دستاورد نیوتن*

ریچارد وستفال*
ترجمهٔ محمدرضا خواجه‌پور

علائق آیزك نیوتن گرچه صرفاً به‌موضوعهای ریاضی منحصر نبود ولی همهٔ دانشها را هم شامل نمی‌شد. اگر چیزی توجهش را به‌خود جلب می‌کرد، او را تمام و کمال به‌خود مشغول می‌داشت و همهٔ چیزهای دیگر کنار نهاده می‌شد. از این‌رو حیات فکری نیوتن درنظر مورخ چون سرگذشتهایی پی درپی است که درهر کدام او خود را وقف موضوعی کرده و در آن به‌استادی مسلم رسیده‌است. به‌هیچ‌وجه نمی‌توان در او به‌چشم انسان جامع عصر رنسانس نگریست. نیوتن با بسیاری از قلمروهای تجربهٔ آدمی ــ مثلاً با بیشتر مظاهر و جلوه‌های هنر ــ بیگانه بود.

حیات فکری نیوتن محدود به آنچه امروزه علم شمرده می‌شود نبود. از دستنوشته‌هایش چنین برمی‌آید که اوقات زیادی را در یك دورهٔ تقریباً سی‌سالهٔ اواسط عمرش، که از لحاظ فکری در اوج توانایی بود، صرف کیمیا کرد. در بهترین سالهای زندگیش، به‌الهیات حتی بیش از کیمیا علاقه‌مند بود. هر چند که در قسمت کلیات پرینکیپیا و در تجسسات ملحق به کتاب اپتیك بحث می‌کند که ساختار طبیعت بر وجود خدا دلالت دارد ولی علاقهٔ او به‌الهیات بر این قبیل مسائل متمرکز نیست، بلکه متوجه آموزه‌های مربوط به تثلیث و الوهیت مسیح است. برفهرست علائق نیوتن باید وظایفش درضرابخانهٔ شاهی را هم افزود؛ چه او با همان تمرکز فکری غرق این وظایف می‌شد که به‌مسائل دیگر می‌پرداخت.

تاریخ، این علاقه‌ها را با همان ترازوی خود نیوتن نسنجیده است. کیمیا، وقتی نیوتن به‌آن روی آورد، حرمت چندانی نزد اهل فکر و اندیشه نداشت. او بعدها از این صناعت کناره گرفت؛ کیمیا از مشغولیات دوران اقامتش در کیمبریج بود که آن را با خود به‌لندن نبرد.

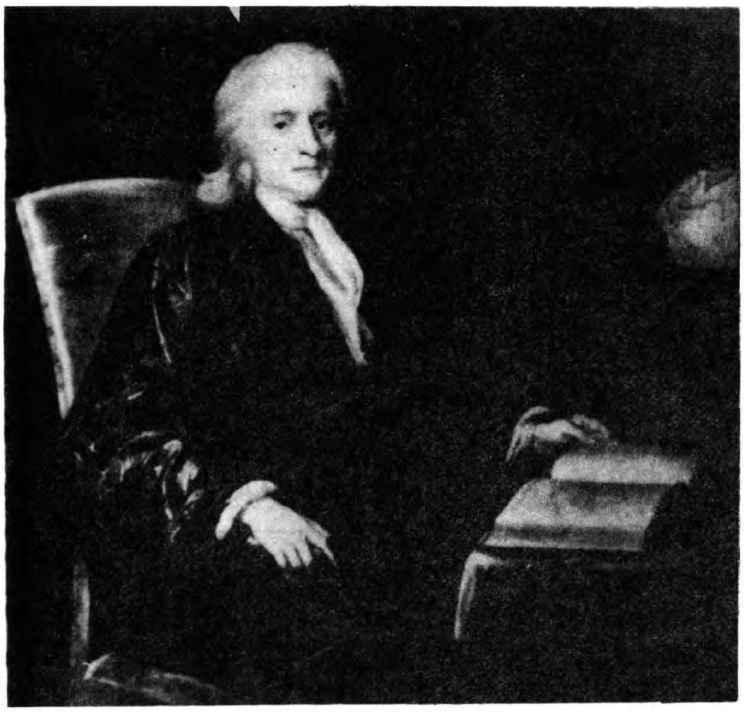
تاریخی که الهیات پشت‌سر نهاده با سرگذشت کیمیا فرق می‌کند ولی امروزه، فاصلهٔ هردو از کانون علائق علمی ما به‌یك اندازه زیاد است. و بالاخره گرچه این روزها حرمت کارمندان برجستهٔ دولت را بسی بیش از جامعهٔ دوران نیوتن پاس می‌داریم ولی سیصدمین سالگرد تولدشان را جشن نمی‌گیریم. این علائق با آنکه بخش بزرگی از زندگی نیوتن را به‌خود اختصاص دادند ولی اثرشان بر ادوار بعدی اندك بوده‌است و ما هم غالباً آنها را نادیده می‌گیریم تا نگاه خود را متوجه دستاوردهایی کنیم که طی سیصدسال بعدی، سهمی عظیم در بنای تمدن مغرب زمین داشته‌اند. ریاضیات، به‌وضوح محور اصلی این دستاوردها بود. تردیدی نیست که جایگاه

ریاضیات در تحقیقات نورشناختی نیوتن ــ که بیشتر به اثبات تجربی ناپیوستگی نور مربوط می‌شد ــ چندان مهم نبود. ولی سوای نورشناخت، کارهای دیگر او را در عدم نمی‌توان از ریاضیات تفکیک کرد.

نیوتن در چارچوب سنت کهنی که سابقه‌اش به یونانیان می‌رسد، یکی از خلاقترین ریاضیدانان بود. وقتی که دوران نوجوانی را پشت سر نهاد و به پختگی و بلوغ رسید، ریاضیات نخستین موضوعی بود که توجهش را تماماً به خود مشغول داشت. در ایام دانشجویی برحسب تصادف با رساله‌های اساسی آنالیز نو پدید قرن هفدهم ــ آثار دکارت، ویت، والیس و دیگران ــ آشنا شد. بی‌سر و صدا برنامهٔ درسی مصوب کیمبریج را نادیده گرفت و تمام سال آخر دانشجویی را وقف کاوش در این دنیای فکری جدید کرد و بی آنکه از تعلیم و راهنمایی کسی بهره‌مند شود همهٔ آثار ریاضیات قرن هفدهم را پیش خود آموخت و از قلمرو ریاضیات زمانه فراتر رفت و به سرزمین ناشناخته‌ها قدم نهاد.

توجه آنالیزدانهای اولیه معطوف به دو مسألهٔ مهم و اساسی بود. ترسیم خط مماس برخمها (یا عملاً همان مسأله‌ای که امروز آن را مشتقگیری می‌نامیم) و پیدا کردن مساحت زیر خمها (یعنی انتگرالگیری). اولین توفیق نیوتن، حل مسألهٔ دوم بود. ریاضیدانان قبلی با استفاده از ابزار بینهایت کوچکها، الگوریتمهایی برای محاسبهٔ مساحت زیر سهمیهای ساده و خمهای درجهٔ سوم ساخته بودند و ازراه استقراء، این الگوریتمها را برای سریهای تام (توانی) تعمیم داده بودند. نیوتن خانوادهٔ خمهای $y=(1-x^2)^n$ را در نظر گرفت و روش والیس را در مورد آنها بسط داد. بسط این دوجمله‌ای به ازای مقادیر صحیح n، چندجمله‌ایی است، باجمله‌های x^2، x^4، ...؛ و مساحتهای زیرخمهای این خانواده، همگی دارای جمله‌های x، $-x^3/3$، $x^5/5$، ... است. نیوتن برای محاسبهٔ مساحت زیر این خمها ($n=0, 1, 3, \ldots$) جدولی از ضرایب معادلات تنظیم کرد که در آن به هرجملهٔ توانی، یك ردیف افقی و به هر مقدار n، ستونی عمودی مربوط می‌شد. این جدول از نوع جدول پاسکال بود. نیوتن از روی ترتیب اعداد آن، مقادیر ضرایب را برای ستون مربوط به کسر $n=1/2$ درونیابی کرد. این ستون به مساحت زیردایره مربوط بود که به صورت سری تامی باجمله‌های x، $-x^3/3$، $x^5/5$، ... نوشته می‌شد. بعداً این روش را در مورد سری نامتناهیی که مبین مساحت زیرخم $y=(1+x)^{-1}$ بود به کار بست و متوجه شد که این مساحت برابراست با لگاریتم $(1+x)$؛ و از شور و حالی که براثر این کشف جدید پیدا کرد لگاریتم چندین عدد را تا ۵۵ رقم اعشار حساب کرد. روش بسط دوجمله‌ای نیوتن، با مساوی هم قرار دادن مساحتهای زیرخمهای ناجور و سریهای متناهی، روش موجود کوادراتورها (تربیع) را تکمیل کرد و امکان محاسبهٔ مساحت زیرهمهٔ خمهای جبری شناخته شده را برای ریاضیدانان فراهم آورد.

نیوتن در عملیاتش همیشه به الگوها توجه می‌کرد. از خود می‌پرسید: آیا می‌توان از الگویی که درجریان کوادراتور پدیدار شده استفاده کرد و خم دیگری را تعریف کرد که قابل مربع کردن باشد؟ خم $y^2=px$ را در نظر گرفت؛ آن‌را مسیر نقطهٔ متحرکی شمرد و مساحت زیر آن را براین اساس که یك خط متحرك مساحتی



را می‌روبد، حساب کرد.

نکته‌ای که دراین مسأله مطرح است و نیوتن هم بدان پی برده بود، قضیهٔ اساسی آنالیز است. مفهوم حرکت اهمیتی اساسی در تحول روش نیوتن داشت و او با توجه به این مطلب روش خودرا روش فلوکسیونها نامید. این افکار پیش از پاییز ۱۶۶۶ در ذهن نیوتن قوام یافته بود و نیوتن آنهارا درچنان گسترهٔ وسیعی به کار بسته بود که حتی در تصور هیچ ریاضیدان زندهٔ دیگری نمی‌گنجید. اما کشفش را بروز نداد. بدین‌طریق اسباب بحث و گفتگویی فراهم آمد که بعدها برسر حق‌تقدم میان او و لایب‌نیتس درگرفت؛ زیرا لایب‌نیتس هم، تقریباً ده سال بعد از او، به همان نتایج ــ منتهی از راهی دیگر ــ رسید.

نیوتن همینکه مسائلی را که بدواً مورد توجهش واقع‌شده بود باموفقیت حل کرد، از ریاضیات به‌چیزهای دیگر روی آورد. بعدها چندبار دیگر به‌ریاضیات بازگشت ولی با گذشت زمان از کثرت این دفعات کاسته می‌شد؛ معمولاً انگیزه‌های خارجی اورا به‌این کار وامی‌داشت. با این حال نتایج این بازگشتهای نوبه‌ای به‌راستی حیرت‌آور بود؛ او این نتایج را هم مانند روش فلوکسیونها منتشر نکرد. شمارشی که ازخمهای درجهٔ سوم به‌عمل آورد، عملاً سدی را که تا آن زمان در برابر آنالیزجدید وجود داشت و آن راکم و بیش یکسره محدود به معادلات درجهٔ دوم می‌کرد، درهم شکست. درپاسخ به‌درخواست کمك محاسبی که به‌تنظیم جدول ریشه‌ها مشغول بود، نظریهٔ درونیابی‌را ابداع کرد. کارهای مهمی‌درهندسهٔ تصویری انجام داد. دستاوردهایش در ریاضیات محض بیش از آن بود که فقط شهرتی ماندنی برایش کسب کند.

نیوتن، کم و بیش درهمان اواسط دههٔ ۱۶۶۰ که به‌ریاضیات روی آورده بود، حکمت طبیعی جدید، از جمله علم مکانیك، راهم

کشف کرد و گوشهٔ چشمی به مسائل این علم انداخت. البته غور کامل او در فیزیك نظری (سوای اپتیك) مدتها بعد، در یك دورهٔ دوسال ونیمه، پس از دیداری که هالی در اوت ۱۶۸۴ ازاوکرد، اتفاق افتاد.

همینکه نیوتن به‌مسألهٔ حرکت‌مداری ــ که هالی برایش مطرح کرده بود ــ پرداخت، نخستین وظیفه‌اش آن شدکه علم مکانیك‌را بنا کند. شمار نظرپردازیهای دینامیکی در ۱۶۸۴ بسیار زیاد بود. اساس بیشتر آنها هم ضربه ونیرویی بودکه تصور می‌شد هرجسم

نیوتن بی‌سروصدا برنامهٔ درسی مصوب کیمبریج را نادیده‌گرفت و تمام سال آخر دانشجویی را وقف کاوش در این دنیای فکری جدیدکرد و بی‌آنکه از تعلیم و راهنمایی‌کسی بهره‌مند شود همهٔ آثار ریاضیات قرن هفدهم را پیش خود آموخت و از قلمرو ریاضیات زمانه فراتر رفت و به‌سرزمین ناشناخته‌ها قدم نهاد.

متحرکی متضمن آن‌است. ولی‌هنوز علم دینامیك به‌دردخوری‌وجود نداشت. نیوتن علم دینامیك را به‌صورت امروزی آن در ماههای آخرسال ۱۶۸۴ وماههای اول۱۶۸۵ عملاً ازهیچ به‌وجودآورد. این کار اگرچه حاصل ذوق و نبوغی غیرعادی بود ولی از جنبهٔ ریاضی نباید آن را چنین به‌حساب آورد. لازمهٔ این کار توانایی فهم اصول دینامیکیی‌بودکه درسینماتیك حرکت شتابدار یکنواخت گالیله مضمر بود. این کار اگرچه محتاج به‌مهارت ریاضی بسیار زیادی نبود ولی به‌ذهنی نیاز داشت‌که به‌راحتی بتواند در قالب کمیات بیندیشد و پیامدهای ضروری روابط متقابل کمی دقیق را دریابد. نیوتن ازچشمهٔ غنی‌این‌استعدادهایش‌دراین‌کار بهره‌گرفت.

لب‌کلام پرینکیپیا عبارت بود از کاربست علم دینامیك در مسائل حرکت مداری و اثبات اینکه قوانین‌کپلر پیامدهای ناگزیر همان اصول دینامیکیی‌هستندکه اساس وزمینهٔ سینماتیك گالیله‌اند. تصور اینکه کسی بتواند چنین کاری را انجام دهد ولی حساب دیفرانسیل‌وانتگرال را به‌خوبی‌نداند، غیرممکن‌است. پس‌پرینکیپیا نخستین‌کتاب فیزیك جدید است، نخستین کتابی است‌که به زبان جدید آنالیز نوشته شده است. برداشت متداول اینست که زبان پرینکیپیا زبان‌هندسهٔ‌کلاسیك است، ونیوتن هم خود باحرفهایی‌که درگرماگرم مجادله‌اش با لایب‌نیتس برسرحق تقدم زده، به اشاعهٔ این‌نظر کمك کرده‌است. کتاب راکه بازمی‌کنیم فرمولهای نسبتهای هندسی را می‌بینیم نه روابط تحلیلی آنالیز را. نیوتن مدعی‌شدکه نخست اثباتهای‌کتاب را به‌روش خود انجام داده و سپس آنها را در قالب هندسهٔ ترکیبی ریخته‌است، و از این‌راه‌کوشید ثابت‌کند که در استنتاج روش فلوکسیونها مقدم بوده است. کسانی که دستنوشته‌های نیوتن‌را مطالعه‌کرده‌اند این داستان را قبول‌ندارند. اماکسی هم‌که پرینکیپیا را به‌دقت مطالعه کند مرتکب این اشتباه نمی‌شودکه ریاضیات آن را هندسهٔ‌کلاسیك بشمارد. پرینکیپیا از ابزار نسبتها استفاده می‌کند، اما مفاهیمی‌که درپس این ابزارپنهان است از حساب‌دیفرانسیل و انتگرال نشأت گرفته‌است نه ازهندسهٔ کلاسیك.

قضیهٔ ششم ازکتاب اول،که قضیه‌های بعدی‌برآن مبتنی‌است، مربوط به‌اندازهٔ نیرو درهرنقطه از یك مسیر منحنی‌الخط است. در این‌قضیه از یك نقطهٔ P واقع برمسیر صحبت می‌شود واز انحرافی که مسیر در نقطهٔ مجاور Q، نسبت به‌خط مماس برخم در P، پیدا می‌کند. نیوتن نیرو را در P حساب می‌کند و برای این‌کارفرض می‌کندکه به"این کمیت فضایی (یعنی‌کمیت مورد نظر در سه بعد) باید آن مقداری را نسبت دادکه مآلاً، وقتی نقاط P و Q برهم منطبق می‌شوند، اختیارمی‌کند". از نظرمفهومی‌سروکارما به‌هیچ‌وجه با دنیای هندسهٔ یونانی نیست بلکه با دنیای نسبتهای تغییرات لحظه‌ای، یعنی دنیای‌آنالیزاست. چند سطر بعد نیوتن به‌قضیهٔ ششم (و چارچوب مفهومی‌آن) متوسل می‌شود تا این نکتهٔ مهم رانشان دهدکه بیضوی بودن یك مدار، قانون نیروی عکس مجذور را (نسبت به‌یکی ازکانونها) ایجاب می‌کند، و این یکی از دو دلیل عمده‌ای است‌که پایه‌های اصل گرانش عام را تشکیل‌می‌دهند.

دلیل‌دیگر، که برای اصل‌گرانش به‌همین‌اندازه اساسی‌است، قضیهٔ هفتاد و یکم است‌که به‌نیروی جاذبهٔ میان یك سطح‌کروی و یك نقطهٔ مادی خارجی‌مربوط می‌شود. اساس استدلال دراین‌قضیه جمع‌کردن جاذبه‌های اجزای دیفرانسیلی سطح است‌که به‌دنیای مفاهیم حساب انتگرال تعلق دارد. به‌همین سیاق، تعداد زیادی از اثباتهای این اثر صریحاً مبتنی برفرض "تربیع‌اشکال منحنی‌الخط" است. یکی از دستنوشته‌های ریاضی نیوتن حاکی از آن است‌که نیوتن اندك زمانی‌پیش‌ازتدوین پرینکیپیا، از دنیای فکری دکارت روی گردانده و به‌کاوش مفهوم نسبتهای اول و نهایی به‌مثابهٔ‌شالودهٔ روش فلوکسیونی خود پرداخته بود، شالوده‌ای که هم مستقل از صورتهای مختلف آنالیز دکارتی بود و هم مطمئنتر ازآنها. او این روش را،که نشان‌دهندهٔ وضع تفکر ریاضی او درآن ایام بود، در مورد مسأله‌ای درفیزیك نظری ــ که حاصل‌دیدار هالی بود ــ به‌کار بست. نیوتن نسبتهای اول و نهایی را شالودهٔ روش فلوکسیونی می‌دانست نه جانشینی برای آن.

سومین گسترهٔ فکری نیوتن به‌عنوان عالم فیزیك ریاضی این بود که ضرورت همبستگی متقابل نظریه و آزمایش را درك می‌کرد و می‌توانست به‌آسانی آن‌را به‌نمایش گذارد. با آنکه میل و گرایش به‌سمت معرفت کمی، موجب حرکت وحیات انقلاب علمی شده بود ولی قرن هفدهم هنوز به‌وسایل اندازه‌گیری دقیق بیشتر کمیتها مجهز نبود. در اواخر قرن هفدهم، ساعت هویگنس سنجش زمان را ازهر اندازه‌گیری دیگری دقیقتر کرد. آونگ جزء اصلی این ساعت بود وتجمع نمونهای خرد، از آن وسیله‌ای ممتاز برای اندازه‌گیری انواع کمیتهایی ساخت که مستقیماً مشهود نبودند. نیوتن بیش از

پرینکیپیا نخستین کتاب فیزیك جدید است، نخستین کتابی است که به‌زبان جدید آنالیز نوشته شده‌است.

هر دانشمند دیگر آن قرن، به امکانات بالقوهٔ آونگ پی برد. در پرینکیپیا از آن استفاده کرد تا تناسب دقیق جرم و وزن را بدثبوت رساند و نظریه‌ای راکه دربارهٔ مقاومت هوا پرداخته بود بیازماید و وجود اثیر کیهانی را نفی کند.

مدتها پیش‌وقتی که تازه فارغ‌التحصیل شده بود وهنوز کتاب هو(رولوگیوم[1] [ساعت] هویگنس انتشار نیافته بود، دیده بود که چگونه به‌کمك آونگ می‌توان شتاب ثقل را اندازه گرفت. وقتی دینامیك حرکت دورانی را حل کرد متوجه شد کـه می‌تواند نیروی گریز از مرکز وزنهٔ آونگ مخروطی را (یا تصوری راکه در آن‌وقت از این نیرو داشت) بـا وزن آن مقایسه کند و نیز پی برد کـه دورهٔ تناوب آونگ ساده و آونگ مخروطی یکی است هر گـاه طولشان یکی باشد. پس لازم شدکه دورهٔ تناوب آونگ ساده را اندازه بگیرد. نیوتن که به‌جز آفتاب و مهارت در اندازه‌گیری با ساعت آفتابی چیز دیگری در اختیار نداشت، توانست زمان ۲۱ نوسان (تقریبـاً ۵۰ ثانیه) دو آونگ به‌طولهای ۵ر۵۶ اینـچ و ۵ر۶۰ اینچ را اندازه بگیرد. اختلاف اندازه‌گیری او بـا آنچه ما از روی طول آونگ ثانیه‌شمار حساب می‌کنیم، در حدود یك درصد بود. از این مقدار شتاب ثقل را تقریباً یك درصد بیش از رقمی که اکنون مورد قبول ماست به‌دست آورد. در پرینکیپیا از رابطهٔ مدار ماه بـا شتاب ثقل برسطح زمین، یکی بودن جاذبه‌ای که سیارات را برمدارهایشان می‌گرداند و نیروی ثقلی که سبب سقوط اجسام به‌سطح زمین‌می‌شود را ثابت‌کرد. نیوتن درکتابش از اندازه‌گیریهای هویگنس استفاده‌کرد، زیرا مکانیسم ساعت چنان بودکه‌کار اندازه‌گیری را می‌شد در مدت چند روز انجام داد نه در ۵۰ ثانیه. انـدازه‌گیریهای نیوتن کـه کار جوانی بود تـازه فارغ‌التحصیل وتقریباً با دست خالی انجام شده بود، ازلحاظ دقت از همهٔ اندازه‌گیریهای دیگر، بجز هویگنس، به‌مراتب بهتر بود— و این را باید توفیقی قابل‌اعتنا در فیزیك کمی بشمار آورد.

اندازه‌گیری سرعت صوت به‌دست او نیز ازهمین‌قماش بود؛ گرچه نتایجش به‌این اندازه برجسته نبود. او در این کار هم از آونگ استفاده کرد، ویکی از گوشه‌های اعجاب‌آور پرینکیپیا محاسبهٔ سرعت صوت است براساس اصول اولیهٔ دینامیك. بعدها معلوم‌شد که نتیجهٔ این محاسبه باید درحدود ۲۰ درصد افزایش یابد، واین ضریبی‌است برابر با جذر نسبت گرمـای ویژهٔ هوا در فشار ثابت به‌گرمای ویژهٔ آن‌درحجم ثابت. وقتی‌که نیوتن‌خواست محاسبه‌اش را با اندازه‌گیریهای موجود مقایسه‌کند متوجه اختلافهای فاحشی در اندازه‌گیریها شد: روبروال مقدار ۶۰۰فوت برثانیه رابه‌دست آورده بود و مرسن ۱۴۷۴ فوت برثانیه را. نیوتن تصمیم گرفت که خود نتیجهٔ محاسبه‌اش رابه‌محك تجربه زند. راهرومسقف کالج ترینیتی‌که طولش ۲۰۸ فوت بود، پـژواك خوبی تولید می‌کرد. نیوتن طول آونگی را چنان تنظیم کردکه هماهنگ با بازگشتهای متوالی پژواك نوسان کند، نتیجه را به‌صورت یك عدد واحد بیان نکرد بلکه دامنه‌ای برای آن قایل شد، و این حکایت از شناختی می‌کندکه‌نسبت به‌مسائل‌علوم کمی‌داشت. نخست دریافت‌که آونگ باید از چهار اینچ (که با سرعت حداکثر ۱۲۷۲ فوت بر ثانیه متناظربود) بلندتر واز۹ اینچ (سرعت حداقل ۸۶۶) کوتاهتر باشد. نتیجهٔ کار او را راضی نکرد، آزمایش را تکرار کرد و حدود را به‌پنج و نیم اینچ (۱۰۸۵ فوت در ثانیه) و ۸ اینچ (۹۲۰) تقلیل داد. و اینها ارقامی‌است‌که در پرینکیپیا منـدرج است؛ اما نیوتن بازهم ازاین‌اندازه‌گیری راضی نبود. کوششهای بعدیش‌در ترینیتی به‌افزایش حدود اندازه‌گیری، ۹۸۴ و ۱۱۰۹، منجرشد. رقم‌اول، ۹۸۴، بیش‌ازسرعت حساب شده در چاپ اول کتاب، ۹۶۸، بود؛ پس آزمایش را با اختیار ارقام مختلفی برای چگالی هوا تکرار کرد تا شاید نتیجهٔ محاسبه را بهتر کند. قبل ازچاپ دوم پرینکیپیا، ویلیام درام از روی‌اختلاف زمان رؤیت آتش‌توپ‌وشنیدن صدای آن، مقدار ۱۱۴۲ فوت در ثانیه را برای سرعت صوت به‌دست آورده بود. نیوتن عـدد درام را پذیرفت و محاسباتش را کمی دستکاری کرد تا بـا نتایج درام بخوانند. اندازه‌گیری درام، که خیلی نزدیـك به‌مقدار مورد قبول ماست از حدود ارقام نیوتن خارج بود ولی از آخرین حـد بالایی او چندان فاصله نداشت. اندازه‌گیریهای نیوتن نسبت به نتایـج موجود پیشرفت عمـده‌ای به‌حساب می‌آمد و شاهد معتبری است برتوفیق او درفیزیك کمی.

چنانکه در ابتدا متذکرشدم نیوتن زندگیش‌را به‌ریاضیات و علوم ریاضی منحصر نکرد؛ ولی مـا حرمت او را به‌خاطر کارهای بزرگش دراین رشته‌هاکه نقش‌آینده را رقم زدند، پاس‌می‌داریم.

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

● این مقاله به مناسبت سیصدمین سال انتشار پرنکیپیا در سال ۱۹۸۷ منتشر شده و مشخصات اصل آن چنین است:

Richard S. Westfall, "The achievement of Issac Newton," *The Mathematical Intelligencer*, (4)9 (1987) 45-49.

★ ریچارد وستفال، دانشگاه ایندیانای آمریکا

1. *Horologium*