

大气中子单粒子效应综述

报告人： 黄泽棋

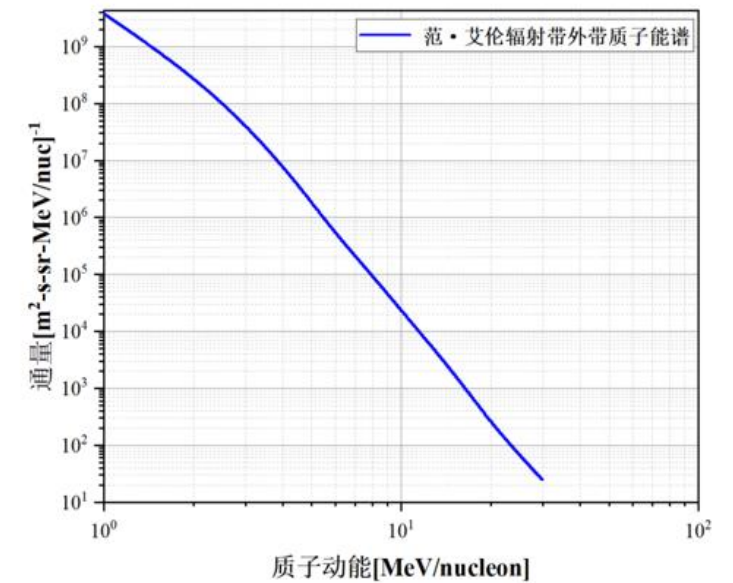
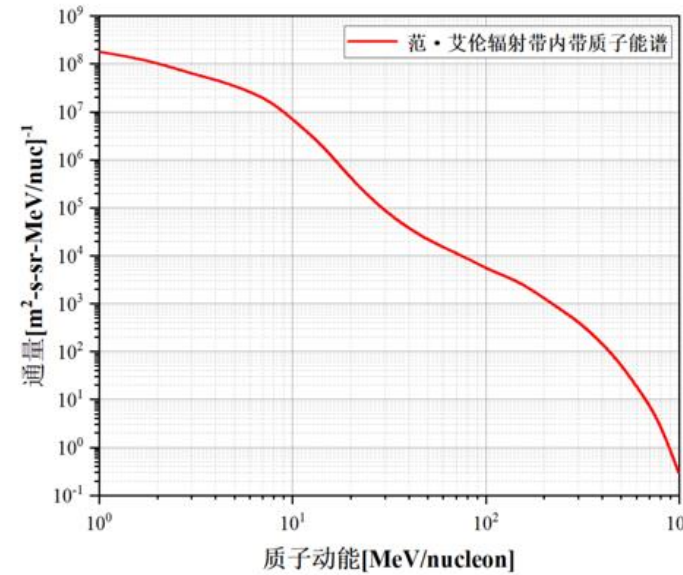
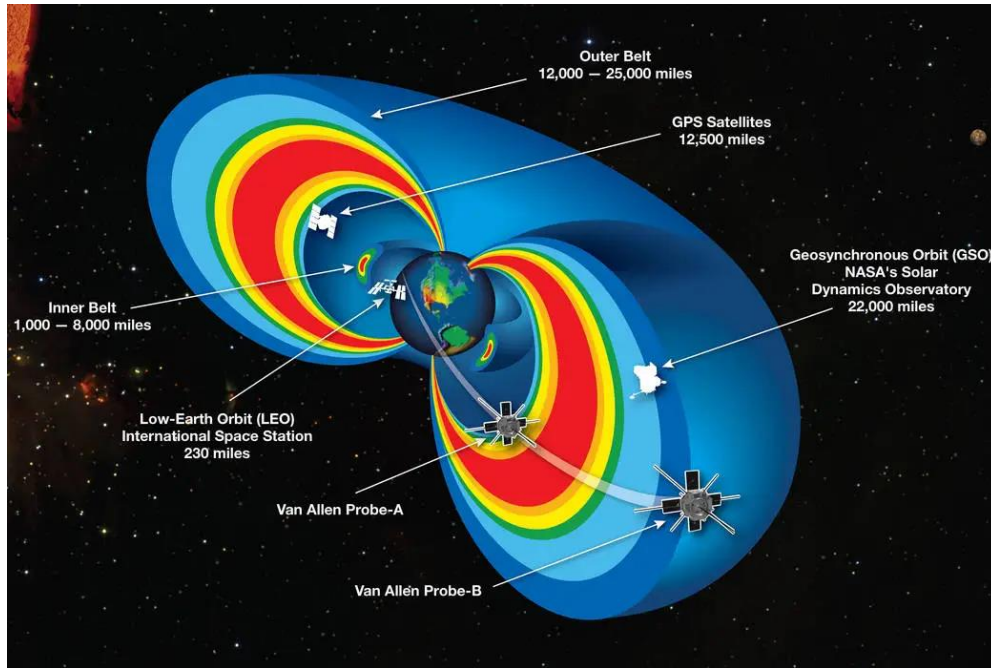
指导教师： 敬罕涛 研究员



2024年4月

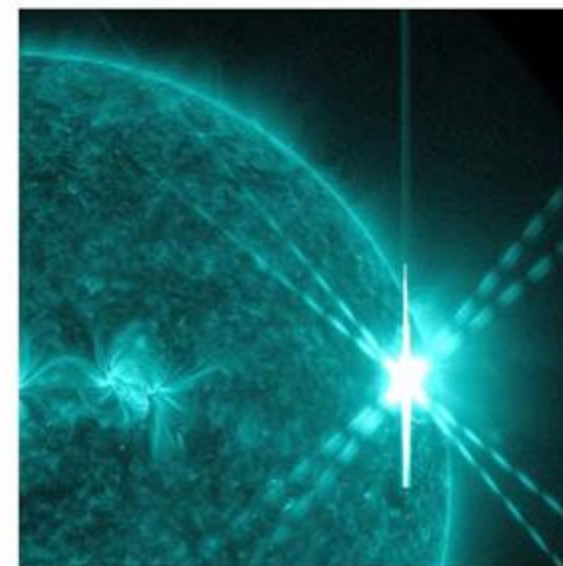
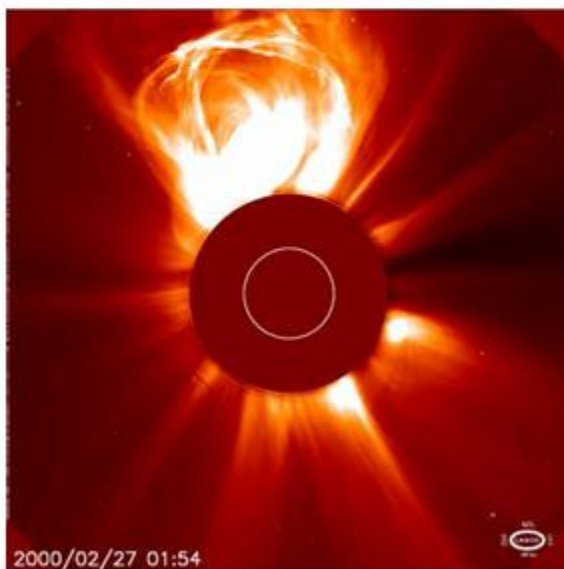
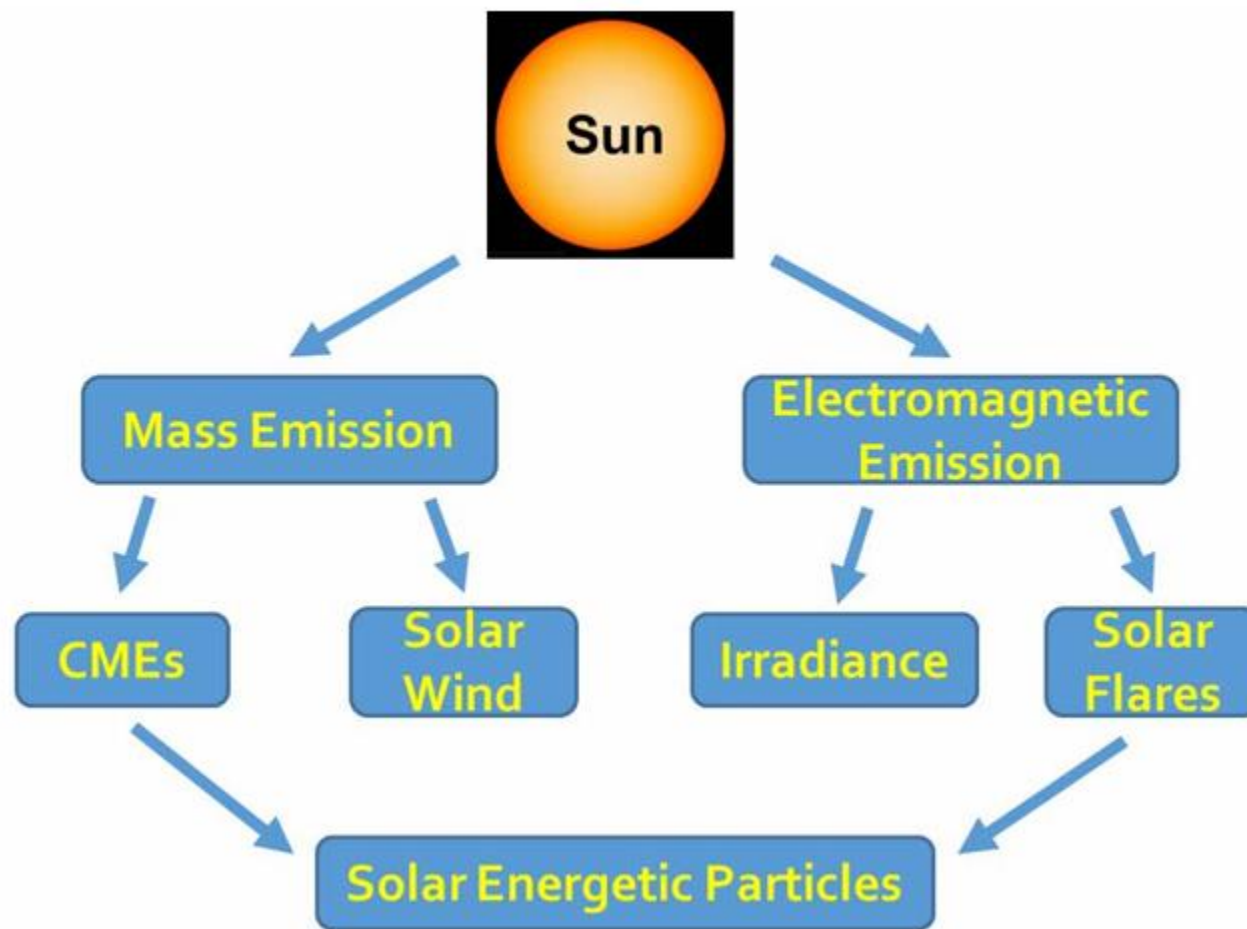
- **辐射场：自然辐射场、人工辐射场**
- **单粒子效应定义及研究现状**
- **中子单粒子效应机制研究**
- **大气中子单粒子效应研究现状**





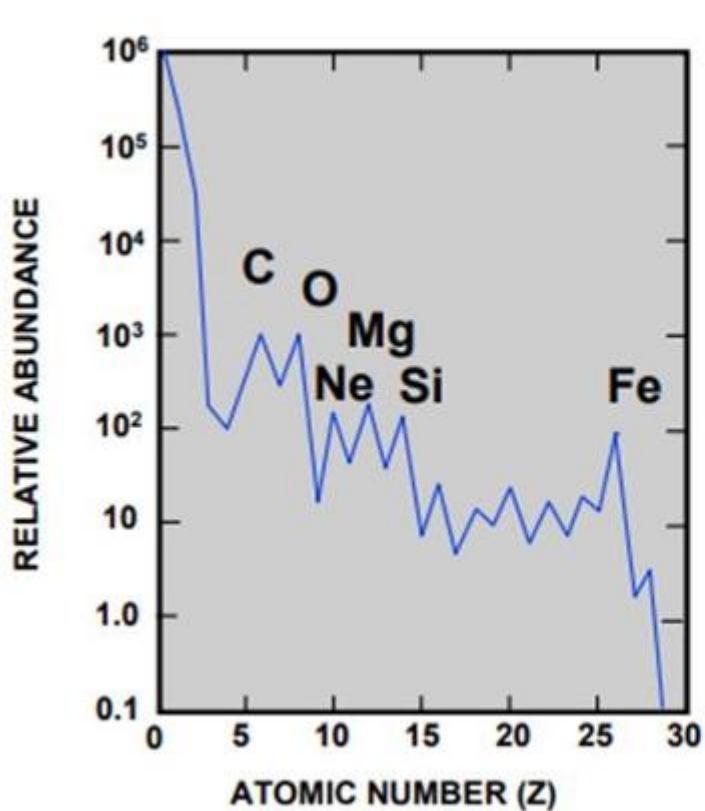
地球辐射带位于地球磁层的内部区域，经过该辐射带的卫星系统中的太阳能电池，集成电路和传感器等组件都可能会因受到辐射带环境的辐射而损坏。内辐射带位于距离地球表面1000英里至8000公里的区域；外辐射带位于距离地球表面12000英里至25000公里的区域。主要由地球磁场捕获的各种高能粒子（主要由质子、电子和少量的低能重离子）组成。

[1]https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html

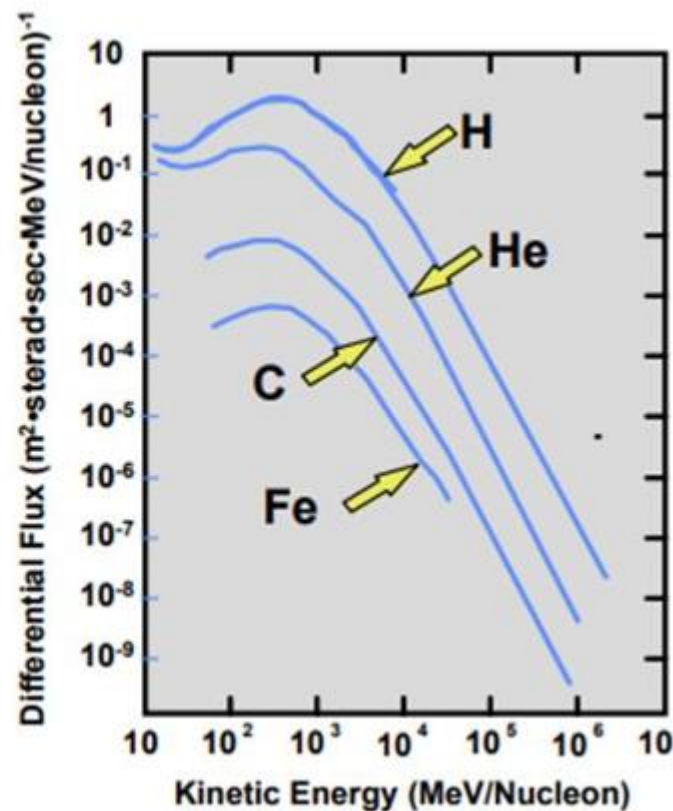


➤ 太阳宇宙射线主要由质子（96.4%）Alpha粒子、重离子以及少量电子组成。

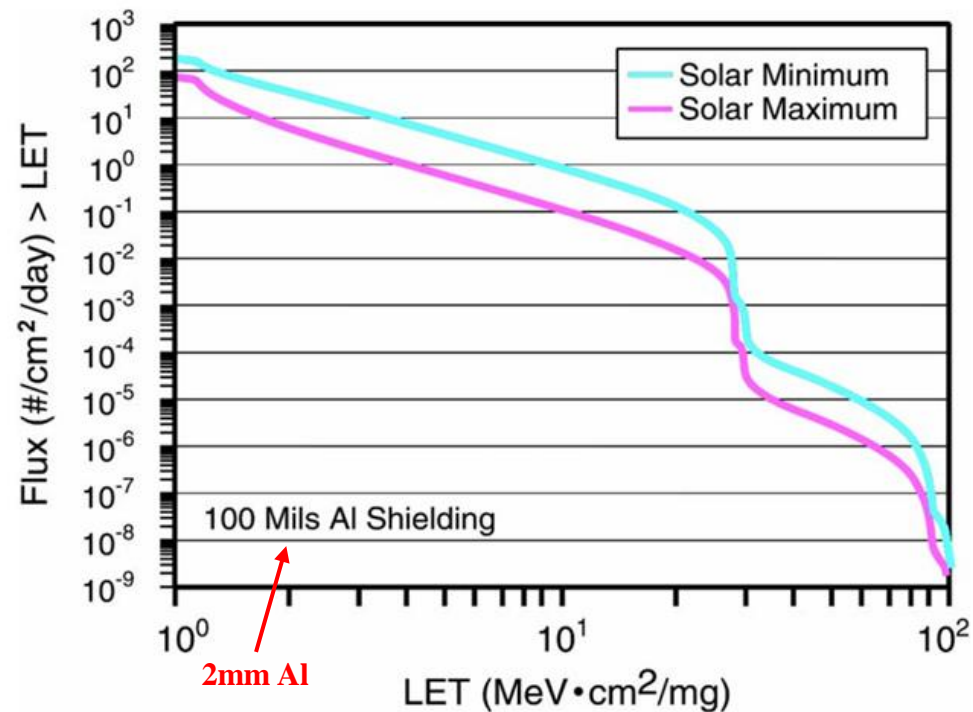
[1]Xapsos M. A Brief History of Space Climatology: From the Big Bang to the Present[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(1): 17–37.



(a)

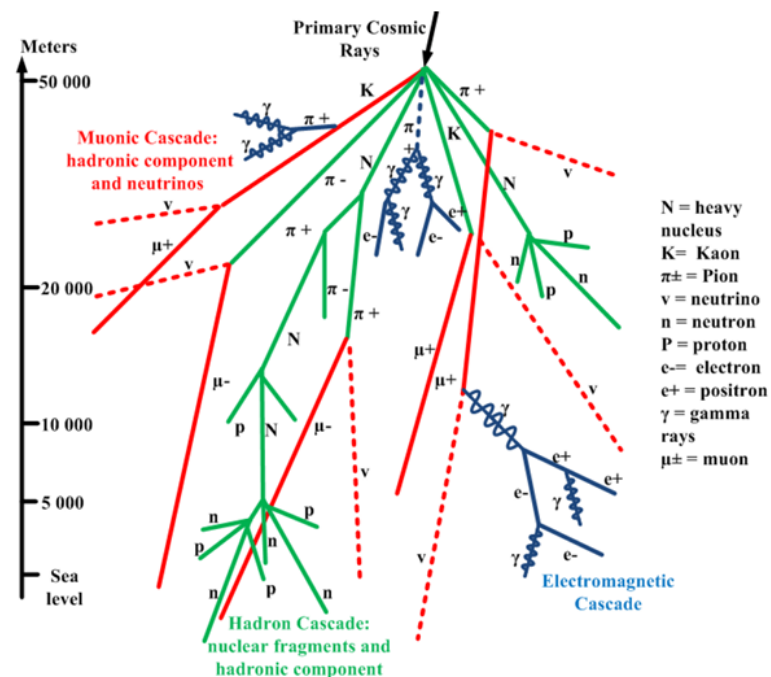


(b)

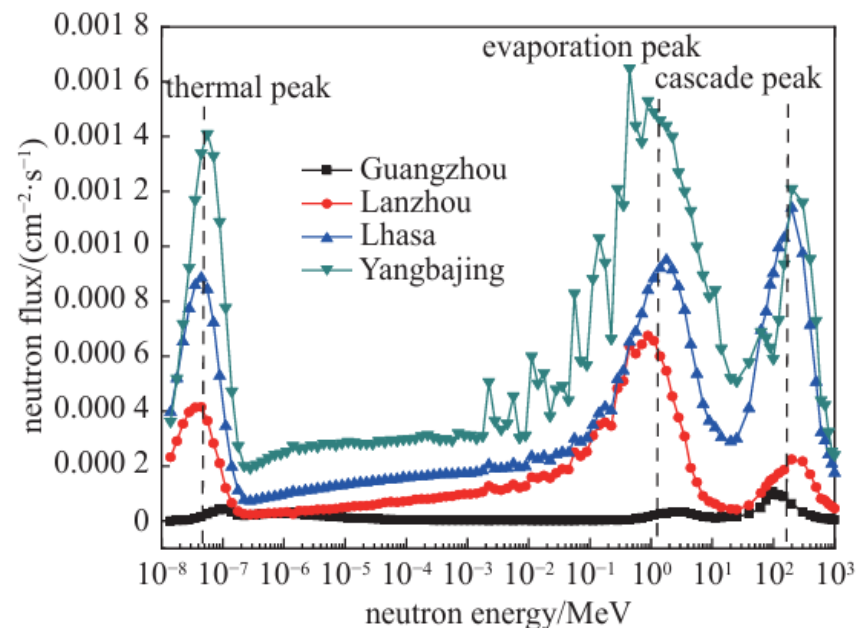


(c)

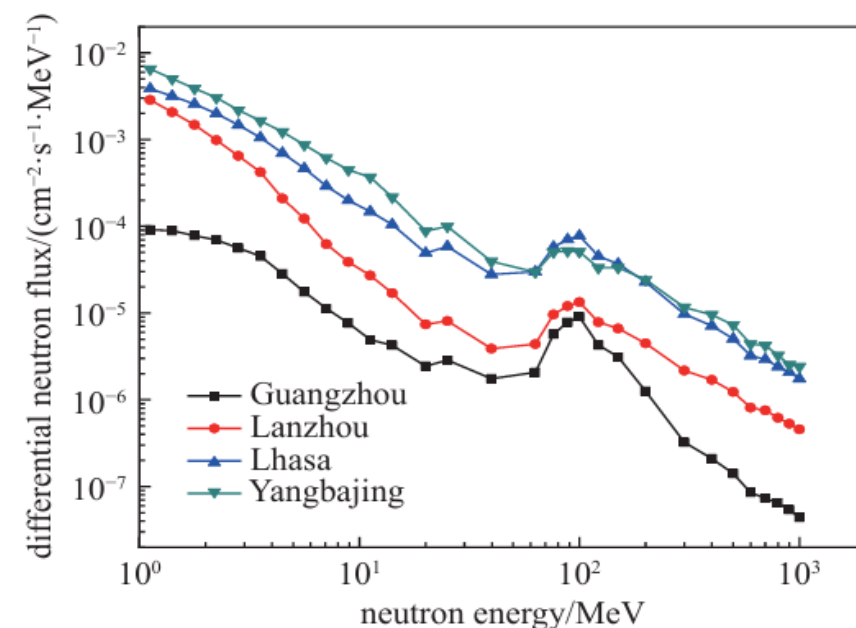
➤ 银河宇宙射线 (Galactic Cosmic Rays, 简称GCR) , 主要为来自于太阳系外的高能粒子。银河系宇宙射线包含的元素范围较广, 其中质子 (氢核) 约占85%, α 粒子 (氦核) 约占14%, 重离子约占1%。



(a)



(b)

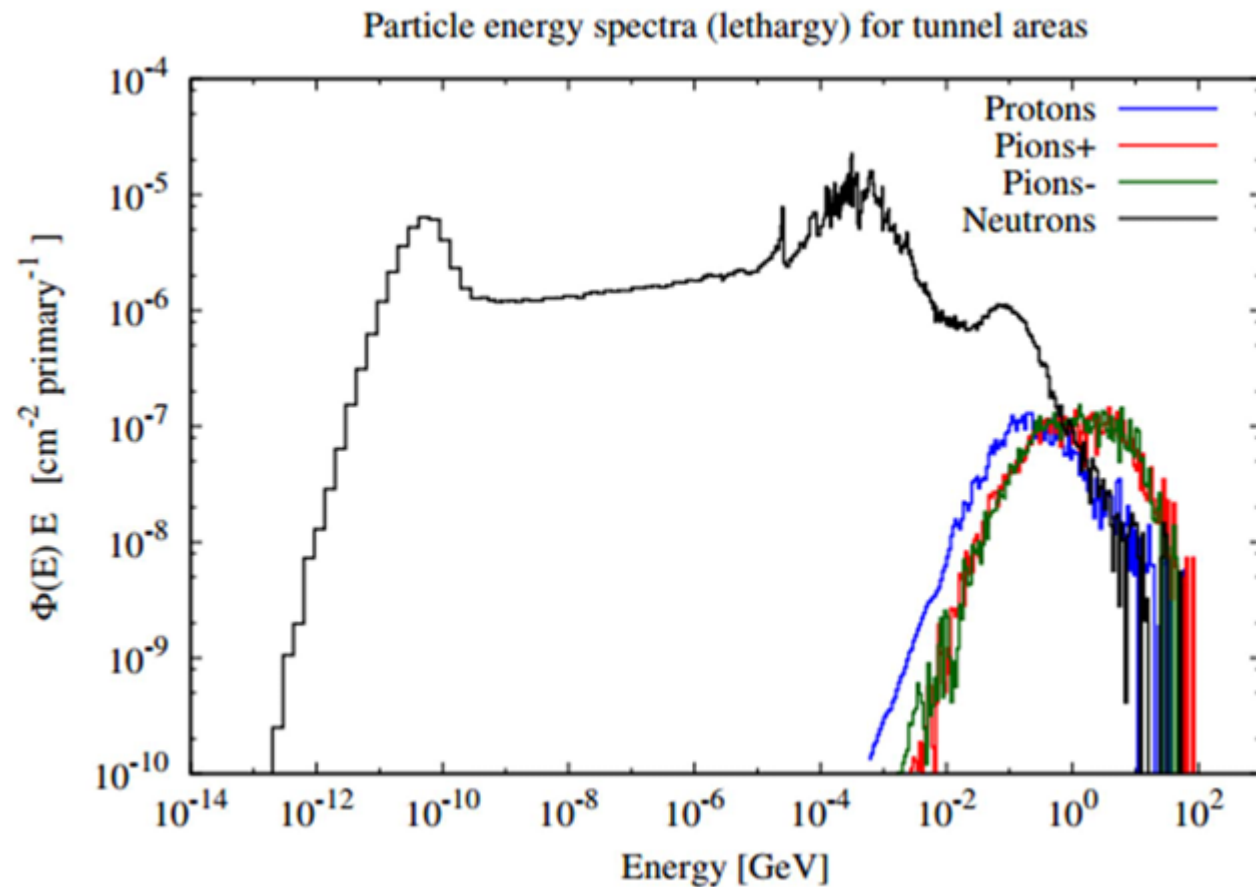
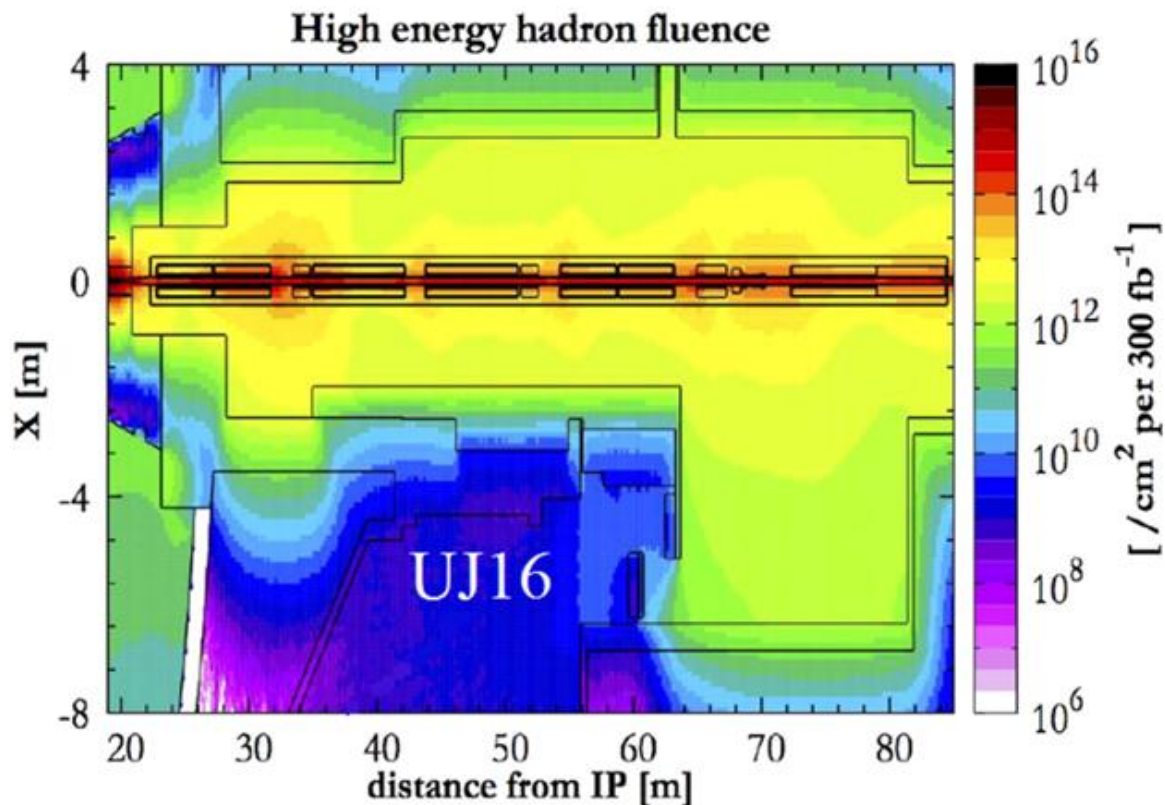


(c)

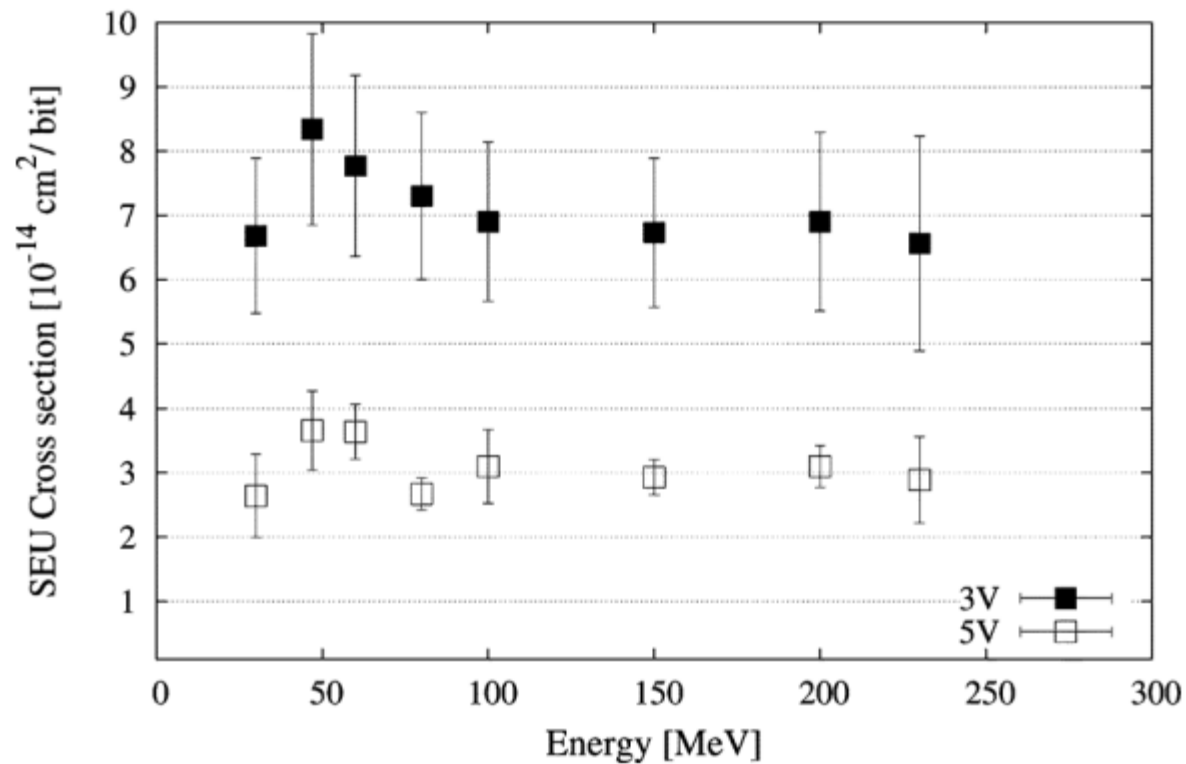
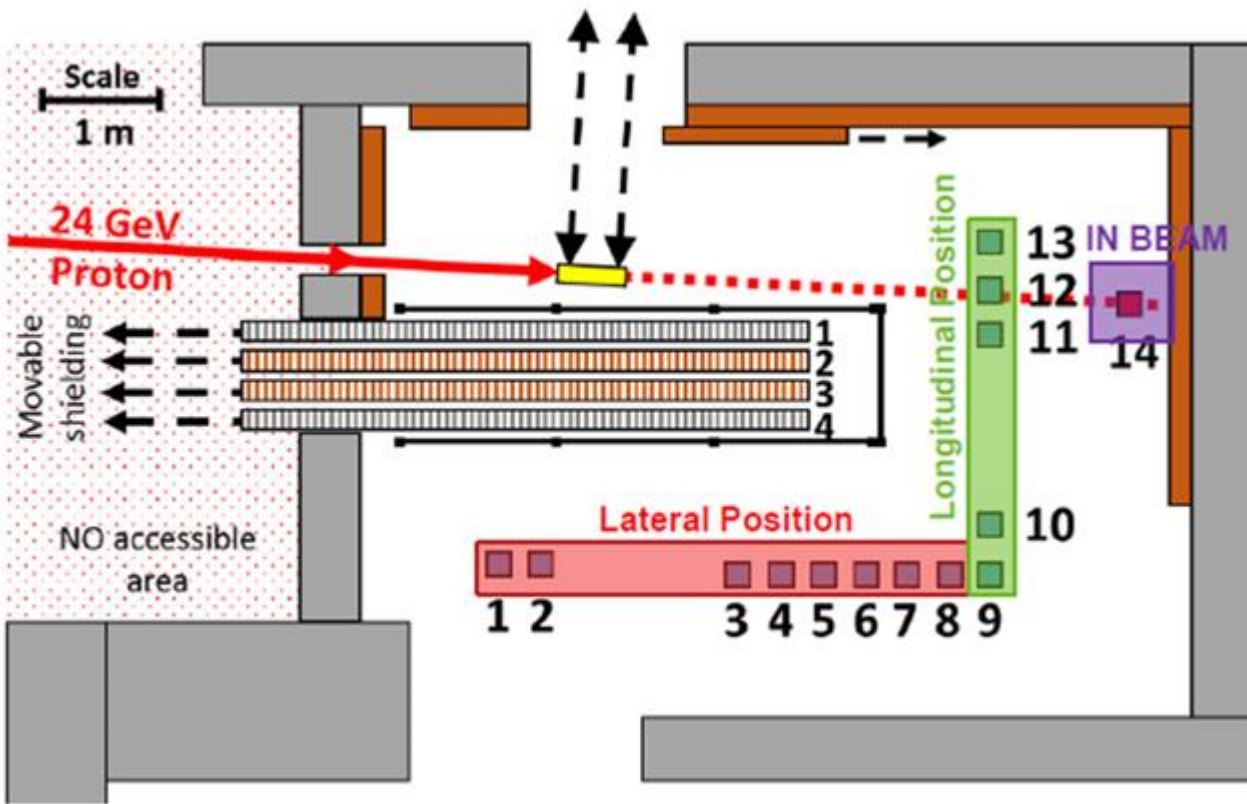
- 不同地区的中子能谱形状近似，均包含3个峰值区：一个能量在100 MeV附近的高能峰，一个能量在1 ~ 2 MeV附近的“核蒸发”峰，以及一个热峰；
- 影响大气中子能谱的主要因素是海拔，次要的是地磁位置即纬度。

[1]Toro D G. Temporal Filtering with Soft Error Detection and Correction Technique for Radiation Hardening Based on a C-element and BICS[D]. Université de Bretagne Occidentale, 2015

[2]彭超,雷志锋,张战刚,等.国内典型地区地面大气中子能谱测量与仿真[J].强激光与粒子束,2023,35(05):157-162.



- 欧洲强子对撞机中容易产生辐照水平较高的位置包括：（1）准直器处；（2）对撞区；（3）束流管道内束流与残余气体相互作用



CERN High energy Accelerator Mixed field facility (CHARM)

[1] K. Roed *et al.*, "Method for Measuring Mixed Field Radiation Levels Relevant for SEEs at the LHC," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 59, no. 4, pp. 1040-1047, Aug. 2012, doi: 10.1109/TNS.2012.2183677.

单粒子效应(Single Event Effect, SEE)是由单个高能粒子与微电子器件或电路的敏感区域相互作用引起器件异常的现象。中子通过电离能量沉积和非电离能量沉积对器件（材料）造成影响。

软错误

- 单粒子翻转
- 单粒子瞬态

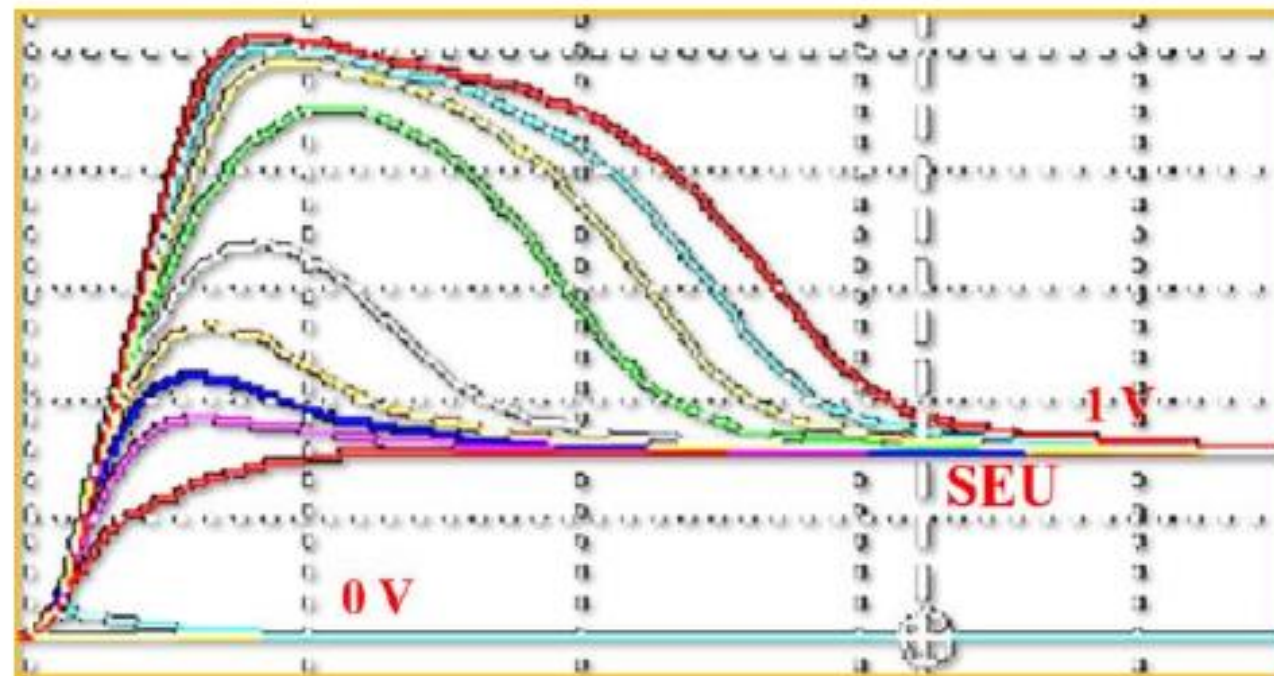
伪硬错误

- 单粒子锁定
- 单粒子中断

硬错误

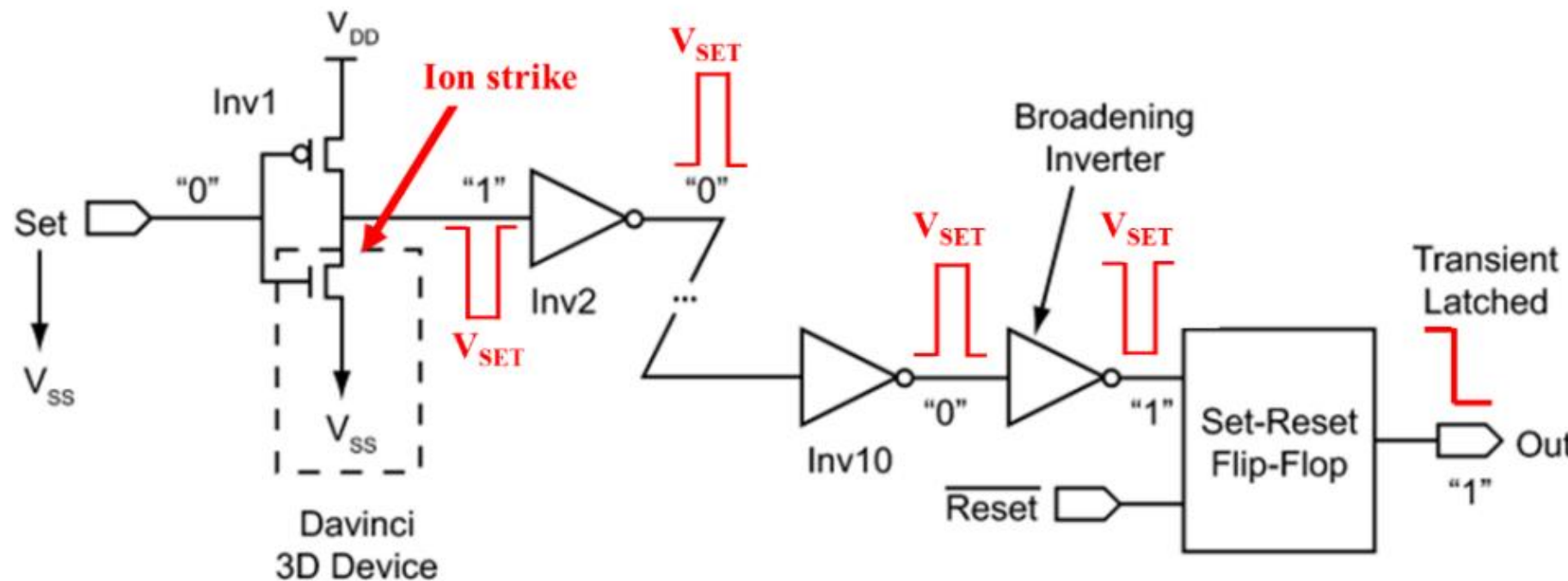
- 单粒子烧毁
- 单粒子击穿

带电粒子在电路的一个或多个敏感节点上沉积电荷，使敏感节点的电势发生变化，使得存储器的逻辑状态发生了从“0”到“1”或者从“1”到“0”的改变，即单粒子翻转。若沿粒子径迹方向分布的电荷被多个单元的灵敏区收集将有可能产生两个或更多逻辑位的翻转被称为单粒子多位翻转（MBU）。器件特征尺寸的减小与工作电压的降低，都会加大SEU和MBU的产生机率。



典型的单粒子效应：单粒子瞬态

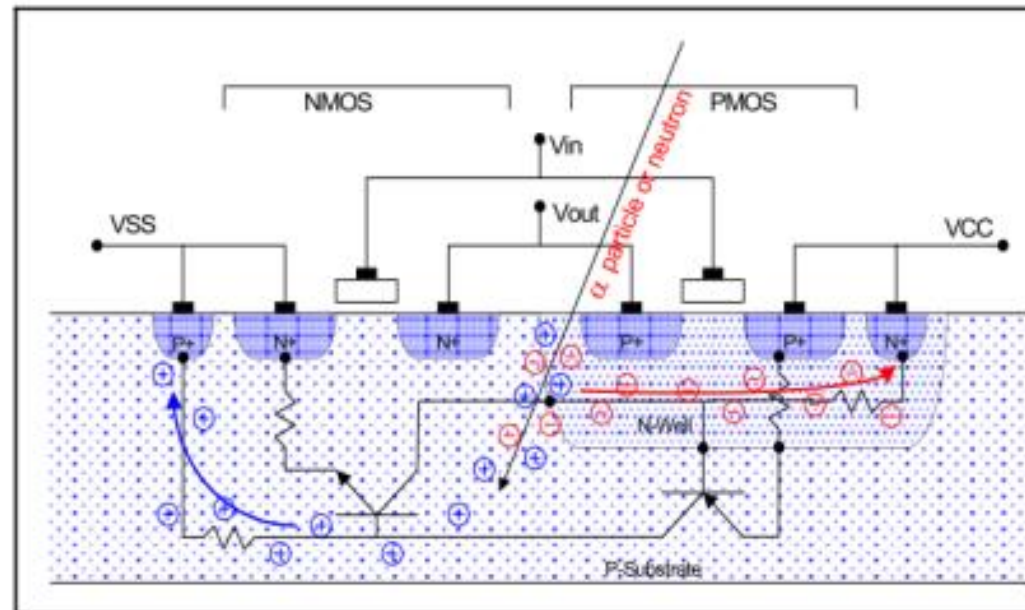
对于CMOS集成电路而言，高能粒子入射可在器件内部引起瞬态电压扰动，该瞬态扰动从受影响的栅极传播到逻辑信号路径中，这种传播的瞬态信号称为单粒子瞬态。该瞬态电压扰动在电路中的传播可能导致存储单元存储数据出错，从而引起翻转。如果一个带电粒子电离沉积足够量的电荷被某个组合逻辑的敏感节点收集，从而形成一个可能通过电路传播的瞬态脉冲。沿电路传播的单粒子瞬态最终是否能引起的翻转取决于单粒子瞬态的脉冲宽度和时钟频率。



[1] Dodd P E, Member S, Shaneyfelt M R, et al. Production and Propagation of Single-Event Transients in High-Speed Digital Logic ICs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3278–3284

典型的单粒子效应：单粒子锁定

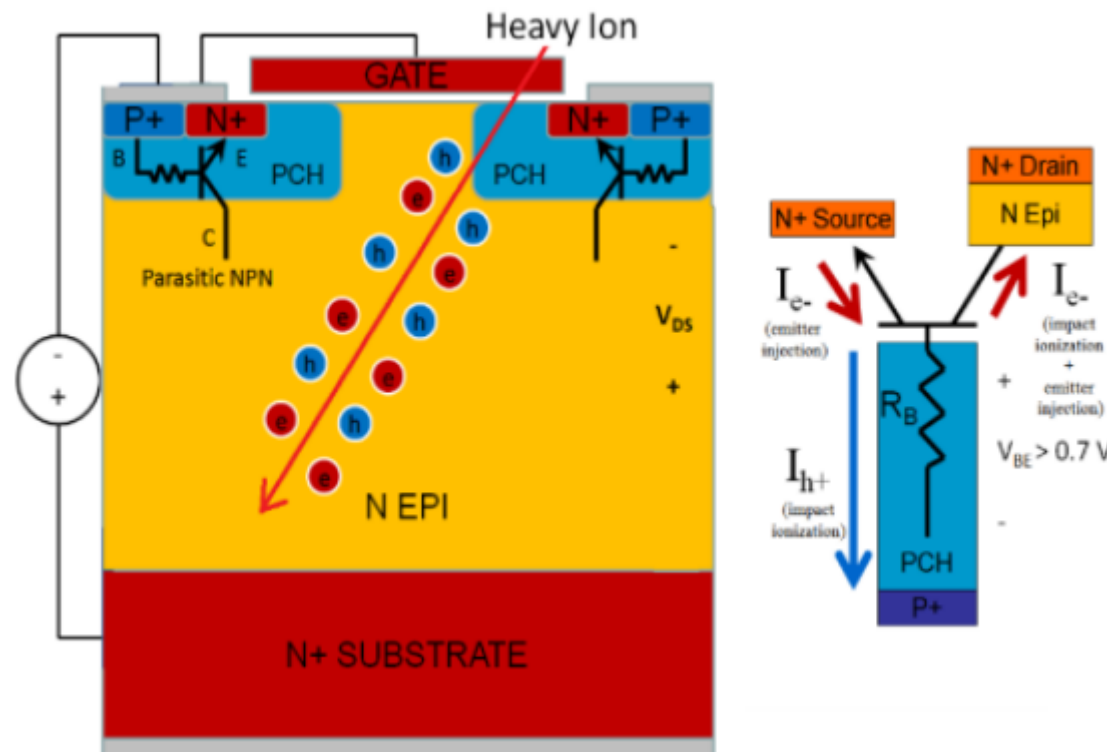
对于体硅 CMOS 工艺器件，其内部存在天然的寄生 PNP 结构。PMOS 管和 NMOS 管的源极、N 阱以及 P 型衬底 (P-Substrate) 分别构成了 PNP 和 NPN 三极管，两个三极管的基极与集电极彼此间相连，从而形成了正反馈的寄生可控硅 (Silicon Controlled Rectifier, SCR) 结构。若没有离子辐照，则 SCR 结构处于关闭状态；如果器件处于被辐照状态，那么离子电离产生的非平衡载流子会导致器件的阱电势发生扰动，这会打开 SCR 结构的正反馈通路，使得电流持续激增。在发生 SEL 时，如果不及时对器件进行断电处理，就会在内部形成不可逆的热损伤，导致器件功能永久失效。



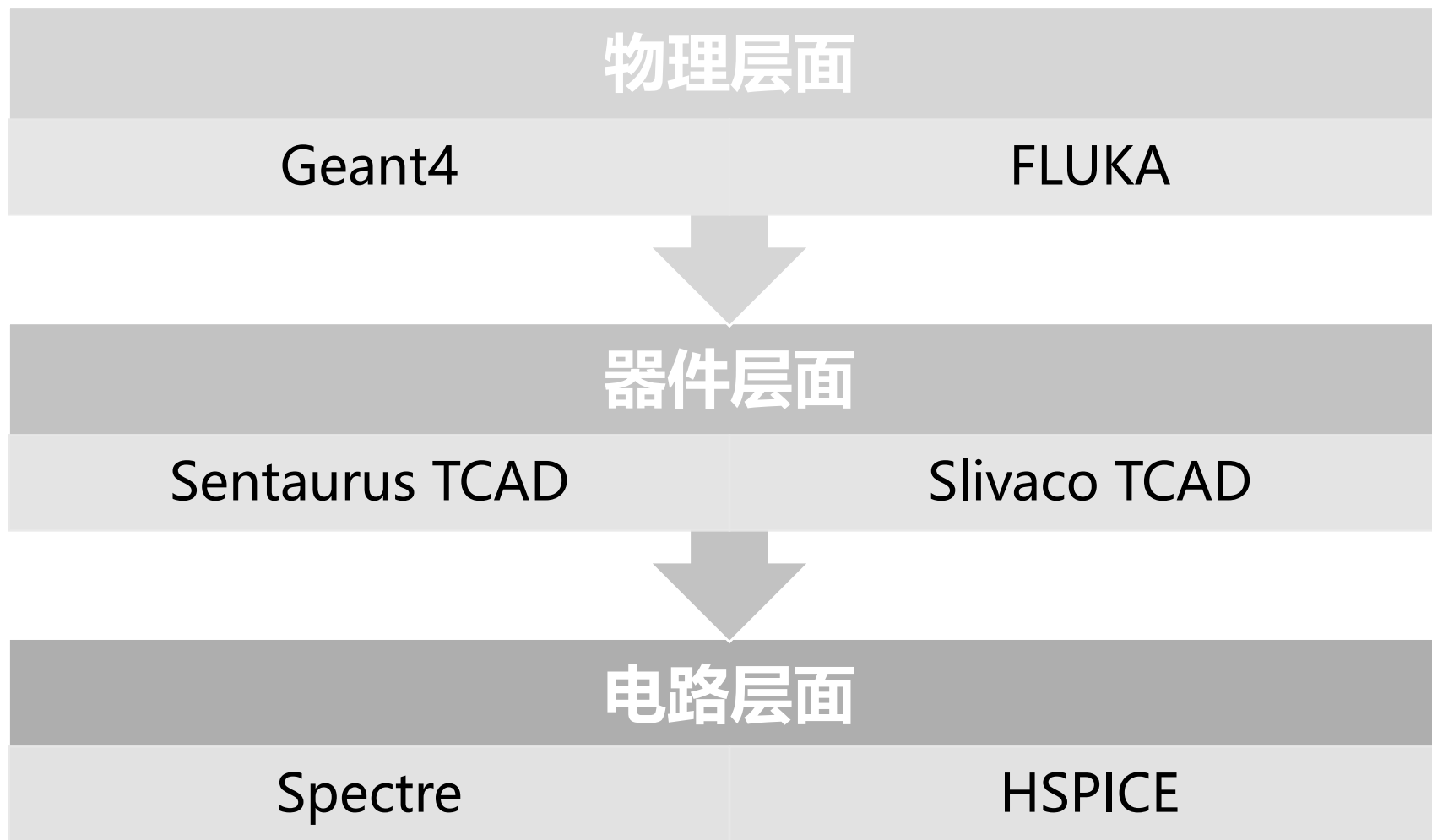
[1]Puchner H, Kapre R, Sharifzadeh S, et al. Elimination of single event latchup in 90nm SRAM technologies [C]. 2006 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, 2006: 721-722.

典型的单粒子效应：单粒子烧毁

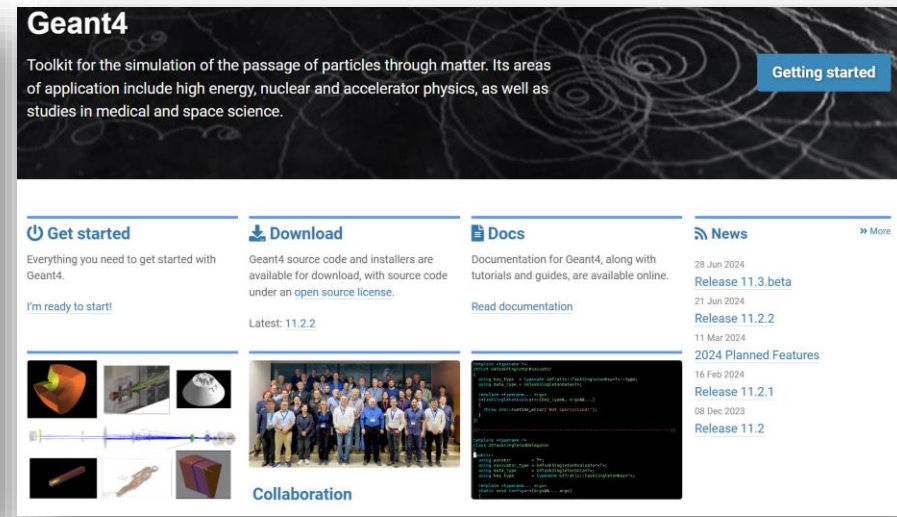
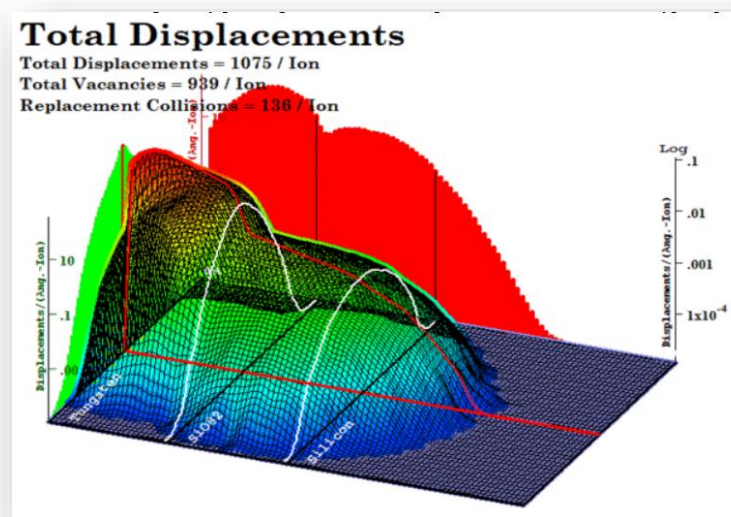
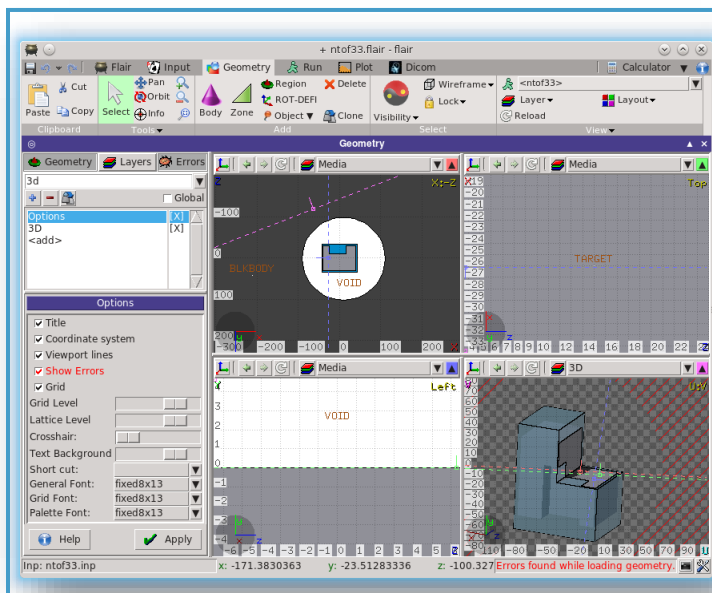
单粒子烧毁多发生在高功率器件，比如MOSFET和二极管中。当高能粒子通过反向偏置的PN结时，产生的电子-空穴对在电场的作用下分离（电子流向漏极，空穴流向源极），产生电流。寄生双极晶体管的基极和发射极产生一个正向压降，使寄生双极晶体管导通。由此产生的电流或者电压若足够大，会导致MOSFET的烧毁，即单粒子烧毁。



- 单粒子效应模拟计算针对物理级、器件级、电路级以及系统级都会有相对应的模拟软件

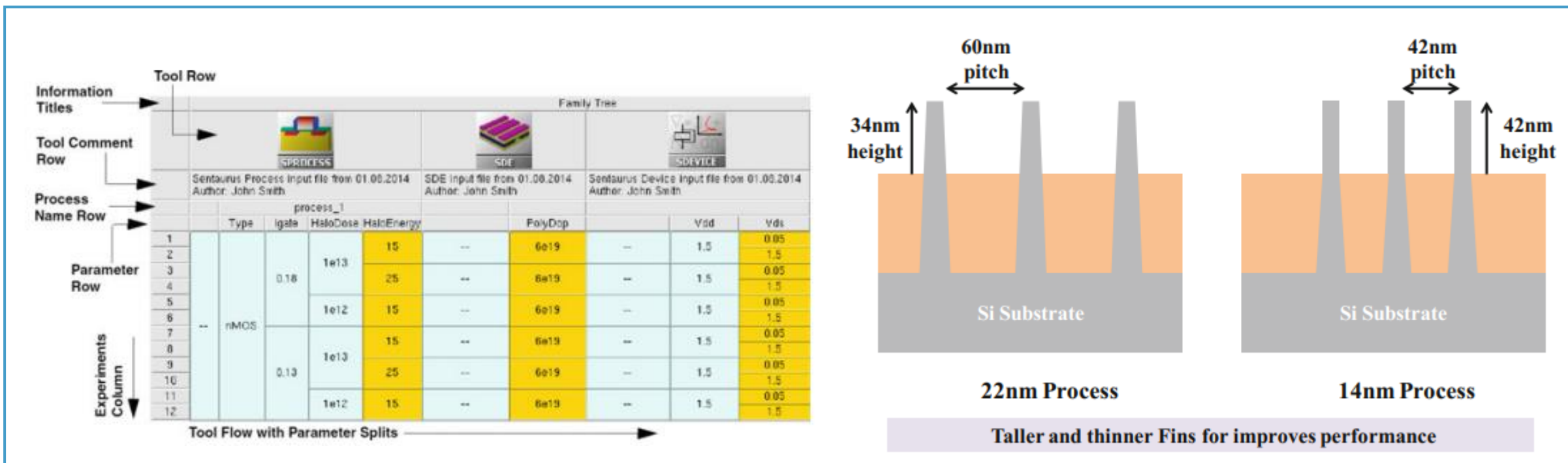


软件模拟粒子入射到半导体器件，穿过不同厚度的灵敏层所沉积的能量，产生次级粒子的种类与分布，粒子入射深度与电荷扩散半径等。该方法可用于快速定性分析非平衡载流子产生的物理过程、影响规律以及内在物理机理，判断该模式下单粒子效应的防护难度。



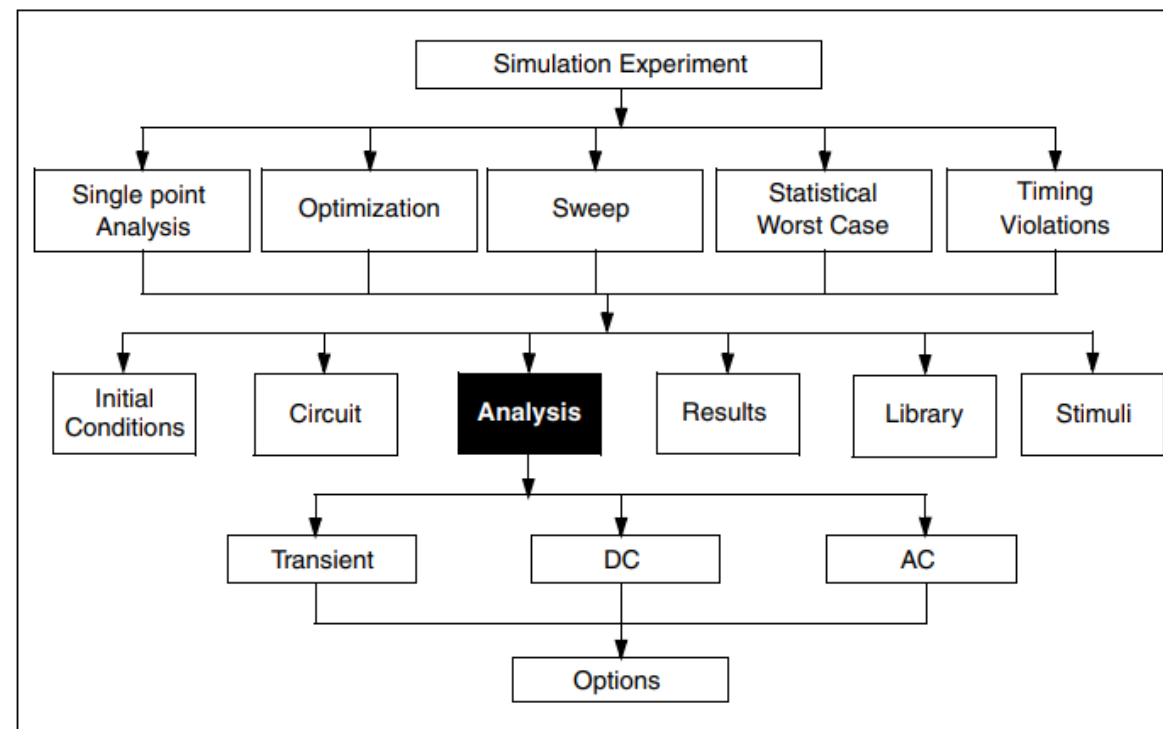
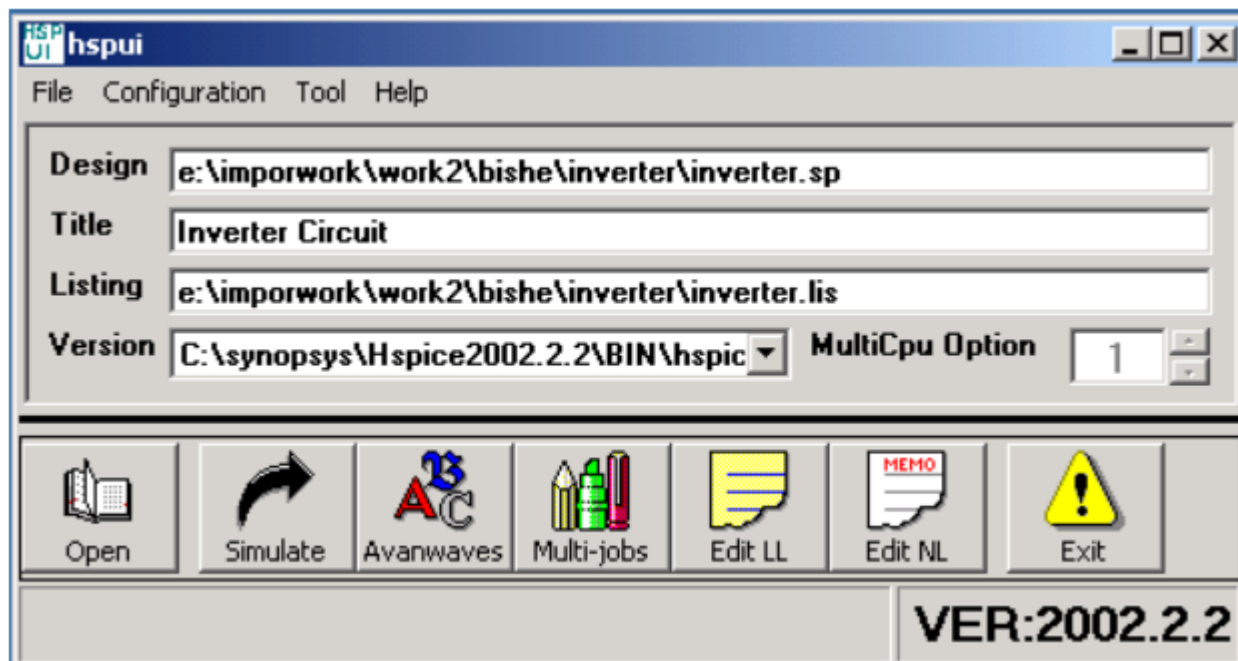
- [1] [Home | The official CERN FLUKA website](#)
- [2] [James Ziegler - SRIM & TRIM](#)
- [3] [Geant4 \(cern.ch\)](#)

TCAD (Technology Computer-Aided Design) 指使用计算机仿真来发展与优化半导体工艺技术和半导体器件。基于有限元方法, TCAD 模拟工具求解基本的物理偏微分方程, 如载流子的扩散和输运方程, 用以代表半导体器件中的硅晶圆或金属层系统。这种底层的物理方法保证了 TCAD 仿真的预测精度。Synopsys Sentaurus TCAD提供了一套全面的仿真软件, 包含行业领先的工艺及器件仿真工艺及方便的交互式仿真界面。器件仿真类型上, Synopsys Sentaurus TCAD 支持广泛, 包含互补金属氧化物半导体场效应晶体管 (CMOSFET)、鳍状场效应晶体管 (FinFET)、功率器件、存储器件、图像传感器、太阳能电池和模拟/射频等器件。



[1] Wu, YC., Jhan, YR. (2018). Introduction of Synopsys Sentaurus TCAD Simulation. In: 3D TCAD Simulation for CMOS Nanoelectronic Devices. Springer, Singapore.

随着集成电路与计算机的迅速发展，以电子计算机辅助设计（computer aided design，即 CAD）为基础的电子设计自动化（electronic design automation 即 EDA）技术已渗透到电子系统和专用集成电路设计的各个环节。模拟集成电路的仿真工具，是众多 EDA 工具中的一个重要的组成部分。HSPICE 于 20 世纪 80 年代起步，是一款基于加州大学伯克利分校开发的 SPICE（以集成电路为重心的仿真程序）技术的模拟电路仿真器。Hspice 用来对电路进行各种分析，包括直流工作点和直流传输特性分析、交流小信号分析、噪声分析、瞬态分析、傅立叶分析、失真分析、灵敏度分析、温度分析以及蒙特卡罗分析等等。



- 在单粒子效应研究中，单粒子失效机理研究是最为关键的研究，采用模拟的方法研究单粒子效应是重要的研究手段。

半导体物理

微观层面，漂移扩散模型和玻尔兹曼方程能够模拟载流子的运动情况，从而分析器件内部各物理量对半导体电学特性的影响。

核物理

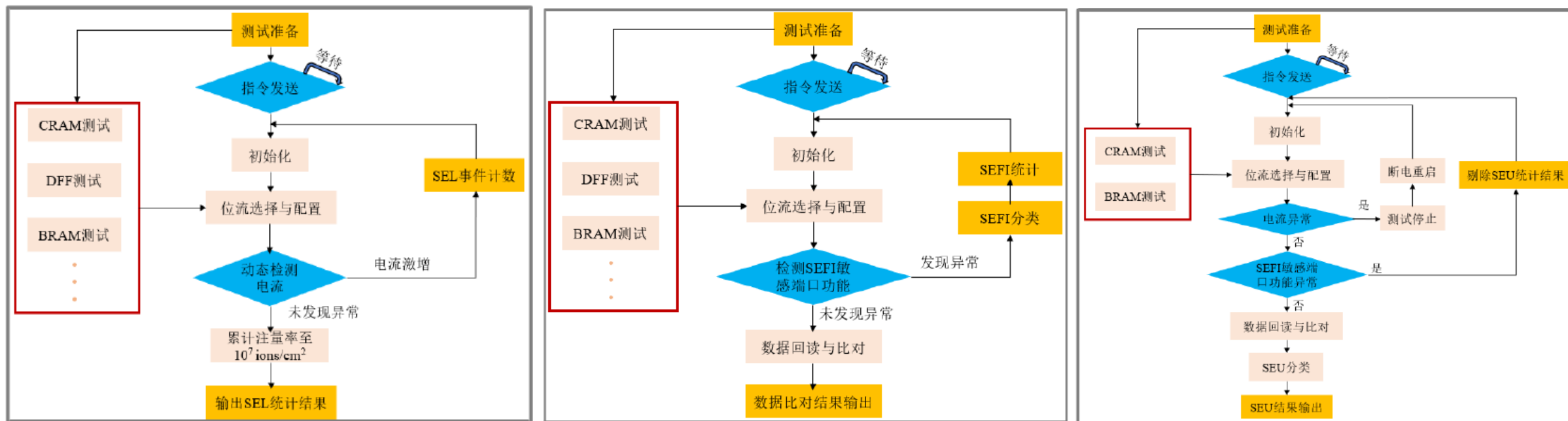
建立合适的势函数描述粒子间的相互作用，能够精确地描述系统中粒子的运动，通常包括Stillinger-Weber (SW)、 Tersoff 势函数。

由于核反应过程通常为较高能量的过程和电子，空穴在材料中的迁移是非常低能过程，两种不但能量差异大，而且处在学科的交叉边界。因此目前直接完整模拟核反应到电子迁移过程的损伤机制尚未有发现。

ESCC-25100 (European Space Components Coordination, ESCC)、JESD89 (Joint Electron Device Engineering Council, JEDEC) 等测试标准结合器件实际的在轨需求制定了地面单粒子实验方法。以SRAM型FPGA为例, 单粒子门锁 (SEL) 与单粒子功能中断 (SEFI) 的监测应与单粒子翻转 (SEU) 并行。在高LET重离子辐照环境下, SEL较易发生并表现为电流的激增。因为SEL具有破坏性, 辐照实验中SEL被监测出以后应及时断电, 防止器件烧毁, SEL的监测也应具有**最高优先级**。SEFI虽然不会造成类似SEL的直接破坏, 但会严重影响卫星的在轨功能, 造成航天器功能失效, 同时也会引发大量的SEU。因此, SEFI的甄别和处理的优先级应低于SEL但高于SEU。

[1]蔡畅.纳米SRAM型FPGA的单粒子效应及其加固技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所),2021.DOI:10.27560/d.cnki.gkjwc.2021.000024.

➤ SRAM型FPGA不同单粒子效应测试方法

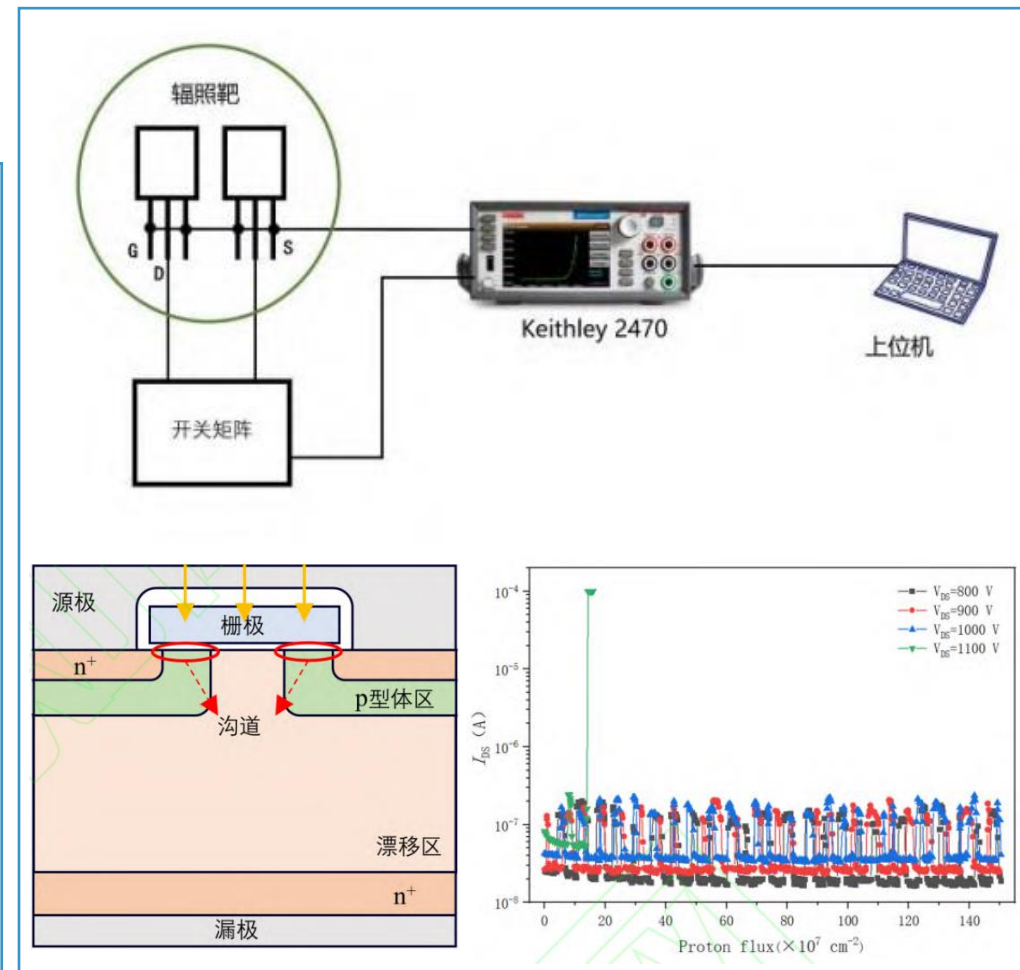
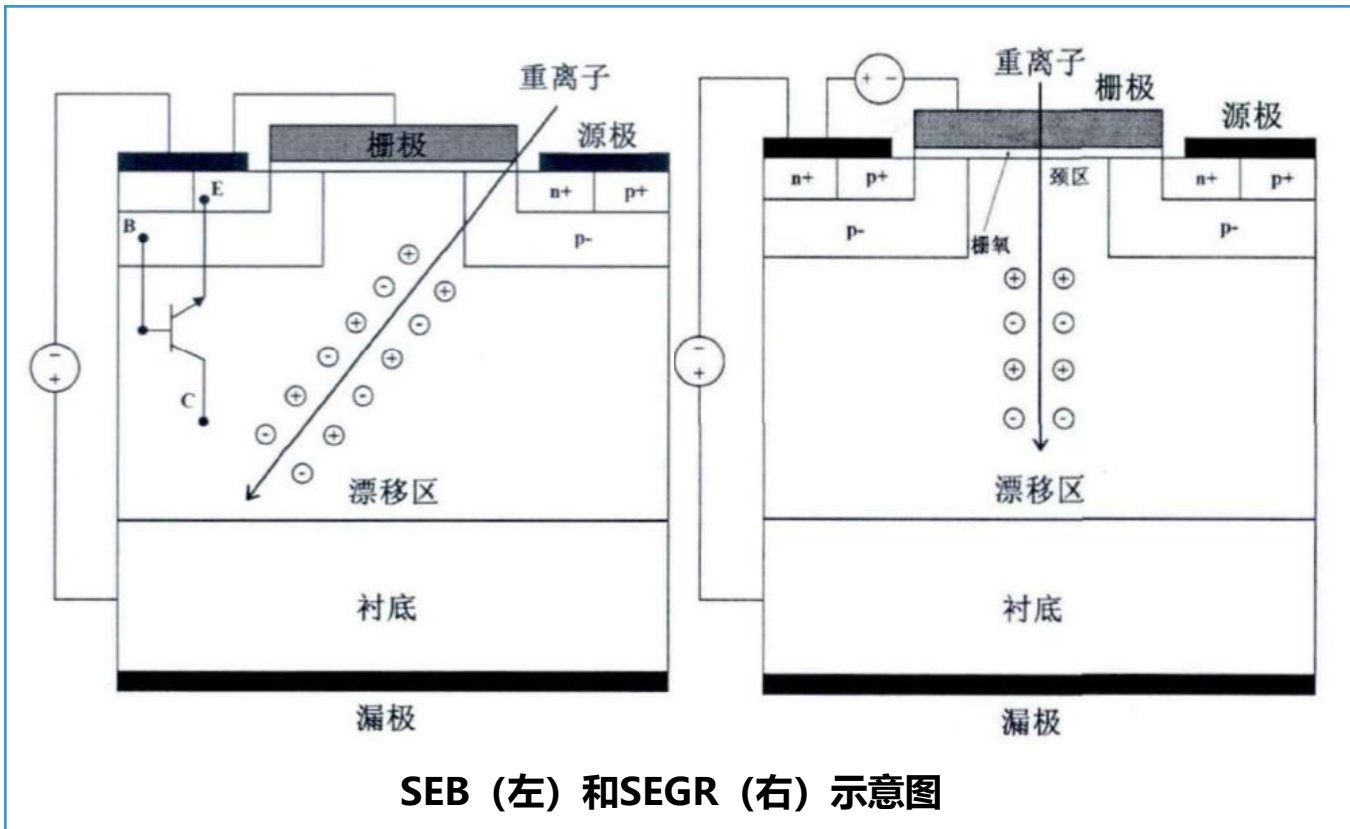


系统通过高速I/O管脚连接主子板两部分，具有可重复使用能力的母基板结构能够有效降低研发与制板成本。测试系统主要包含电源模块、通信模块、控制模块等，可以满足单粒子效应测试的各种需求。

[1]蔡畅.纳米SRAM型FPGA的单粒子效应及其加固技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所),2021.DOI:10.27560/d.cnki.gkjc.2021.000024.

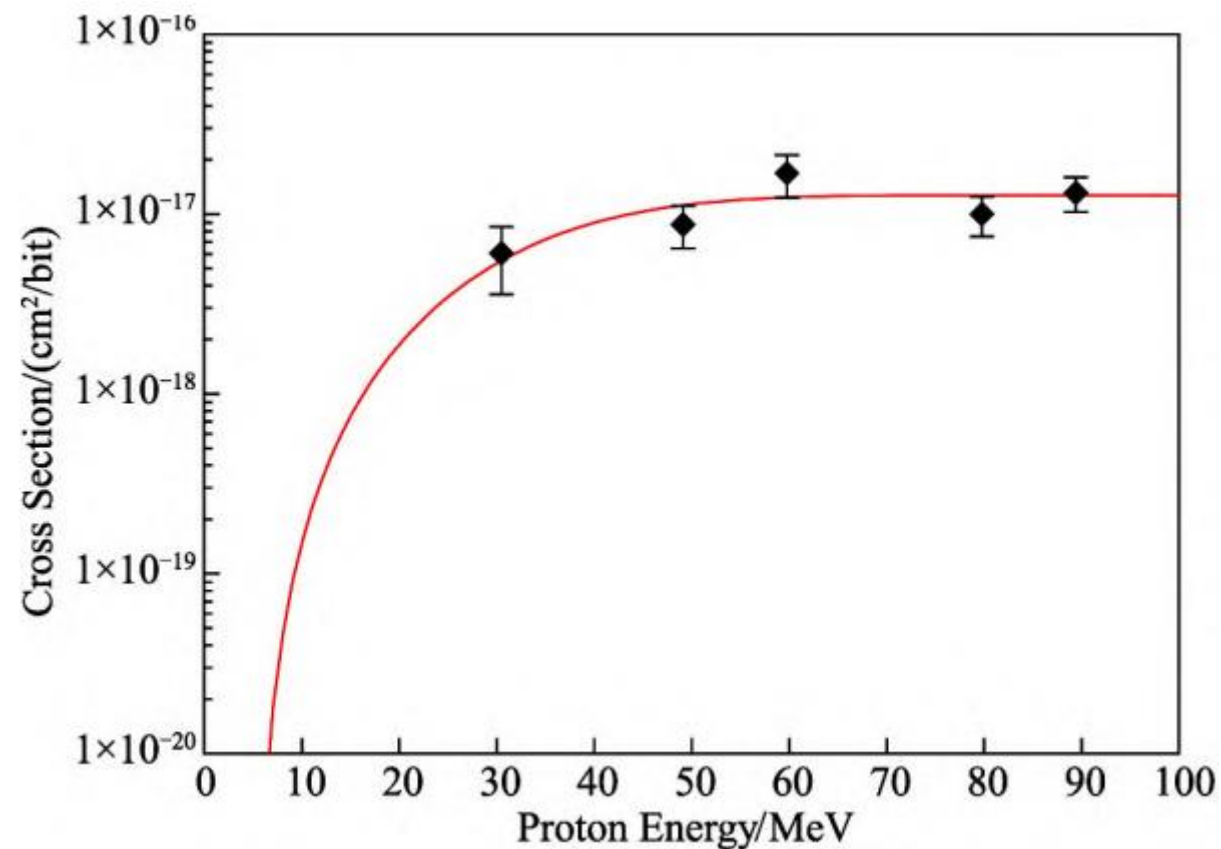
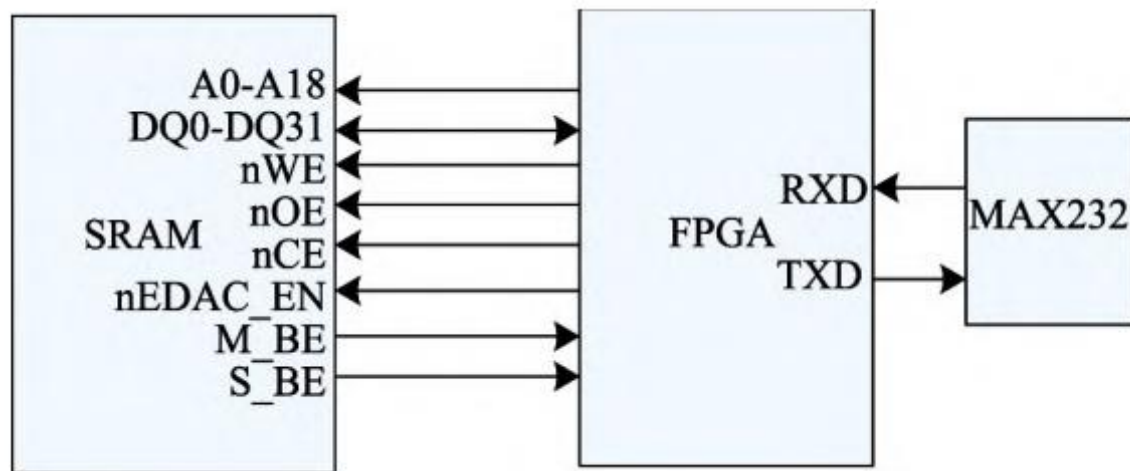
单粒子效应研究现状：实验研究

由于功率MOSFET具有很高的工作电压，单粒子效应大多发生在功率MOSFET器件中。实验和模拟结果表明，在功率器件单粒子效应及加固研究中，值得关注的效应包括单粒子烧毁（SEB）以及单粒子栅穿（SEGR）。



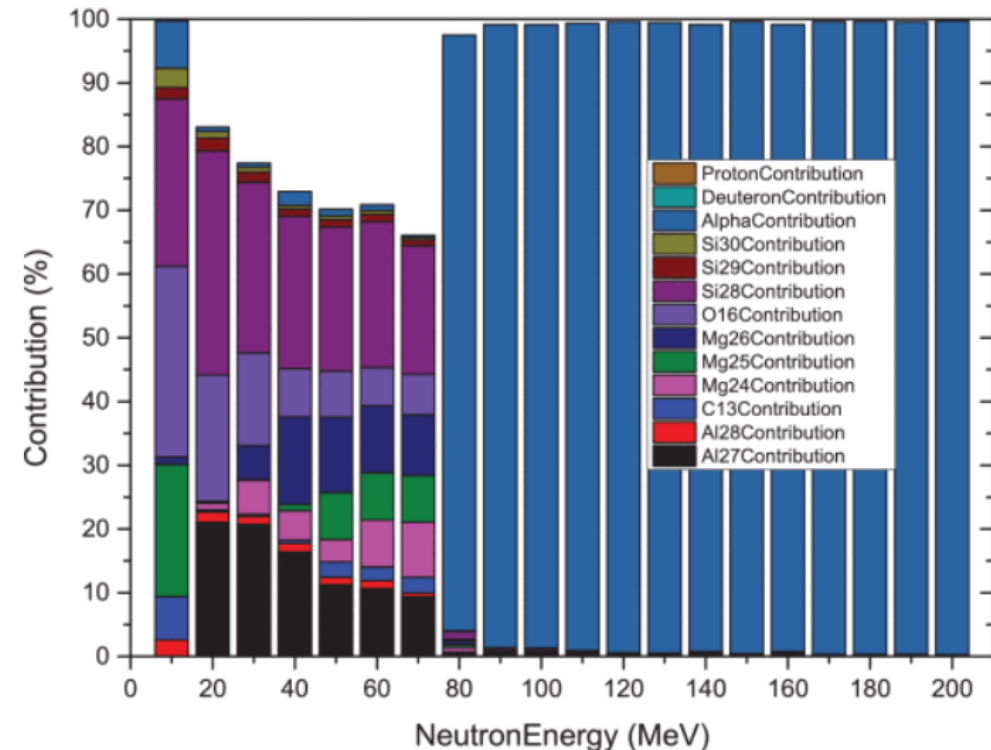
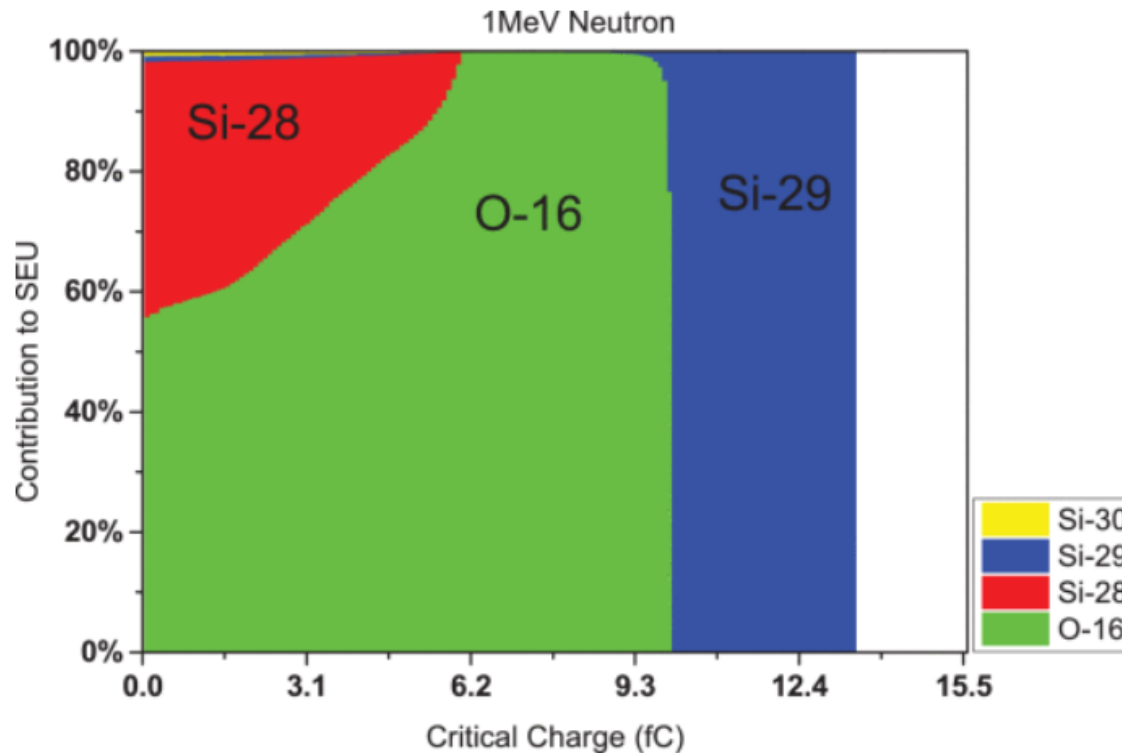
[1]史慧琳,郭刚,张峥,等.SiC MOSFET的质子单粒子效应[J/OL].半导体技术:1-7[2024-07-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1109.tn.20240517.0852.002.html>.

[2]李洋帆,郭红霞,张鸿,等.双沟槽SiC金属-氧化物-半导体型场效应管重离子单粒子效应[J].物理学报,2024,73(02):204-211.



- 基于研究宇宙射线的需要，Hess W. N等人系统地计算了大气中的中子能谱。1999年，E. Normand证明了大气中子是诱发航空电子系统单粒子翻转的主要原因，验证了中子单粒子效应对随机存储存取(RAMs)、静态随机存储器 (SRAMs) 以及动态随机存储器 (DRAMs) 的影响。
- 随着器件工艺制程降低，集成度提高，关于中子单粒子效应研究越来越多。研究表明，工艺制程的降低，临界电荷减少，会更容易被诱发单粒子效应。同时，热中子同样会诱发单粒子效应；对于中高能中子而言，随着能量提高，单粒子效应也会提高。
- 测试图形和特征尺寸对单粒子翻转截面影响不大，对多位翻转截面有着较大的影响，而版图工艺对二者均会有较大的影响

高能中子轰击半导体器件后，中子和硅原子发生反应，并伴随带电粒子的产生，如质子、反冲重核、 α 粒子等，这些带电粒子在半导体器件中运动，导致沉积能量，一旦沉积的能量超过其阈值，就会导致单粒子效应发生，造成器件产生逻辑错误，甚至损毁等现象。

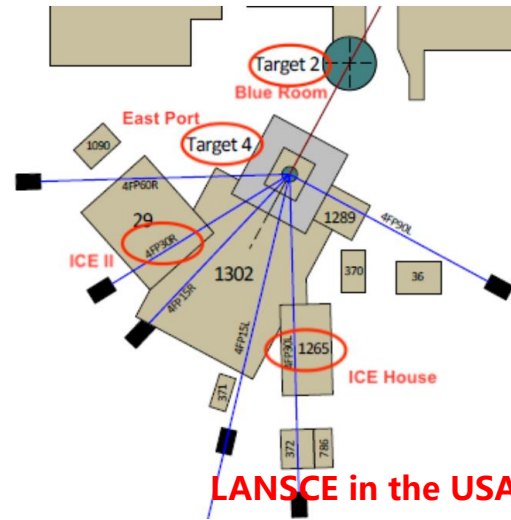


[1] W. Chen *et al.*, "Single-Event Upsets in SRAMs With Scaling Technology Nodes Induced by Terrestrial, Nuclear Reactor, and Monoenergetic Neutrons," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 66, no. 6, pp. 856-865

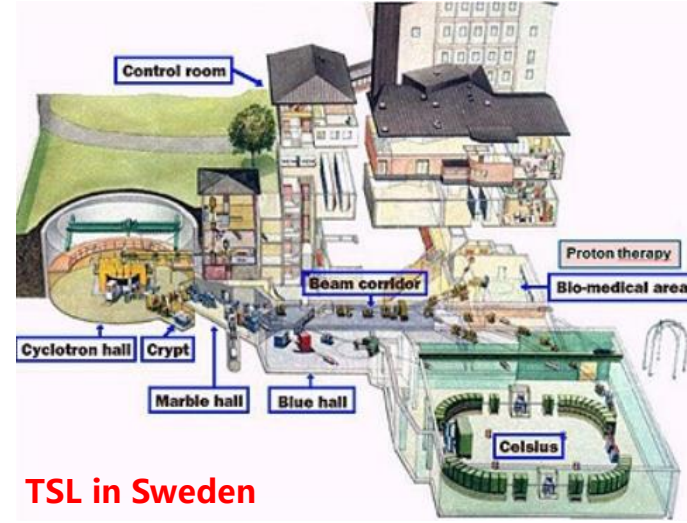
大气中子单粒子效应研究现状



TRIUMF in Canada 10



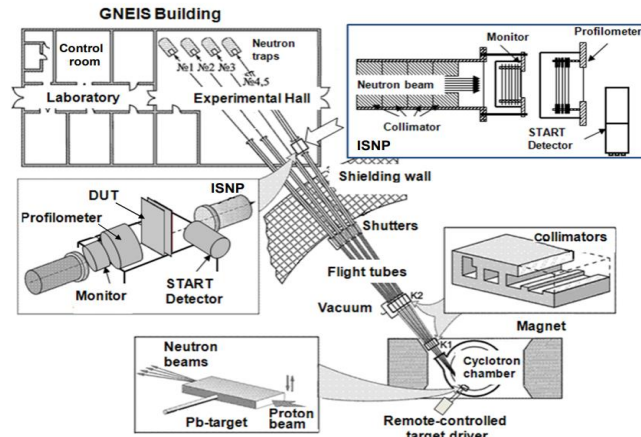
LANSCE in the USA



TSL in Sweden



ChipIR at ISIS in the UK



ISNP/GNEIS at ROSCOSMOS in Russia

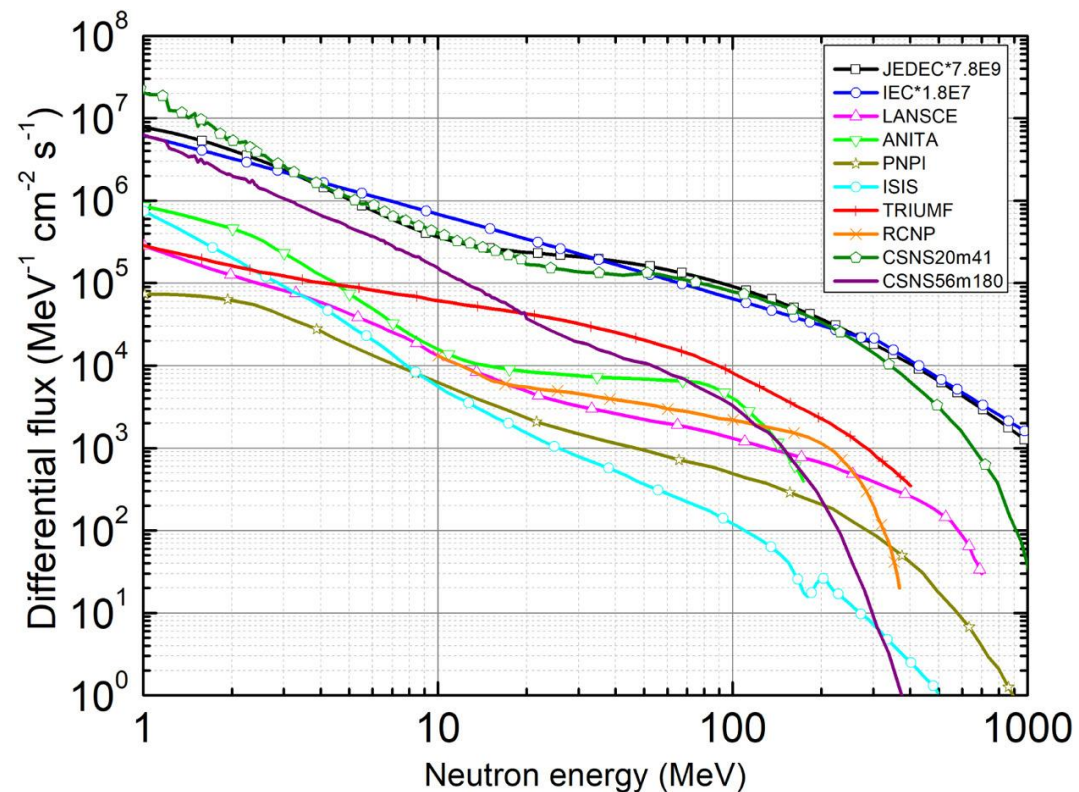


RCNP in Japan

[1] Quanzhi Yu. Evaluating the broad neutron spectrum of ANIS. Applied Radiation and Isotopes.

根据测量和理论研究，利用在地面和航空环境中获取的数据，国际上形成了两个标准的中子能谱，分别为JEDEC（前称联合电子设备工程委员会）的JESD89A标准给出的中子能谱和IEC给出的中子能谱。

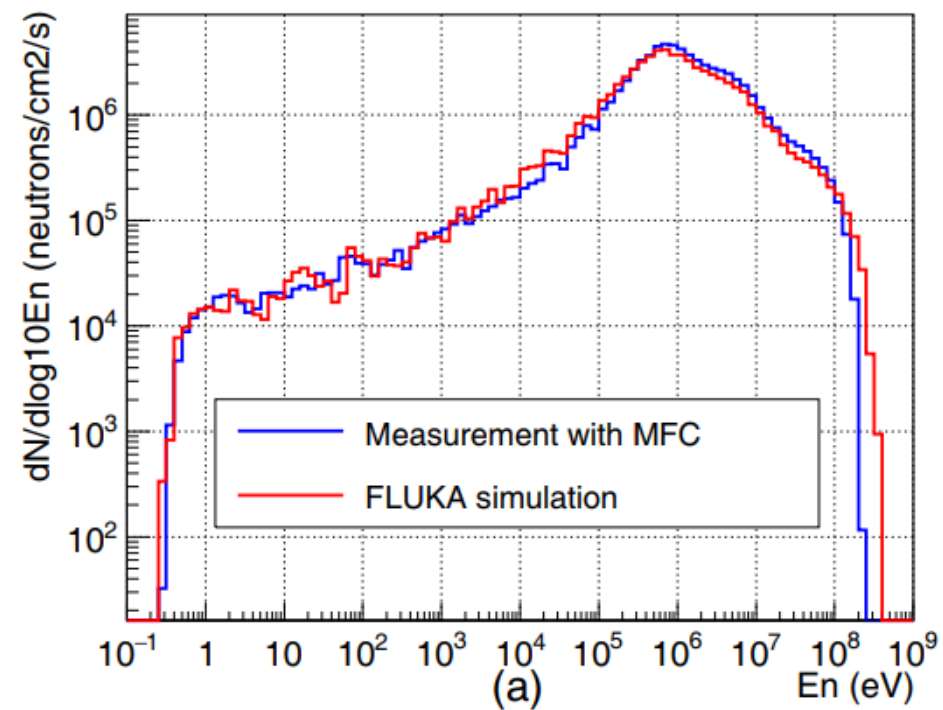
装置	国家	质子能量 /MeV	质子流强/ μA	束线距离/m	中子通量 / ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
UC Davis	美国	40-60	10	3	6×10^5
UCL	比利时	20-65	10	3.3	10^6
TRIUMF	加拿大	70-200	0.3	1	10^5
TSL	瑞典	25-180	10	3	3×10^5
RCNP	日本	392	1.0	1	3×10^5
TIARA	日本	30-85	3	5.2	1.2×10^5
CYRIC	日本	20-50	3	1.0	$1.0\times 10^6-10^7$
LANSCE	美国	800	1.5	19.7	6.5×10^5
CSNS	中国	1600	62.5 (直线)	20	1.5×10^{11} (@ 41°)
				56	3.4×10^{10} (@ 180°)



[1]黄泽棋,敬罕涛,张玉亮,等.大气中子单粒子效应研究现状及进展[J].现代应用物理,2022,13(02):144-150.

[2] Weijun Ni, Hantao Jing, Liying Zhang, Li Ou,Possible atmospheric-like neutron beams at CSNS,Radiation Physics and Chemistry,Volume 152,2018

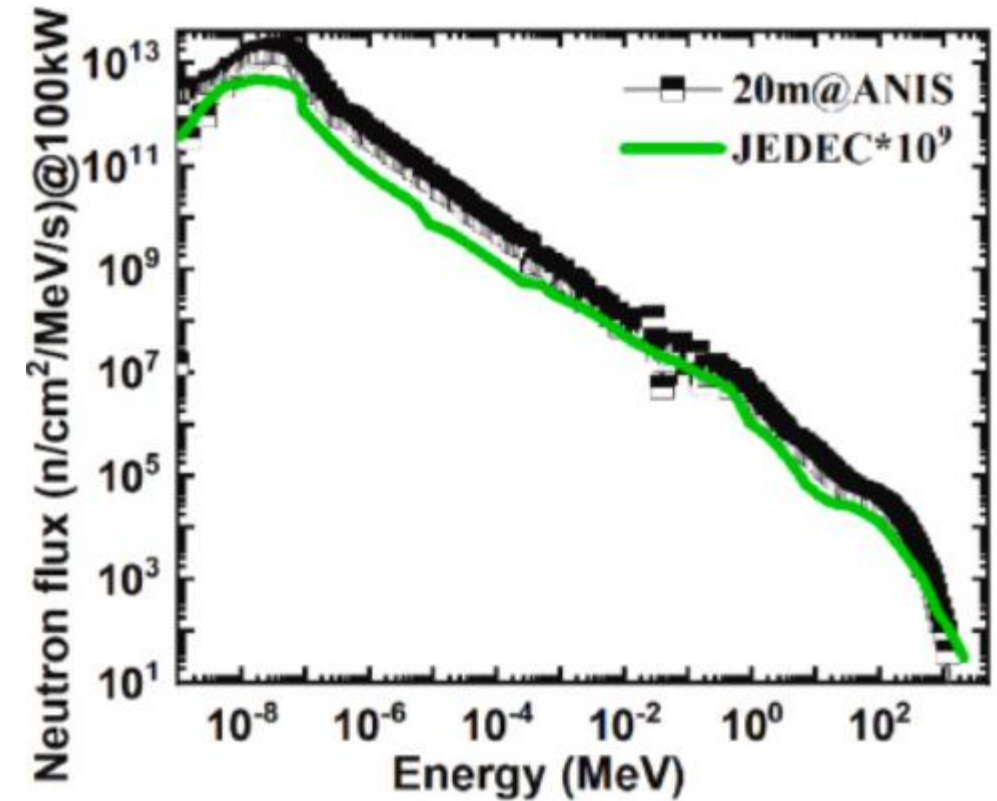
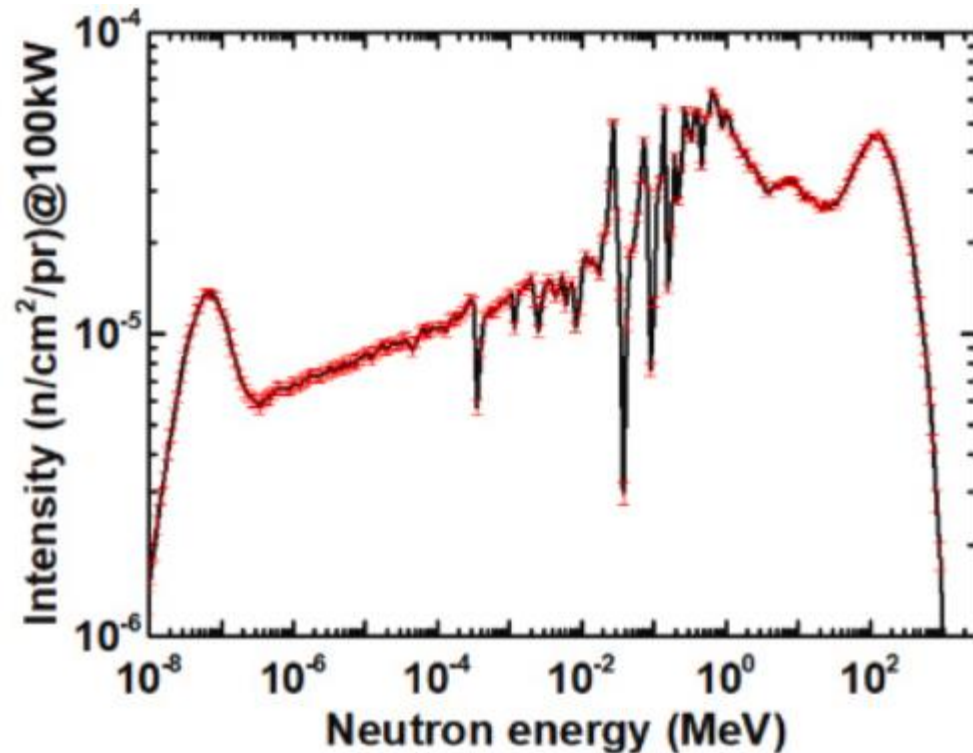
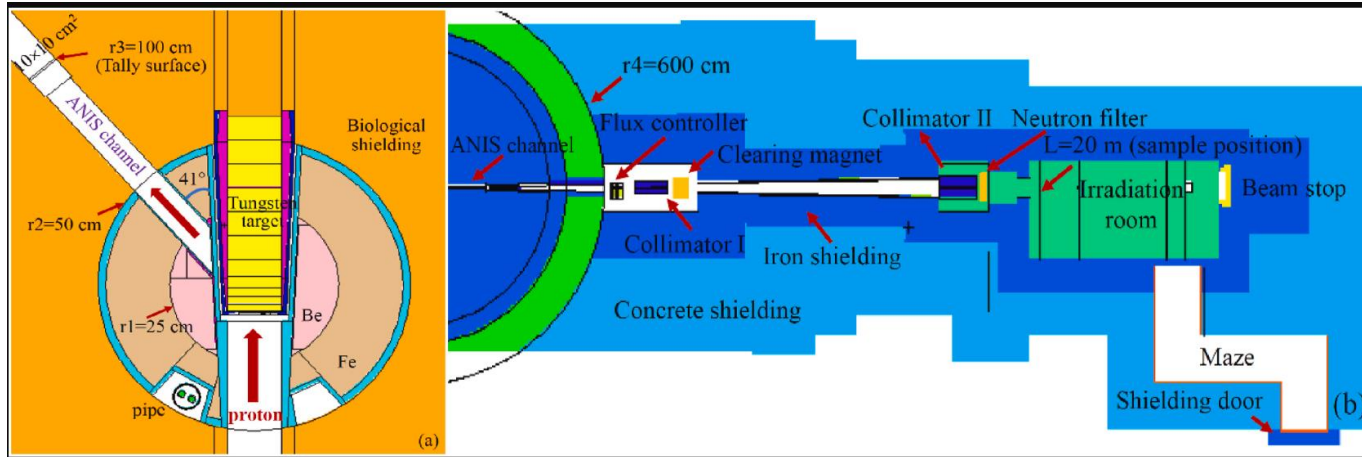
大气中子单粒子效应研究现状 (Back-n)



[1]Tang, JY., An, Q., Bai, JB. et al. Back-n white neutron source at CSNS and its applications. NUCL SCI TECH 32, 11 (2021).

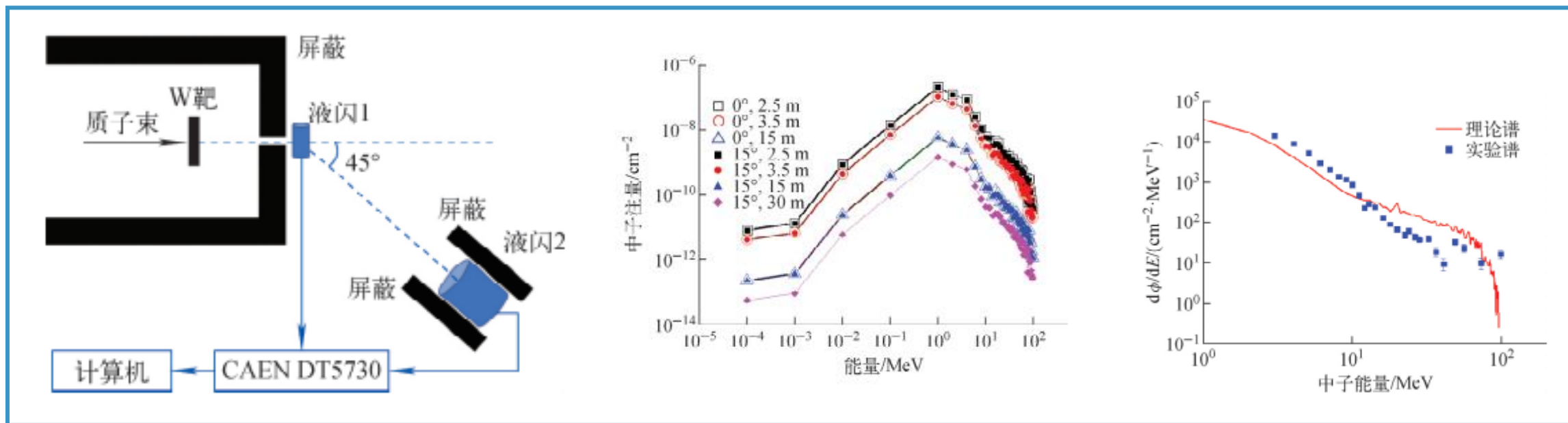
[2] Chen, Y., Luan, G., Bao, J. et al. Neutron energy spectrum measurement of the Back-n white neutron source at CSNS. Eur. Phys. J. A 55, 115 (2019).

大气中子单粒子效应研究现状 (ANIS)

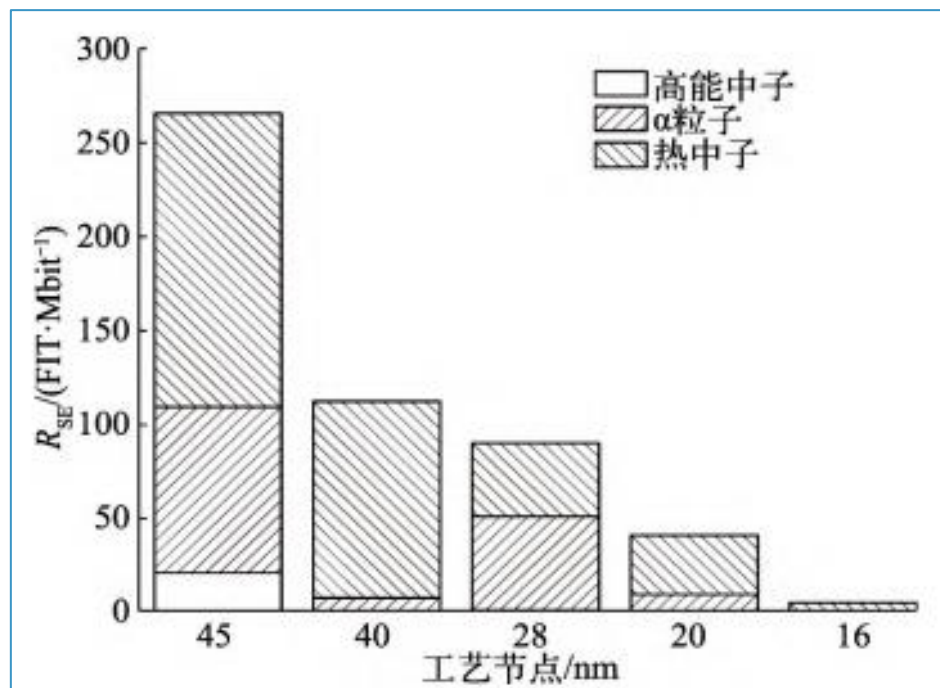


[1] Quanzhi Yu. Evaluating the broad neutron spectrum of ANIS. Applied Radiation and Isotopes.

➤ 中国原子能科学研究院100 MeV质子回旋加速器(CYCIAE-100)白光中子源



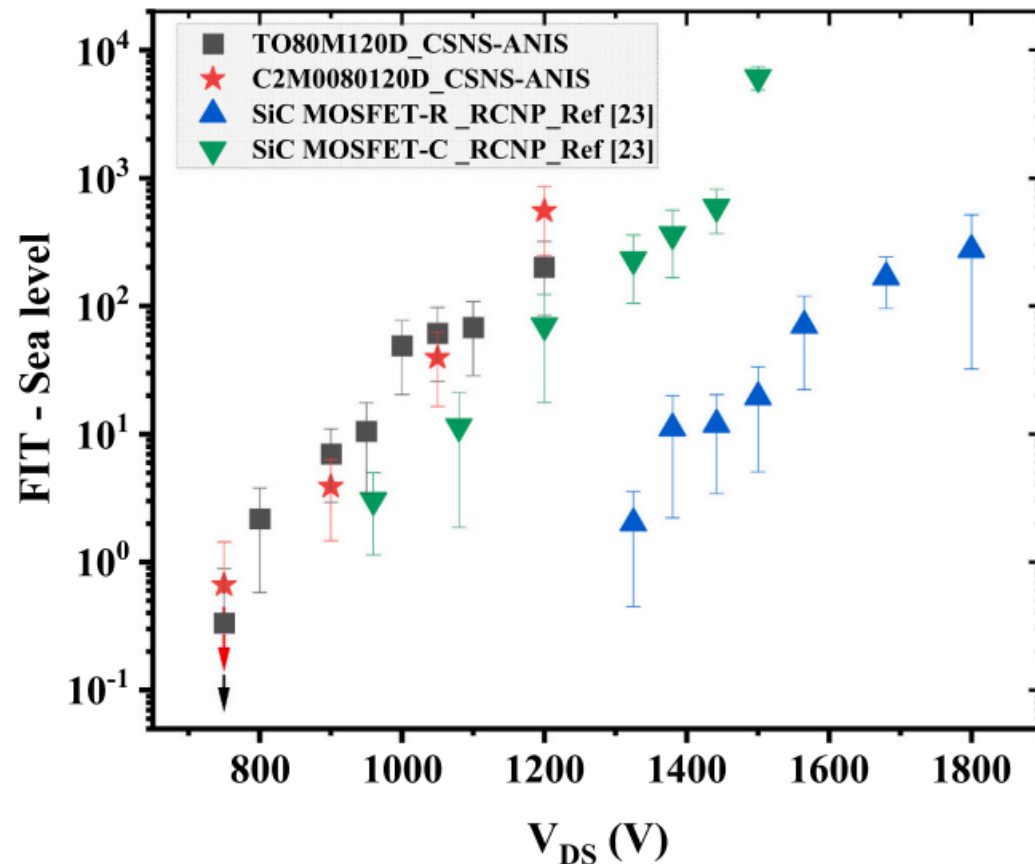
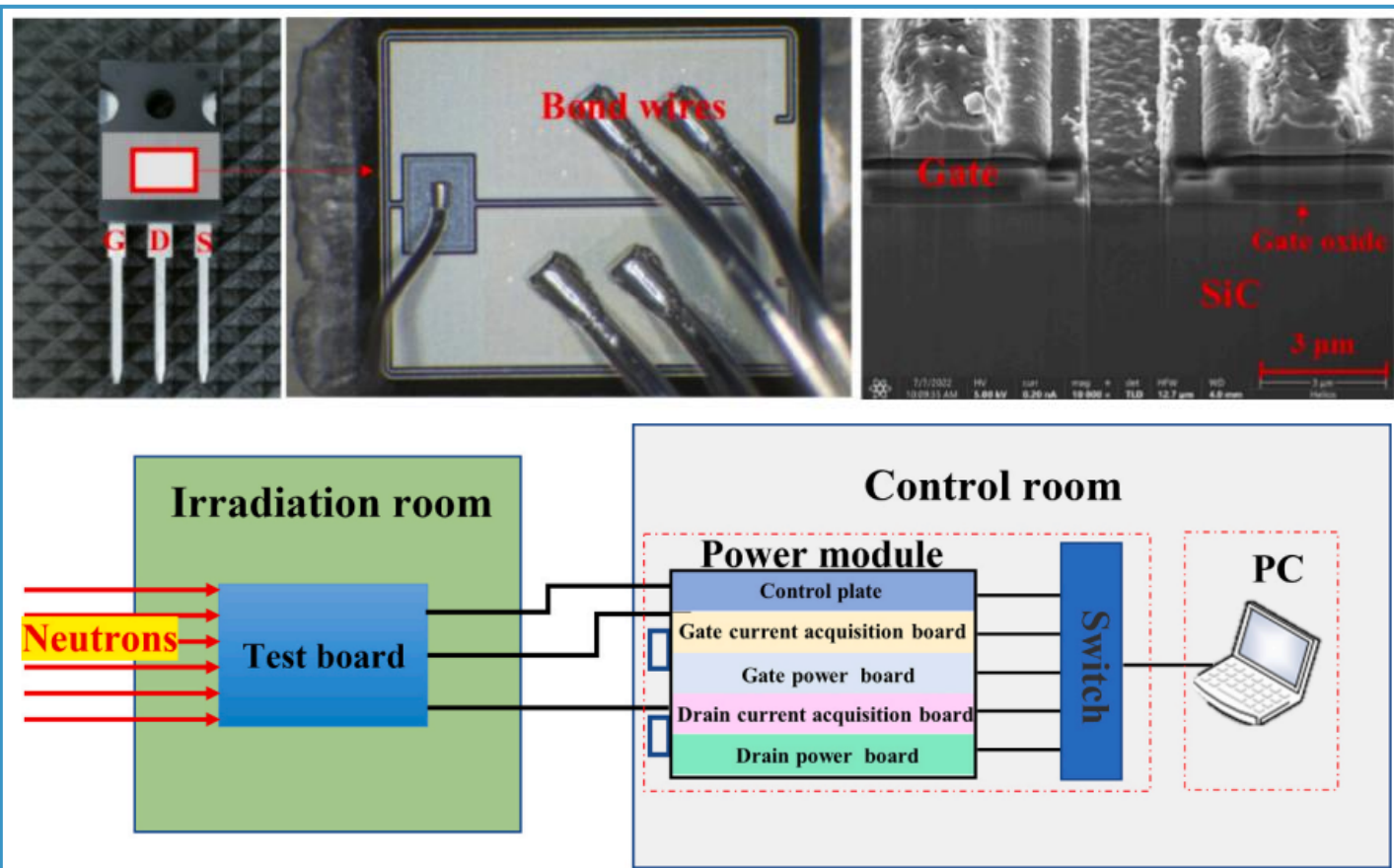
[1]陈启明,鲍杰,马旭,等.用于单粒子效应辐照实验的CYCIAE-100白光中子源研究[J].原子能科学技术,2023,57(12):2281-2287.



➤ 高能中子、热中子以及Alpha对不同工艺节点的FinFET诱发的SER贡献度

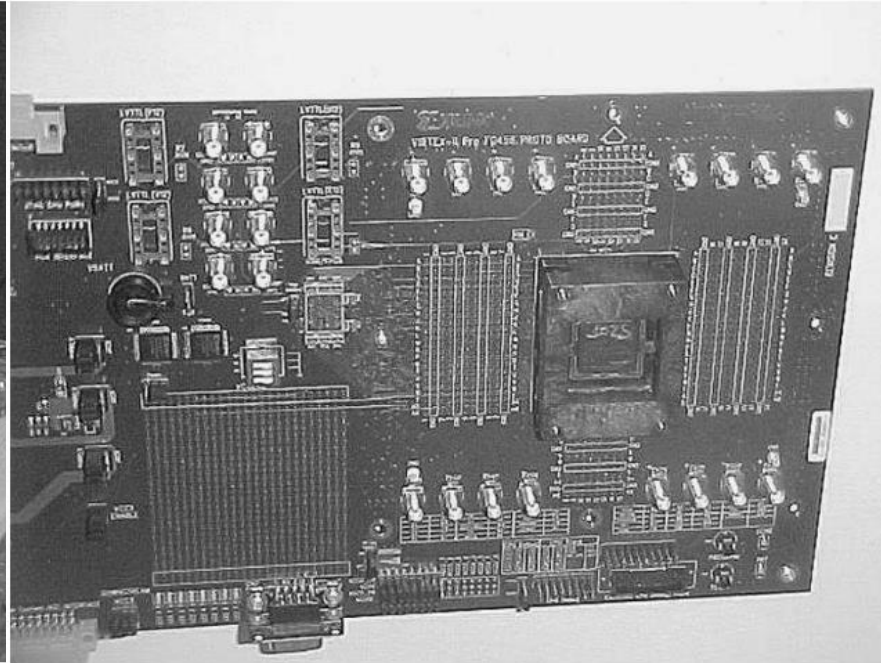
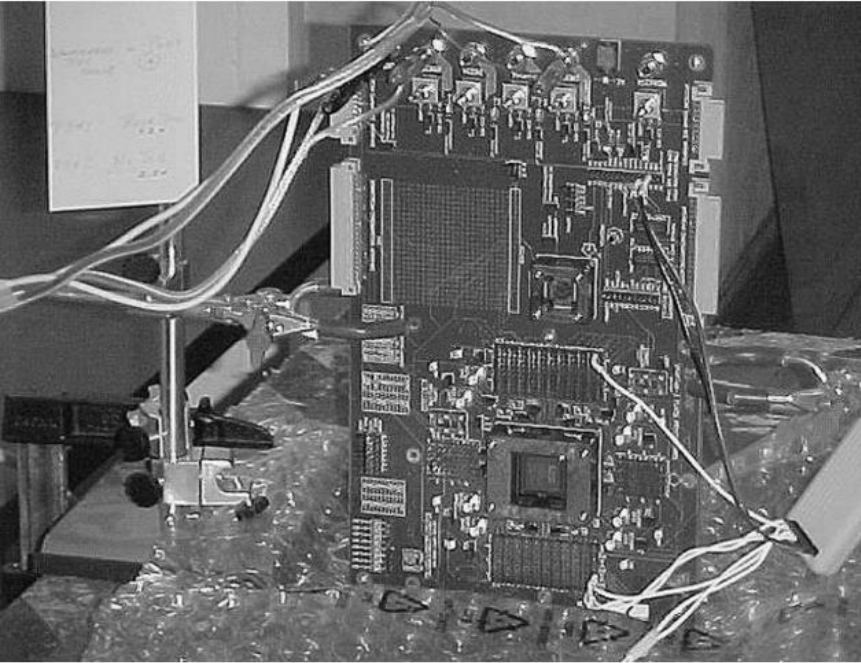
- 根据 JESD89A 标准，**高能中子**指能量大于 10 MeV 的中子，其通过与 Si 原子发生弹性或非弹性碰撞，形成 Si 反冲核和二次离子。中子的能量越高，二次离子的种类越丰富，将产生更多高原子序数的离子。部分离子在 Si 中具有很高的 LET 值，电离能力更强，更容易发生 SEU。但是，这些二次离子占比极小，对 SER 的贡献有限。因此，引发 SEE 的主要离子为原子序数较低但含量丰富的 H、He 等二次离子。正是高能中子的高能量，使其二次离子具有极强的电离能力。因此，高能中子在大气环境中对集成电路 SER 的贡献具有绝对优势。
- **热中子**集中在能量低于 0.4 eV 的热中子峰。B 是集成电路制造中的重要元素，p 型半导体通常掺杂 B 作为受主。为，器件对热中子的敏感性与工艺环节密切相关，而与工艺尺寸关系不大。在过去，集成电路工艺流程中的 BPSG 技术被认为是 B 的主要来源。

[1]余淇睿,张战刚,李斌,等.大气中子及 α 粒子对芯片软错误的贡献趋势[J].电子与封装,2023,23(08):74-80.DOI:10.16257/j.cnki.1681-1070.2023.0103.



[1]Lihua Mo, Single event burnout of SiC MOSFET induced by atmospheric neutrons, Microelectronics Reliability, Volume 146, 2023

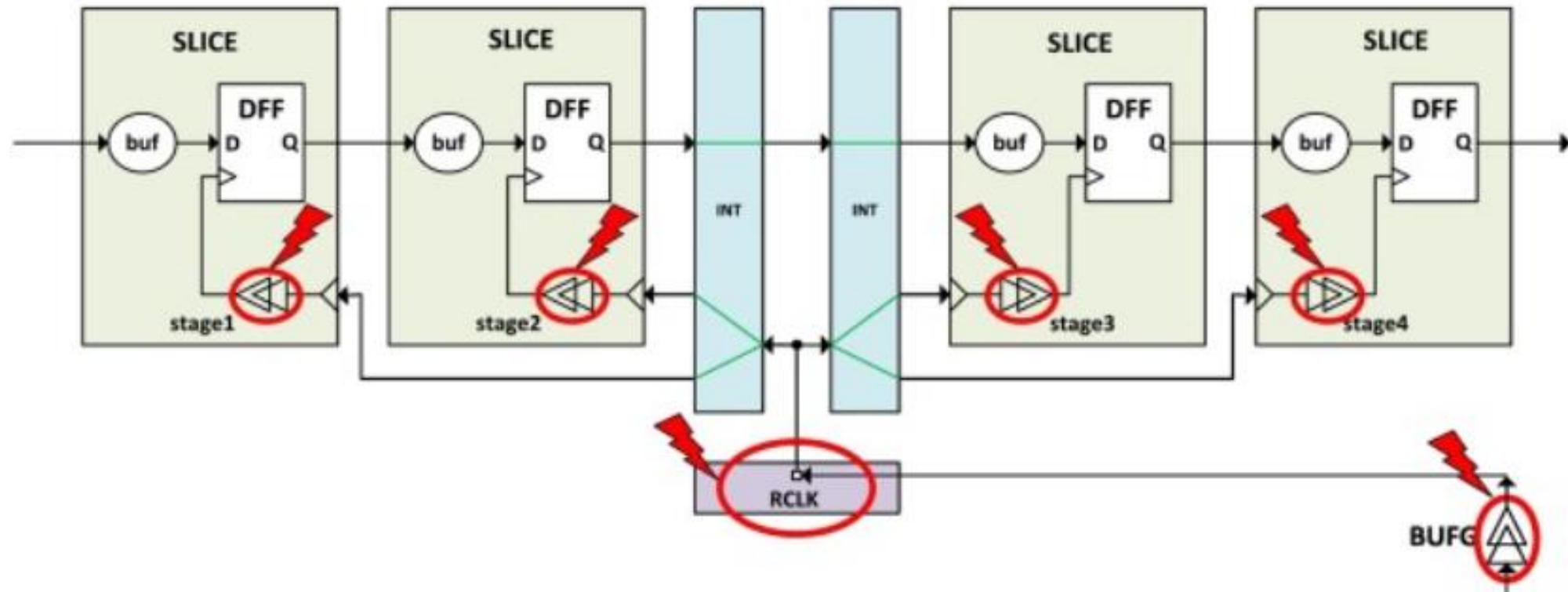
➤ 不同工艺尺寸FPGA在大气中子中单粒子效应研究



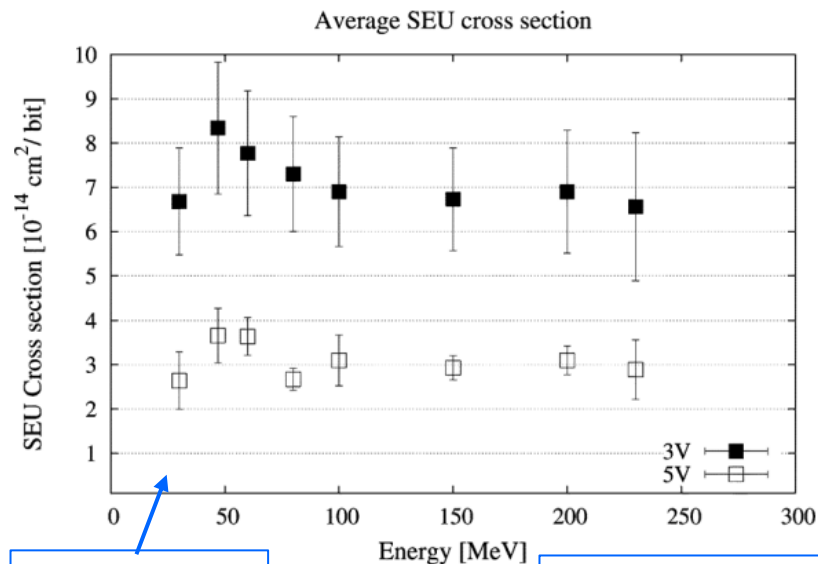
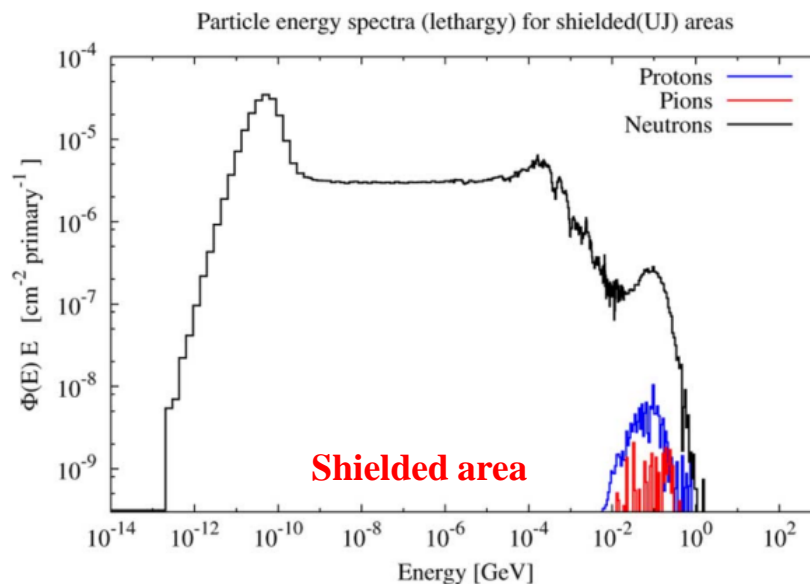
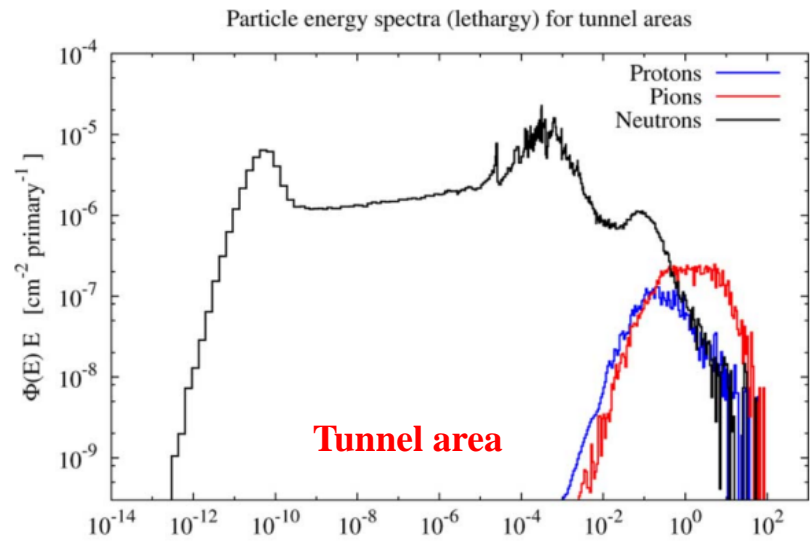
Technology	Cross Section >1.5 MeV	Cross Section >10 MeV
150 nm	1.65e-14	3.18e-14
130 nm	1.54e-14	2.98e-14
90 nm (Spartan 3)	1.49e-14	2.87e-14

[1] A. Lesea, S. Drimer, J. J. Fabula, C. Carmichael and P. Alfke, "The rosetta experiment: atmospheric soft error rate testing in differing technology FPGAs," in *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 5, no. 3, pp. 317-328, Sept. 2005

- FPGA等系统级单粒子效应测试成为研究热点，动态单粒子效应测试是研究关键



[1] Jian Yu, Chang Cai, Bingxu Ning, Shuai Gao, Tianqi Liu, Liewei Xu, Mingjie Shen, Jun Yu, Design and verification of multiple SEU mitigated circuits on SRAM-based FPGA system, Microelectronics Reliability, Volume 126, 2021.



Proton at PSI

Neutron at PTB

Bias	SEU cross section, σ_{SEU} (\pm Err) [cm ² / bit]		
	5.7 MeV	8.5 MeV	14.8 MeV
3 V	$1.7 \cdot 10^{-14}$ (0.2)	$4.1 \cdot 10^{-14}$ (0.2)	$1.0 \cdot 10^{-13}$ (0.1)
5 V	$5.2 \cdot 10^{-15}$ (0.7)	$1.4 \cdot 10^{-14}$ (0.1)	$3.9 \cdot 10^{-14}$ (0.4)

Bias	SEU cross section, σ_{SEU} (\pm Err) [cm ² / bit]		
	5.7 MeV	8.5 MeV	14.8 MeV
3 V	$1.5 \cdot 10^{-14}$ (0.2)	$3.0 \cdot 10^{-14}$ (0.1)	$8.0 \cdot 10^{-14}$ (0.5)
5 V	$5.3 \cdot 10^{-15}$ (0.9)	$1.0 \cdot 10^{-14}$ (0.1)	$2.8 \cdot 10^{-14}$ (0.3)

- 混合辐射场单粒子效应实验
- 混合辐射场粒子成分确认

[1] K. Roed et al., "Method for Measuring Mixed Field Radiation Levels Relevant for SEEs at the LHC," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 59, no. 4, pp. 1040-1047, Aug. 2012, doi: 10.1109/TNS.2012.2183677.

建立单粒子效应对飞行器内部半导体器件的影响的系统性评估方案

随着国内大飞机及相关高端电子产业的发展，国内的在此方面的研究也越来越重视。

单粒子效应还会对自动驾驶汽车，高原地区的输电网的自动化控制系统以及大型太阳能发电设备等，需要拓宽研究广度。



请各位老师批评指正

