

阅读会报告

# 磁单极子相关文献阅读结果



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

戎杙

# 议程

- 磁单极子存在的相关理论
- 磁单极子的能损
- 磁单极子在介质中的射程
- 磁单极子的探测
- 小结

# 磁单极子存在的相关理论

- 1、磁荷
- 2、质量

# 磁单极子的磁荷

- Dirac PAM. Proc. R. Soc. 133:60 (1931)

用磁荷产生的磁场带入Maxwell方程得到 $g_D$ ：

$$g = g_D = n \cdot \frac{1}{2} \frac{\hbar c}{e} \approx n \cdot \frac{137}{2} e$$

- GUT

大一统群G自发性破缺成子群对应的相变过程中产生的。

$$g_G = 2g_D$$

# 磁单极子的质量

- Dirac

$$M_D \sim g_D^2 m_e / e^2 \sim 2.4 \text{ GeV}$$

- GUT

质量极大 ( $10^5 \sim 10^{12} \text{ GeV}$ )

# 磁单极子的能损

- 1、磁单极子与原子核相互作用
- 2、磁单极子与电子相互作用

## 磁单极子与原子核相互作用

- 磁单极子产生的静磁场 $B_M$ 和原子核产生的磁矩 $\mu$ 相互作用由下式给出：

$$W_D = -\mu \cdot B_M$$

在接近玻尔半径的距离下， $W_D \cong 7\text{eV}$ ，接近原子结合能大小，因此原子预计会发生较大“形变”。

# 磁单极子与电子相互作用

- 运动的磁单极子产生**电场**，该电场可以**激发或电离**原子中的电子。

对于不同范围的入射粒子速度 $\beta$ ，入射粒子的能损满足不同的方程：

1、 $\beta > 0.05$

$$-\frac{dE}{dx} = C \frac{Z}{A} g^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \frac{1}{2} + \frac{k}{2} - \frac{\delta}{2} - B_m \right]$$

2、 $10^{-2} > \beta > 10^{-3}$

$$-\frac{dE}{dx} = C \frac{Z}{A} \frac{c}{2v_F} g^2 \beta \left[ \ln \frac{2m_e v_F a_0}{\hbar} - \frac{1}{2} \right]$$

3、 $10^{-3} > \beta$

$$-\frac{dE}{dx} = \mu \frac{4\pi\hbar g e N}{cm_e} \cdot \frac{3}{5}$$

# 如何理解磁单极子的能损公式

•  $\beta > 10^{-1}$

$$-\frac{dE}{dx} = C \frac{Z}{A} g^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \frac{1}{2} + \frac{k}{2} - \frac{\delta}{2} - B_m \right]$$

此式其实是由贝特-布洛赫 (Bethe-Bloch) 公式直接修改过来的, 为更好的理解此式, 简单回顾一下经典的 Bethe-Bloch 公式的推到过程。

经典电离能损推导过程



$$\begin{aligned} \Delta p_{\perp} &= \int F_{\perp} dt = \int F_{\perp} dx \frac{dt}{dx} = \int F_{\perp} \frac{1}{v} dx \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{ze^2}{(x^2+b^2)} \frac{b}{\sqrt{x^2+b^2}} \cdot \frac{1}{v} dx \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ze^2}{bv} \end{aligned}$$

转移给单个电子的能量:

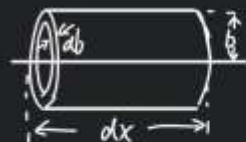
$$\Delta E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2$$

对所有电子作积分:

$$-dE(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} \cdot 2\pi n b \cdot dx \cdot db$$

右图体积内电子数

其中  $n$  为电子数密度:  $n = \frac{Z_1 N_1 \rho}{A}$



$$\begin{aligned} \text{则 } -\frac{dE}{dx} &= \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \\ &= \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi}{m_e v^2} \frac{Z_1 N_1 \rho}{A} z^2 e^4 \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \end{aligned}$$

$$-\frac{dE}{\rho dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}, \quad K \text{ 为常数只与电子有关。}$$

# 如何理解磁单极子的能损公式

- $10^{-2} > \beta > 10^{-3}$

$$-\frac{dE}{dx} = C \frac{Z}{A} \frac{c}{2v_F} g^2 \beta \left[ \ln \frac{2m_e v_F a_0}{\hbar} - \frac{1}{2} \right]$$

- $v_F$ 是费米速度:

$$v_F = \frac{\hbar}{m_e} \cdot (3\pi^2 N_e)^{\frac{1}{3}} \sim 3.9 \times 10^8 \left[ \frac{cm}{s} \right]$$

- $a_0$ 是玻尔半径。

磁单极子在该速度下可以假设介质是简并电子气体。

# 如何理解磁单极子的能损公式

- $10^{-3} > \beta$

$$-\frac{dE}{dx} = \mu \frac{4\pi\hbar g e N}{c m_e} \cdot \frac{3}{5}$$

此速度下磁单极子以不足以激发电子，以碰撞和热运动的形式损失能量。

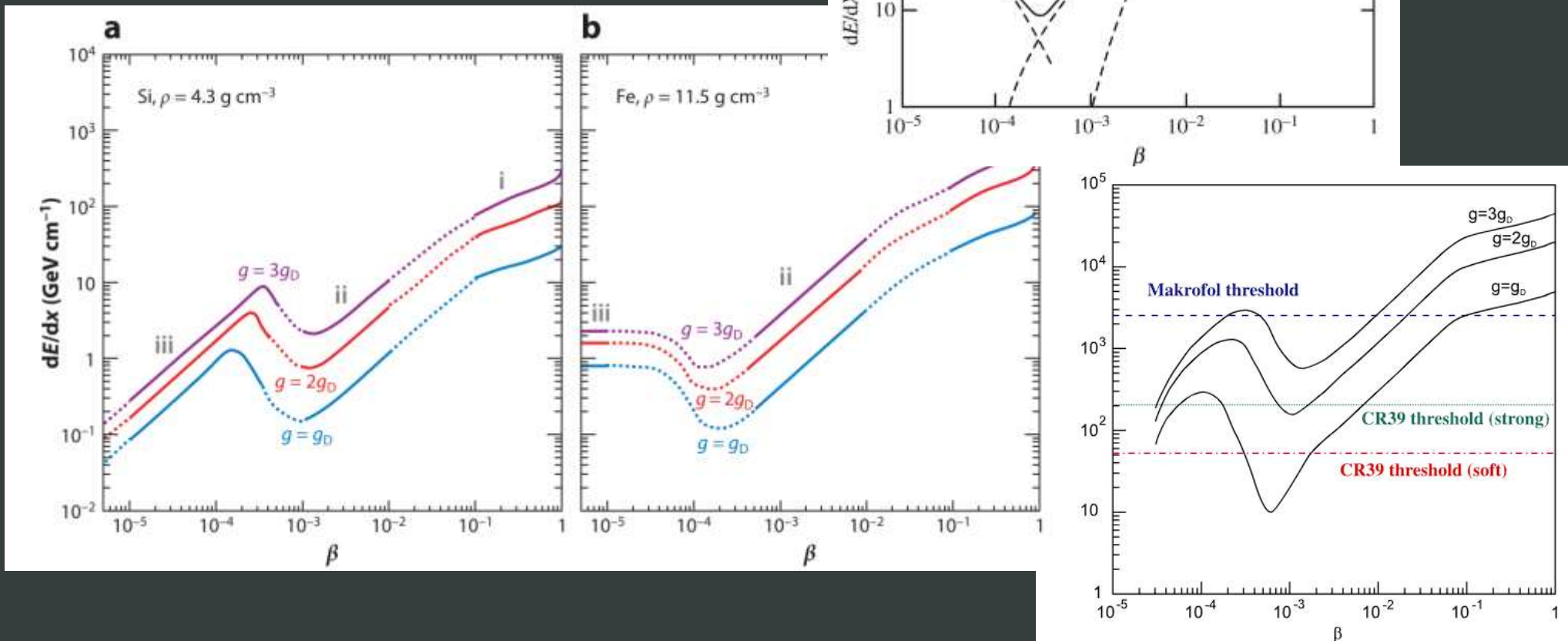
- 不同材料的  $\mu$  有所不同:

For Aluminum  $\mu = 3.6415$ ;

for Iron,  $\mu = 2.201$ ;

for Copper,  $\mu = 2.2233$ .

# 磁单极子的能损



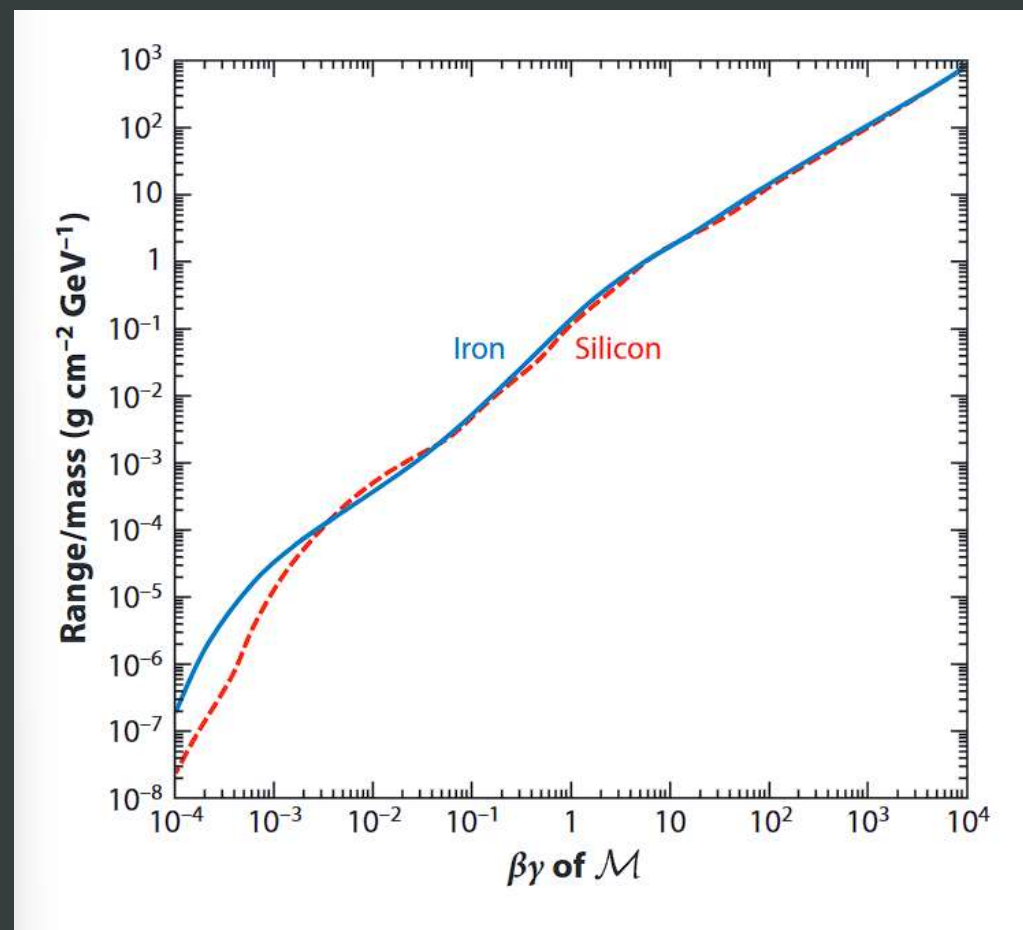
# 磁单极子在介质中的射程

# 磁单极子在介质中的射程

- 射程R满足以下公式:

$$R = \int_{E_{min}}^{E_0} \frac{dE}{dE/dx}$$

低速时, 不同材料的  $\mu$  不同, 故能损和射程有较大差异, 其他速度情况下, 能损与材料的关系较小。



# 磁单极子的探测

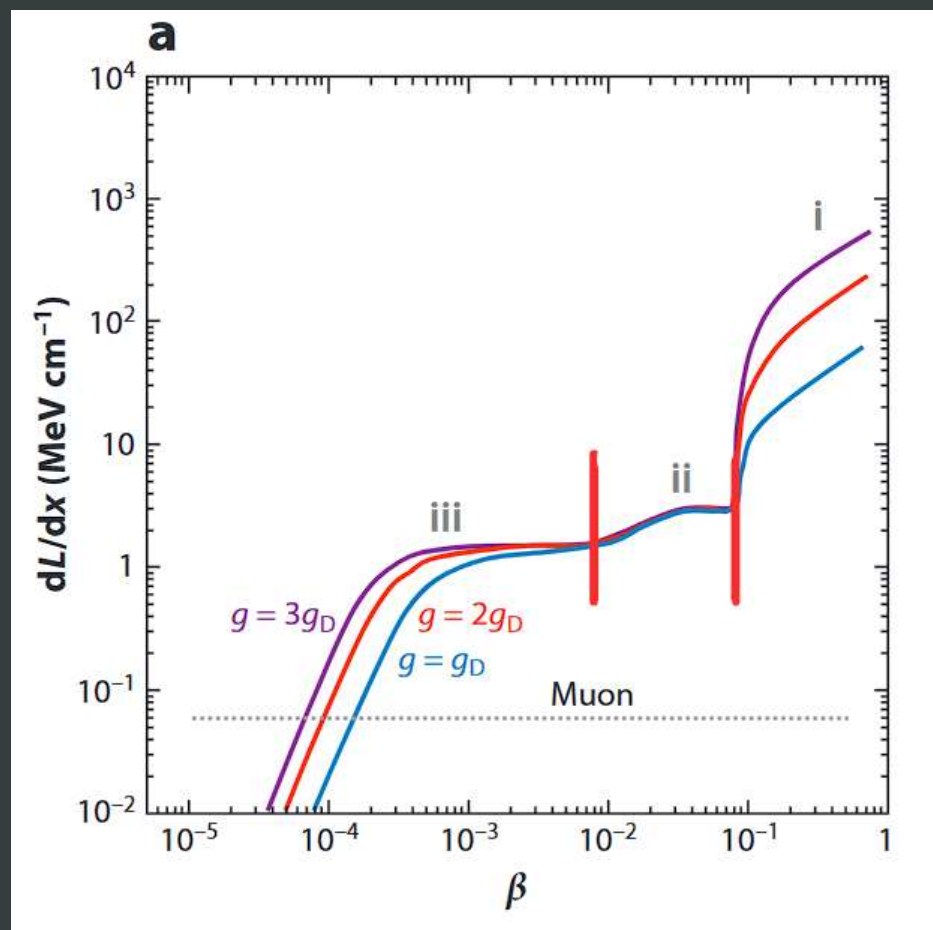
- 1、光产额
- 2、对撞机中寻找磁单极子
- 3、探测器中寻找磁单极子

# 磁单极子通过闪烁体时的光产额

- 闪烁体中的光产额:

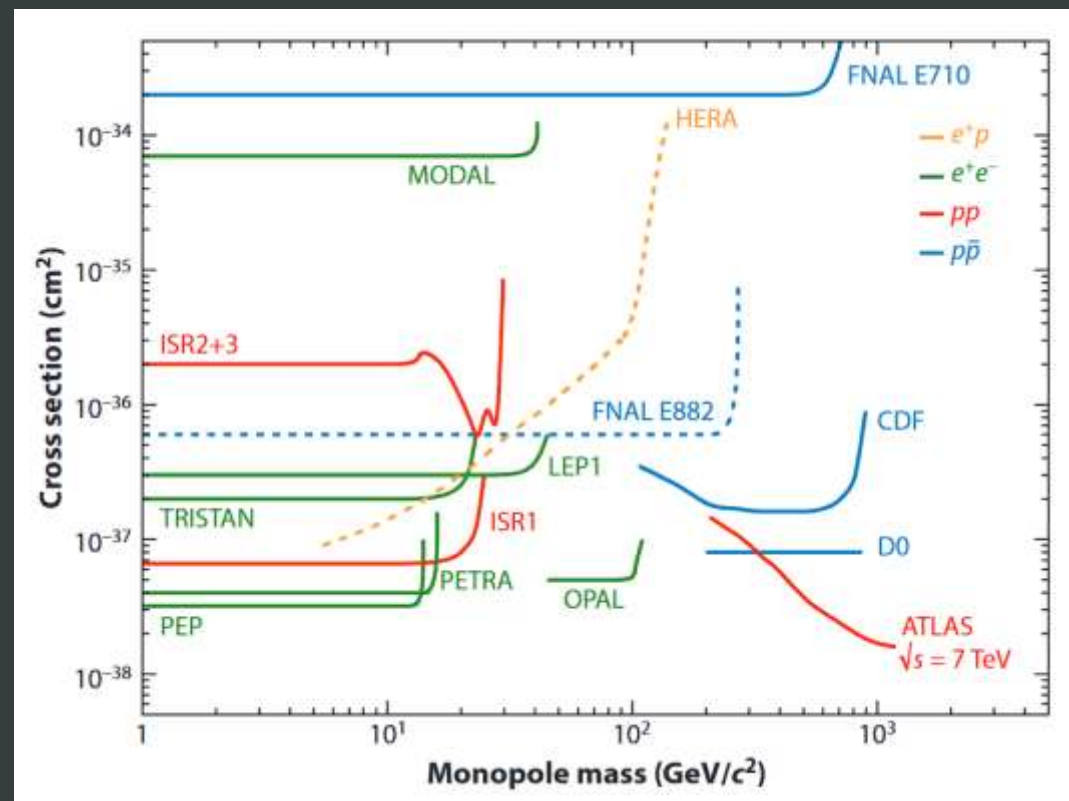
$$\frac{dL}{dx} = \mathcal{A} \times \left[ \frac{1 - F}{1 + \mathcal{A}B(1 - F) \frac{dE}{dx}} + F \right] \times \frac{dE}{dx}$$

- (iii) 低速区, 光产额随 $\beta$ 增大而增大, 与 $g^2$ 成正比。
- (ii) 中间区, 因为quenching parameter(猝灭参数) $B$ 而导致一小段增长, 且这段区间光产额与 $g$ 的大小无关。
- (i) 高速区, 束缚电子被电离而增大光产额, 与 $g^2$ 成正比。



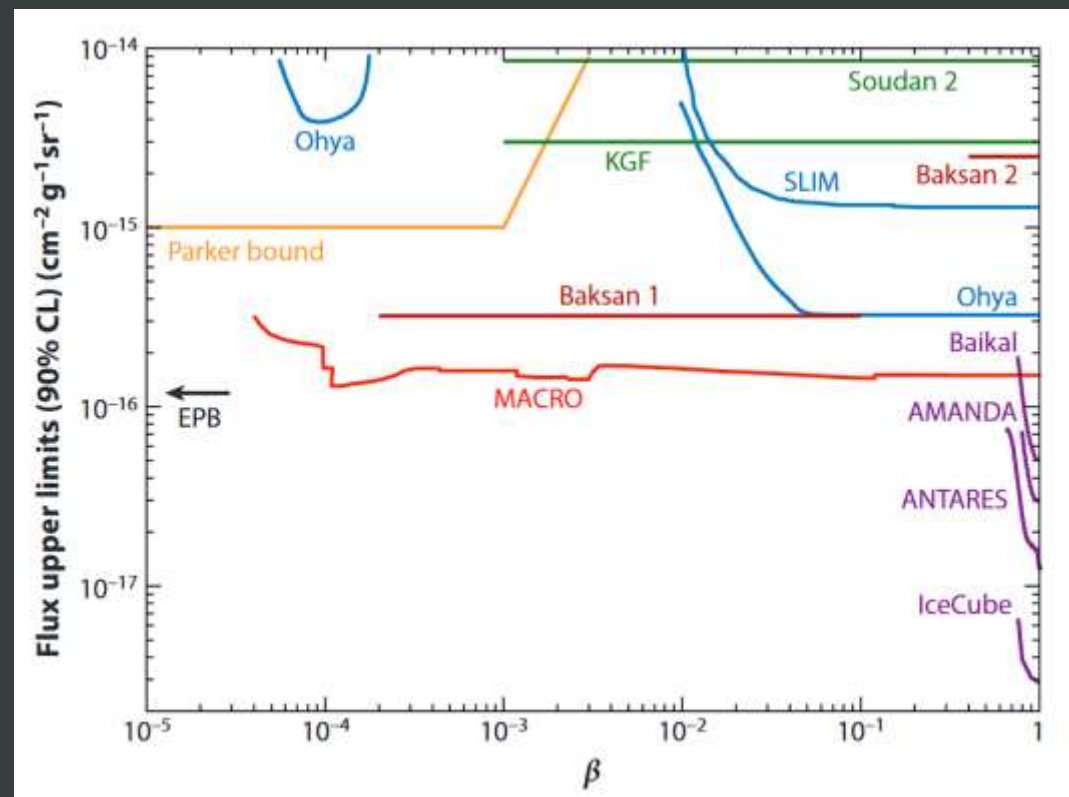
# 对撞机中寻找磁单极子

- 通过 $e^+p$ 、 $e^+e^-$ 、 $pp$ 、 $p\bar{p}$ 四种方式的对撞来产生磁单极子，并用超导线圈对产生的磁单极子做探测。
- 理论上磁单极子的质量极大，对撞机难以得到理想的结果。



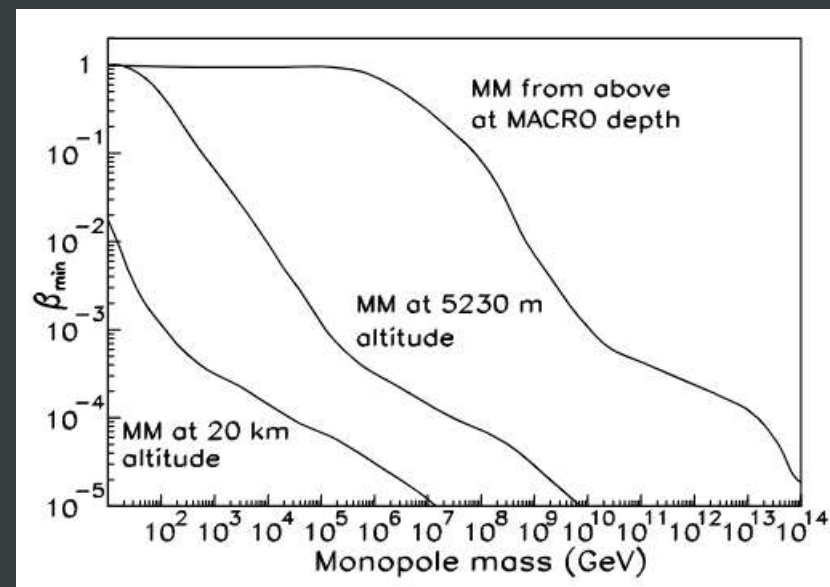
# 探测器中寻找磁单极子

- 希望从自然界（宇宙线）中寻找磁单极子。
- 自然界（宇宙线）中存在大量高能粒子，有望存在高质量磁单极子。



# 探测器中寻找磁单极子

- 不同海拔高度下磁单极子的可探测区间  
(线右上方)，海拔越高探测区间越松。



# 小结

# 小结

- 大一统理论GUT允许磁单极子的存在。
- 磁单极子的能损可以由一般带电粒子的能损公式做类比获得。
- 中、高速区，磁单极子在不同介质中的射程差别不大。
- 低速和高速区的磁单极子的光产额正比于 $g^2$ ，中速区不同 $g$ 的磁单极子光产额几乎相同。
- 许多对撞机和探测设备都在致力于探测磁单极子，并都一定程度缩小了磁单极子的可能探测范围。
- 高质量的磁单极子更有可能在宇宙线中被找到。

创寰宇学府 育天下英才

感谢观看



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

报告人 戎杙