

Physiology and biochemistry of the eye

The cornea

cornea เป็นเนื้อเยื่อที่ใส ประกอบด้วย corneal stroma เป็นส่วนใหญ่ในบริเวณตรงกลาง ด้านหน้ามี stratified squamous epithelium ซ้อนกัน ๕-๖ ชั้น ส่วนด้านหลังมี endothelium ชั้นเดียววางอยู่ epithelium ทางด้านหน้านั้น สามารถแบ่งตัวมาแทนที่ cell ที่อยู่ด้านบนได้ตลอดชีวิต โดยจะใช้เวลาประมาณ ๘ วัน จากที่เริ่มแบ่งตัวไปจนหลุดลอกออก ส่วน endothelium นั้น ไม่สามารถแบ่งตัวได้อีก จึงมีจำนวนลดลงตามอายุ

เนื่องจาก cornea ไม่มี vessel มาเลี้ยง จึงต้องใช้ Oxygen จากบรรยากาศเป็นส่วนใหญ่ ส่วน metabolic material และ oxygen ที่เหลือมาจากการ diffusion จากเส้นเลือดรอบๆ ตัวมันเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาหลับตานานๆ หรือนอนหลับ ส่วนนี้จะเป็นส่วนสำคัญที่สุด

cornea ขอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง ๓๖๕-๒๕๐๐ nm. ผ่านได้ โดยเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง ๕๐๐-๑๒๐๐ nm จะผ่านได้ทั้งหมด (100% transmission) คุณสมบัตินี้ทำให้ cornea มีความใส ซึ่งเป็นผลมาจาก ๑) ลักษณะทางกายวิภาค ซึ่งไม่มี blood vessel และ pigment รวมทั้งการเรียงตัวที่เป็นระเบียบของ cell ต่างๆ และที่สำคัญคือ การเรียงตัวของ collagen fiber ใน stroma ที่เป็นระเบียบและมีระยะห่างที่เท่ากัน ๒) ภาวะ relative dehydration ของ corneal stroma ซึ่งเป็นผลจากการที่มี epithelial tight junction ร่วมกับการทำงานของ endothelium ในการคั้นน้ำเข้าสู่ aqueous humor ดังนั้นถ้ามีการสูญเสียของ endothelium ก็จะทำให้มี corneal edema ได้ โดยเฉพาะหลังผ่าตัดต่อกระจก ที่เรียกว่า bullous keratopathy

metabolism ของ cornea อาศัย glucose จาก aqueous humor และ oxygen จากบรรยากาศ โดยที่ epithelium เป็นส่วนที่มี metabolism สูงสุด หลังจาก que glucose เปลี่ยนเป็น glucose-6 phosphate แล้ว จะถูกนำไปใช้ผ่าน pathway ดังต่อไปนี้ ๑) Glycolysis ซึ่งไม่ต้องการ oxygen ทำให้ได้ pyruvate และในกรณีที่ไม่มี oxygen ก็จะเปลี่ยนไปเป็น lactic acid เข้าสู่ precorneal tear ๒) ถ้ามี oxygen pyruvate จะเปลี่ยนเป็น acetylcoenzyme A แล้วเข้าสู่ Klebs cycle ต่อไป ๓) จาก glucose-6-phosphate ผ่าน pentose phosphate shunt เพื่อนำไปสร้าง nucleic acid ที่จำเป็นในการแบ่งตัวของ epithelium ต่อไป

Tear

ส่วนหน้าของลูกตาจะถูกอาบด้วย น้ำตา ซึ่งหลั่งมาจาก accessory lacrimal gland ได้แก่ Gland of Krause (๖๗%) และ gland of Wolfring (๓๓%) ส่วนตัว lacrimal gland เอง ส่วนใหญ่จะหลั่งน้ำตาต่อเมื่อมีการกระตุ้น ได้แก่ สภาพทางจิตใจ หรือ การกระตุ้นที่ trigeminal nerve จาก injury หรือ disease ที่เรียกว่า reflex tear

การกะพริบตาจะช่วยทำให้น้ำตาแผ่ออกไปคลุมบนลูกตาทั่วถึงกัน และมีส่วนสำคัญในการไหลของน้ำตาเข้าสู่ ทางเดิน น้ำตาต่อไป โดยทั่วไปคนเราจะกะพริบตาประมาณ.....ครั้ง/นาที แต่ถ้าตั้งใจทำอะไร อัตรานี้จะลดลงได้ โดยเฉพาะเวลา อ่านหนังสือ อาจทำให้รู้สึกเคืองตา ตาแห้งง่ายกว่าปกติได้

เนื่องจากมี epithelium membrane คลุมอยู่ ผิวหน้าของลูกตาจึงมีคุณสมบัติ hydrophobic ทำให้น้ำตาไม่สามารถเกาะติด ได้ จึงต้องมี mucous มาเคลือบไว้อีกที mucous นี้ สร้างจาก goblet cell ที่ conjunctiva และจาก lacrimal gland ส่วนด้านหน้า จะมี lipid layer บางๆ ลอยอยู่เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำตา lipid นี้ สร้างมาจาก Meibomian gland, gland of Zeis และ gland of Moll

ในส่วนที่เป็น aqueous จะมีส่วนประกอบ ๘๘% มี sodium และ bicarbonate ใกล้เคียงกับใน plasma และมี potassium และ chloride มากกว่าใน plasma ส่วน glucose จะน้อยกว่าใน plasma มาก นอกจากนี้ยังมี protein โดยเฉพาะอย่างยิ่ง immunoglobulin A และ anti-inflammatory factor ต่างๆ

IgA สร้างมาจาก plasma cell ใน main และ accessory lacrimal gland มีหน้าที่ในการ neutralize virus และป้องกันการ เกาะของ bacteria กับ conjunctival surface ส่วน IgG จะผ่านมาจาก conjunctival vessel เพื่อกระตุ้นให้มี phagocytosis และ complement-mediated bacterial lysis ทั้ง ๒ ตัวนี้จะเพิ่มขึ้นในกรณีที่มี inflammation ส่วน IgE จะเพิ่มขึ้นในกรณี allergy

lactoferrin ที่มีอยู่ในน้ำตา ช่วยในการ chelate irons ทำให้ bacteria ขาด iron มีผล bactericidal ต่อเชื้อ Bacillus subtilis, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis และ Pseudomonas aeruginosa และยังช่วยเสริมการทำงานของ lysosome ซึ่งไปทำลาย bacteria โดยไปสลาย glycoaminoglycan ที่หุ้ม nonpathologic gram+ bacteria

Aqueous Humor

เป็น clear fluid ที่อยู่ใน anterior และ posterior chamber ช่วยทำให้ intraocular pressure คงที่ และตอบสนองต่อความต้องการทาง metabolic ของ corneal endothelium, crystalline lens และ trabecular meshwork ถูกสร้างจาก nonpigment epithelium ของ ciliary body โดยกระบวนการ active transport และ diffusional exchange และเนื่องจากมี blood aqueous barrier ทำให้ large molecular weight protein และ blood cell ไม่สามารถผ่านเข้ามาได้

aqueous humor จะผ่านจาก posterior chamber ทาง pupil แล้วเข้ามาใน anterior chamber หลังจากนั้นส่วนใหญ่จะผ่าน trabecular meshwork เข้าไปใน Schlemm canal ก่อนจะออกไปยัง deep scleral vascular plexus (conventional pathway) อีกส่วนหนึ่ง ประมาณ ๒๐% จะผ่านไปทาง ciliary muscle space เข้าไปใน suprachoroidal space (uveoscleral pathway)

บริเวณ nonpigment epithelium ของ ciliary body ส่วนที่เป็นรอยหยักมากๆ (par plicata) จะมี secretion ของ sodium, chloride และ bicarbonate โดย osmotic pressure ของสารเหล่านี้จะดึงเอาน้ำตามออกมาด้วย sodium จะมีการแลกเปลี่ยนกับ potassium ผ่าน Na,K-ATPase ส่วน bicarbonate จะผ่านทาง carbonic anhydrase type II นอกจากนี้ยังมีกระบวนการ active transport ของ sugar, ascorbic acid และ amino acid บางตัว ทำให้พบว่า aqueous concentration ของ ascorbic acid สูงกว่าในเลือดถึง 10-50 เท่า

เนื่องจากการมี tight junction ของ nonpigment epithelium ร่วมกับ junction ของ iris tissue และ iris blood vessel ทำให้เกิดเป็น blood aqueous barrier ที่ยอมให้ lipid-soluble substance เช่น oxygen และ carbon dioxide ผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้ sodium, larger water-soluble ions, protein และ large/medium size molecule อื่นๆ ผ่าน

ในคนเรา อัตราการสร้างของ aqueous humor อยู่ที่ประมาณ 2-3 $\mu\text{L}/\text{min}$ การให้ยาในกลุ่มที่เป็น Beta-adrenergic antagonist จะทำให้อัตรานี้ลดลง 17-47% ส่วนการให้ยาที่เป็น carbonic anhydrase inhibitor จะลดลงประมาณ 40%

Intraocular pressure

เพื่อให้ลูกตาคงสภาพอยู่ได้ความดันภายในลูกตาต้องมากกว่า ความดันของบรรยากาศที่อยู่รอบๆ ความดันลูกตาปกติจะอยู่ที่ประมาณ 10-20 mmHg และอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ 2-3 mm Hg ตามการเต้นของหัวใจ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ intravascular vessel และภายในวันหนึ่งๆ ความดันลูกตาอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ประมาณ 2-5 mm Hg การที่ความดันลูกตาคงที่อยู่ได้เป็นผลจากปัจจัย 3 อย่าง คือ 1) aqueous production 2) drainage of aqueous through trabecular meshwork 3) episcleral venous pressure

เราสามารถวัดความดันลูกตาโดยตรงได้โดยการใส่เครื่องมือเข้าไปใน anterior chamber แต่ไม่เหมาะสมกับชีวิตจริง จึงใช้วิธีวัดจากภายนอก โดยอาศัยหลักการ 2 อย่าง คือ 1) applanation tonometry เพื่อหาแรงที่สามารถกดให้ cornea พื้นที่ขนาดหนึ่งราบลงได้และไปคิดหาค่า ความดันจากสมการ $P=F/A$ เครื่องมือที่ใช้หลักการนี้ได้แก่ Goldmann tonometry 2) indentation tonometry เพื่อหาว่าแรงขนาดหนึ่งสามารถกด cornea ให้ลึกลงไปได้เท่าไร แล้วนำไปเทียบกับตารางที่หามาแล้วว่าความดันควรเป็นเท่าไร ซึ่งอาจมีค่าแตกต่างกันไปตามความแข็งของ cornea (corneal rigidity) ในแต่ละคน เครื่องมือที่ใช้หลักการนี้ได้แก่ Schiøtz tonometry

The lens

lens อยู่ภายใน basement membrane ที่เรียกว่า lens capsule โดยทางด้านหน้าจะมี lens epithelium มาเรียงตัวอยู่ 1 ชั้น ส่วนด้านหลังจะไม่มี epithelium cell โดยที่ lens epithelium จะเริ่มมาจากทาง anterior subcapsular ที่ใกล้กับ lens equator และมีการสร้าง lens fibrils ตลอดช่วงอายุ ทำให้ lens fibril เหล่านี้จะเรียงตัวกันเหมือนกับหอมหัวใหญ่ (onion layer) ส่วนที่สร้างใหม่ก็จะอยู่ด้านนอกออกไปเรื่อยๆ lens จึงมีขนาดกว้างขึ้นเรื่อยๆ

lens จะถูกยึดติดกับ ciliary body โดย lens zonule เมื่อมี contraction ของ ciliary muscle ก็จะทำให้ มีแรงดึงมาที่ lens และทำให้ความโค้งของ lens มากขึ้นจึงมี refractive power มากขึ้น ช่วยทำให้ focus สิ่งที่อยู่ใกล้ได้ หรือที่เรียกว่า accommodation ซึ่งทำให้เราสามารถมองเห็นชัดได้ทั้งที่ไกล และใกล้ แต่ในการมองใกล้ นั้น นอกจากจะต้อง accommodate แล้วตาทั้ง 2 ข้างยังต้องมีการมองเข้าใน (convergence) เพื่อไม่ให้เห็นภาพซ้อน ขณะเดียวกันก็จะมี การหดตัวของ pupil (miosis) รวมเรียกว่า near reflex อย่างไรก็ตาม accommodation ของเราจะลดลงไปเรื่อยๆตามอายุ จนอายุประมาณ 40 ปี จะมีค่าเหลือประมาณ 4-8 D ทำให้ถ้าอ่านหนังสือ ที่ระยะ 33 cm จะต้องออกแรงเพื่อ accommodation 3D ซึ่งจะประมาณครึ่งหนึ่งของแรงที่มีอยู่ ทำให้เราปวดตา หรือ มัวลงได้ เรียกภาวะนี้ว่า presbyopia เราจึงจำเป็นต้องใช้แว่นเลนส์นูนช่วยเล็กน้อย เพื่อไม่ให้ต้องออกแรงที่มีอยู่จนเกินกำลัง โดยทั่วไปเราจะอ่านหนังสือได้ดี ถ้าออกแรง accommodation ไม่เกินครึ่งหนึ่งของที่มีอยู่ แรง accommodation นี้ ส่วนใหญ่จะหมดไปเมื่ออายุประมาณ 60 ปี

lens จะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่น 400-1400 นาโนเมตร ได้ประมาณ 80% และจะมี refractive index ใน ส่วนกลางๆมากกว่า ส่วนที่อยู่นอกออกมา เมื่ออายุมาก nucleous อาจมี refractive index มากขึ้นได้ ทำให้อาจเกิดเป็นสายตาสั้น (myopic shift)

lens มีส่วนประกอบที่เป็น protein ถึง 33% ซึ่งมากกว่าเนื้อเยื่อทั่วไปถึง 2 เท่า lens protein นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ water soluble และ water insoluble ที่เป็น water soluble พบได้ประมาณ 80% ในจำนวนนี้ส่วนใหญ่ เป็น intracellular protein ที่อยู่ใน epithelium และ lens fiber cell ที่เรียกว่า crystallins ซึ่งยังแบ่งออกได้เป็นอีก 3 กลุ่ม คือ alpha, beta และ gamma แต่จากหลักฐานในระยะหลัง เชื่อว่า beta และ gamma น่าจะเป็นกลุ่มเดียวกัน รวมเรียกว่า betagamma crystallins ส่วน water insoluble แบ่งได้เป็น urea soluble และ urea insoluble รวมแล้วพบได้ประมาณ 20% แต่จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดเป็น nuclear sclerosis จะพบ urea insoluble ได้มากขึ้น

metabolism ของ lens จะพบว่า glucose ที่เข้าไปใน lens จะถูกเปลี่ยนเป็น Glucose-6-phosphate โดย enzyme hexokinase ซึ่งมีจำนวนจำกัด ถ้าระดับ น้ำตาลมากเกินไป น้ำตาลใน lens ยังคงที่อยู่จนเมื่อระดับน้ำตาลเกิน 175 mg/ml การควบคุมนี้จะเสียไป น้ำตาลส่วนเกินที่อยู่ในรูป aldehyde ก็จะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลในรูป alcohol โดย enzyme aldose reductase และจะไม่สามารถออกจาก lens capsule ได้ ทำให้มีการคั่งน้ำเข้ามาใน lens และเกิด cataract ตามมาได้

ในภาวะปกติ glucose-6-phosphate จะถูกนำไปใช้ต่อได้ 2 เส้นทาง ส่วนใหญ่เกือบ 85% จะผ่าน anaerobic glycolysis ซึ่งจะนำไปสู่ pyruvate และ lactate ในที่สุด ที่เหลืออีกประมาณ 15% จะผ่าน aerobic pathway (Pentose phosphate or Hexose

monophosphate shunt) เกิด ribose-5-phosphate (ซึ่งนำไปใช้ในการสร้าง nucleic acidต่อไป) และ carbon dioxide นอกจากนี้ยังทำให้เกิด NADPH ซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของ glutathione reductase, aldose reductase และ hexokinase

ในกรณีที่ lens บวมขึ้น ทำให้สูญเสียความใสไป เราเรียกว่าต้อกระจก (cataract) โดยอาจจำแนกตามบริเวณที่เป็น เช่น ถ้าเป็นบริเวณตรงกลางของ lens (nucleous) มักจะทำให้ lens มีสีที่เปลี่ยนไป เป็นสีเหลืองจนถึงน้ำตาลเข้ม (brunescent cataract) เราจะเรียกว่า nuclear sclerosis พบว่าในกรณีนี้ ภายใน lens จะมี sodium เพิ่มขึ้น water soluble protein ลดลง และ water insoluble protein มากขึ้น ระดับ glutathione จะต่ำลง และมี oxidation ของ methionine และ cysteine ทำให้เกิด membrane-bound, high molecular weight disulfide-linked aggregate และมีการทำลายของ membrane ในที่สุด ส่วนถ้าเกิดบริเวณ รอบนอก nucleous ออกมา เราจะเรียกว่า cortical cataract จะพบว่า crystallins จะจับกันเป็น high molecular weight protein และจะมีน้ำไปแทรกใน lens fiber การทำงานของ ionic magnesium และ Na, K-ATPase จะลดลง

The retina

เนื่องจาก retina พัฒนามาจาก optic cup ซึ่งประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 2 ชั้นทับกัน เนื้อเยื่อนี้ ส่วนด้านนอกพัฒนาต่อมาเป็น retinal pigment epithelium ส่วนด้านใน ระยะเวลาแรกจะมีเพียง cell ชั้นเดียวแล้วจะพัฒนาจนมาเป็น retina ที่มี cell หลายชนิดเรียงกันเป็นชั้นๆ ดังนั้นจึงมีช่องว่างระหว่าง retinal pigment epithelium และ retina อยู่แล้วโดยธรรมชาติ แต่ในคนทั่วไป ช่องว่างนี้จะมีการเชื่อมต่อกัน ทำให้เป็น potential space ในกรณีที่ชั้นทั้ง 2 ชั้นนี้ แยก ออกจากกันเรียกว่า retinal detachment

blood supply ของ retina แยกเป็น 2 ระบบ คือ retinal circulation และ choroidal circulation ในส่วน inner retina (ตั้งแต่ outer plexiform layer เข้าไป) จะถูกเลี้ยงโดย retinal artery ส่วน outer retina จะถูกเลี้ยงโดย choroidal circulation ผ่าน retinal pigment epithelium พบว่า ถ้าเทียบกันตามปริมาตร blood supply ของ retina จะมีปริมาณมากกว่าของ tissue อื่นๆ มาก เนื่องจากมี metabolism ที่สูง แม้ในเวลาอนหลับก็ตาม นอกจากนี้ในส่วนนี้จะมี blood retinal barrier ซึ่งเป็นผลมาจาก tight junction ของ retinal vessel และ retinal pigment epithelium

photoreceptor ของเรา แยกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ rod ซึ่งทำหน้าที่ในขณะที่มีแสงน้อย (scotopic vision) โดยจะทำให้เห็นได้แค่เลือนราง และ cone ซึ่งทำหน้าที่ในขณะที่มีแสงปานกลางหรือมาก (photopic vision) โดยจะทำให้เห็นได้ชัดเจน และช่วยในการมองเห็นสี (color vision) ใน retina ของคนเรา จะมี rod ประมาณ 100-120 ล้าน cell และมี cone เพียงแค่ 6 ล้าน cell cone จะอยู่กันหนาแน่นในบริเวณ macular โดยเฉพาะที่ fovea จะมี cone อยู่กันหนาแน่นที่สุด ประมาณ 200,000 cones/sq mm และไม่มี rod เลย ส่วน rod จะพบหนาแน่นมากที่สุดที่ประมาณ 20 องศา จาก fovea

axon ของ photoreceptor จะไป synapse กับ horizontal cell และ bipolar cell ที่ outer plexiform layer โดยที่ horizontal cell จะเชื่อมต่อ photoreceptor (ส่วนใหญ่เป็น rod) เข้าด้วยกัน และ axon ของ bipolar cell จะไป synapse กับ amacrine cell และ ganglion cell ที่ inner plexiform layer หลังจากนั้น axon ของ ganglion cell ที่เรียกว่า nerve fiber จะไปรวมกันที่ optic disc และส่งผ่าน optic nerve ไปยัง lateral geniculate body เพื่อส่งต่อไปยัง สมองต่อไป การเชื่อมต่อกันระหว่าง ganglion cell กับ photoreceptor ต่างกันไปตามหน้าที่ ที่บริเวณ fovea cone ประมาณ 150,000 cell จะส่งต่อไปยัง ganglion cell จำนวน 2 เท่า ส่วนบริเวณ periphery retina พบว่า rod จำนวน 10,000 rod จะส่งต่อไปยัง ganglion cell ตัวเดียว บริเวณที่ กลุ่มของ photoreceptor ที่ส่งสัญญาณไปยัง ganglion cell ตัวเดียวกัน เรียกว่า receptive field ทำให้ แม้มีการกระตุ้นที่ photoreceptor

ตัวหนึ่ง ก็ไม่ต่างจากกระตุ้นที่ photoreceptorตัวอื่นใน receptive field ตัวเดียวกัน ยิ่งถ้า receptive field กว้างขึ้นเท่าไร resolution ในการมองเห็นก็จะยิ่งลดลง ความคมชัดก็จะลดลงด้วย

photoreceptor จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ2ส่วน คือ outer segment และ inner segment outer segment ของทั้ง rod และ cone ประกอบไปด้วยdisc ประมาณ700-1000 discs โดยที่discของ cone จะเป็น plasma membrane ที่พับไปพับมา ส่วนของ rod จะเป็น free disc ที่plasma membrane หลุดเข้าไปใน cell cytoplasmแล้ว ส่วนที่ inner segment ของทั้ง rod และ cone จะมี mitochondria และ intracellular organelles จำนวนมาก เพื่อทำหน้าที่สร้าง outer segment disc ใหม่ๆ

outer segment ของทั้ง rod และ cone จะถูก phagocytosis โดย retinal pigment epithelium ตลอดเวลา จึงต้องมีการสร้างใหม่มาเรื่อยๆโดย inner segment จะพบว่า outer segment ของ rod จะมี turnover rate มากกว่า cone มาก โดย cone disc จะถูกกำจัดไปหลังจากอยู่ในที่มืด พักเดียว และจะมีการสร้างขึ้นใหม่ช่วงที่ยังมีตอยู่ ส่วน rod disc จะตรงกันข้าม

Photochemistry of vision

คนเรา มี photopigment อยู่ 4 ชนิด ได้แก่ rod photopigment ที่เรียกว่าrhodopsin ซึ่งจะรับแสงที่มีความยาวคลื่น 507 nm ได้ดีที่สุด และ cone photopigment อีก3 ชนิดซึ่งจะรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ได้แก่ ที่ 440 nm(blue), 535 nm(green) และ 570 nm(red) โดยที่ protein เหล่านี้จะจับกับ 11 cis-retinal (aldehyde form of vitamin A)

vitamin A ได้มาจาก อาหารที่มี vitaminA และ carotenoid โดยเฉพาะในรูป carotene ซึ่งจะถูกลดเป็น vitamin A โดย enzyme ที่ intestinal mucosa และในตับ หลังจากนั้นจะจับกับ retinol binding protein ในเลือด ที่ retinal pigment epithelium จะมี specific protein receptor มาจับ vitamin A และมีcarrier protein มาส่งต่อไปยัง photoreceptor อีกที

เมื่อแสงถูกจับไว้ โดย photopigment ที่อยู่ใน photoreceptor disc ใน outer segment จะมีการกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงของ enzyme ต่างๆ ในouter segment ทำให้มีการปิดของ sodium channels ระดับของ extracellular sodium ก็จะเพิ่มขึ้น (เกิด hyper polarization) เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้น กระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงของ synaptic vesicle และส่งสัญญาณประสาทต่อไปยังcellต่างๆใน retina ผ่าน nerve fiber ไปยังสมองต่อไป ในขณะที่เดียวกันภายใน cell ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงต่อไป และจะมีผลให้ sodium channel กลับมาเปิดอีกครั้งหนึ่ง และจะกลับมาอยู่ในสภาพ depolarization ใหม่ การเปลี่ยนแปลงโดย enzyme ทั้งหมด จนเกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้านี้ เรียกว่า phototransduction มีผลในการขยายสัญญาณประสาท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ rhodopsin ทำให้ เราสามารถมองเห็นแสงที่มีความสว่างน้อยมากได้ แต่ก็ใช้เวลาในการกลับมาเหมือนเดิมนาน ส่วนในกรณีของ cone phototransduction จะไม่มีการขยายสัญญาณมากนัก จึงกลับมาเหมือนเดิมได้เร็วกว่ากันมาก แต่ก็มีข้อจำกัดในการต้องการแสงที่มากกระตุ้นมากขึ้นด้วยเช่นกัน

photoreceptor ของเรารับ ได้เฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่น 400- 770 nm และความสามารถนี้จะเปลี่ยนไปตามความสว่างของแสง ในที่ซึ่งมีแสงสว่างมากพอ (photopic vision) cone จะทำงานเป็นหลัก และจะมี maximum sensitivity ต่อแสงที่มีความยาวคลื่น 555 nm ในขณะที่ในที่มืด (scotopic vision) rod จะทำงานเป็นหลักและจะมี maximum sensitivity ต่อแสงที่มีความยาวคลื่น 507 nm และจะมองเห็นเป็นแค่สีขาวดำ จนเมื่อสว่างมากขึ้นจึงจะเริ่มมองเห็นเป็นสี

เมื่อเราเข้าในที่มืด จะทำให้เราค่อยๆมีความไวต่อแสงมากขึ้น เรียกว่า dark adaptation โดยในขณะที่เราอยู่ในที่สว่างมากๆ จะมีbleaching ของ photopigment ทำให้ cone ทำงานอยู่อย่างเดียวเพราะ cone phototransduction กลับคืนได้เร็วกว่ามาก

เมื่อเข้าที่มี rod ยังทำงานไม่ได้ แต่ cone ยังทำงานอยู่ได้ แม้จะยังไม่ดีที่สุด กระจกนี้จึงมีความไวต่อแสงมากขึ้น (มองเห็นแสงที่มีความสว่างน้อยลง) ทีละน้อย จนประมาณ 5-9 นาที cone ก็จะกลับมาทำงานได้เต็มที่ ความไวต่อแสงก็จะคงที่อยู่ที่ (rod-cone transition time) โดยจะมองเห็นแสงที่มีความสว่างประมาณ 1/100 เท่า จากช่วงแรก หลังจากนั้น rod จะเริ่มกลับมาทำงานได้ แม้จะยังไม่เต็มที่ก็ตาม ความไวต่อแสงก็จะค่อยๆ ดีขึ้นอีก จนคงที่ที่ความสว่างประมาณ 1/1000 เท่าของ rod-cone transition time

extraocular muscle

ลูกตาแต่ละข้างจะมี กล้ามเนื้อตาอยู่ทั้งหมด 6 มัด แต่ละมัดจะทำหน้าที่ต่างกันไป เวลาที่เรามองตรง ลูกตาจะอยู่ตรงกลาง เรียกว่า primary position ถ้าขยับไปในทิศทาง บน ล่าง เข้าใน ออกนอก จะเรียกว่า secondary position และถ้าไปในแนวเฉียง จะเรียกว่า tertiary position

medial rectus และ lateral rectus เป็นกล้ามเนื้อตาที่แต่ละมัดทำหน้าที่อย่างเดี่ยว คือ มองเข้า (adduction) และมองออก (abduction) ตามลำดับ กล้ามเนื้อตาที่เหลือจะทำหน้าที่ได้ 3 อย่าง แล้วแต่ว่ามันวางตัวอยู่ในลักษณะใด ใน primary position

superior rectus ทำหน้าที่ adduction, elevation และ intorsion

superior oblique ทำหน้าที่ abduction, depression และ intorsion

inferior rectus ทำหน้าที่ adduction, depression และ extorsion

inferior oblique ทำหน้าที่ abduction, elevation และ extorsion

จะเห็นว่าในการทำหน้าที่แต่ละอย่างอาจมีกล้ามเนื้อตาหลายมัดช่วยกันทำหน้าที่ ทำให้เราแยกได้ยากว่า ถ้าตามองไปในทิศทางใดไม่ได้ เกิดจากความผิดปกติของกล้ามเนื้อใด จึงต้องมีวิธีในการช่วยให้ลดการทำงานของกล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่เหมือนกัน โดยการให้มองเข้าใน หรือออกข้างนอก แล้วจึงมองขึ้นลงอีกที กล้ามเนื้อที่วางตัวตั้งฉากกับทิศทางการมองก็จะทำงานไม่ได้หรือทำได้ลดลง เราจึงตรวจได้ว่ากล้ามเนื้อที่วางตัวขนานกับทิศทางของการมองนั้น ทำงานได้มากน้อยเพียงใด ดังนั้นในการตรวจการทำงานของกล้ามเนื้อตาแต่ละมัด เราจึงใช้ต้องตรวจให้ครบ 6 cardinal position ดังนี้

ตรวจ medial rectus ให้มอง adduction

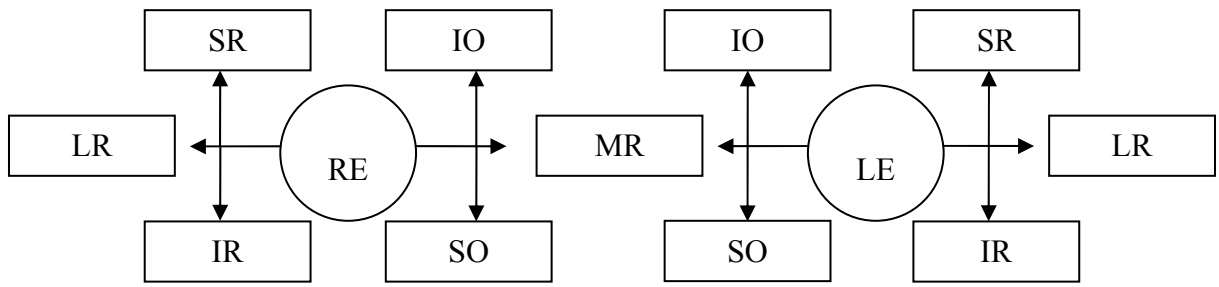
ตรวจ lateral rectus ให้มอง abduction

ตรวจ superior rectus ให้มอง abduction แล้ว elevation

ตรวจ inferior rectus ให้มอง abduction แล้ว depression

ตรวจ superior oblique ให้มอง adduction แล้ว depression

ตรวจ inferior oblique ให้มอง adduction แล้ว elevation



duction คือการที่ตาข้างหนึ่งกลอกไปในทิศทางใด กล้ามเนื้อตาในตาข้างนั้นที่มีส่วนในการกลอกตาไปในทิศทางนั้นเรียกว่า synergists ยกตัวอย่างเช่น ในท่ามองเข้าไปใน medial rectus ทำงานร่วมกับ superior rectus และ inferior rectus จึงเป็น synergist ของ medial rectus หรือในท่ามองขึ้น superior rectus เป็น synergist กับ inferior oblique ในขณะเดียวกัน ก็จะมี กล้ามเนื้อที่ทำงานตรงกันข้ามในท่านั้น เรียกว่า antagonist ยกตัวอย่างเช่น ในท่ามองขึ้น superior rectus เป็น antagonist กับ inferior rectus การที่จะกลอกตาไปทางใดได้นั้นต้องมีการกระตุ้นกล้ามเนื้อที่ทำงานหลัก ขณะเดียวกันก็ต้องมีการยับยั้ง กล้ามเนื้อที่เป็น antagonist (เรียกว่า Sherrington's law)

version คือการที่ตาทั้ง 2 ข้างกลอกไปทางใดทางหนึ่งเหมือนกัน ได้แก่ไปทางขวา (dextroversion) ไปทางซ้าย (levoversion) ขึ้นบน (sursumversion) และลงล่าง (deosumversion) กล้ามเนื้อตาของแต่ละข้างที่ทำหน้าที่หลักในการกลอก ตานี้เรียกว่า yoke muscle ยกตัวอย่างเช่น เวลากลอกตาไปทางขวา lateral rectus ของตาขวา และ medial rectus ของตาซ้าย ต้องทำงานพร้อมกัน lateral rectus ของตาขวา และ medial rectus ของตาซ้าย จึงเป็น yoke muscle กันในท่ามองเดียวกันจะ พบว่า superior rectus จะเป็น yoke muscle กับ inferior oblique ที่อยู่อีกตาหนึ่ง และ inferior rectus ก็เป็น yoke muscle กับ superior oblique ที่อยู่อีกตาหนึ่ง การที่ตาทั้ง 2 ข้างนี้จะกลอกไปในทิศทางเดียวกันได้พอดี ต้องมีการกระตุ้น yoke muscle ด้วยแรงที่เท่ากัน (Hering's law)

vergence คือการที่ตาทั้ง 2 ข้างกลอกเข้าใน (convergence) หรือออกนอก (divergence) พร้อมกัน มีไว้เพื่อให้สามารถมอง ภาพที่อยู่ตรงกลางในระยะใกล้ หรือไกลได้ดี ไม่เห็นเป็นภาพซ้อน เช่นเวลาอ่านหนังสือ ตัวหนังสือจะอยู่ใกล้ตาเรา เราจึง ต้องกลอกตาเข้าใน เราสามารถตรวจความสามารถในการ convergence นี้ได้โดยให้ผู้ถูกตรวจมองวัตถุขนาดเล็ก แล้วเลื่อน วัตถุเข้าหาตัว ตาทั้ง 2 ข้างจะกลอกเข้าในเรื่อยๆ จนในที่สุดจะไม่สามารถกลอกเข้าได้ และตาจะหลุดออกไป ระยะที่ตาหลุด ออกไปนี้เรียกว่า near point convergence ซึ่งคนปกติจะไม่เกิน 8 cm ในคนที่ convergence ไม่ดีอาจทำให้มีอาการปวดตาได้ ง่ายเวลาอ่านหนังสือ หรืออาจมองเห็นเป็นภาพซ้อนเวลามองใกล้ได้ โดยทั่วไปมักเกิดในคนที่ไม่ค่อยใช้สายตามองใกล้มาก แต่อาจพบได้ในกรณี midbrain lesion ได้

stereopsis คือการเห็นภาพเป็น 3 มิติเกิดได้จากการที่ตาทั้ง 2 ข้างมองเห็นภาพต่างกันเพียงเล็กน้อยพร้อมกัน มีประโยชน์ ในการให้ข้อมูลสภาพแวดล้อมที่จำเป็นในการทำงานบางอย่าง โดยเฉพาะงานในที่ใกล้ ที่ต้องใช้ตาและมือร่วมกัน อาชีพ บางอย่าง (เช่น นักบิน, microsurgeon) จำเป็นต้องมี stereopsis ที่ดีเพื่อทำงานได้อย่างเที่ยงตรงและปลอดภัย

การที่จะมี stereopsis ได้นั้นต้องมีการมองเห็นพร้อมกันทั้ง 2 ตา (binocular vision) ซึ่งนอกจากจะช่วยในการมองเห็น 3 มิติแล้ว ยังช่วยให้ visual field เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 30 องศา จากที่มองด้วยตาข้างเดียว ช่วยให้มองเห็นชัดขึ้น มี visual acuity ดี ขึ้นประมาณครึ่งแถวของ Snellen chart และช่วยทำให้ contrast sensitivity ดีขึ้นประมาณ 40%

การที่เราจะสามารถรวมภาพที่เกิดขึ้นจากทั้ง2ตาต้องอาศัย primary visual cortex ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ที่ calcarine fissure ภาพที่ตกลงบน retina แต่ละจุด จะส่งต่อไปยัง จุดจำเพาะจุดหนึ่งใน visual cortex โดยมีแบบแผนที่แน่นอนในขณะที่ภาพ จากตาอีกข้าง ก็จะไปที่จุดเดียวกันเดียวได้ จุดที่ retina ในแต่ละตาที่ส่งภาพต่อไปยัง visual cortex จุดเดียวกัน เรียกว่า retinal correspondence นอกจากนี้ในความเป็นจริงแล้วจุดที่บน retina ที่ส่งภาพจากตาทั้ง2 ข้าง ไปยัง visual cortex จุดเดียวกันนี้ เข้า ไปได้กับ receptive field ของ ganglion cell ทำให้เกิดเป็นพื้นที่ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากัน ในบริเวณตรงกลางจะมีขนาดเล็กและกว้าง ขึ้นเมื่อออกไปด้านนอก ทำให้เกิดเป็นพื้นที่ซึ่งเราสามารถมองเห็นภาพเป็นภาพเดียวกันได้ เรียกว่า Panum's area เนื่องจากตา ทั้ง2ข้างของเรา ห่างกันประมาณ 60 cm. ทำให้จุดหนึ่งในตาทั้ง2ข้างมองวัตถุต่างกันได้เล็กน้อย ถ้าภาพที่มากระตุ้นที่จุด เดียวกันนี้ต่างกันไม่มากก็จะสามารถรวมกันและเห็นเป็นภาพเดียวกันได้ แต่ถ้าภาพที่มากระตุ้นนี้ต่างกันมากก็จะทำให้เกิด ภาพซ้อน(diplopia)ได้

เราอาจแบ่ง stereopsis ได้ตามตำแหน่ง ในการมองเห็น ถ้าใช้มองตรงกลางผ่าน fovea ก็จะเรียก central stereopsis ถ้าใช้ ส่วนที่ห่างจาก fovea ไปก็เรียก peripheral stereopsis และในส่วนนี้จะหยาบกว่า หรือเรียกว่า gross stereopsis ส่วนใน central stereopsis นั้นถ้าสามารถแยกความต่างที่น้อยกว่า 200 second of arc ก็จะเรียก fine stereopsis

กลไกการมองเห็น

จะเห็นว่าสิ่งที่เรามองเห็นวัตถุต่างๆ ได้นั้นเป็นผลของการทำงานร่วมกันหลายอย่างประสานกันอย่างดี แต่อาจสรุปได้ ว่าการที่จะมองเห็นได้ชัดนั้นต้องมีปัจจัยอย่างน้อย4อย่างดังนี้

- 1) clear ocular media ซึ่งจะยอมให้แสงที่มองเห็นได้ผ่านเข้าไปในลูกตาได้ ในขณะที่เดียวกันต้องมีส่วนที่เป็น opaque media เพื่อกันไม่ให้แสงที่ไม่ต้องการเข้าไปรบกวน
- 2) refractive status เพื่อปรับให้แสง focus ที่ fovea ได้พอดี โดยทั่วไปถ้ามองไกลคนทั่วไปจะมองเห็นได้ดี ภาพ focus ที่ fovea เรียกว่า emmetropia ถ้า focus หน้า fovea เรียกว่า myopia และถ้า focus หลัง fovea เรียกว่า hyperopia และในขณะที่มองใกล้เข้า ตาก็จะต้อง accommodation เพื่อปรับ focus โดยการเพิ่มความโค้งของ lens ทำให้ lens power มากขึ้น ร่วมกับ มีการเปลี่ยนแปลงคือ miosis และ convergence
- 3) sensory pathway เพื่อรับภาพที่เข้าไปในลูกตาแล้วส่งเป็นสัญญาณประสาทต่อไปยังสมอง โดยเริ่มที่ photoreceptor ซึ่งแยกได้เป็น2 กลุ่ม คือ rod และ cone เพื่อแยกรับแสงในที่มืด และที่สว่าง ส่งผ่าน bipolar cell และ ganglion cell ผ่านเป็น optic nerve ไป lateral geniculate body แล้วผ่าน optic radiation ต่อไปยัง visual cortex ในที่สุด
- 4) higher brain function เพื่อแปลงสัญญาณต่อจนเป็นภาพที่เรามองเห็นได้

ถ้ามีความผิดปกติในกลไกส่วนนี้อันใด ก็จะทำให้การเห็นภาพมัวลงไปได้