



来自白矮星的疑似暗物质信号

牛家树 (Jia-Shu Niu)

2024.10.14

@ 紫金山暗物质研讨会 (2024), 苏州

山西大学, 理论物理研究所

jsniu@sxu.edu.cn

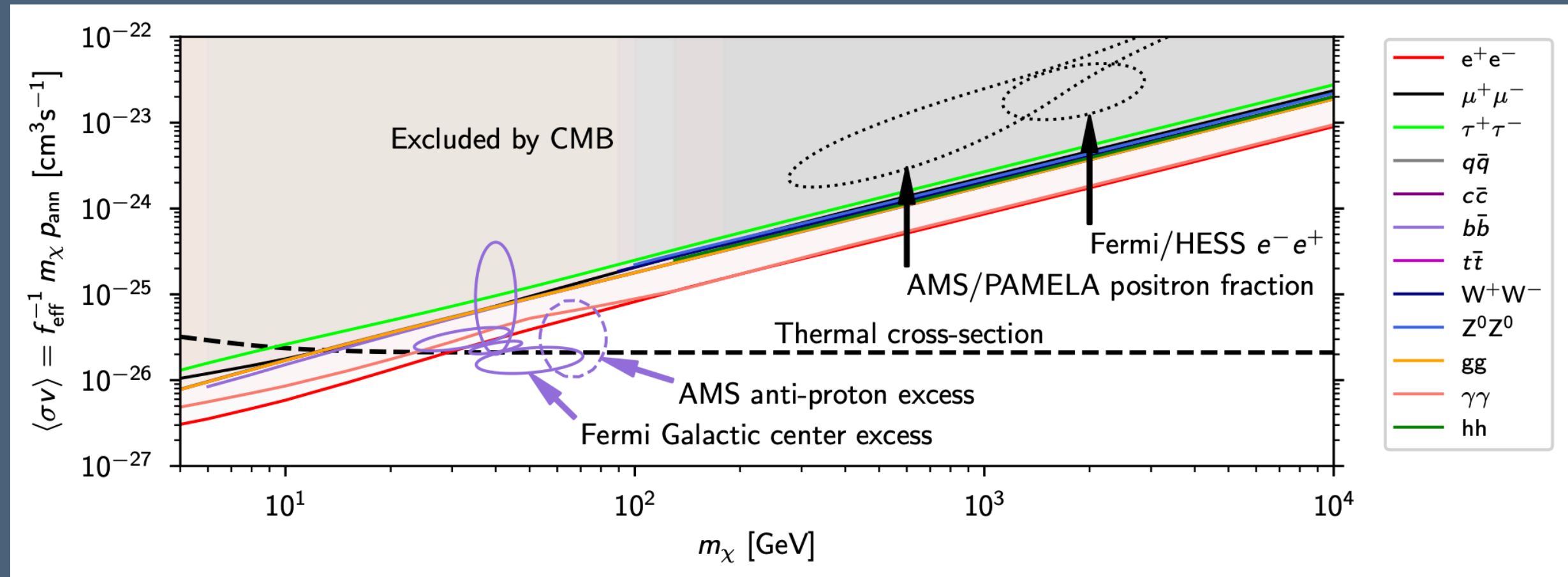
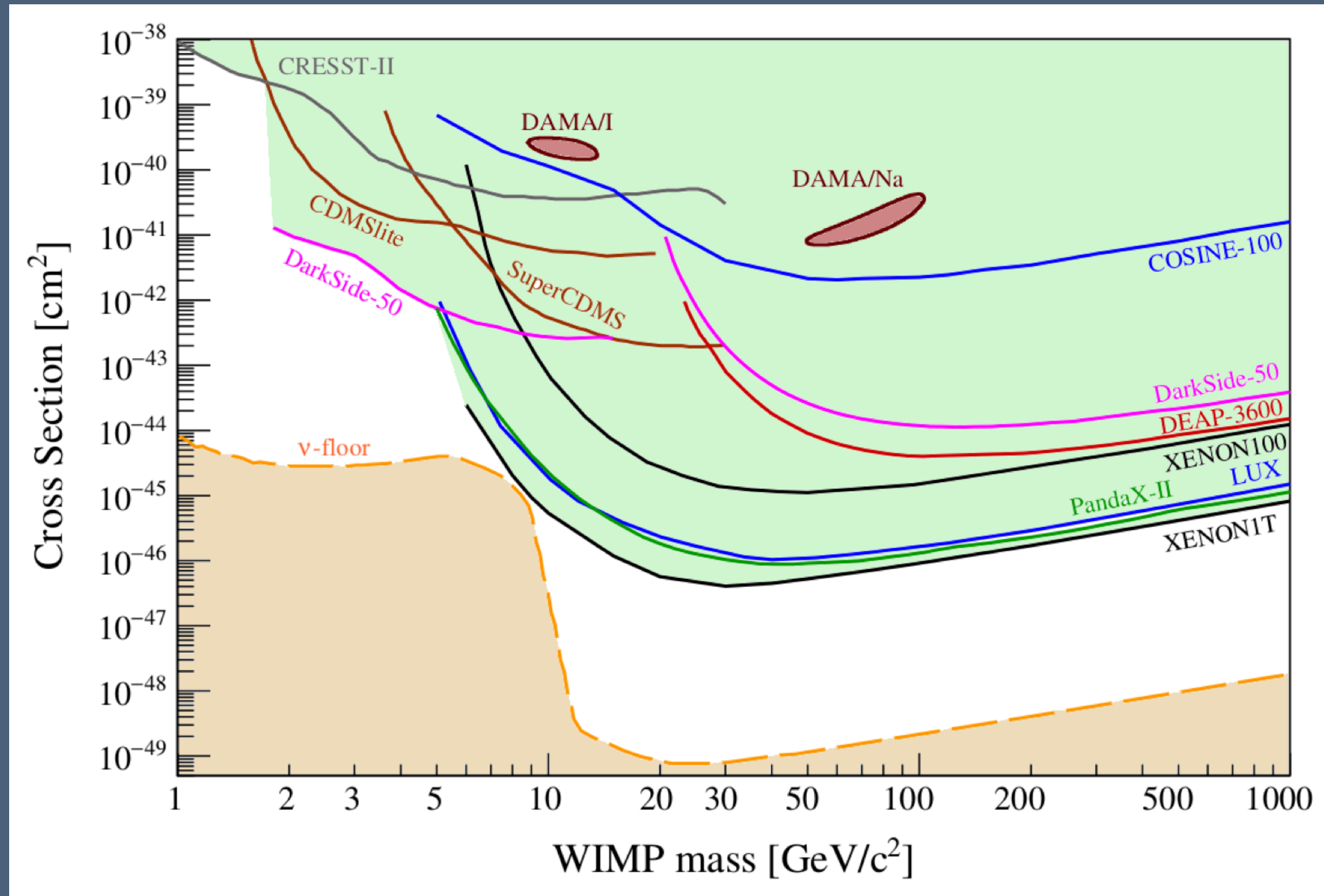
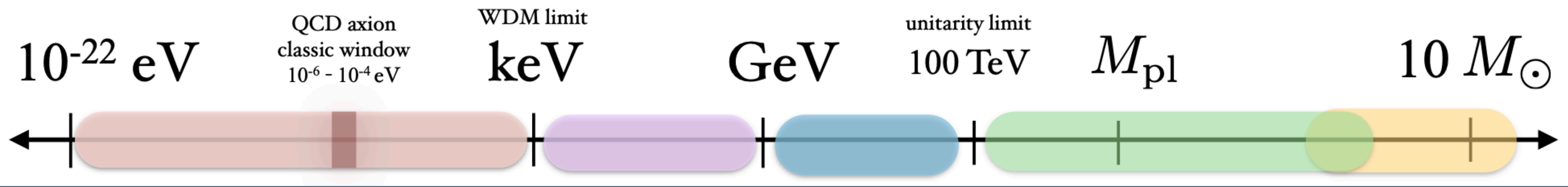
相关工作

- Jia-Shu Niu, Hui-Fang Xue; **Possible Dark Matter Signals from White Dwarfs**, arXiv:2401.04931 [hep-ph].
- Jia-Shu Niu; **Exploring the Dark Frontier: White Dwarf-Based Constraints on Light Dark Matter**, arXiv:2406.03100 [hep-ph].

主要内容

- 现状
- 动机
- DM×WD
- 结果
- 讨论与展望

现状



无法完全排除天体物理源的影响!

即将把探测器放到中微子地板上摩擦!

动机

放空想想。 。 。

放空想想。 。 。

暗物质存在的证据：

- 可观测宇宙 (CMB)
- 大尺度结构 (n体模拟)
- 星系团 (碰撞)
- 星系 (旋转曲线)
- 矮星系 (动力学)
- 星团?
- 恒星?
- 地球? 实验室?

放空想想。 。 。

暗物质存在的证据：

- 可观测宇宙 (CMB)
- 大尺度结构 (n体模拟)
- 星系团 (碰撞)
- 星系 (旋转曲线)
- 矮星系 (动力学)
- 星团?
- 恒星?
- 地球? 实验室?

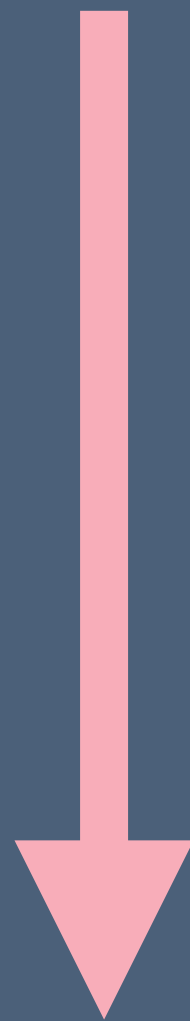
- 所有的观测证据都只是某种现象，所有这些现象是否指向一个物理本质?

放空想想。 。 。

暗物质存在的证据：

- 可观测宇宙 (CMB)
- 大尺度结构 (n体模拟)
- 星系团 (碰撞)
- 星系 (旋转曲线)
- 矮星系 (动力学)

- 星团?
- 恒星?
- 地球? 实验室?

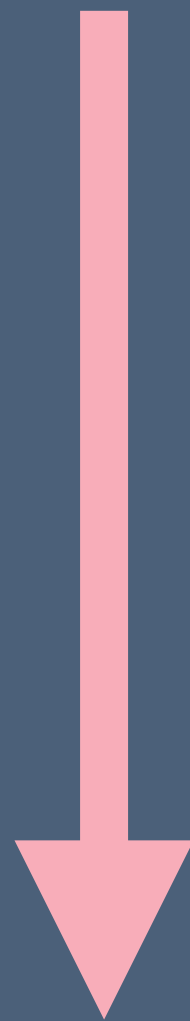


- 所有的观测证据都只是某种现象，所有这些现象是否指向一个物理本质?
- 矮星系以下的结构体系中，有没有确实的观测证据?

放空想想。 。 。

暗物质存在的证据：

- 可观测宇宙 (CMB)
- 大尺度结构 (n体模拟)
- 星系团 (碰撞)
- 星系 (旋转曲线)
- 矮星系 (动力学)
- 星团?
- 恒星?
- 地球? 实验室?



- 所有的观测证据都只是某种现象，所有这些现象是否指向一个物理本质?
- 矮星系以下的结构体系中，有没有确实的观测证据?
- 地球实验室以上的结构体系中，有没有可观测的效应?



放空想想。。

暗物质存在的证据：

- 可观测宇宙 (CMB)
- 大尺度结构 (n体模拟)
- 星系团 (碰撞)
- 星系 (旋转曲线)
- 矮星系 (动力学)
- 星团?
- 恒星?
- 地球? 实验室?

- 所有的观测证据都只是某种现象，所有这些现象是否指向一个物理本质?
- 矮星系以下的结构体系中，有没有确实的观测证据?
- 地球实验室以上的结构体系中，有没有可观测的效应?

天文学家与物理学家需要
双向奔赴!

放空想想。。。。

暗物质存在的证据：

- 可观测宇宙 (CMB)
- 大尺度结构 (n体模拟)
- 星系团 (碰撞)
- 星系 (旋转曲线)
- 矮星系 (动力学)

- 星团?
- 恒星?
- 地球? 实验室?

- 所有的观测证据都只是某种现象，所有这些现象是否指向一个物理本质?
- 矮星系以下的结构体系中，有没有确实的观测证据?
- 地球实验室以上的结构体系中，有没有可观测的效应?

天文学家与物理学家需要
双向奔赴!

解铃还须系铃人！

解铃还须系铃人！

从天文现象中来，到天文现象中去！

在暗物质探测的参数空间中，我们不仅需要画排除线，更需要

在暗物质探测的参数空间中，我们不仅需要画排除线，更需要

将与各类“反常”天文现象相联系的暗物质参数空间区域标记出来！

在暗物质探测的参数空间中，我们不仅需要画排除线，更需要

将与各类“反常”天文现象相联系的暗物质参数空间区域标记出来！

以正合，以奇胜

——《孙子兵法·兵势篇》

DMIXWD

白矮星

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；
- 已知最为电子致密的物体/天体。

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；
- 已知最为电子致密的物体/天体。

探测暗物质与电子相互作用最佳的实验室！

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；
- 已知最为电子致密的物体/天体。

探测暗物质与电子相互作用最佳的实验室！

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；
- 已知最为电子致密的物体/天体。

探测暗物质与电子相互作用最佳的实验室！

对于脉动白矮星，

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；
- 已知最为电子致密的物体/天体。

探测暗物质与电子相互作用最佳的实验室！

对于**脉动白矮星**,

- 其结构和演化状态可以由星震学精确测定；

白矮星

- 银河系中97%恒星的演化终态；
- 内部结构相对简单：简并电子内核和大气壳层（大部分由氢和氦组成）；
- 内部核反应完全停止；
- 已知最为电子致密的物体/天体。

探测暗物质与电子相互作用最佳的实验室！

对于**脉动白矮星**,

- 其结构和演化状态可以由星震学精确测定；
- 其演化速率可以由其脉动周期的变化率标定，而变化率则可以通过长时间的测光观测确定。

当白矮星遭遇暗物质粒子。。。。

当白矮星遭遇暗物质粒子。。。。

在银河系中，暗物质粒子将不可避免地穿过白矮星。在此过程中，暗物质粒子可能与白矮星内的物质（原子核与电子）发生相互作用，损失动能。如果暗物质粒子的速度过低，将会被白矮星捕获。这些被捕获的暗物质粒子将在白矮星内部**累积**、**湮灭**，或者被**蒸发**到白矮星外部。

当白矮星遭遇暗物质粒子。。。。

在银河系中，暗物质粒子将不可避免地穿过白矮星。在此过程中，暗物质粒子可能与白矮星内的物质（原子核与电子）发生相互作用，损失动能。如果暗物质粒子的速度过低，将会被白矮星捕获。这些被捕获的暗物质粒子将在白矮星内部**累积**、**湮灭**，或者被**蒸发**到白矮星外部。

白矮星内部的暗物质粒子数目可以表达为

$$\frac{dN_{\chi}}{dt} = C_* - E_* \cdot N_{\chi} - A_* \cdot N_{\chi}^2,$$

C_* 为星体的暗物质粒子捕获率， E_* 为蒸发率， A_* 为暗物质粒子的湮灭率。

利用脉动白矮星探测暗物质粒子

利用脉动白矮星探测暗物质粒子

对于脉动白矮星：

$$\frac{\dot{P}}{P} \simeq -\frac{1}{2} \frac{\dot{T}_c}{T_c} - \frac{1}{3} \frac{\dot{M}_*}{M_*},$$

T_c 是白矮星内核的温度， M_* 是白矮星的质量。

利用脉动白矮星探测暗物质粒子

对于脉动白矮星：

$$\frac{\dot{P}}{P} \simeq -\frac{1}{2} \frac{\dot{T}_c}{T_c} - \frac{1}{3} \frac{\dot{M}_*}{M_*},$$

T_c 是白矮星内核的温度， M_* 是白矮星的质量。

暗物质粒子相关过程对脉动白矮星的影响：

利用脉动白矮星探测暗物质粒子

对于脉动白矮星：

$$\frac{\dot{P}}{P} \simeq -\frac{1}{2} \frac{\dot{T}_c}{T_c} - \frac{1}{3} \frac{\dot{M}_*}{M_*},$$

T_c 是白矮星内核的温度， M_* 是白矮星的质量。

暗物质粒子相关过程对脉动白矮星的影响：

- **暗物质的捕获和累积将减小 \dot{P}** ：在这个过程中暗物质粒子将能量传递给星体 ($\dot{T}_c > 0$)，并且增加了星体的质量 ($\dot{M}_* > 0$)；

利用脉动白矮星探测暗物质粒子

对于脉动白矮星：

$$\frac{\dot{P}}{P} \simeq -\frac{1}{2} \frac{\dot{T}_c}{T_c} - \frac{1}{3} \frac{\dot{M}_*}{M_*},$$

T_c 是白矮星内核的温度， M_* 是白矮星的质量。

暗物质粒子相关过程对脉动白矮星的影响：

- **暗物质的捕获和累积将减小 \dot{P}** ：在这个过程中暗物质粒子将能量传递给星体 ($\dot{T}_c > 0$)，并且增加了星体的质量 ($\dot{M}_* > 0$)；
- **暗物质的蒸发将增加 \dot{P}** ：在这个过程中星体将传递能量给暗物质粒子 ($\dot{T}_c < 0$)，并且减小了星体的质量 ($\dot{M}_* < 0$)；

利用脉动白矮星探测暗物质粒子

对于脉动白矮星：

$$\frac{\dot{P}}{P} \simeq -\frac{1}{2} \frac{\dot{T}_c}{T_c} - \frac{1}{3} \frac{\dot{M}_*}{M_*},$$

T_c 是白矮星内核的温度， M_* 是白矮星的质量。

暗物质粒子相关过程对脉动白矮星的影响：

- **暗物质的捕获和累积将减小 \dot{P}** ：在这个过程中暗物质粒子将能量传递给星体 ($\dot{T}_c > 0$)，并且增加了星体的质量 ($\dot{M}_* > 0$)；
- **暗物质的蒸发将增加 \dot{P}** ：在这个过程中星体将传递能量给暗物质粒子 ($\dot{T}_c < 0$)，并且减小了星体的质量 ($\dot{M}_* < 0$)；
- **暗物质的湮灭将减小 \dot{P}** ：在这个过程中暗物质粒子将给星体注入能量。

观测结果如何?

ID	G117-B15A	R548	L19-2	PG 1351+489
Marks	DAV1	DAV2	DAV3	DBV
P_{obs} (s)	215.20	212.95	113.8	489.33
P_{the} (s)	215.215	213.401	113.41	489.47
$\dot{P}_{\text{obs}}/P_{\text{obs}}$ (s/s)	$(5.12 \pm 0.82) \times 10^{-15}$	$(3.3 \pm 1.1) \times 10^{-15}$	$(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-15}$	$(2.0 \pm 0.9) \times 10^{-13}$
$\dot{P}_{\text{the}}/P_{\text{the}}$ (s/s)	1.25×10^{-15}	1.08×10^{-15}	1.42×10^{-15}	0.81×10^{-13}
M_*/M_{\odot}	0.593 ± 0.007	0.609 ± 0.012	0.705 ± 0.023	0.664 ± 0.013
$\log(L_*/L_{\odot})$	-2.497 ± 0.030	-2.594 ± 0.025	-2.622 ± 0.046	-1.244 ± 0.030
$\log(R_*/R_{\odot})$	-1.882 ± 0.029	-1.904 ± 0.015	-1.945 ± 0.037	-1.912 ± 0.015
Distance* (pc)	57.37	32.71	20.87	175.47

观测结果如何?

ID	G117-B15A	R548	L19-2	PG 1351+489
Marks	DAV1	DAV2	DAV3	DBV
P_{obs} (s)	215.20	212.95	113.8	489.33
P_{the} (s)	215.215	213.401	113.41	489.47
$\dot{P}_{\text{obs}}/P_{\text{obs}}$ (s/s)	$(5.12 \pm 0.82) \times 10^{-15}$	$(3.3 \pm 1.1) \times 10^{-15}$	$(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-15}$	$(2.0 \pm 0.9) \times 10^{-13}$
$\dot{P}_{\text{the}}/P_{\text{the}}$ (s/s)	1.25×10^{-15}	1.08×10^{-15}	1.42×10^{-15}	0.81×10^{-13}
M_*/M_{\odot}	0.593 ± 0.007	0.609 ± 0.012	0.705 ± 0.023	0.664 ± 0.013
$\log(L_*/L_{\odot})$	-2.497 ± 0.030	-2.594 ± 0.025	-2.622 ± 0.046	-1.244 ± 0.030
$\log(R_*/R_{\odot})$	-1.882 ± 0.029	-1.904 ± 0.015	-1.945 ± 0.037	-1.912 ± 0.015
Distance* (pc)	57.37	32.71	20.87	175.47

观测结果如何?

ID	G117-B15A	R548	L19-2	PG 1351+489
Marks	DAV1	DAV2	DAV3	DBV
P_{obs} (s)	215.20	212.95	113.8	489.33
P_{the} (s)	215.215	213.401	113.41	489.47
$\dot{P}_{\text{obs}}/P_{\text{obs}}$ (s/s)	$(5.12 \pm 0.82) \times 10^{-15}$	$(3.3 \pm 1.1) \times 10^{-15}$	$(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-15}$	$(2.0 \pm 0.9) \times 10^{-13}$
$\dot{P}_{\text{the}}/P_{\text{the}}$ (s/s)	1.25×10^{-15}	1.08×10^{-15}	1.42×10^{-15}	0.81×10^{-13}
M_*/M_{\odot}	0.593 ± 0.007	0.609 ± 0.012	0.705 ± 0.023	0.664 ± 0.013
$\log(L_*/L_{\odot})$	-2.497 ± 0.030	-2.594 ± 0.025	-2.622 ± 0.046	-1.244 ± 0.030
$\log(R_*/R_{\odot})$	-1.882 ± 0.029	-1.904 ± 0.015	-1.945 ± 0.037	-1.912 ± 0.015
Distance* (pc)	57.37	32.71	20.87	175.47

$$\dot{P}_{\text{obs}} > \dot{P}_{\text{the}}$$

只能来自于暗物质蒸发!

捕获-蒸发平衡态

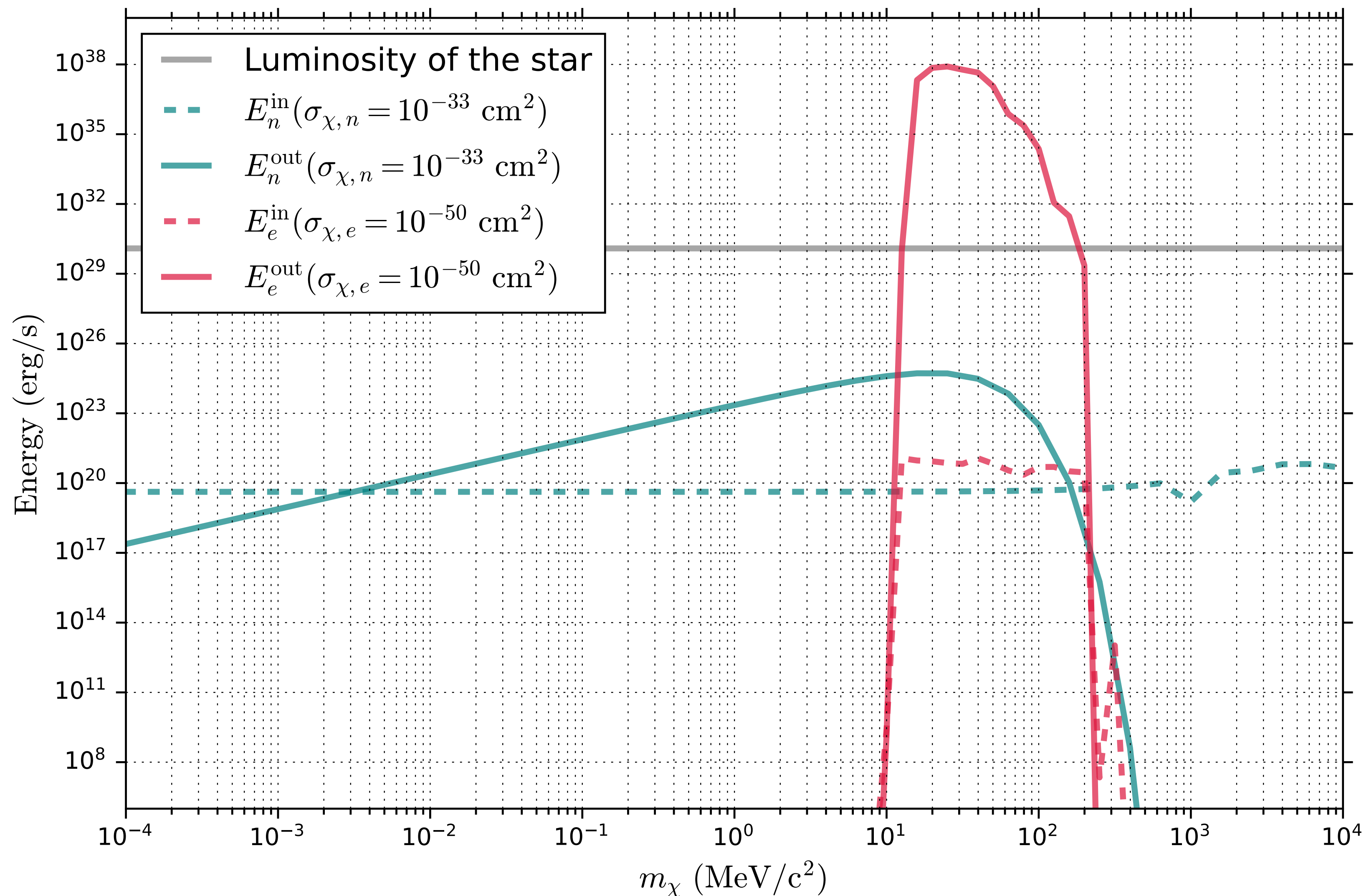
- E^{in} : 捕获过程中暗物质粒子传递给星体的能量;
- E^{out} : 蒸发过程中星体传递给暗物质粒子接着排到外界环境中的能量;
- $E^{\text{net}} \equiv E^{\text{out}} - E^{\text{in}}$: 星体净损失的能量。

脉动白矮星的观测结果要求

$$E^{\text{net}} > 0,$$

这意味着白矮星在捕获-蒸发平衡态下是损失能量的。

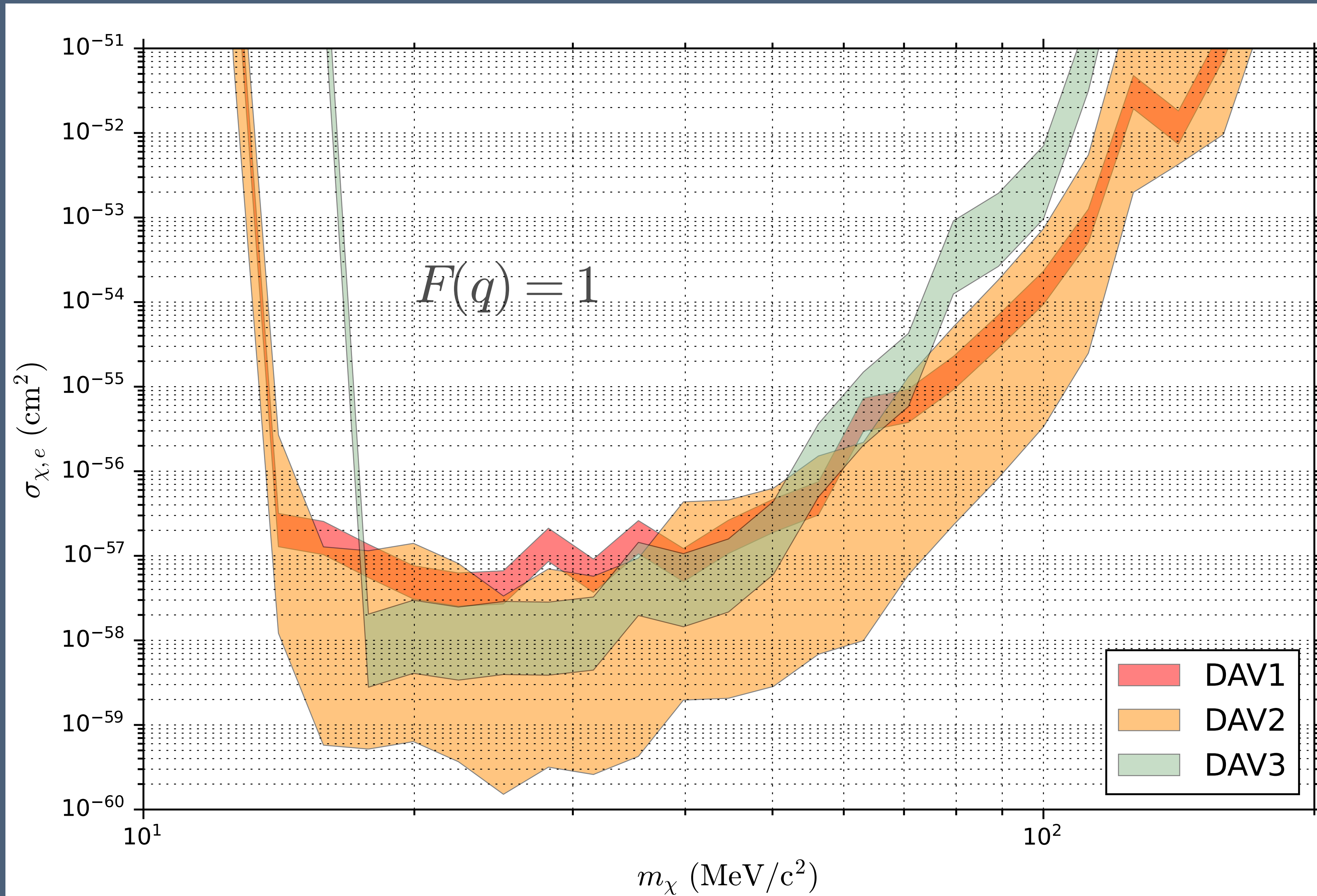
一个例子：DAV1



在接下来，我们将只考虑暗物质粒子与电子的相互作用。

结果

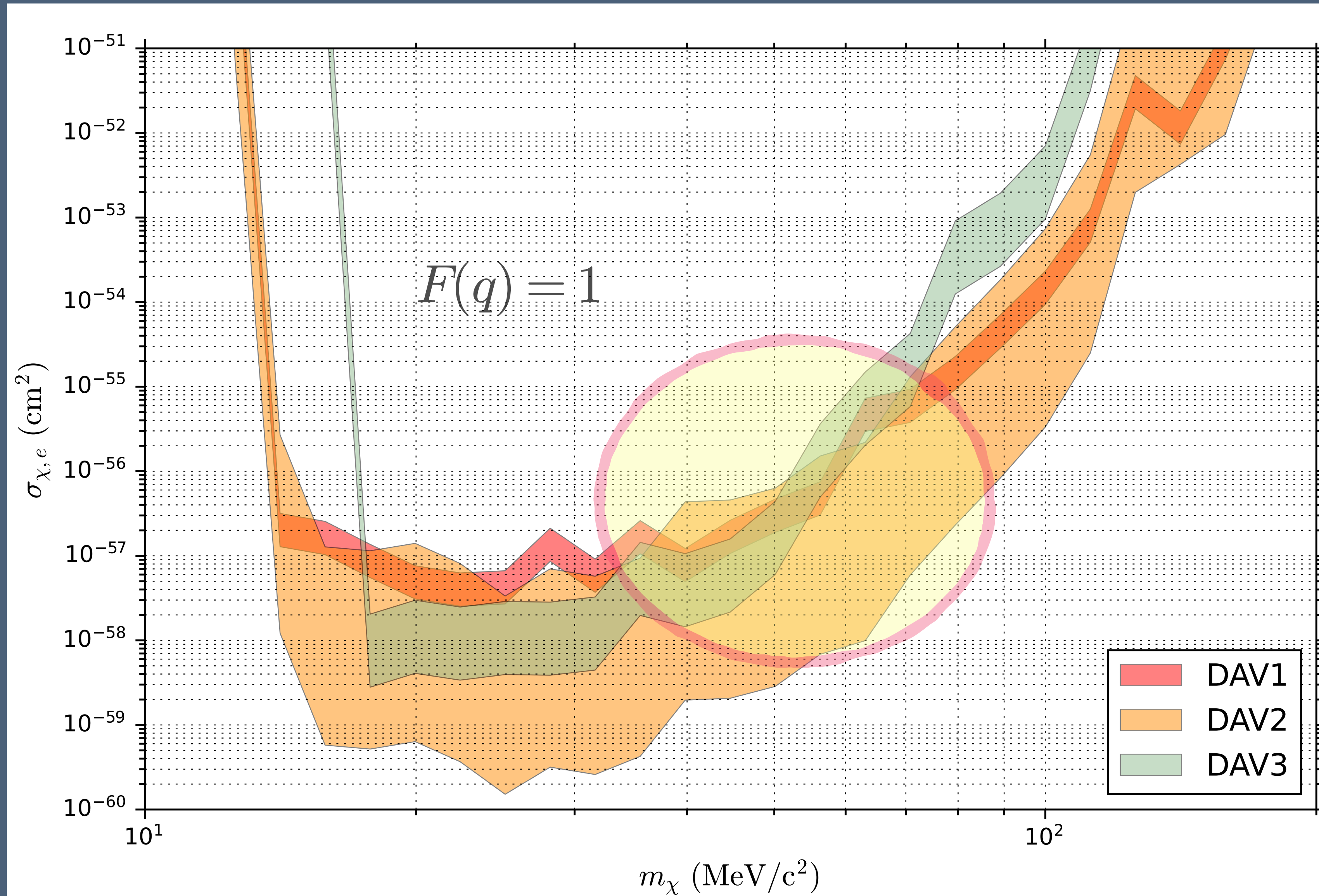
相关暗物质粒子参数空间 (DAVs)



$$40 \text{ MeV}/c^2 \lesssim m_\chi \lesssim 70 \text{ MeV}/c^2$$

$$10^{-57} \text{ cm}^2 \lesssim \sigma_{\chi,e} \lesssim 10^{-55} \text{ cm}^2$$

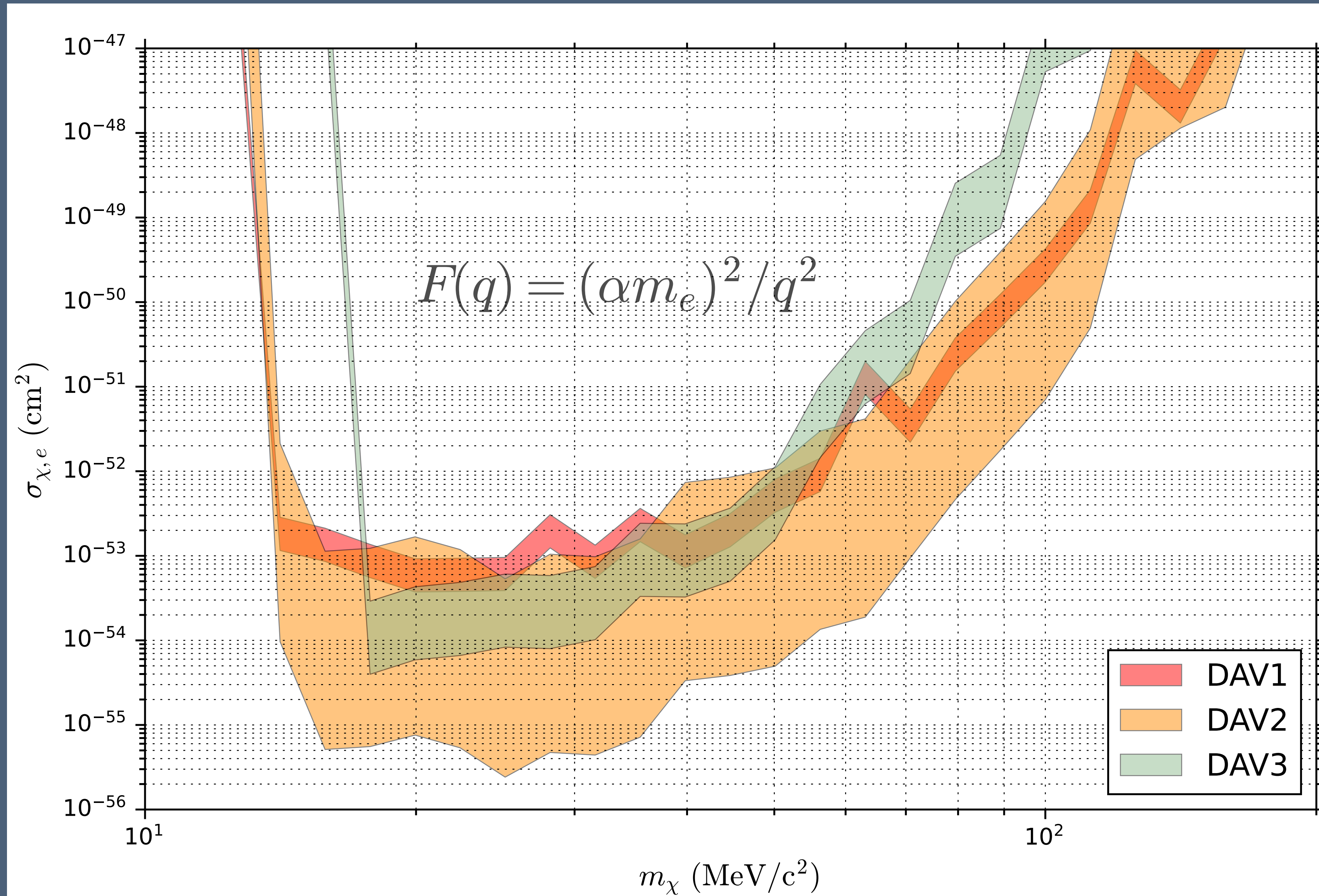
相关暗物质粒子参数空间 (DAVs)



$$40 \text{ MeV}/c^2 \lesssim m_\chi \lesssim 70 \text{ MeV}/c^2$$

$$10^{-57} \text{ cm}^2 \lesssim \sigma_{\chi,e} \lesssim 10^{-55} \text{ cm}^2$$

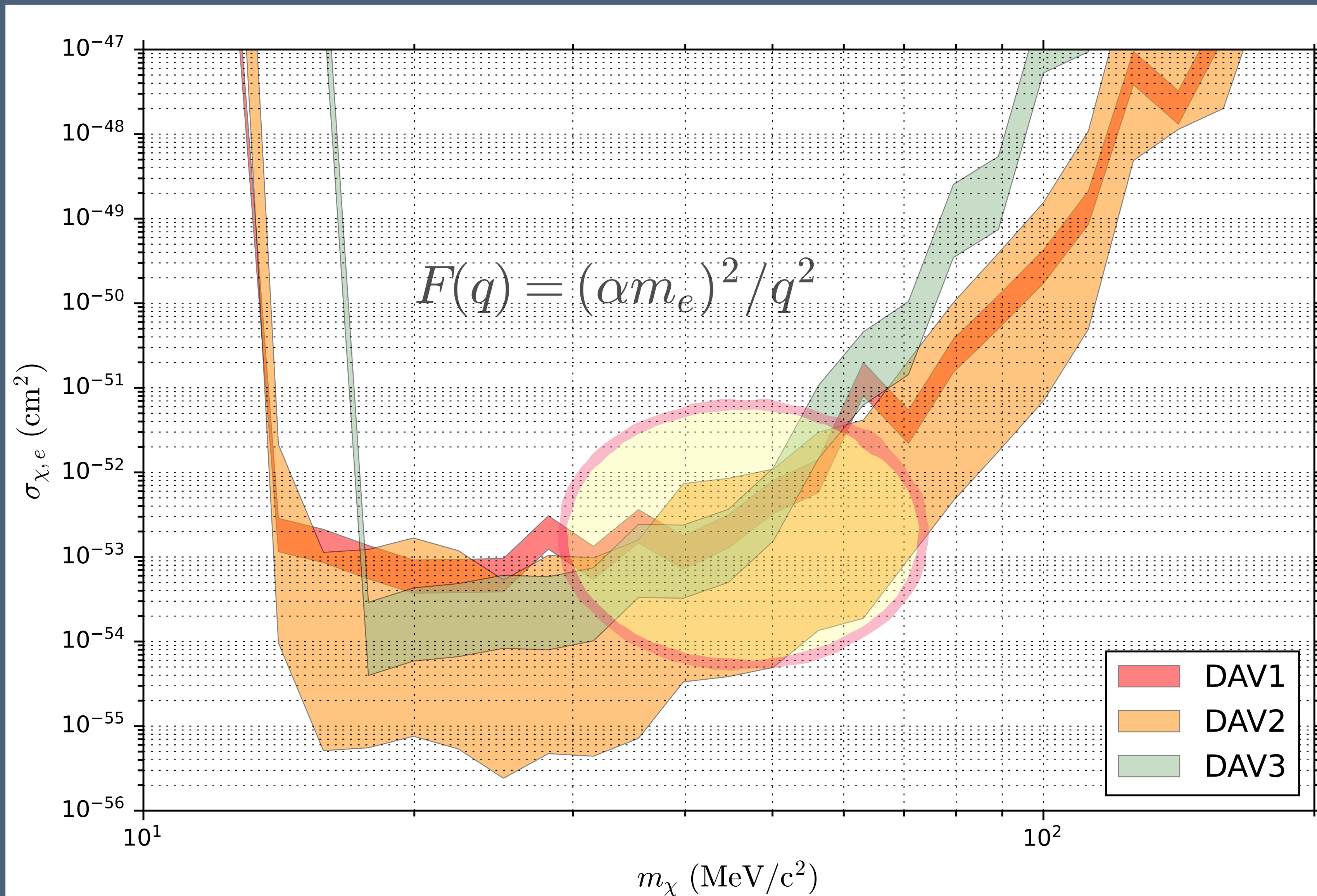
相关暗物质粒子参数空间 (DAVs)



$$30 \text{ MeV}/c^2 \lesssim m_\chi \lesssim 60 \text{ MeV}/c^2$$

$$10^{-53} \text{ cm}^2 \lesssim \sigma_{\chi,e} \lesssim 10^{-51} \text{ cm}^2$$

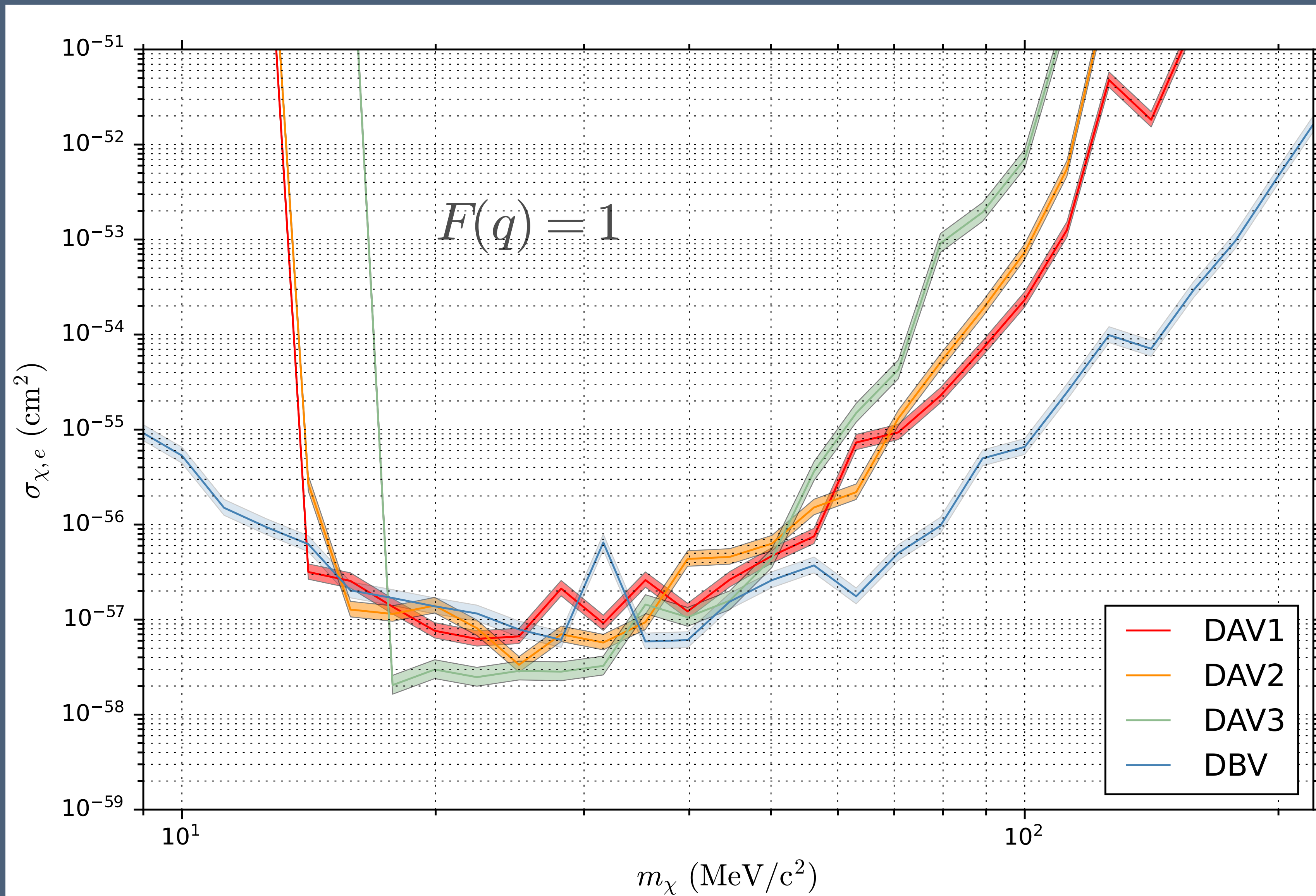
相关暗物质粒子参数空间 (DAVs)



$$30 \text{ MeV}/c^2 \lesssim m_\chi \lesssim 60 \text{ MeV}/c^2$$

$$10^{-53} \text{ cm}^2 \lesssim \sigma_{\chi,e} \lesssim 10^{-51} \text{ cm}^2$$

基于四颗脉动白矮星的参数空间限制

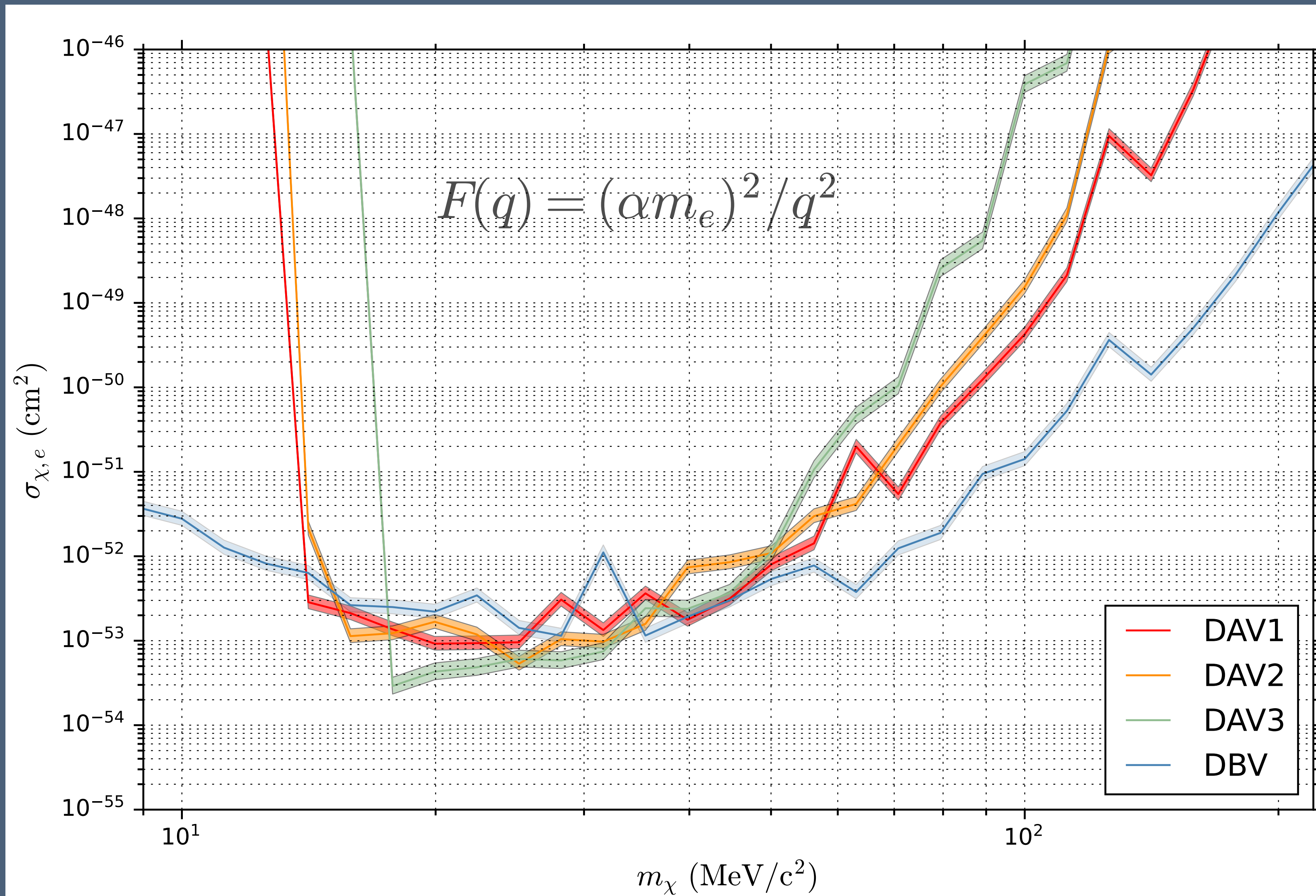


95% C.L.上限

$20 \text{ MeV}/c^2 \lesssim m_\chi \lesssim 30 \text{ MeV}/c^2$

$\sigma_{\chi,e} \lesssim 2 \times 10^{-58} \text{ cm}^2$

基于四颗脉动白矮星的参数空间限制



95% C.L.上限

$20 \text{ MeV}/c^2 \lesssim m_\chi \lesssim 30 \text{ MeV}/c^2$

$\sigma_{\chi,e} \lesssim 10^{-53} \text{ cm}^2$

讨论与展望

讨论与展望

讨论与展望

- 独特的星体质量（逃逸速度）和费米简并能量显著提升了捕获率；
- 内核的高温使得蒸发成为可能；
- 偏低的局域暗物质密度（ 0.3 GeV/cm^3 ）使得排除限制非常强。

讨论与展望

- 独特的星体质量（逃逸速度）和费米简并能量显著提升了捕获率；
- 内核的高温使得蒸发成为可能；
- 偏低的局域暗物质密度（ 0.3 GeV/cm^3 ）使得排除限制非常强。
- 需要观测更多脉动白矮星的周期变化率；
- 需要新的方案对相关结果进行交叉证认；
- 需要更多来自理论的相关动机和线索。

讨论与展望

- 独特的星体质量（逃逸速度）和费米简并能量显著提升了捕获率；
- 内核的高温使得蒸发成为可能；
- 偏低的局域暗物质密度（ 0.3 GeV/cm^3 ）使得排除限制非常强。
- 需要观测更多脉动白矮星的周期变化率；
- 需要新的方案对相关结果进行交叉证认；
- 需要更多来自理论的相关动机和线索。

多在敌后开辟根据地！

星星之火，可以燎原！

感谢大家关注！
欢迎大家批评指正！