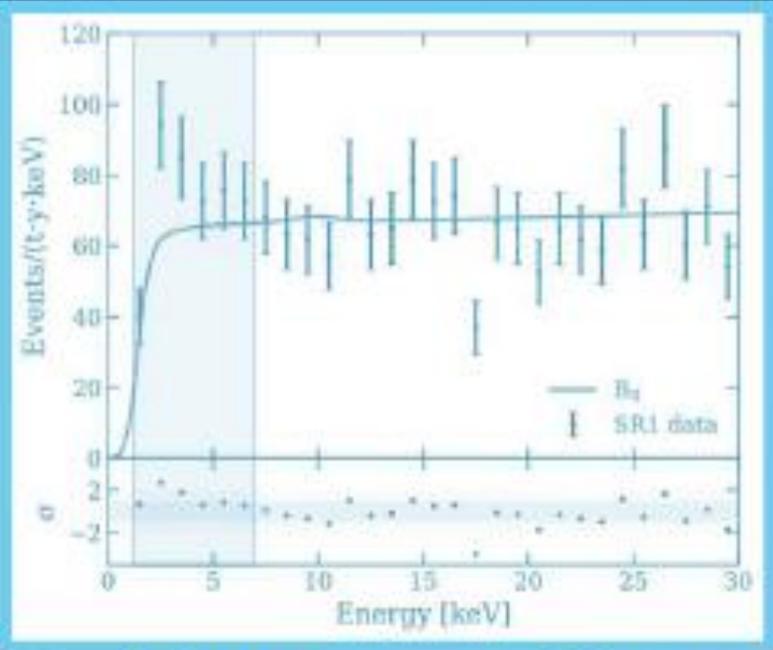
Would be a **3.5σ** fluctuation



**XENON
RESULTS**

Background model
JCAP04(2016)027
fit to data:
very good across
most of the
energy range
[1, 210] keV

No.	Component	Expected Events	Fitted Events
i	²¹⁴ Pb	(3450, 8530)	7489 ± 300
ii	²¹⁴ Bi	896 ± 150	773 ± 80
iii	Materials	323 (Fixed)	323 (Fixed)
iv	¹³⁶ Xe	3138 ± 310	2198 ± 150
v	Solar neutrinos	228.7 ± 6.6	328.8 ± 4.7
vi	¹³² Xe	808 ± 410	808 ± 85
vii	^{131m} Xe	23760 ± 640	24278 ± 350
viii	¹⁴⁰ Ar (K)	79 ± 33	67 ± 32
ix	¹⁴⁰ Ar (L)	15.3 ± 6.5	13.1 ± 2.3
x	¹³⁹ Ar (M)	3.4 ± 1.3	2.84 ± 0.98
xi	⁸⁵ Kr	3508 ± 330	3671 ± 51
xii	¹²⁹ Xe (NIC)	135 ± 58	113 ± 36
xiii	¹²⁹ Xe (SCL)	38 ± 15	34.9 ± 7.3
xiv	¹²⁹ Xe (LL)	2.8 ± 1.1	3.04 ± 0.55



Search in 1 t LXe fiducial mass and 226.9 live days

THE XENON COLLABORATION

2020年9月，清华加入XENON国际合作组

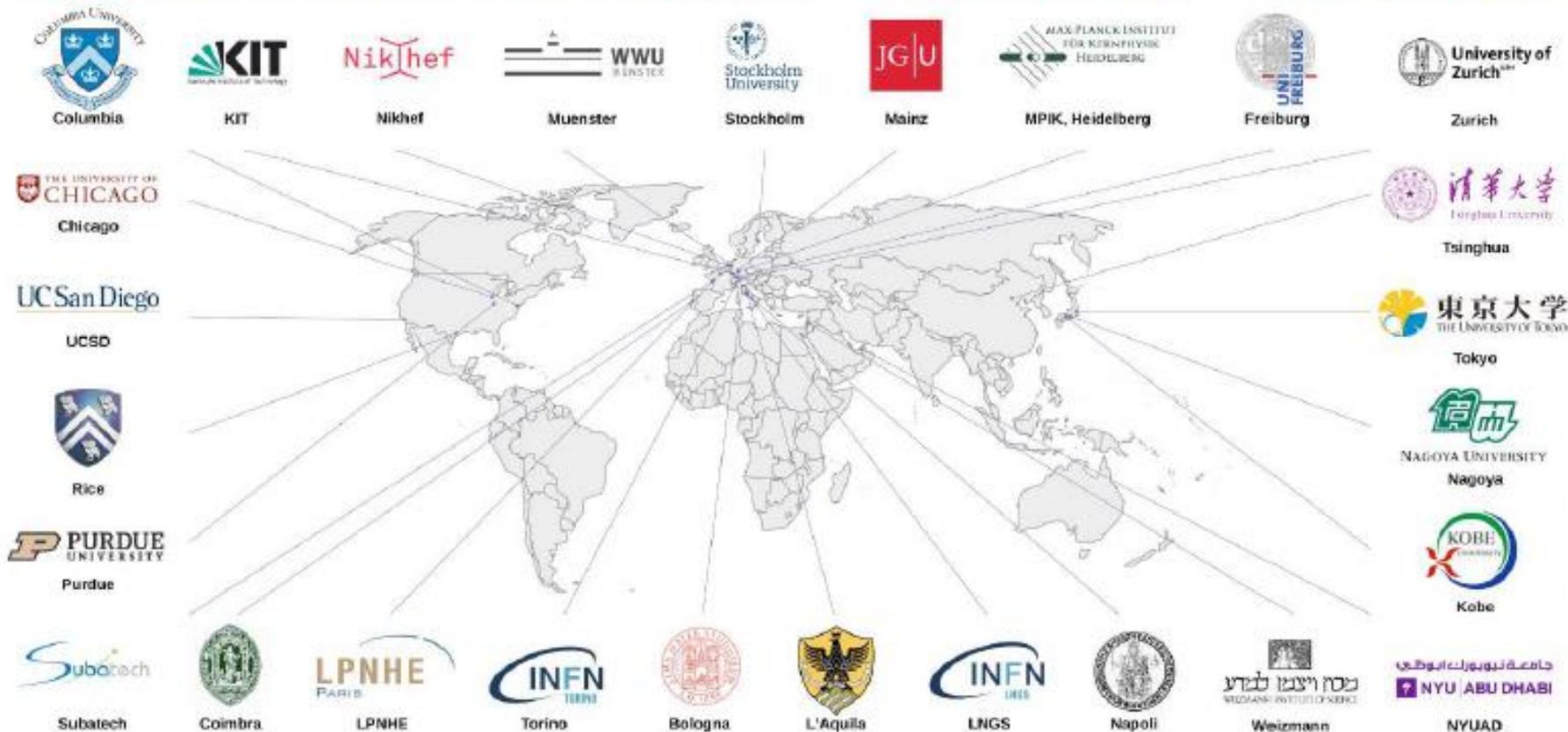
 Spanning over 17 out of 24
Always open eyes on XENON

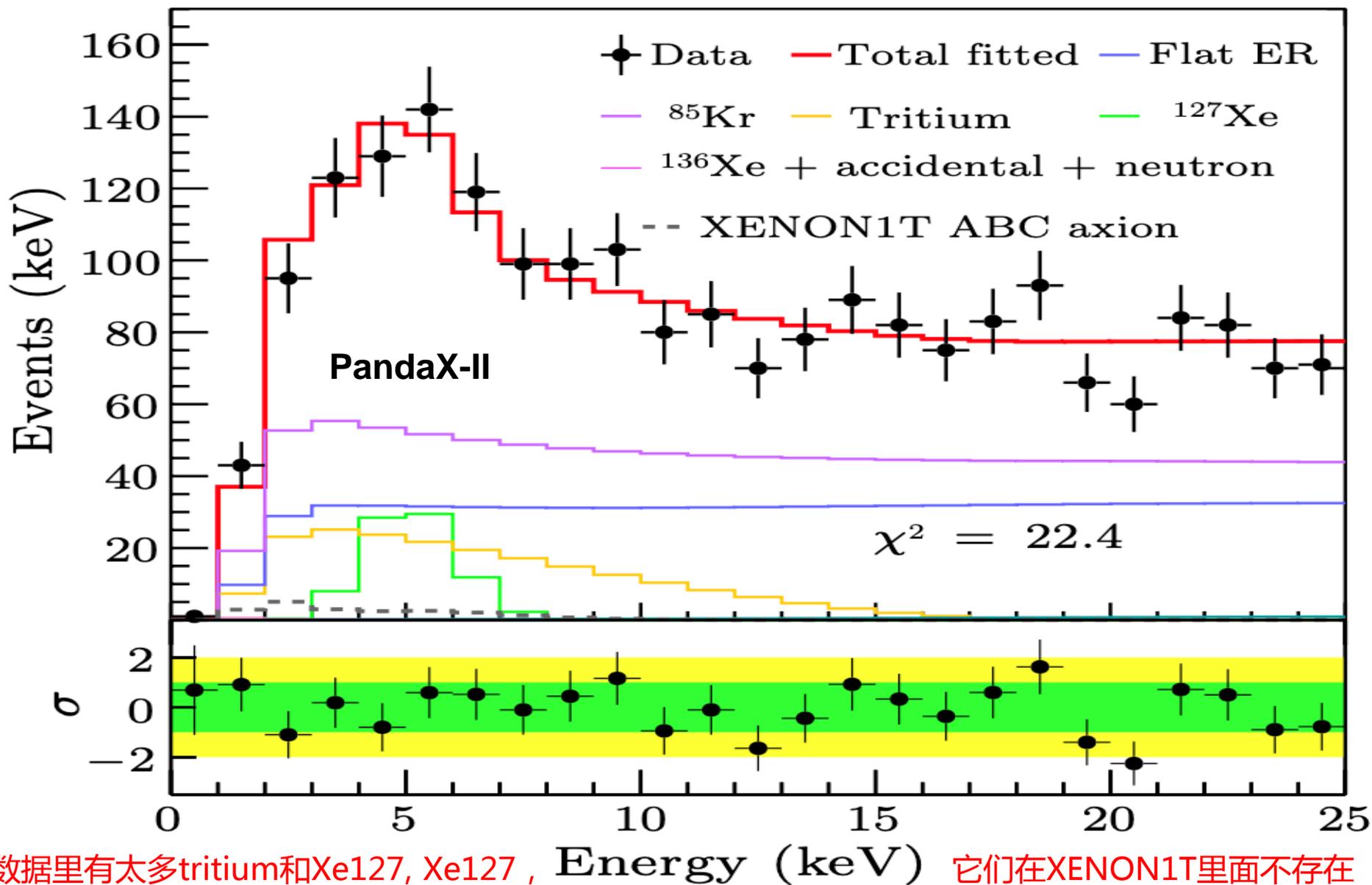
170 SCIENTISTS

27 INSTITUTIONS

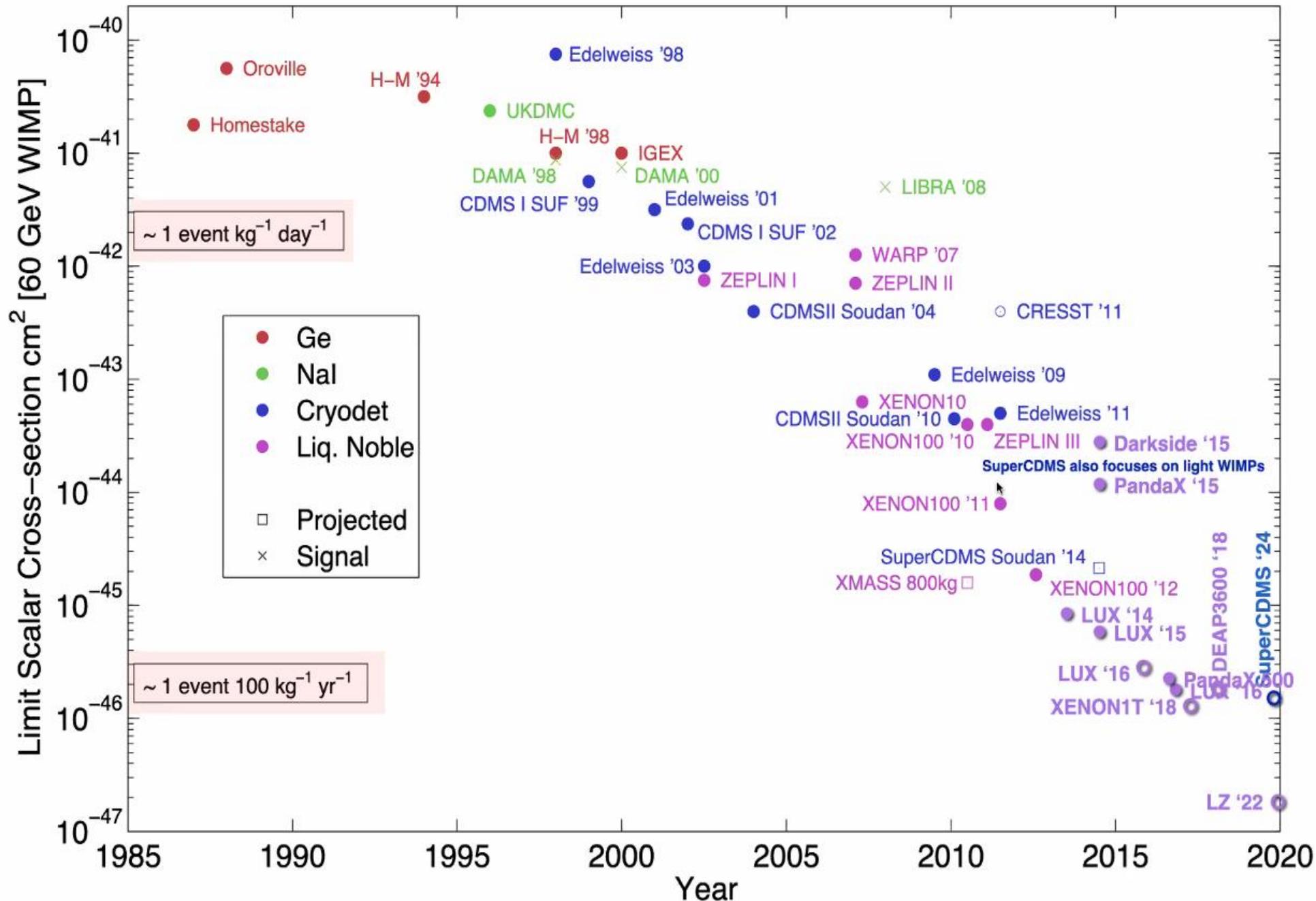
11 COUNTRIES

9 TIME ZONES





Dark Matter Searches: Past, Present & Future

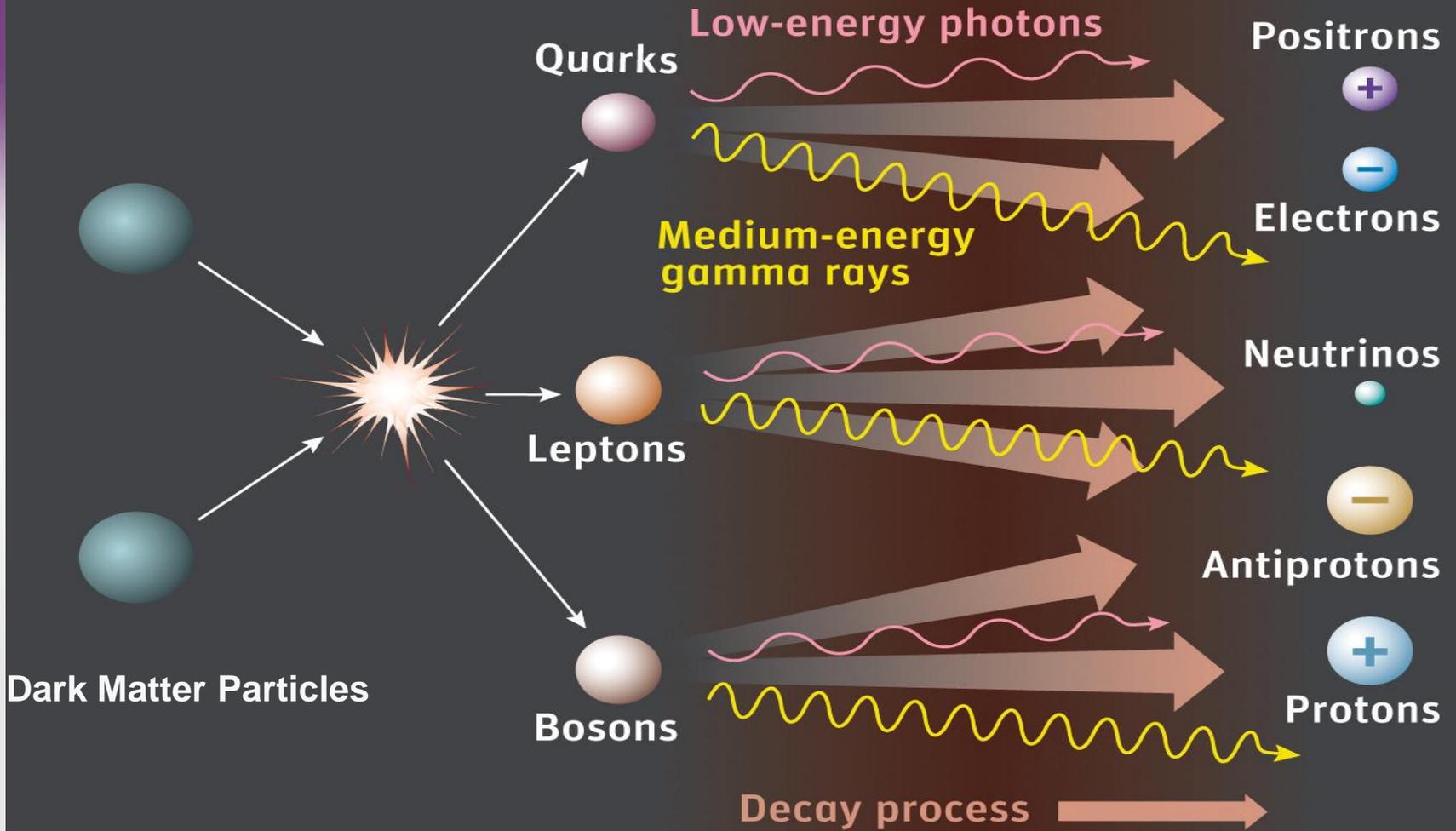




● 暗物质的间接探测

正电子和反质子是**非源初的**!

电子和质子依赖**初始源**!





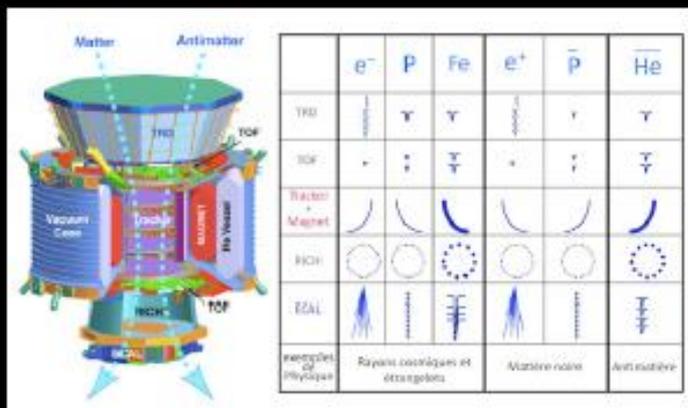
Searching for DM in cosmic rays



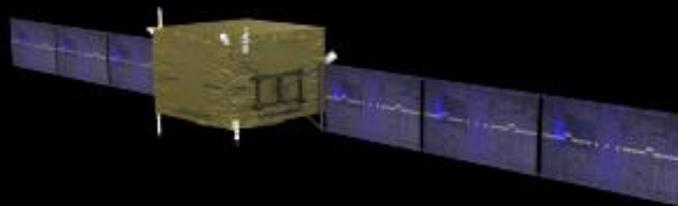
PAMELA



Fermi



AMS02



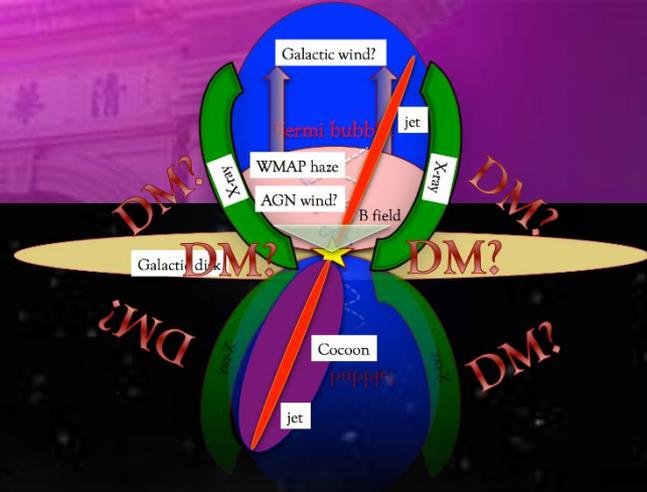
DAMPE (悟空)

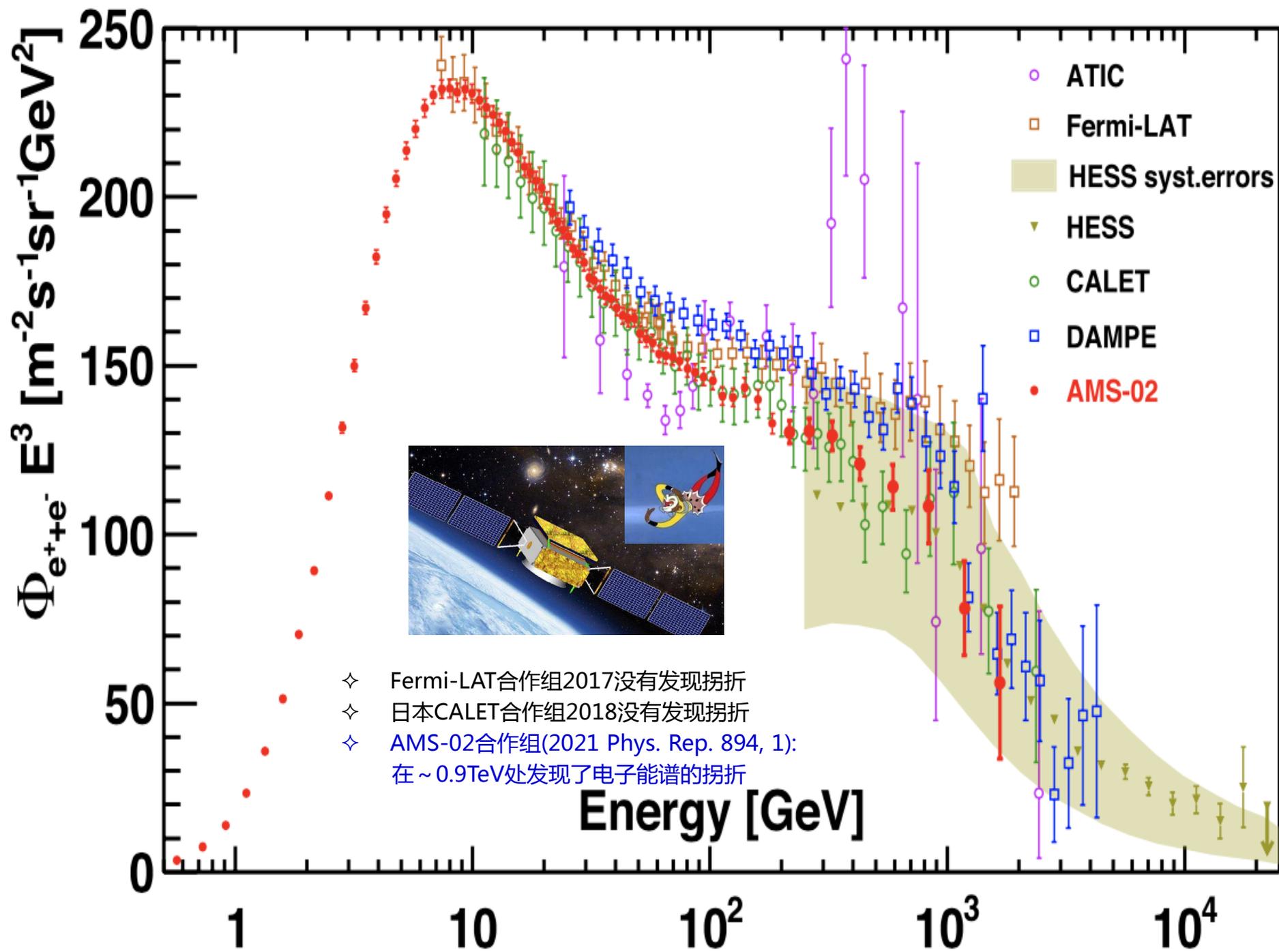


清华大学

Tsinghua University

Fermi γ -ray Bubbles as foreground for DM search from Galactic center

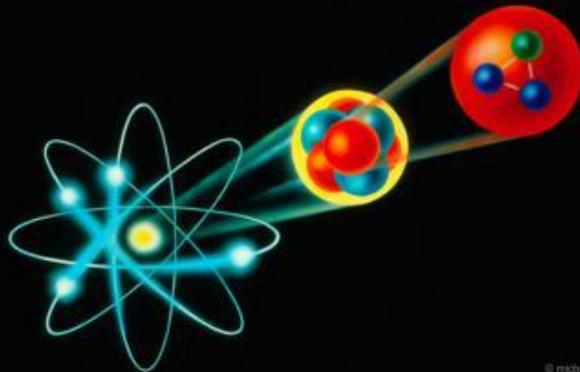




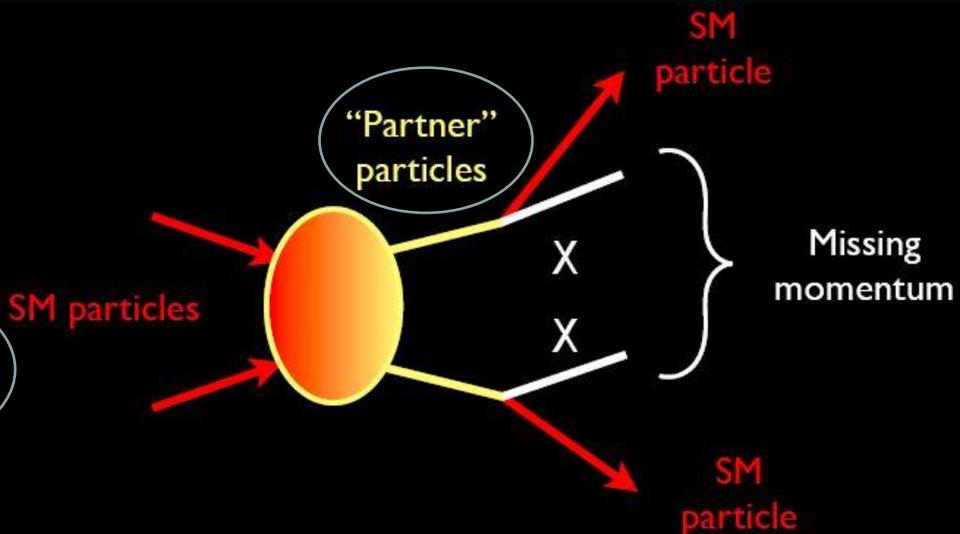
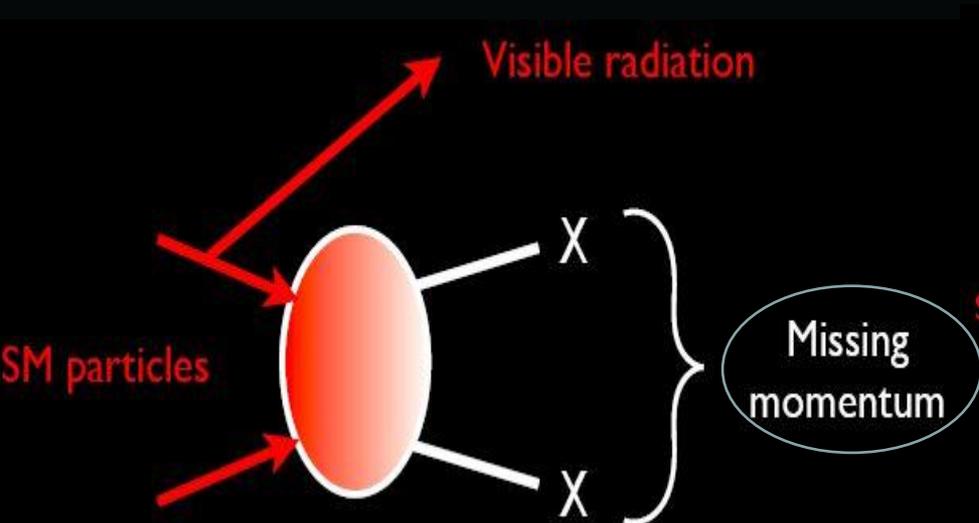
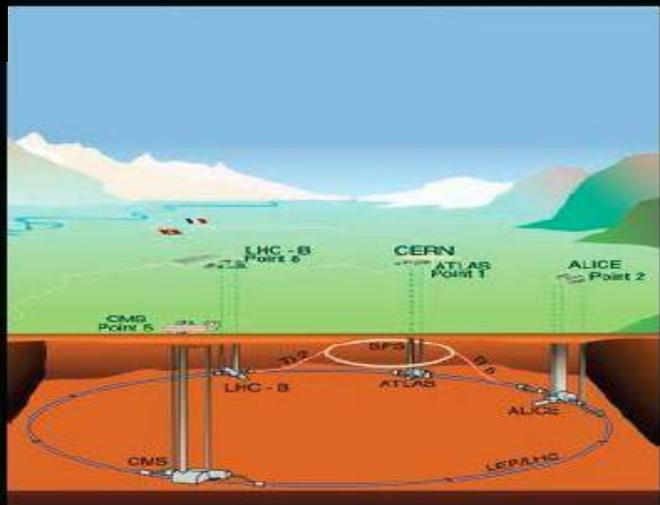


清华大学
Tsinghua University

● 暗物质的对撞机寻找

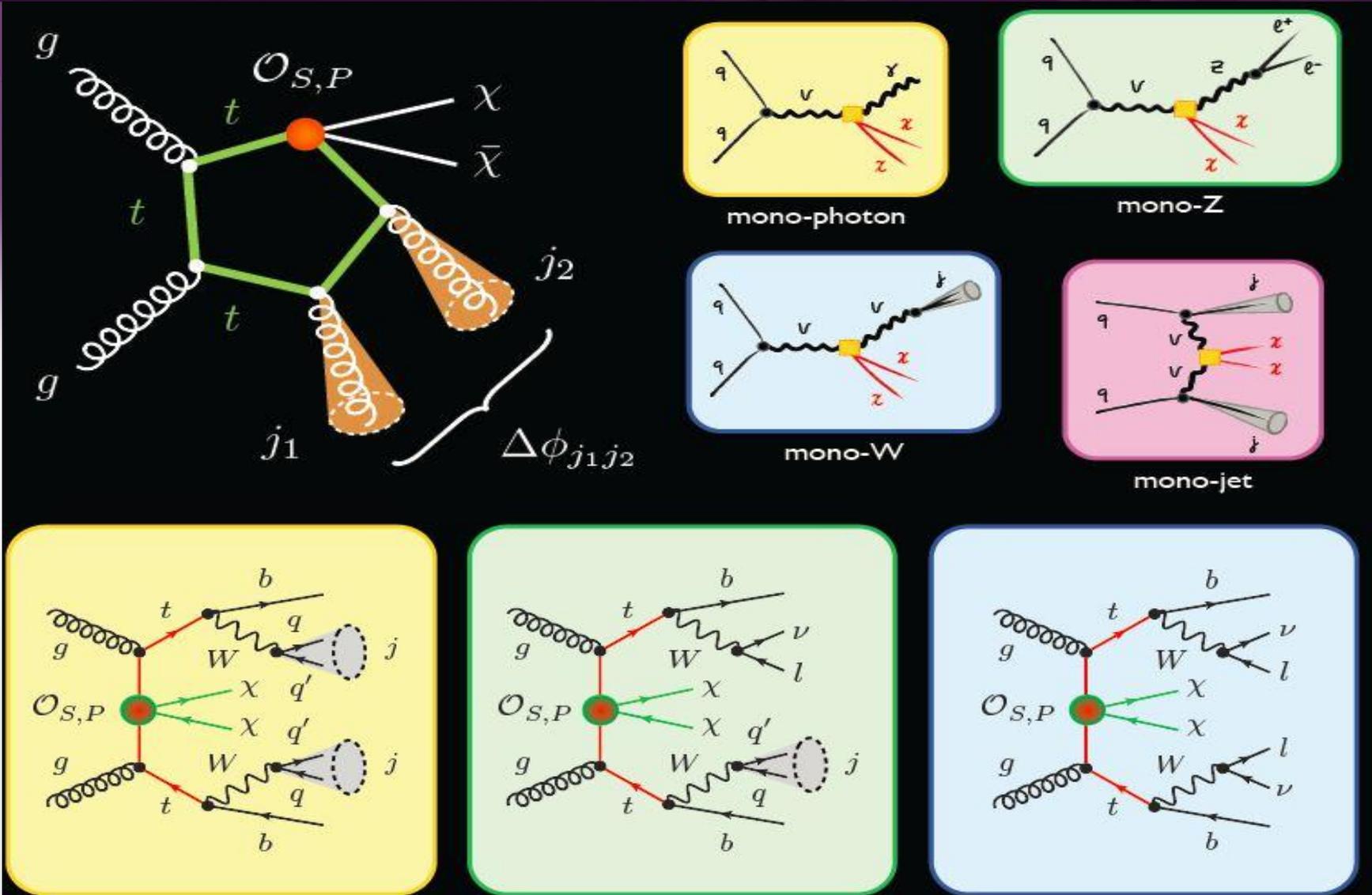


LHC at CERN





● 暗物质的对撞机寻找





清华大学

Tsinghua University

暗物质研究的未来

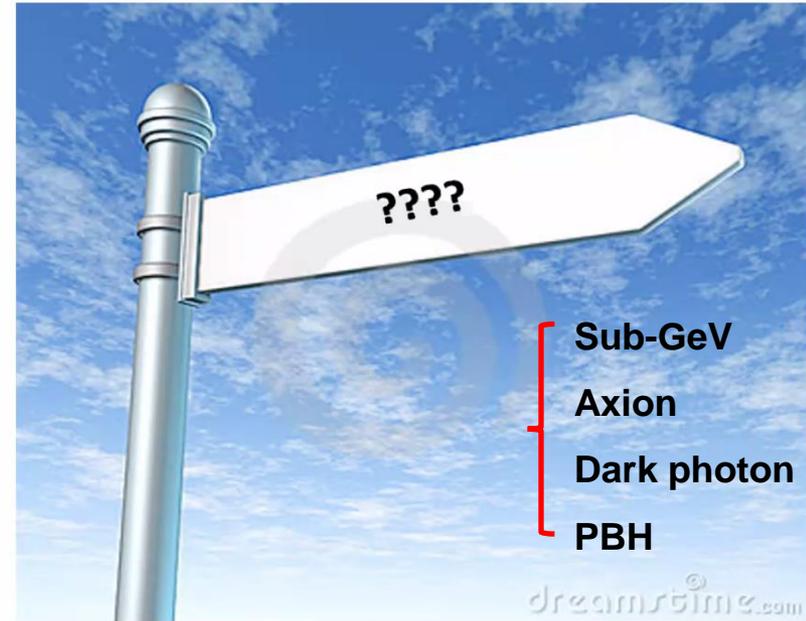


Implications for DM trends

- Few years ago



- Now



PARTICLE PHYSICS

By Adrian Cho

Science 351 , 1376 (2016)

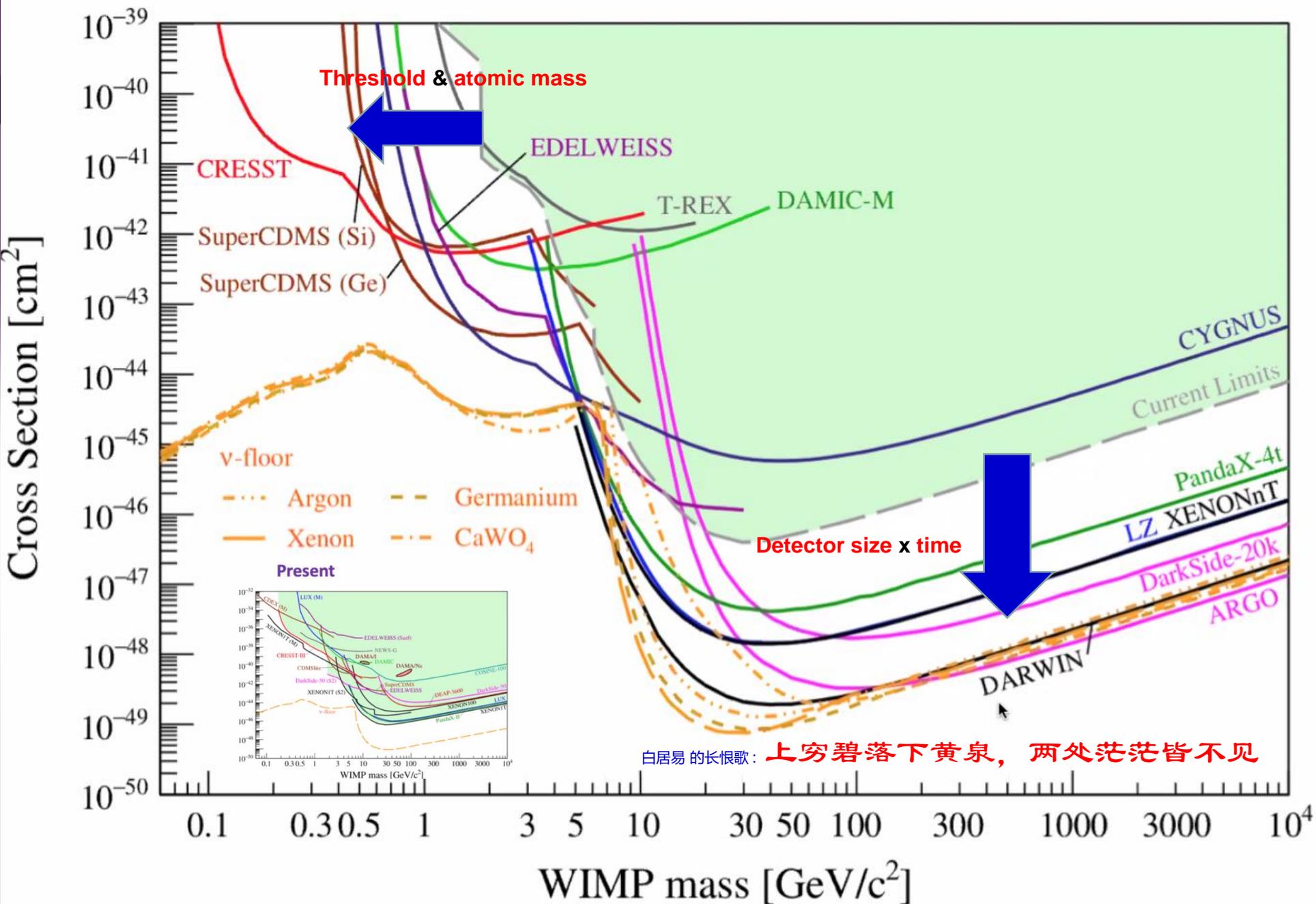
Crunch time for dark matter hunt

Little confidence that biggest WIMP detector ever will find hypothesized particles

End of the road for WIMP searches

The quest for weakly interacting massive particles (WIMPs) likely will end when increasingly sensitive detectors run into interference from neutrinos. They've already ruled out some of the range for supersymmetric WIMPs.

Next decade(+)



白居易的长恨歌：上穷碧落下黄泉，两处茫茫皆不见



● 暗物质的寻找与已在粒子物理里发现的希格斯粒子的寻找对比

- 都寻找了很多很多年.....
- 希格斯粒子若找不到，理论么正性要求 TeV能区 有新物理！
- 暗物质在天文上已经发现了
- 但在最有希望的 **TeV** 能区迟迟没有发现
- 希格斯粒子也巡遍理论实验的所有能区，最后在犄角旮旯
- 暗物质的质量没限制，和普通物质的耦合可以没下限....

• Higgs boson search at the LHC:
most of mass range ruled out before
discovery was made in a "tiny" ~ 15 GeV
window (predicted by SUSY)

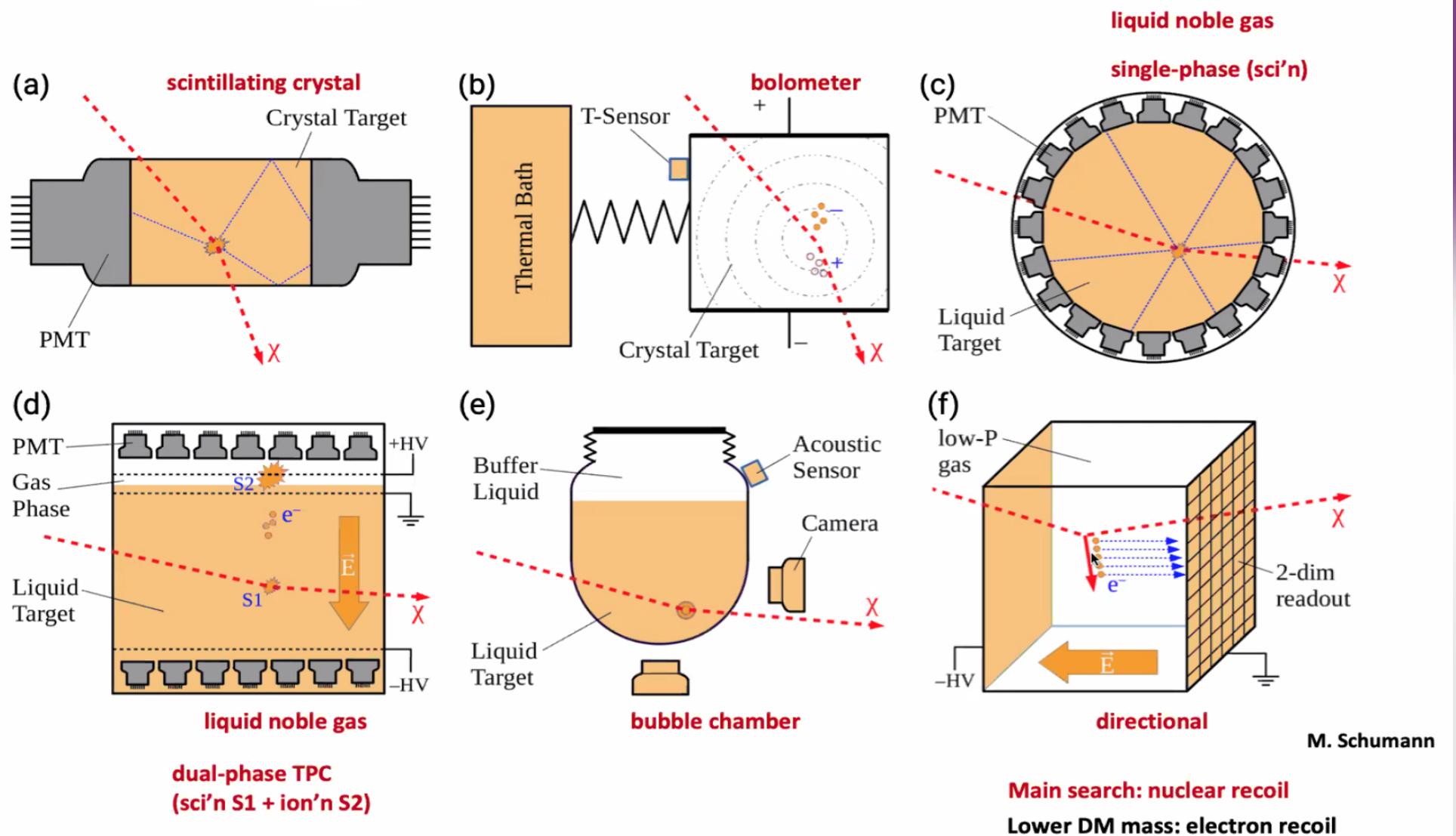


● 暗物质的寻找与已发现的引力波的寻找对比

- 都寻找了很多很多年.....
- 都对能区没有限制；理论上都有很大的不确定性
- 引力波在寻找了40年后被发现被认为是机遇和好运气
- 引力波的探测技术和数据分析做到了极致
- 暗物质在天文上已经发现了
- 暗物质探寻的技术和分析离极致尚有很大的距离



● 引领和促进新技术及产业的发展!





● 暗物质的寻找引领的高技术进步

易企秀 07:08

× 同方威视高纯锗系列产品 ...



2021
高纯锗伽马谱仪

让世界更安全
CREATING A SAFER WORLD

同方威视技术股份有限公司

易企秀 07:08

× 同方威视高纯锗系列产品 ...



2021
BUSINESS BROCHURE
产品展示
PRODUCT DISPLAY

RM0200GA/RM0100GE

高纯锗 γ 谱仪的特点在于将核素识别、活度计算功能合为一体，采用高能量分辨率及高探测效率的高纯锗探测器，配合低本底铅室、制冷装置、高性能数字多道分析系统及无源效率刻度软件，保证对低剂量放射性物质的核素识别及活度计算的精确度。多用于在环保、核电、质检、科研单位的实验室分析工作。

威视，让世界更安全！

易企秀 07:08

× 同方威视高纯锗系列产品 ...



2021
BUSINESS BROCHURE
产品展示
PRODUCT DISPLAY

RM0200GA/RM0100GE

同方威视提供完整而先进的实验室与便携式高纯锗伽马谱仪，有普通液氮制冷和机械制冷两种选项。实验室提供10%至80%效率的同轴或扁平同轴探测器，全面保证效率、分辨率、峰康比和峰形指标，配套提供液氮回凝制冷器、数字化谱仪、谱获取&分析软件包与低本底铅室等。

威视，让世界更安全！



清华大学
Tsinghua University

The future is ~~bright~~ dark !